

# Оглавление

<b>1</b>	<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	
	Цели и задачи настоящего руководства _____	9
	О руководстве _____	9
<b>2</b>	<b>ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА</b>	
	Общие сведения _____	11
<b>3</b>	<b>ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУХА</b>	
	Введение _____	13
	Температура сухого термометра $t_{сух}$ _____	14
	Температура влажного термометра $t_{вл}$ _____	14
	Содержание влаги, $x$ _____	14
	Энталпия, $h$ _____	14
	Насыщение _____	14
	Относительная влажность, $\varphi$ _____	14
	Диаграмма Молье _____	15
	Нагрев _____	16
	Охлаждение _____	17
	Увлажнение водой и паром _____	18
	Смешение двух потоков воздуха _____	19
	Смешение двух потоков воздуха с образованием тумана _____	20
	Различные климатические условия на диаграмме Молье _____	21
	Резюме _____	22
<b>4</b>	<b>ГИДРОГАЗОДИНАМИКА</b>	
	Введение _____	25
	Ламинарное и турбулентное течение _____	25
	Закон подобия Рейнольдса _____	25
	Определение давления _____	26
	Течение в трубах и воздуховодах _____	26
	Перепад давления _____	28
	Резюме _____	29
<b>5</b>	<b>ТЕПЛООБМЕН</b>	
	Введение _____	31
	Теплопроводность _____	31
	Конвекция _____	32
	Тепловое излучение _____	32
	Классификация _____	32
	Резюме _____	33
<b>6</b>	<b>ОХЛАЖДЕНИЕ</b>	
	Введение _____	35
	Охлаждение _____	36
	Мощность охлаждения _____	37
	Энергопотребление _____	37
	КПД охлаждения _____	37
	КПД обогрева _____	37
	Резюме _____	38

<b>7</b>	<b>УТИЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГИИ ОБОГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ</b>	
	Введение _____	41
	Временной график _____	42
	Определения _____	43
	Эффективность _____	43
	Резюме _____	45
<b>8</b>	<b>РАСЧЕТЫ ЗАТРАТ НА СРОК СЛУЖБЫ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ</b>	
	Введение _____	47
	Затраты на электроэнергию на срок службы _____	47
	Затраты на электроэнергию и выбросы углекислого газа _____	47
	Снижение затрат на электроэнергию _____	48
	Принципы расчета энергопотребления и затрат на электроэнергию на срок службы _____	48
	Расчет температуры _____	48
	Компенсация температуры наружного воздуха _____	49
	Продолжительность работы _____	49
	Вентиляционная система с переменным расходом воздуха _____	50
	Временной график _____	50
	Резюме _____	51
<b>9</b>	<b>ЗВУК</b>	
	Введение _____	53
	Звук _____	53
	Частота _____	54
	Коррекция по шкале А _____	55
	Источники шума в вентиляционных установках _____	55
	Связь уровня звуковой мощности и уровня звукового давления _____	56
	Вне помещения _____	56
	В помещении _____	56
	Уровень звукового давления в рабочих и жилых помещениях _____	57
	Как выбрать тихую вентиляционную установку _____	57
	Резюме _____	58
<b>10</b>	<b>ВОЗДУШНЫЕ КЛАПАНЫ</b>	
	Введение _____	61
	Регулирование расхода воздуха _____	61
	Смешение потоков воздуха _____	61
	Свойства смеси _____	62
	Регулирование расхода воздуха в режиме обхода _____	63
	Запорные воздушные клапаны _____	63
	Створки воздушного клапана _____	64
	Утечка воздуха из закрытого воздушного клапана _____	65
	Утечка воздуха через корпус воздушного клапана _____	65
	Необходимый крутящий момент _____	65
	Давление _____	65
	Резюме _____	66
<b>11</b>	<b>ФИЛЬТРЫ</b>	
	Введение _____	69
	Загрязнения в окружающем воздухе _____	69
	Принцип работы фильтра твердых частиц _____	70
	Испытания и классификация фильтров твердых частиц _____	72

Перепад давления на фильтре твердых частиц	73
Угольные (сорбционные) фильтры	74
Фильтры в вентиляционных установках	74
Предварительные фильтры	74
Фильтры тонкой очистки	75
Высокоэффективные фильтры HEPA	75
Угольные фильтры	76
Монтаж	76
Резюме	77
<b>12 ГЛУШИТЕЛИ</b>	
Введение	79
Снижение уровня шума	79
Диссилиативные глушители	79
Реактивные глушители	79
Ширина	80
Длина	80
Перепад давления на глушителе	80
Собственный шум глушителя	81
Место установки глушителя	81
Методы измерений	81
Резюме	82
<b>13 ВЕНТИЛЯТОРЫ</b>	
Введение	85
Типы вентиляторов	85
Центробежные вентиляторы	86
Прямоточные вентиляторы	87
Осевые вентиляторы	87
Графики вентиляторов	88
Формулы для расчета вентиляторов	89
Кривые систем	90
Совместимость вентиляционной системы и вентилятора	90
Влияние изменений характеристик вентиляционной системы	90
Параллельная работа вентиляторов	91
Эффект вентиляционной системы	92
Отводы воздуховодов	92
Жалюзийный воздушный клапан	92
Эффективность вентилятора	92
Нагрев воздуха на вентиляторе	92
Балансировка лопастного колеса вентилятора	93
Собственная частота колебаний	93
Собственная частота колебаний виброзолирующих опор	93
Максимальная допустимая скорость вибрации	93
Шум	93
Виброзоляция	94
Система привода вентилятора	95
Прямой привод	95
Система ременного привода	96
Ременный привод	96
Привод с клиновидным ремнем	96
Привод с плоским ремнем	96
Привод с микроклиновидным [поликлиновидным] ремнем	96

Привод с плоским ремнем	96
Привод с микроклиновидным (поликлиновидным) ремнем	96
Электродвигатели вентиляторов	97
Трехфазные асинхронные электродвигатели	97
Крутящий момент	97
Эффективность электродвигателя	98
Прямой пуск односкоростного электродвигателя	98
Пуск односкоростного электродвигателя переключением со звезды на треугольник	98
Пуск двухскоростного электродвигателя и управление его работой	98
Задита электродвигателя от перегрузки	98
Оборудование для тяжелого пуска	98
Задита от выпадения из синхронизма	98
Электродвигатели с электронной коммутацией	99
Высокая эффективность	99
Регулирование скорости	99
Особенности электродвигателей с электронной коммутацией	99
Классификация электродвигателей по эффективности	100
Время пуска электродвигателей без частотного преобразователя	100
Сравнение времени пуска электродвигателя с максимальным допустимым значением	101
Сравнение времени пуска электродвигателя со временем срабатывания защиты от перегрузки	101
Схемы электрического подключения электродвигателей	101
Удельная мощность вентилятора SFP	102
Удельная мощность вентилятора SFPv	102
Энергоэффективные вентиляторы	103
Управление вентилятором	103
Резюме	104

#### **ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛИ И ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛИ**

Введение	107
Конструкция	108
Различные схемы теплообменников	108
Контуры теплообменника	109
Теплообменники для испаряющегося хладагента	110
Схема разделение контуров по выходным ступеням	110
Нормальные скорости движения жидкости в теплообменниках	110
Модули охлаждения	111
Испаритель	111
Компрессор	111
Конденсатор	111
Расширительный клапан	111
Реле высокого давления	112
Реле высокого давления (функционирующее)	112
Реле низкого давления	112
Жидкостной фильтр	112
Смотровое окно	112
Приемники хладагента	112
Конденсатор с водяным охлаждением	112
Выбор модуля охлаждения	112
Непрямое испарительное охлаждение	113
Увлажнение удаляемого воздуха или наружного воздуха	114
Расчет производительности по охлаждению	114

Охлаждение в ночное время	114
Энергозатраты и стоимость эксплуатации	114
Гигиена	114
Электрические воздухонагреватели	115
Резюме	115
<b>15 ТЕПЛООБМЕННИКИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ ОБОГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ</b>	
Введение	117
Роторные теплообменники	118
Продувочный сектор	119
Замораживание	120
Оттаивание	120
Антикоррозийная защита	120
Области применения	120
Гигроскопичные и негигроскопичные роторы	121
Системы с двумя роторами	123
Пластинчатые теплообменники	124
Конструкция	124
Замораживание и оттаивание	124
Утечки	124
Антикоррозийная защита	124
Системы с промежуточным теплоносителем	125
Конструкция	125
Характеристики	125
Эффективность	125
Регулирование и предотвращение замерзания	125
Незамерзающий теплоноситель	125
Система ECONET®	126
Функционирование системы	126
Эффективность теплообмена и перепад давления	127
Сравнение решений	127
Резюме	128
<b>16 УВЛАЖНИТЕЛИ</b>	
Введение	131
Принципы работы увлажнителей	131
Контактные увлажнители	132
Функционирование	132
Гигиена	132
Управление	132
Паровые увлажнители	133
Форсуночные увлажнители	133
Требования к качеству воды	133
Резюме	134
<b>17 СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ</b>	
Введение	137
Динамические характеристики	138
Различные типы контроллеров и принципы их работы	139
Включение и выключение	139
Многоступенчатое управление	139
Пропорциональное управление	140
Интегральное управление	140

Пропорционально-интегральное управление (ПИ-управление)	141
Пропорционально-интегрально-дифференциальное управление (ПИД-управление)	141
Каскадное управление	141
Устройства управления в вентиляционных установках	142
Регулирование исходя из температуры приточного воздуха	142
Регулирование исходя из температуры удаляемого воздуха	142
Регулирование исходя из температуры воздуха в помещении	143
Регулирование расхода воздуха и давления (управление вентилятором)	143
Ступенчатое управление	145
Примеры управления различными процессами в сфере отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха	146
Роторный теплообменник	146
Пластинчатый теплообменник	146
Теплообменник с промежуточным теплоносителем	147
Теплообменники обогрева и охлаждения	147
Регулирование расхода воды	147
Байпасное регулирование	148
Электрический воздухонагреватель	149
Дополнительные функции	149
Компенсация температуры наружного воздуха	149
Обогрев в ночное время	150
Охлаждение в ночное время (естественное охлаждение)	150
Регулирование концентрации углекислого газа	151
Общее управление вентиляционной установкой	151
Зашита от замораживания	151
Аварийные сигналы	151
Коммуникация	152
Резюме	153

## 18

### МЕТОДЫ И СТАНДАРТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Введение	155
Погрешность измерения	155
Температура	156
Термопары	156
Термометры сопротивления	156
Давление и расход	156
Мембранные датчики давления	156
Жидкостные манометры (U-образные трубы)	157
Расчет расхода воздуха	157
Атмосферная влажность	158
Стандарты	158
Резюме	159

## 19

### ФОРМУЛЫ

Сборник формул	161
Формулы	164
Параметры состояния воздуха	164
Газодинамика	164
Теплообмен	165
Охлаждение	165
Утилизация энергии обогрева и охлаждения	166
Шум	167
Вентиляторы	168



# 1

## Введение

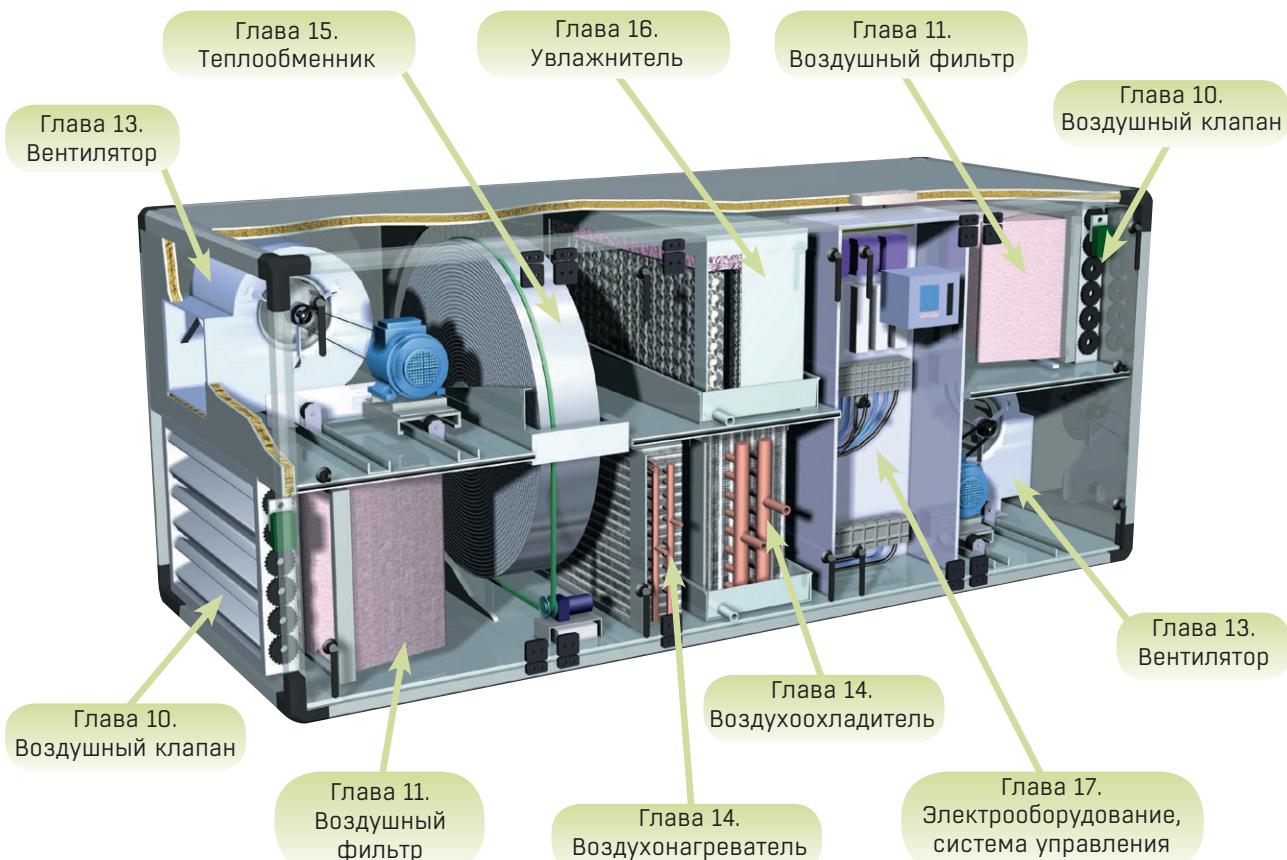


# Цели и задачи настоящего руководства

Настоящее руководство является дополнением к каталогам продукции и решений в сфере вентиляции, в которых описываются различные вентиляционные установки компании Fläkt Woods. В руководстве собраны сведения, необходимые для проектирования, выбора и монтажа вентиляционных установок и их компонентов. Данное руководство позволит вам углубить свои знания в области отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, а также непосредственно в области вентиляционных установок.

## О руководстве

Настоящее руководство состоит из двух основных частей. Первые главы руководства содержат теоретическое описание процессов, происходящих в различных компонентах вентиляционной установки, а также на их входах и выходах. В последующих главах описаны отдельные компоненты вентиляционных установок. Вначале описываются воздушные клапаны, затем фильтры, и далее последовательно все компоненты вентиляционной установки. В конце руководства приводятся необходимые формулы. В начале каждой главы приводится ее краткое содержание, а в конце — резюме изложенного.



## 2 Общие сведения о системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха



Вентиляционные установки предназначены для очистки, нагрева, охлаждения и подачи воздуха с целью создания комфортного микроклимата в помещении. Помимо этого, вентиляционные установки могут использоваться в качестве источника воздуха требуемого состава в различных промышленных процессах.

Обычно мы проветриваем помещения, чтобы удалить из них загрязненный воздух. Помимо этого, например, в офисных помещениях воздух может иметь чрезмерно высокую температуру. Избыточное тепло также может рассматриваться как загрязнение, от которого необходимо избавиться. Удаляемый воздух заменяется приточным. При этом приточный воздух должен иметь надлежащую температуру, а его подача не должна приводить к возникновению сквозняков или мешающего шума.

В конструкции вентиляционной установки предусмотрено наличие фильтра, позволяющего очистить воздух перед его подачей в помещение. Воздушные фильтры различных типов имеют разные назначения. Они могут быть предназначены

для удаления твердых частиц, паров или газов.

Температура и влажность наружного воздуха постоянно меняются. В один день на улице может быть жарко и влажно, а в другой — морозно и сухо. В помещении температура может колебаться приблизительно в пределах от 19 до 26°C. Вентиляционная установка нагревает или охлаждает наружный воздух до требуемой температуры. Для этого в ее конструкции предусмотрены теплообменники нагрева и охлаждения.

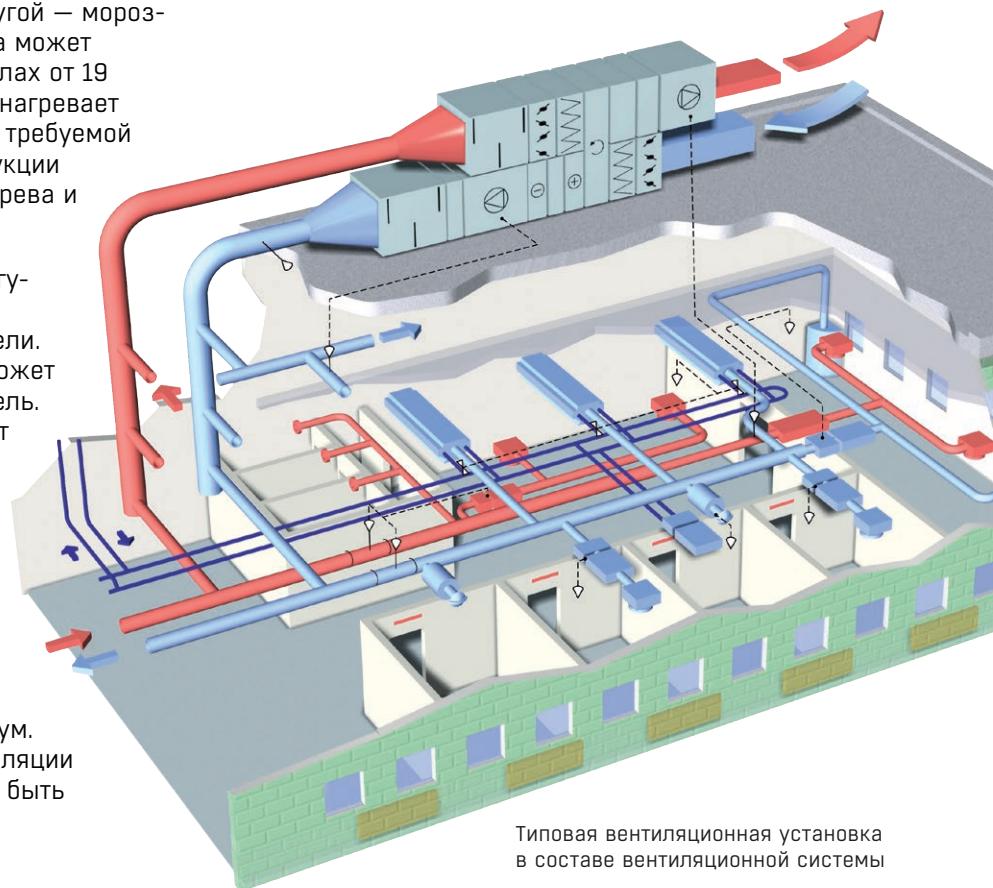
Влажность воздуха также может регулироваться. При чрезмерно низкой влажности используются увлажнители. Если влажность излишне высока, может использоваться, например, охладитель. При охлаждении воздуха происходит конденсация содержащейся в нем влаги, в результате чего его влажность снижается.

Приточный вентилятор предназначен для прокачки воздуха через вентиляционную установку и его подачи в помещения по системе воздуховодов. Побочным продуктом работы вентилятора является шум. Поэтому в системе отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха могут быть

предусмотрены глушители, позволяющие снизить уровень шума в помещениях. При перекачивании воздуха с помощью вентиляторов его температура повышается, т.к. любое движение приводит к нагреву. Помещение, в которое подается воздух, как правило, необходимо оборудовать системой вытяжки. Объем удаляемого ей воздуха должен быть равен объему приточного воздуха. Удаление воздуха из помещения осуществляется с помощью вентиляторов.

В Северной Европе удаляемый воздух обычно теплее наружного, особенно зимой. Эта теплота нередко утилизируется с помощью теплообменников, что позволяет снизить стоимость эксплуатации здания. Напротив, в регионах, в которых удаляемый воздух обычно холоднее наружного, возможна утилизация энергии охлаждения.

Все описанные выше процессы осуществляются с помощью различных компонентов вентиляционной установки, заключенных в изолированный герметичный и прочный корпус.



Типовая вентиляционная установка в составе вентиляционной системы

# 3

## ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУХА



## Краткое содержание главы



- Параметры состояния воздуха.
  - Температура.
  - Содержание воды.
  - Энталпия.
  - Относительная влажность.
- Диаграмма Молье

Наружный воздух представляет собой смесь множества газов (главным образом азота и кислорода), пара (главным образом водяного) и частиц пыли.

Для понимания процессов, происходящих в вентиляционной установке, достаточно рассматривать воздух как смесь сухого газа и водяного пара. Данную смесь мы будем называть влажным воздухом. Количество водяного пара, содержащегося в воздухе, не может превышать определенного значения. Достижение этого значения называется насыщением. Данное значение зависит от температуры и давления воздуха.

В сфере отопления, вентиляции и кондициони-

рования воздуха обычно рассматривают воздух как смесь газов, находящуюся под нормальным атмосферным давлением. Если воздух в условиях постоянного давления насыщен влагой, дальнейшее увеличение концентрации водяных паров в нем возможно только при увеличении температуры.

Если насыщенный влагой воздух охлаждается, в нем образуется конденсат. Так зимой запотевает окно ванной комнаты. Для описания различных состояний влажного воздуха используется ряд физических величин. Чтобы описать состояние влажного воздуха, необходимо знать его давление и два других независимых параметра.

Проектировщики вентиляционных систем должны быть знакомы с различными параметрами, описывающими состояние воздуха. Это необходимо для создания в помещении требуемого микроклимата.

## Термины и определения

---

Ниже перечислены различные физические величины, используемые для описания состояния воздуха.

### Температура сухого термометра, $t_{\text{сух}}$

Температура, которую мы изменяем с помощью «обычного» термометра, например, комнатного, называется температурой сухого термометра. При выборе воздухонагревателя, воздухоохладителя и увлажнителя для вентиляционной установки температура сухого термометра используется в качестве одной из двух необходимых величин.

### Температура влажного термометра $t_{\text{вл}}$

Если колбу термометра обернуть увлажненной тканью, она будет охлаждаться за счет испарения воды, поэтому термометр покажет меньшую температуру. Чем более сухим является окружающий воздух, тем выше скорость испарения и тем более низкими будут показания термометра. Таким образом, исходя из температуры влажного термометра можно определить влажность воздуха.

### Содержание влаги, $x$

Содержание влаги — это количество воды, имеющейся в воздухе. Данная величина обычно выражается в килограммах воды на килограмм воздуха. Воздух в помещении обычно содержит 5-10 грамм воды на килограмм воздуха.

### Энтальпия, $h$

Энтальпия — это количество энергии в воздухе за вычетом количества энергии в том же воздухе при стандартных условиях. Энтальпия выражается в кДж/кг.

В системе СИ стандартными условиями считаются 0°C и нулевое содержание влаги. При изменении различных условий энтальпия воздуха меняется. Иными словами, при этом воздух получает дополнительную энергию или отдает ее.

### Степень насыщения

Степень насыщения воздуха — это отношение текущего содержания воды в воздухе к содержанию воды в воздухе при насыщении. Данная величина выражается в процентах.

### Относительная влажность, $\phi$

Относительная влажность воздуха — это отношение текущего парциального давления водяного пара в воздухе к парциальному давлению водяного пара в воздухе при насыщении. Данная величина выражается в процентах. Иными словами, относительная влажность — это отношение текущего количества водяного пара в воздухе к максимально возможному при данной температуре количеству.

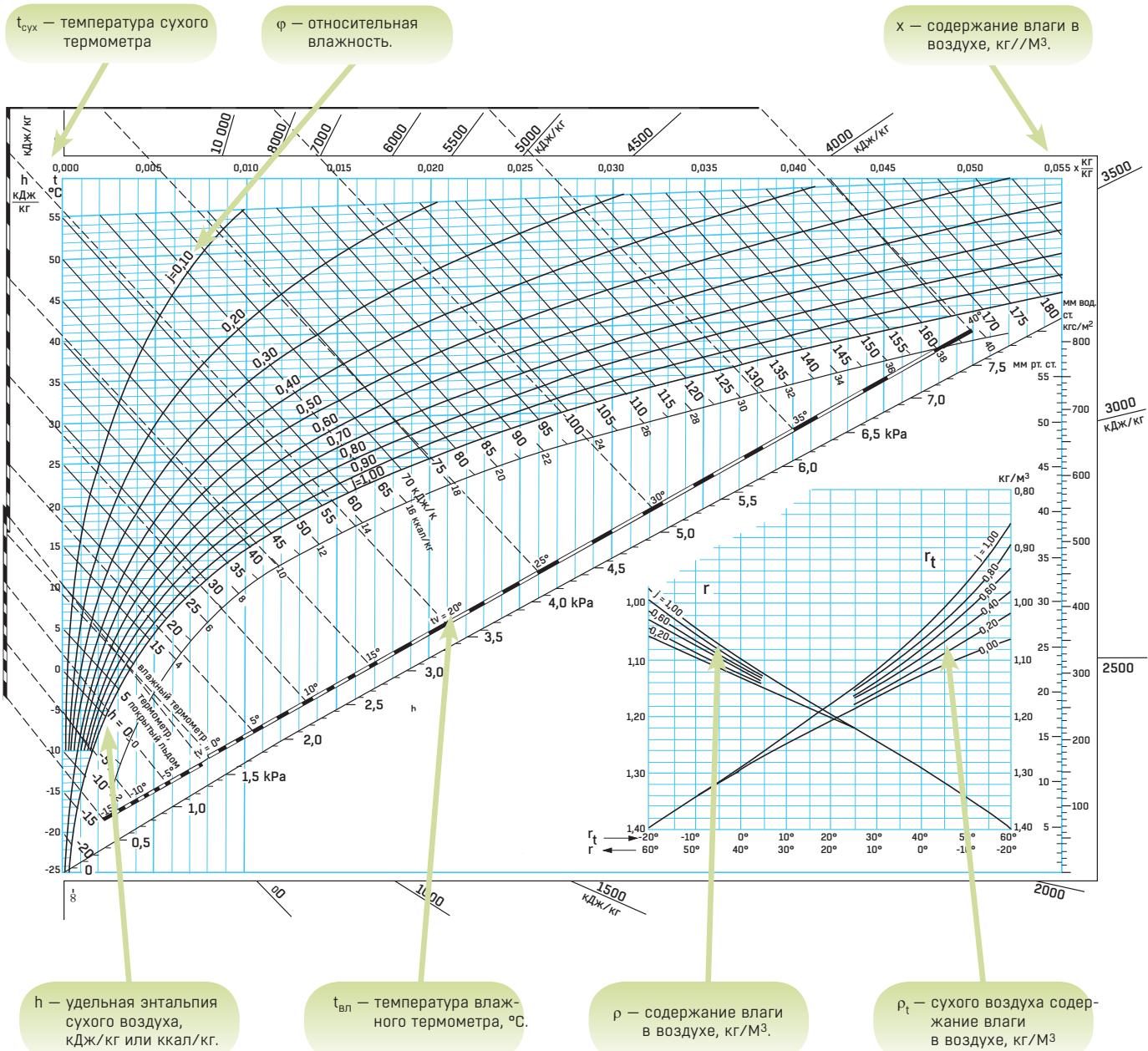
## Диаграмма Молье

Диаграммы Молье используются при расчетах процессов, связанных с отоплением и кондиционированием воздуха. Среди прочего, они позволяют рассчитать изменения температуры и влажности, а также количества энергии, необходимых для нагрева и охлаждения воздуха. С помощью программы выбора продукции ACON компании Fläkt Wood диаграмма Молье для требуемого процесса, происходящего в вентиляционной установке, может быть построена автоматически.

### Обозначения

- $h$  – энталпия сухого воздуха, кДж/кг или ккал/кг.
- $x$  – содержание влаги в сухом воздухе, кг/кг.
- $\varphi$  – относительная влажность.
- $t_{\text{сух}}$  – температура сухого термометра, °С.
- $t_{\text{вл}}$  – температура влажного термометра, °С.
- $\rho_t$  – плотность как отношение массы сухого воздуха к объему влажного воздуха, кг/м<sup>3</sup>.
- $\rho$  – плотность как отношение массы влажного воздуха к объему влажного воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Диаграмма рассчитана для барометрического давления 760 мм рт. ст. (101,3 кПа).



## Нагрев

В процессе нагрева содержание водяных паров в воздухе остается неизменным, поэтому данный процесс отображается на диаграмме в виде прямой вертикальной линии. При этом энталпия и температура сухого термометра возрастают.

Для расчета требуемой мощности обогрева  $P$  может использоваться следующая формула:

$$P = \Delta h \cdot q_{\text{вл}} \cdot \rho_t = (h_B - h_A) \cdot q_{\text{вл}} \cdot \rho_t$$

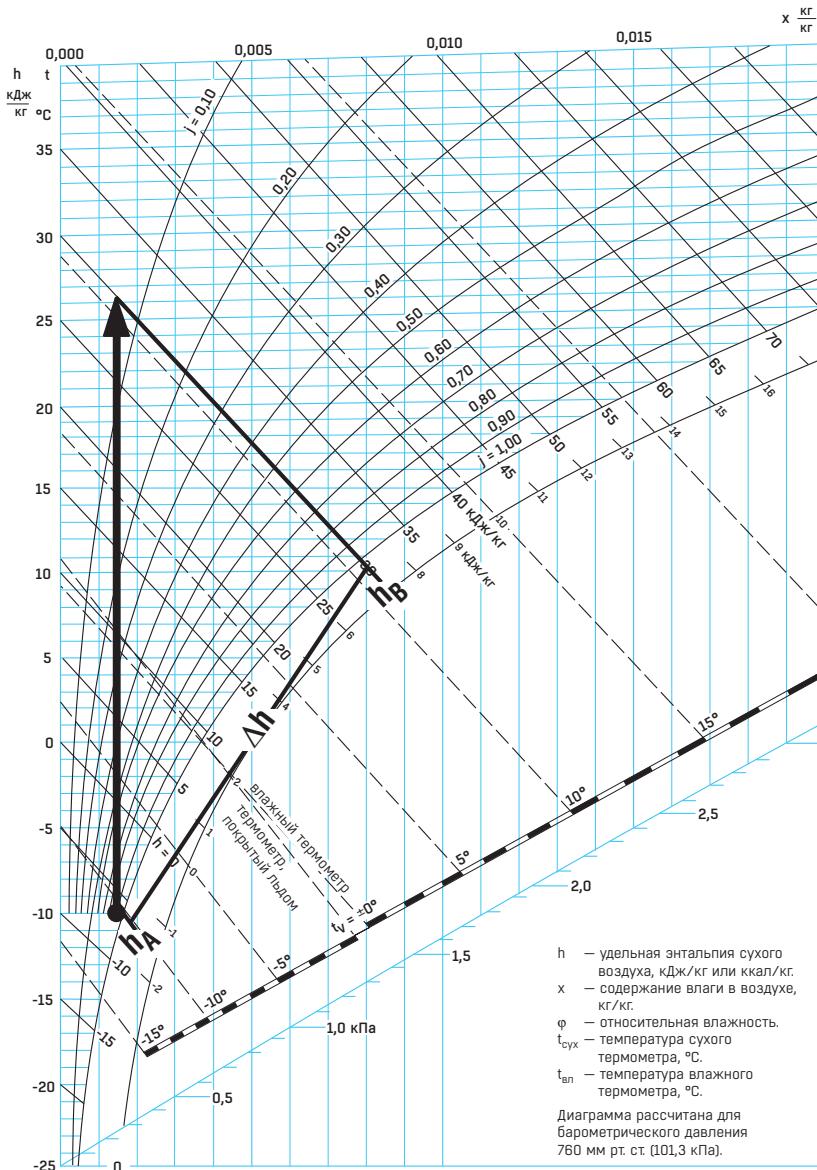
где

$P$  — мощность обогрева, кВт;

$\Delta h$  — изменение энталпии сухого воздуха, кДж/кг;

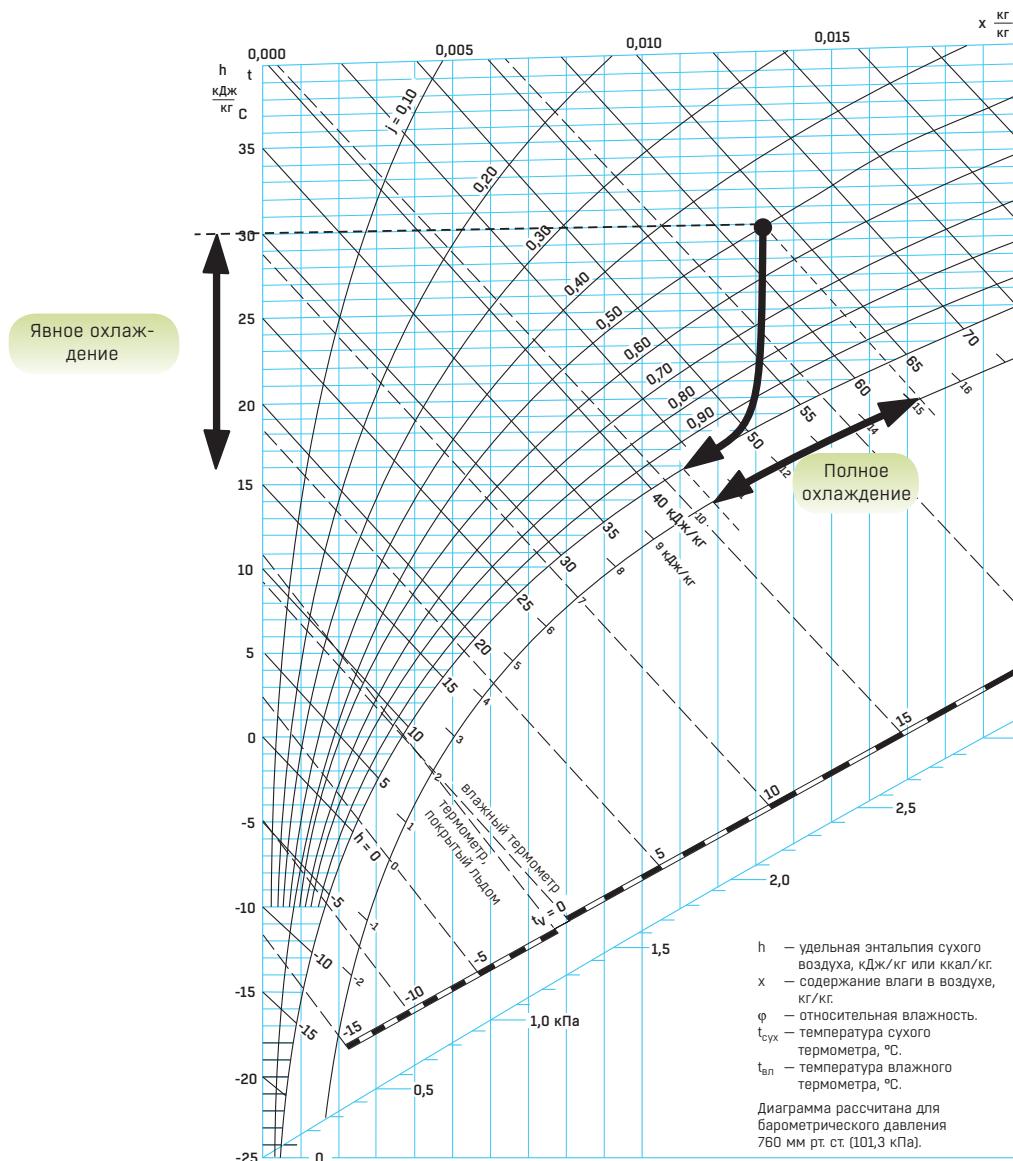
$q_{\text{вл}}$  — расход влажного воздуха, м<sup>3</sup>/с;

$\rho_t$  — плотность как отношение массы сухого воздуха к объему влажного воздуха, кг/м<sup>3</sup>.



## Охлаждение

В процессе охлаждения часто достигается точка росы и влага конденсируется. Полная ходильная нагрузка может быть легко рассчитана из изменения энталпии, а явное охлаждение (охлаждение без учета конденсации) — по изменению температуры сухого термометра. Форма кривой данного процесса на диаграмме может меняться в зависимости от конструкции охлаждающего теплообменника.



# Увлажнение водой и паром

Увлажнение — это процесс увеличения содержания воды в воздухе. Увлажнение может осуществляться, например, путем подачи пара или путем испарения воды.

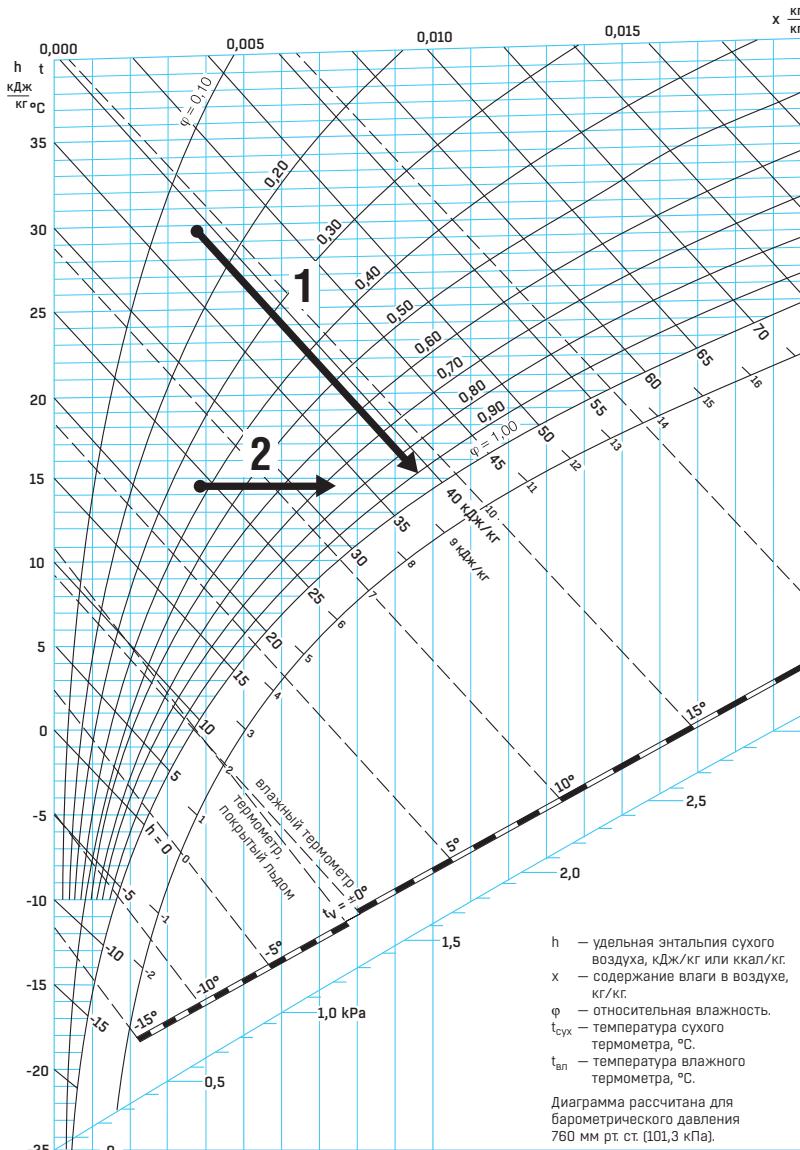
## 1. Увлажнение путем испарения воды

Тепло, необходимое для испарения воды, забирается из воздуха, в результате чего воздух охлаждается. Если вода циркулирует в увлажнителе, вскоре достигается температура адиабатического насыщения. Это означает, что процесс описывается линией для влажного термометра.

Если вода подается напрямую в увлажнитель, ход процесса будет определяться ее температурой. Очень холодная вода охлаждает воздух сильнее, чем более теплая.

## 2. Увлажнение паром

При использовании пара линия процесса на диаграмме будет практически горизонтальной. В этом случае температура воздуха по сухому термометру меняется незначительно. Расход пара рассчитывается из разницы в содержании воды, умноженной на объемный расход воздуха.



## Смешение двух потоков воздуха

При смешении двух объемов сухого воздуха  $m_1$  и  $m_2$ , состояния которых соответствуют точкам A1 и A2, точка смешения B находится на прямой линии, соединяющей эти две точки.

Ее положение может быть определено графически путем разделения линии A1-A2 на два отрезка, длина которых находятся из соотношения:

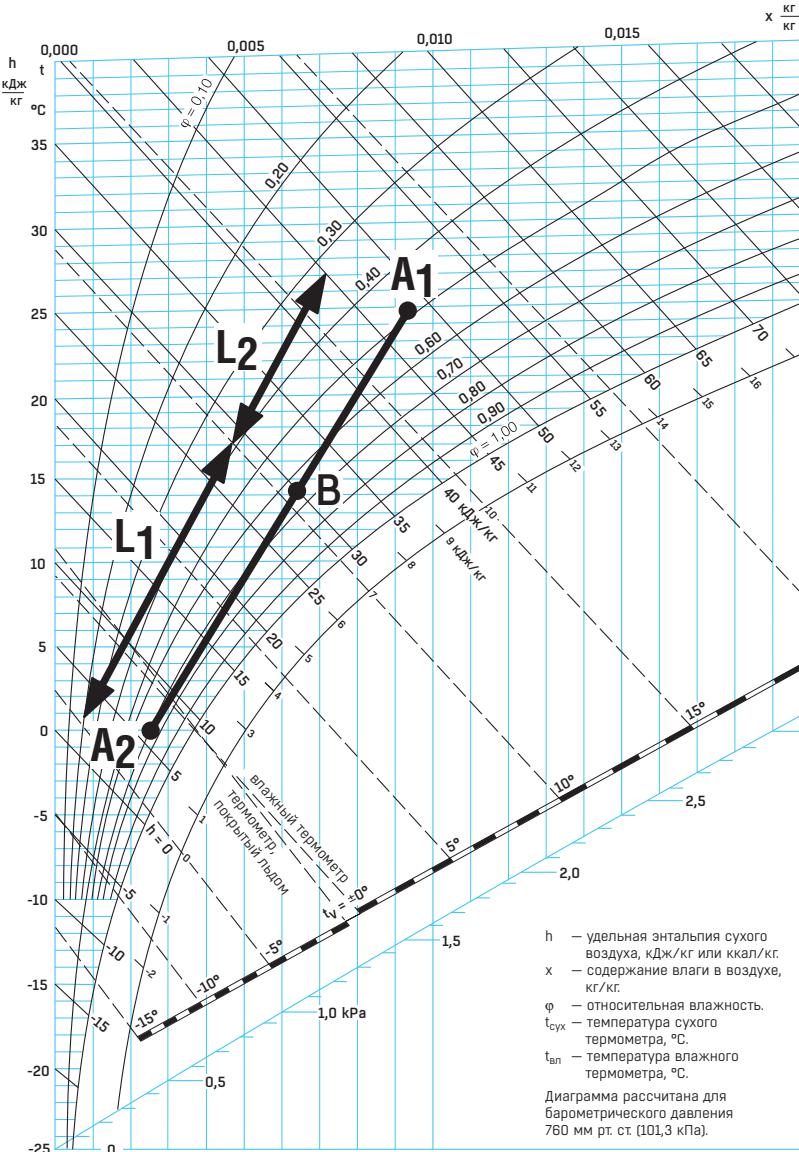
$$L_1/L_2 = m_2/m_1.$$

Тот же результат может быть получен из расчета с использованием значений абсолютной влажности:

$$B = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{m_1 + m_2}$$

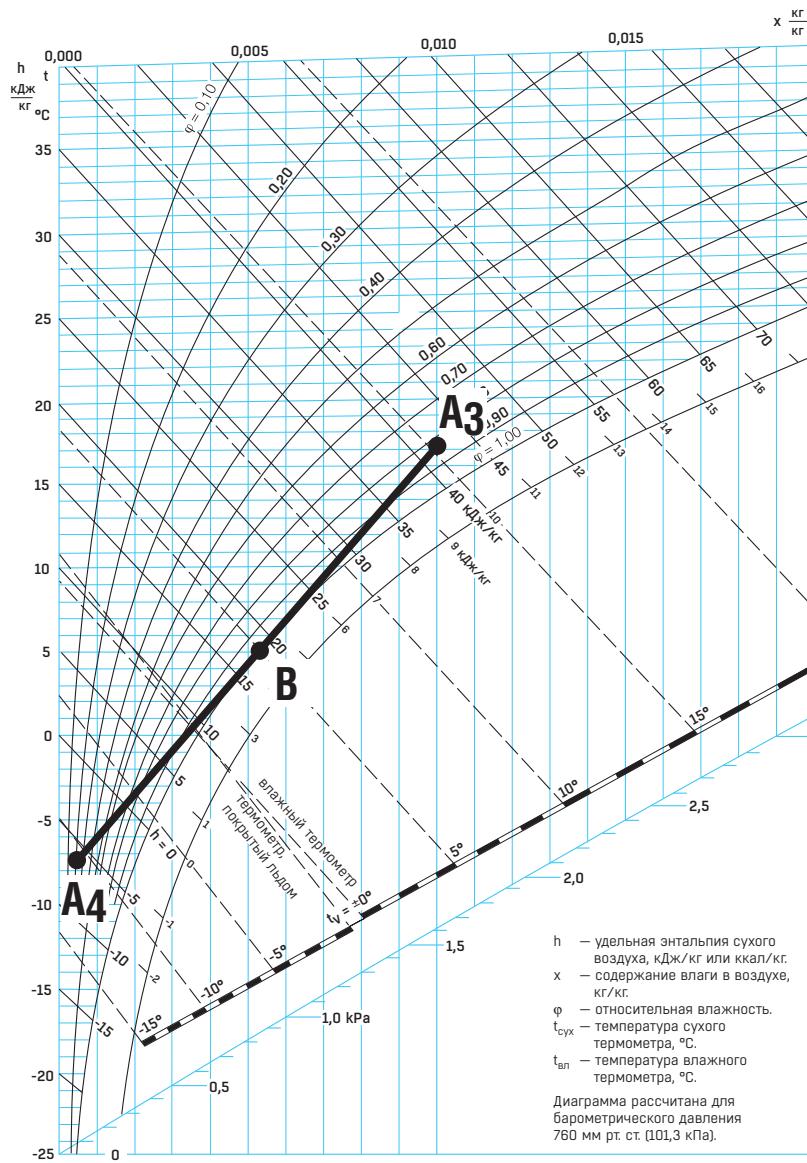
где

B — точка смешения, кг/кг;  
 $m_1$  и  $m_2$  — объем воздуха в точках 1 и 2



Смешение двух потоков воздуха с образованием тумана

При смешении двух потоков воздуха, не насыщенных влагой, иногда возможно образование тумана. Это может происходить при смешении двух сходных количеств воздуха, состояния которых соответствуют точкам А3 и А4. В этом случае точка смешения В1 находится ниже линии насыщения, т.е. в зоне образования тумана.



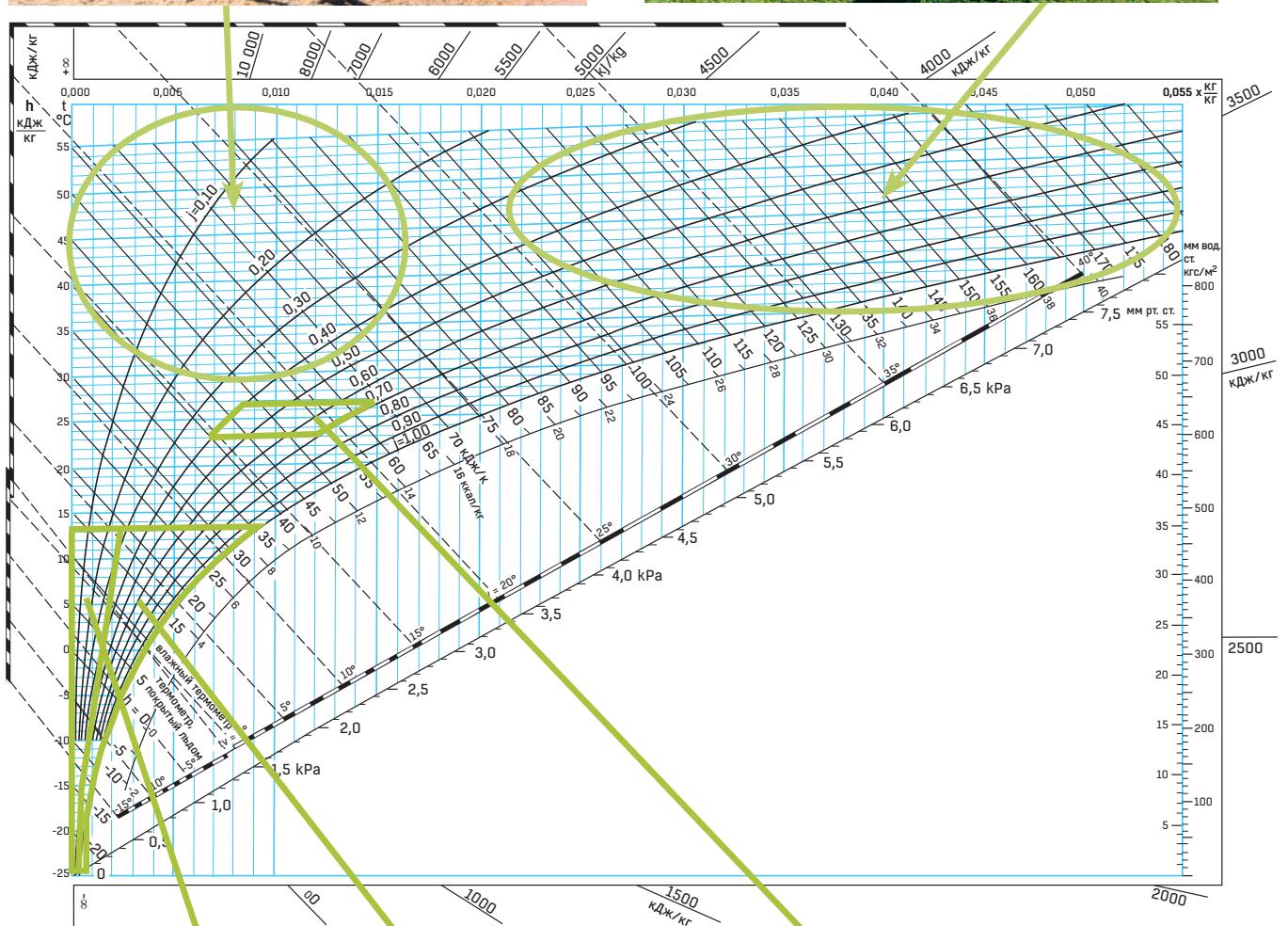
## Различные климатические условия на диаграмме Молье

Различные климатические условия соответствуют областям, очерченным на диаграмме зелеными линиями.

Жарко, воздух сухой



Жарко, воздух влажный



Холодно, воздух сухой



Холодно, воздух влажный



Идеальный микроклимат в офисе:  
23-26°C, 40-70% вл.





## Резюме

Наружный воздух представляет собой смесь множества газов, а также водяного пара и частиц пыли. Для понимания процессов, происходящих в вентиляционных установках, воздух следует рассматривать как смесь сухого газа и водяного пара. Данная смесь называется влажным воздухом.

Для описания различных состояний влажного воздуха используются перечисленные ниже физические величины.

- Температура сухого термометра,  $t_{сух}$ .
- Температура, измеряемая обычным термометром. Выражается в  $^{\circ}\text{C}$ .
- Температура влажного термометра,  $t_{вл}$ . Используется для определения влажности воздуха. Выражается в  $^{\circ}\text{C}$ .
- Содержание влаги,  $x$ . Отношение массы воды, имеющейся в воздухе, к массе этого воздуха.
- Энталпия,  $h$ . Количество энергии в воздухе за вычетом количества энергии в том же воздухе при  $0^{\circ}\text{C}$ . Выражается в кДж/кг.
- Степень насыщения. Отношение текущего содержания воды в воздухе к содержанию воды в воздухе при насыщении.

Выражается в процентах.

- Относительная влажность,  $\phi$ . Отношение текущего давления водяного пара в воздухе к давлению водяного пара в воздухе при насыщении при той же температуре. Выражается в процентах.

Различные параметры, используемые для описания состояния воздуха, отображаются на диаграмме Молье.

Диаграммы Молье используются для описания различных процессов, происходящих в вентиляционной установке, таких как нагрев, охлаждение, осушение и смешение воздуха. Помимо этого, диаграммы Молье позволяют рассчитывать температуру, энергопотребление установки и другие параметры.



# 4

## Гидrogазодинамика



## Краткое содержание главы

- Ламинарное течение.
- Тurbулентное течение.
- Пограничный слой.
- Число Рейнольдса.
- Статическое, динамическое и полное давление.
- Уравнение Бернулли.

Гидрогазодинамика играет важную роль в целом ряде аспектов проектирования вентиляционных систем. В частности, газодинамические расчеты производятся для потоков воздуха на вентиляторах, в воздуховодах, на фильтрах и в теплообменниках, а также для потоков воды в теплообменниках и трубах. Характеристики воздушных потоков также играют важнейшую роль при решении вопросов теплообмена и снижения уровня шума.

В потоке жидкости или газа действуют силы давления, инерции и трения. Если значения всех действующих сил равны, теоретические расчеты становятся более сложными. При доминировании одной или двух основных сил расчеты упрощаются.

При проектировании вентиляционных систем в большинстве случаев можно пренебречь силами инерции (за исключением случая лопастей вентилятора). Таким образом, поведение потока будет определяться силами давления и трения.

## Ламинарное и турбулентное течение

Существуют два принципиально разных вида течения среды. Если скорость потока достаточно низка, среда перемещается параллельно движущимся слоями. Такое течение называется ламинарным.

При более высокой скорости для текущей среды характерны вихревые движения с переменными модулями векторных величин и частотами. Такое

текущее называется турбулентным. Турбулентное течение характеризуется значительно большими трением и теплообменом по сравнению с ламинарным. Данный эффект возникает вследствие вихревых движений среды. Вид течения может в значительной степени определять ход процессов теплообмена. Это касается как воздуха, так и воды. Если вода перемещается в трубе в виде ламинарных слоев, теплообмен резко снижается, а управление течением становится затруднительным.

## Закон подобия Рейнольдса

Закон подобия Рейнольдса позволяет определить, ламинарным или турбулентным является течение.

### Число Рейнольдса

$$Re = \frac{wL}{v}$$

где

w — скорость движения среды, м/с;

L — характерный размер, м

(при движении воздуха по воздуховоду характерный размер L равен диаметру воздуховода d);

v — кинематическая вязкость среды, м<sup>2</sup>/с.

Благодаря закону подобия Рейнольдса можно определить, ламинарным или турбулентным является поток. В экспериментах с воздуховодами различных форм были установлены приблизительные значения числе Рейнольдса  $Re_{kp}$ , при которых поток воздуха превращается из ламинарного в турбулентный.

В воздуховодах это происходит при  $2300 < Re_{kp} < 4000$ . В случае движения потока между плоскими пластинами число Рейнольдса лежит в пределах  $500 < Re_{kp} < 1000$ . При этом характерным размером является расстояние между пластинами.

Если ламинарное течение нарушается, значение  $Re_{kp}$  будет меньшим, чем указано выше. Это изменение не является резким, однако в области изменения всегда происходит переход.

## Определение давления

В текущей среде можно выделить три вида давления: статическое, динамическое и полное.

Статическое давление — это давление среды в направлении, перпендикулярном направлению течения. При течении среды по трубам данное давление может быть измерено через небольшое отверстие в стенке трубы.

Полное давление — это давление среды на небольшую поверхность, расположенную перпендикулярно направлению течения, на которой скорость движения среды падает до нуля при отсутствии обтекания.

Динамическое давление — это разность между полным и статическим давлением.

## Течение в трубах и воздуховодах

### Упрощенное уравнение Бернуlli

Предположим, что текущая среда является несжимаемой, силы трения отсутствуют и все части воздуховода расположены на одной высоте. В этом случае уравнение Бернулли применимо в его простейшем виде:

$$\frac{P_s}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot v^2 = \text{const},$$

где

$P_{\text{стат}}$  — статическое давление, Па;  
 $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  
 $v$  — скорость движения воздуха, м/с.

Если обе части уравнения умножить на плотность, получим:

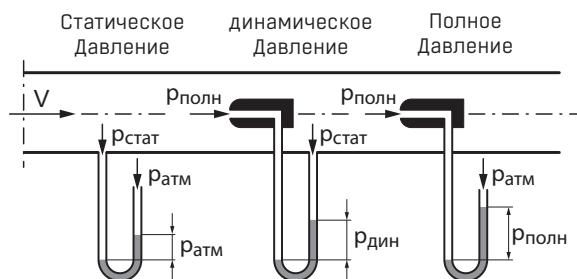
$$P_{\text{стат}} + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = P_{\text{стат}} + P_{\text{дин}} = P_{\text{полн}} = \text{const},$$

где

$P_{\text{стат}}$  — статическое давление, Па;  
 $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  
 $v$  — скорость движения воздуха, м/с;  
 $P_{\text{дин}}$  — динамическое давление, Па;  
 $P_{\text{полн}}$  — полное давление, Па.

Уравнение Бернулли описывает обратную зависимость статического давления от скорости движения среды.

На рисунке показаны принципы измерения давления в воздуховоде. Предполагается, что статическое давление в воздуховоде превышает атмосферное.



Принципиальная схема измерения давления в воздуховоде

### Снижение давления вследствие трения

Давление воздуха может снижаться вследствие его трения о стенки воздуховода. Для расчета снижения давления используется следующая формула:

$$\Delta P_\lambda = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2,$$

где

$\Delta P_\lambda$  — снижение давления вследствие трения;  
 $d$  — диаметр воздуховода, м;  
 $L$  — длина воздуховода, м;  
 $v$  — скорость движения воздуха, м/с;  
 $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\lambda$  — коэффициент гидравлического трения, связанный с числом Рейнольдса и неровностью поверхности стенок воздуховода.

Для расчета коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  используется следующая формула:

При ламинарном течении ( $Re \leq 2320$ ):

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

При турбулентном течении ( $Re \geq 2320$ ):

$$\lambda = \frac{1,14 - 2 \log \frac{k}{d}}{\sqrt{Re}}$$

где  
 $k$  — неровность поверхности стенки воздуховода, мм;  
 $d$  — диаметр воздуховода, м.

### Снижение давления вследствие изменения формы воздуховода

Разовое снижение давления происходит, например, при внезапном изменении площади сечения воздуховода, при изгибе трубы и т.п.

Для расчета снижения давления используется следующая формула:

$$\Delta p_{\text{форм}} = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2,$$

где

$\Delta p_{\text{форм}}$  — снижение давления вследствие изменения формы воздуховода;

$\zeta$  — коэффициент разового снижения давления;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  — скорость движения воздуха, м/с;

### Обобщенное уравнение Бернуlli

Если необходимо учесть уменьшение давления, описанное в предыдущем разделе, а также разницу в высоте, на которой расположены различные части воздуховода, следует использовать обобщенное уравнение Бернулли:

$$p_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + \rho g h_2 + \Delta p_{\lambda},$$

где

$p$  — статическое давление на высоте  $h = 0$ , Па;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  — скорость движения воздуха, м/с;

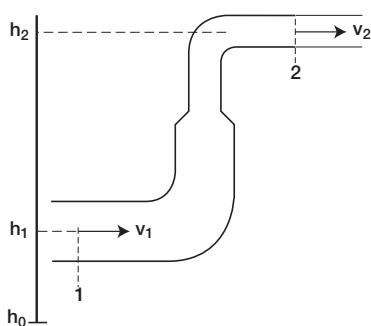
$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$h$  — высота, м;

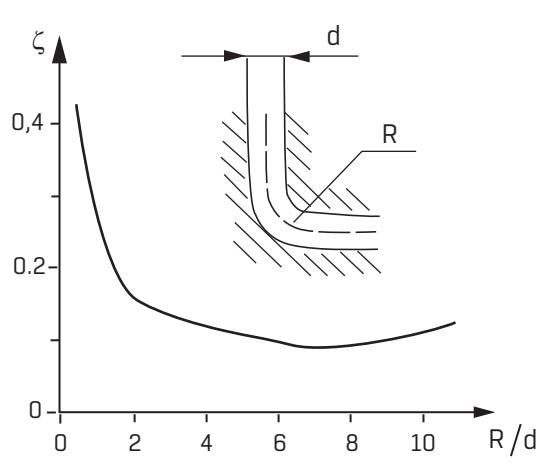
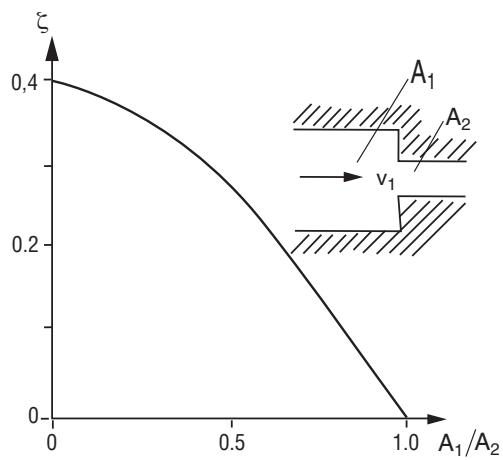
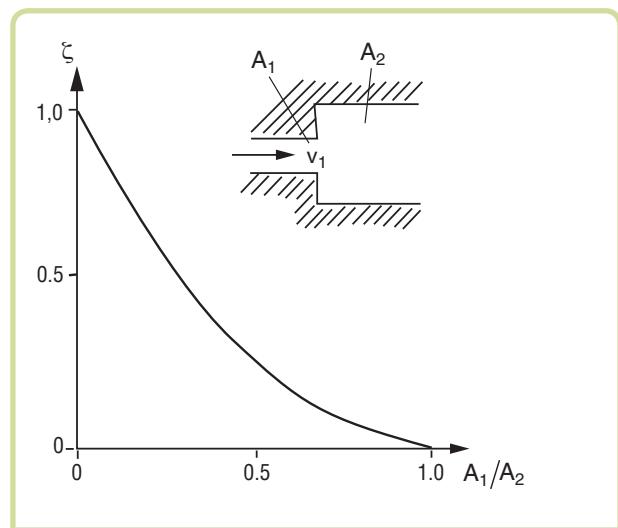
$\Delta p_{\lambda}$  — потери давления, Па;

$\rho \cdot \frac{v^2}{2}$  — динамическое давление;

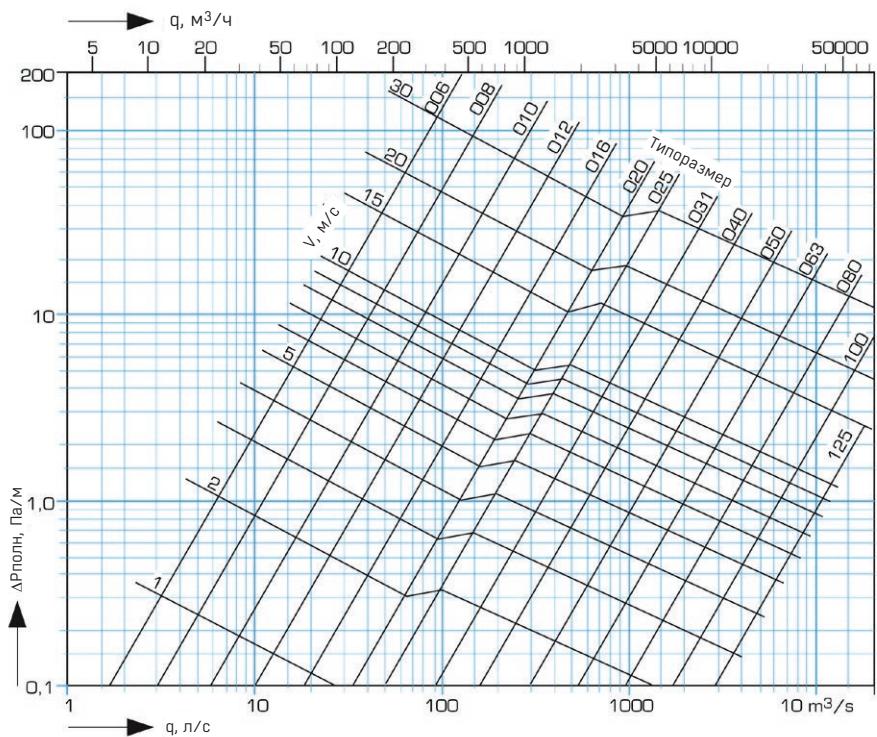
$\rho g h$  — давление за счет разности высот.



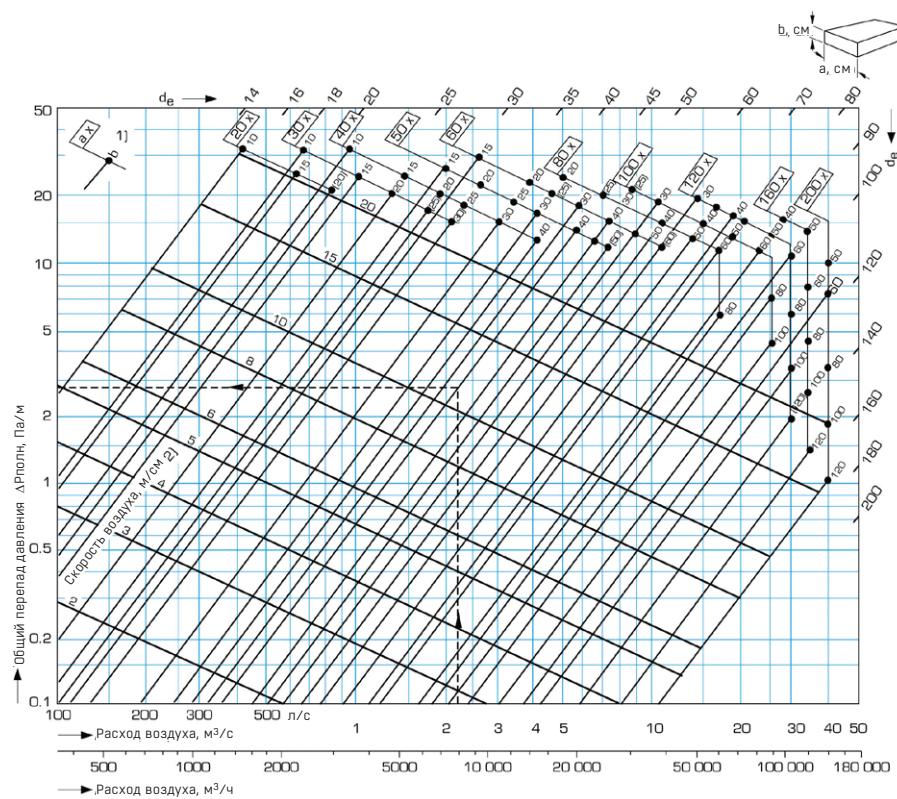
Ниже на графиках показаны значения коэффициента разового снижения давления  $\zeta$  для ряда случаев.



## Перепад давления в системе воздуховодов круглого сечения



## Перепад давления в системе воздуховодов прямоугольного сечения





## Резюме

В потоке жидкости или газа действуют силы давления, инерции и трения.

При проектировании вентиляционных систем в большинстве случаев можно пренебречь силами инерции (за исключением случая лопастей вентилятора). Таким образом, поведение потока будет определяться силами давления и трения.

Гидрогазодинамика играет фундаментальную роль в целом ряде аспектов проектирования вентиляционных систем. В частности, газодинамические расчеты производятся для потоков воздуха на вентиляторах, в воздуховодах, на фильтрах и в теплообменниках, а также для потоков воды в теплообменниках и трубах.

Существует два вида течения: ламинарное и турбулентное. Вид течения может в значительной степени определять ход про-

цессов нагрева и теплообмена. Это касается как воздуха, так и воды. При ламинарном течении воды в трубе в виде теплообмена резко снижается, а течение становится затруднительным.

Закон подобия Рейнольдса позволяет определить, ламинарным или турбулентным является течение.

В текущей среде можно определить три вида давления: статическое, динамическое и полное.

Значения данных величин рассчитываются с помощью уравнения Бернулли.

Помимо этого, уравнение Бернулли описывает обратную зависимость статического давления от скорости движения среды.

# 5

## Теплообмен



## Краткое содержание главы

- Теплопроводность.
- Закон теплопроводности Фурье.
- Конвекция.
- Тепловое излучение.
- Классификация теплоизоляции вентиляционных установок.

Тепло – это форма энергии, передающейся только в одном направлении: от более теплого тела к более холодному.

Теория теплообмена играет важную роль в целом ряде аспектов проектирования вентиляционных систем. В частности, теплообменные расчеты производятся для теплообменников и систем утилизации теплоты, а также для процессов охлаждения и теплопередачи через стенки оборудования. Материал, из которого выполняются теплообменники, должен обладать высокой теплопроводностью, а также обеспечивать эффективный конвективный теплообмен между корпусом изделия и жидкостью или газом.

В других случаях необходима хорошая теплоизоляция, следовательно, теплопроводность и конвекция должны быть сведены к минимуму.

Существует три механизма передачи тепла: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение.

## Теплопроводность

Теплопроводность – это процесс, в рамках которого обмен энергией осуществляется за счет движения электронов в металлах или, в случае жидкостей и газов в состоянии покоя, за счет движения молекул. Тепловой поток через единицу площади может быть выражен с помощью закона теплопроводности Фурье:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dn}, \text{ Вт/м}^2$$

где

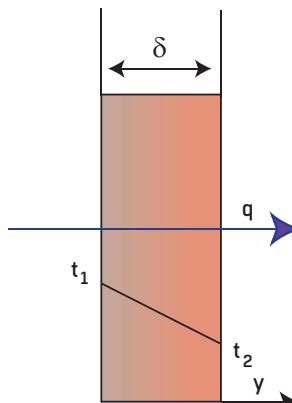
$\lambda$  – коэффициент теплопроводности (удельная теплопроводность) материала;

$\frac{dt}{dn}$  – градиент температуры в направлении, перпендикулярном поверхности.

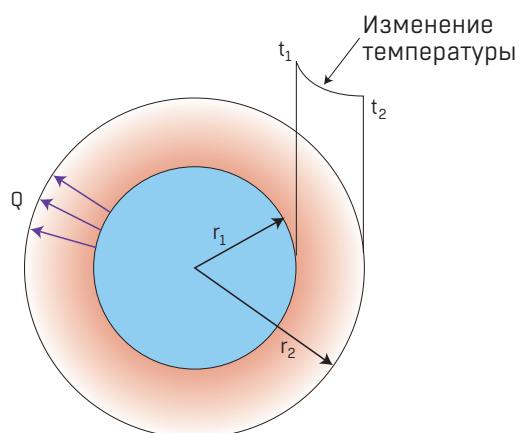
Минус в правой части уравнения показывает, что тепловой поток всегда направлен в сторону убывания температуры.

**Для плоской стенки можно показать, что:**

$$q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dy} = -\lambda \cdot \frac{(t_2 - t_1)}{\delta} = \lambda \cdot \frac{(t_1 - t_2)}{\delta}, \text{ Вт/м}^2$$



**Для трубы круглого сечения:**



$$Q = -2\pi \cdot r \cdot \lambda \cdot \frac{dt}{dr}, \text{ Вт}$$

Если  $Q$  не зависит от  $r$ , после интегрирования мы получим тепловой поток на единицу длины:

$$Q = -2\pi \cdot \lambda \cdot \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \text{ Вт}$$

## Конвекция

При конвективном теплообмене тело нагревается или охлаждается контактирующей с ним движущейся средой. В жидкости передача тепла происходит как за счет молекулярной теплопроводности, так и за счет макроскопических движений жидкости. На поверхности твердого тела скорость движения текучей среды равна нулю, поэтому передача тепла происходит только за счет теплопроводности.

Если среда приводится в движение с помощью внешних устройств, таких как вентиляторы, насосы и т.п., конвекция называется вынужденной. Если движение среды обусловлено изменениями ее плотности, возникающими вследствие разницы температур, конвекция называется естественной.

## Классификация

Стандарт EN 1886 Европейского комитета по стандартизации вводит две классификации корпусов вентиляционных установок на основе их теплоизолирующих характеристик.

В зависимости от коэффициента теплопроводности  $U$ ,  $\text{Bt}/\text{m}^2 \text{SDgrC}$ , корпусу присваивается класс от T1 до T5, а в зависимости от коэффициента изоляции  $K_b$  – класс от TB1 до TB5, отражающий степень защиты от образования конденсата.

Коэффициент теплопроводности  $U$  определяется путем измерения потери тепла в стационарном тепловом режиме при разнице температур внутри и снаружи вентиляционной установки, составляющей  $20^\circ\text{C}$ . Классификация по коэффициенту теплопроводности производится согласно следующей таблице:

<b>Класс T1</b>	$0 < U \leq 0,5$
<b>Класс T2</b>	$0,5 < U \leq 1,0$
<b>Класс T3</b>	$1,0 < U \leq 1,4$
<b>Класс T4</b>	$1,4 < U \leq 2,0$
<b>Класс T5</b>	Требования отсутствуют

## Тепловое излучение

Для осуществления теплообмена с помощью теплового излучения не требуется какая бы то ни было среда. Такой теплообмен может происходить между поверхностями двух твердых тел, а также между поверхностью твердого тела и газом. Также возможно взаимодействие между несколькими поверхностями и газами.

Если температура близка к комнатной, теплообмен с помощью теплового излучения практически всегда пренебрежимо мал в сравнении с конвекционным теплообменом.

Классификация, основанная на коэффициенте изоляции  $K_b$ , отражает устойчивость секций корпуса к образованию конденсата. Это безразмерная величина, рассчитываемая по формуле:

$$k_b = \frac{(t_{\text{поверхн}} - t_{\text{внутр}})}{(t_{\text{наруж}} - t_{\text{внутр}})}$$

где

$k_b$  – коэффициент изоляции;  
 $t_{\text{внутр}}$  – температура воздуха внутри вентиляционной установки;  
 $t_{\text{наруж}}$  – температура снаружи вентиляционной установки;  
 $t_{\text{поверхн}}$  – наименьшая температура поверхности секций установки.

Классификация по коэффициенту теплопроводности производится согласно следующей таблице:

<b>Класс TB1</b>	$0,75 < k_b \leq 1,00$
<b>Класс TB2</b>	$0,60 < k_b \leq 0,75$
<b>Класс TB3</b>	$0,45 < k_b \leq 0,60$
<b>Класс TB4</b>	$0,30 < k_b \leq 0,45$
<b>Класс TB5</b>	Требования отсутствуют

Секция корпуса с наименьшим коэффициентом теплоизоляции определяет класс изоляции всей вентиляционной установки.



## Резюме

Тепло — это форма энергии, передающейся только в одном направлении: от более теплого тела к более холодному.

**Существует три механизма передачи тепла:**

- **Теплопроводность.**

Теплопроводность — это процесс, в рамках которого обмен энергией осуществляется за счет движения электронов в металлах или, в случае жидкостей и газов в состоянии покоя, за счет движения молекул.

- **Конвекция.**

При конвективном теплообмене тело нагревается или охлаждается контактирующей с ним движущейся средой — жидкостью или газом.

- **Тепловое излучение.**

Для осуществления теплообмена с помощью теплового излучения не требуется какая бы то ни было среда. Такой теплообмен может происходить между поверхностями двух твердых тел, а также между поверхностью твердого тела и газом. Также возможно взаимодействие между несколькими поверхностями и газами.

### Классификация

Имеются две классификации вентиляционных установок на основе их теплоизолирующих характеристик — по потери тепла через корпус и по защищенности корпуса от образования конденсата.

Эти классификации вводятся стандартом Европейского комитета по стандартизации. В рамках первой классификации корпус получает класс от T1 до T5, а в рамках второй — от TB1 до TB5.

# 6

## Охлаждение



## Краткое содержание главы

- Введение.
- Контур охлаждения.
- Мощность охлаждения.
- Энергопотребление.
- КПД охлаждения.
- КПД обогрева.



Охладитель

Чтобы понять, как протекают процессы охлаждения, необходимо иметь представления о том, как текущие среды реагируют на различные изменения давления и температуры. Рассмотрим эти вопросы на примере воды. Используемые в вентиляционных установках хладагенты ведут себя аналогично.

Если к воде подводить тепло, она будет нагреваться. Однако если температура воды, к которой подводится тепло, достигнет 100°C, вода начнет испаряться и в конце концов полностью превратится в пар. Теплота, необходимая для превращения воды с температурой 100°C в пар той же температуры, называется теплотой испарения (парообразования).

В случае обратного фазового перехода, т.е. превращения пара в воду, выделяется эквивалентное количество теплоты.

Температура кипения воды зависит от давления. Например, на высоте 3000 метров над уровнем моря вода кипит при температуре немногого ниже 90°C, т.к. при наборе высоты атмосферное давление падает. Напротив, при росте давления температура кипения повышается. В сковорарке вода кипит приблизительно при 110°C, т.к. давление в ней примерно на 50% выше атмосферного. В процессе охлаждения используются измене-



Чиллер

ния давления, позволяющие сместить температуры испарения и конденсации. В результате происходит либо непосредственное охлаждение воздуха, либо охлаждение воды, которая затем используется для охлаждения воздуха.

## Охлаждение

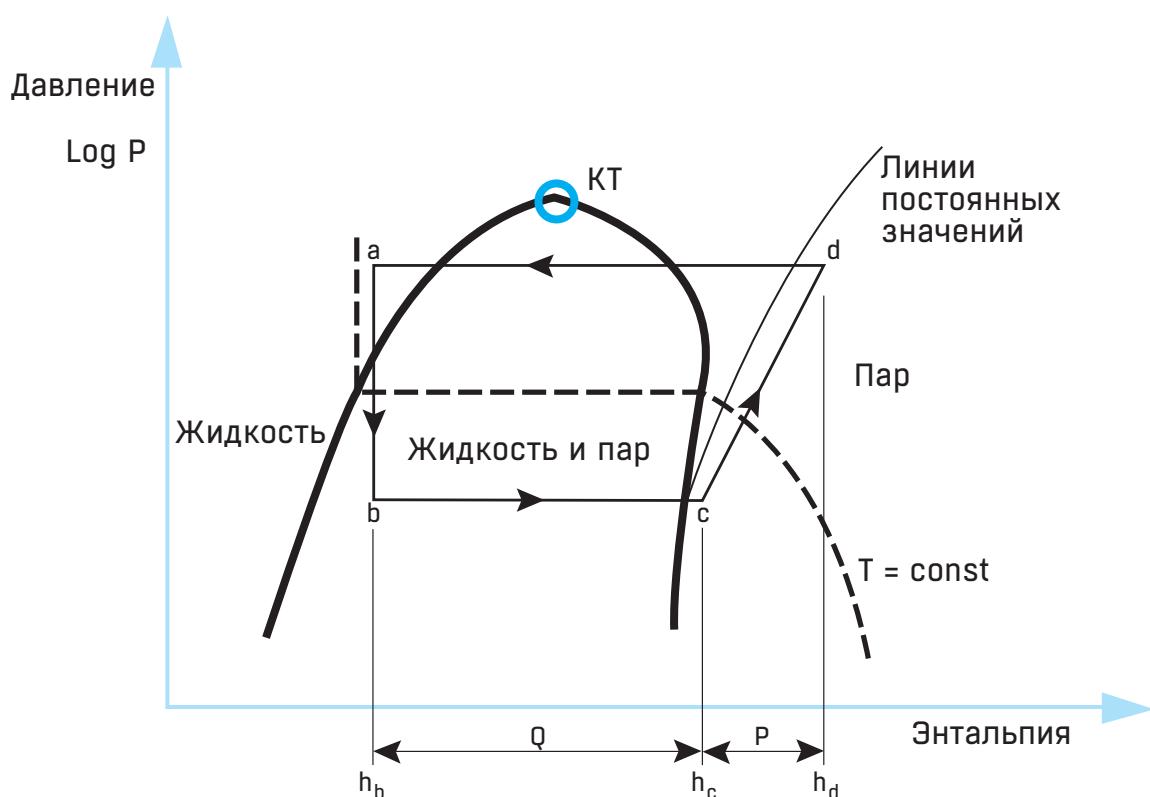
Процесс охлаждения состоит из четырех основных этапов. Эти этапы повторяются циклически.

1. Благодаря низкому давлению в испарителе хладагент кипит при низкой температуре и испаряется. При этом используется теплота приточного воздуха, который таким образом охлаждается.
2. Газообразный хладагент поступает в компрессор, где сжимается до высокого давления. В результате возрастает его температура.
3. Газообразный хладагент поступает в конденсатор. При этом его давление столь высоко, что он полностью конденсируется несмотря на высокую температуру. Тепло конденсации отводится потоком удалаемого воздуха.
4. Давление на расширительном клапане падает, и это приводит к снижению температуры жидкого хладагента.

На приведенном ниже графике можно выделить три области, отделенные друг от друга жирной линией насыщения.

Область слева от линии насыщения соответствует жидкости; область, ограниченная линией насыщения — смеси жидкости и газа; область справа от линии насыщения — газу. Фазовые переходы (испарение и конденсация) происходят при постоянной температуре и располагаются на линии насыщения.

Кривая постоянной температуры показана пунктиром. Ее вертикальная часть находится в области жидкости, горизонтальная — в области смеси жидкости и газа, а изогнутая — в области газа. Также показаны линии постоянной энтропии, соответствующие идеальному сжатию газовой фазы. Реальное сжатие не в полной мере соответствует данным линиям ввиду потерь (см. график). Сокращение КТ обозначает критическую точку.



## Мощность охлаждения

Мощность охлаждения рассчитывается как изменение энталпии в испарителе, умноженное на массовый расход хладагента.

$$Q = m \cdot (h_c - h_b),$$

где

$Q$  — мощность охлаждения, кВт;

$m$  — массовый расход хладагента, кг/с;

$h_c - h_b$  — изменение энталпии между точками  $b$  и  $c$ , см. график на предыдущей странице.

## Энергопотребление

Функционирование контура охлаждения обеспечивается за счет работы компрессора. Энергопотребление рассчитывается как изменение энталпии в компрессоре, умноженное на массовый расход хладагента.

$$P = m \cdot (h_d - h_c),$$

где

$P$  — энергопотребление, кВт;

$m$  — массовый расход хладагента, кг/с;

$h_d - h_c$  — изменение энталпии между точками  $c$  и  $d$ ,

см. график на предыдущей странице.

## КПД охлаждения

КПД охлаждения  $COP_2$  рассчитывается как количество теплоты, поступившей в испаритель, разделенное на работу, выполненную компрессором.

$$COP_2 = \frac{Q}{P} = \frac{m \cdot (h_c - h_b)}{\dot{m} \cdot (h_d - h_c)},$$

где

$COP_2$  — КПД охлаждения;

$Q$  — мощность охлаждения, кВт;

$P$  — энергопотребление, кВт.

Отсюда видно, что КПД является характеристикой конструкции модуля охлаждения и не зависит от массового расхода хладагента:

$$COP_2 = \frac{(h_c - h_b)}{(h_d - h_c)},$$

## КПД обогрева

КПД обогрева  $COP_1$  рассчитывается как количество теплоты, отводимое в конденсаторе, разделенное на работу, выполненную компрессором.

$$COP_1 = \frac{(h_d - h_a)}{(h_d - h_c)},$$

Ввиду того, что  $(h_d - h_a) = (h_c - h_b) + (h_d - h_c)$ , получаем:  $COP_1 = COP_2 + 1$



## Резюме

Чтобы понять, как протекают процессы охлаждения, необходимо иметь представления о том, как текущие среды реагируют на различные изменения давления и температуры. Рассмотрим эти вопросы на примере воды. Используемые в вентиляционных установках хладагенты ведут себя аналогично.

Если к воде подводить тепло, она будет нагреваться. Однако если температура воды, к которой подводится тепло, достигнет 100°C, вода начнет испаряться и в конце концов полностью превратится в пар. Темплота, необходимая для превращения воды с температурой 100°C в пар той же температуры, называется теплотой испарения.

В случае обратного фазового перехода, т.е. превращения пара в воду, выделяется эквивалентное количество теплоты. Также необходимо помнить, что температура кипения воды зависит от давления. Например, на высоте 3000 метров над уровнем моря вода кипит при температуре немного ниже 90°C, т.к. при наборе высоты атмосферное давление падает. Напротив, при росте давления температура кипения повышается. В сковородке вода кипит приблизительно при 110°C, т.к. давление в ней примерно на 50 % выше атмосферного.

В процессе охлаждения используются изменения давления, позволяющие сместить температуры испарения и конденсации.

В результате происходит либо непосредственное охлаждение воздуха, либо охлаждение воды, которая затем используется для охлаждения воздуха.

**Процесс охлаждения состоит из четырех основных этапов. Эти этапы повторяются циклически.**

1. Благодаря низкому давлению в испарителе хладагент кипит при низкой температуре и испаряется. При этом используется теплота приточного воздуха, который таким образом охлаждается.
2. Газообразный хладагент поступает в компрессор, где сжимается до высокого давления. В результате возрастает его температура.
3. Газообразный хладагент поступает в конденсатор. При этом его давление столь высоко, что он полностью конденсируется несмотря на высокую температуру. Тепло конденсации отводится потоком удалаемого воздуха.
4. Давление на расширительном клапане падает, и это приводит к снижению температуры жидкого хладагента.

Данный цикл отображается на графике в координатах  $h - \log P$ , где  $h$  – энталпия (количество энергии, содержащейся в хладагенте),  $P$  – давление хладагента.



# Утилизация энергии обогрева и охлаждения



## Краткое содержание главы



- Временной график.  
Временной график
- Энергоэффективность.

Утилизация теплоты в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха является чрезвычайно рентабельной. В холодном климате срок окупаемости необходимого для этого оборудования может составить всего один год. В жарком климате срок окупаемости также может оказаться очень коротким благодаря возможности использования модуля охлаждения меньшего размера, требующего меньших начальных вложений и потребляющего меньшее количество энергии.

Размер экономии зависит главным образом от климата, количества рабочих часов и энергоэффективности выбранной системы утилизации энергии.

Помимо обеспечения высокой рентабельности, утилизация энергии обогрева и охлаждения также позволяет снизить нагрузку на окружающую среду. В частности, ее использование позволяет уменьшить объем сжигаемого топлива и таким образом сократить выбросы углекислого газа.

Еще одним преимуществом является более высокая кратность воздухообмена при низком энергопотреблении, что позволяет улучшить качество воздуха в здании.

Интенсивность теплообмена зависит от разницы температур, поэтому чем более холодным является наружный воздух, тем большее количество теплоты может быть утилизировано из удаляемого воздуха. Аналогично чем теплее наружный воздух, тем большее количество энергии охлаждения можно извлечь. Исключением являются очень низкие температуры наружного воздуха, при которых влага удаляемого воздуха может замерзать в теплообменнике. В этом случае теплообменник должен быть отрегулирован с целью уменьшения теплообмена или периодически переключаться на цикл оттаивания.

На рынке представлены различные системы утилизации теплоты, каждая из которых обладает своими преимуществами и недостатками. Выбор системы должен осуществляться исходя из предлагаемой сферы ее применения.

## Временной график

Расчет экономического эффекта от утилизации теплоты должен выполняться для полного года эксплуатации системы, а не только для периода максимальной нагрузки.

На рисунке справа представлен временной график зависимости температуры, °С, от времени, ч. График отображает усредненные температурные показатели для Стокгольма. Различные области на графике обозначают количество градусо-часов (градусов, умноженных на часы). Данные значения, умноженные на расход воздуха  $q$ , плотность воздуха и удельную теплоемкость воздуха  $c_p$  дают потребность в обогреве или охлаждении — тепловую нагрузку.

Нижняя область между линией температуры наружного воздуха и температурой приточного воздуха показывает годовую тепловую нагрузку по обогреву  $Q_{полн}$  без теплообменника и при непрерывной работе.

$$Q_{полн} = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot \text{количество градусо-часов},$$

где

$Q_{полн}$  — годовая тепловая нагрузка по обогреву, кВт·ч/год, без теплообменника;  
 $q$  — расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;  
 $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  
 $c_p$  — удельная теплоемкость воздуха, Дж/кг · °С.

Потребность в дополнительном тепле  $Q_{дополн}$  соответствует малому треугольнику в верхней левой части графика.

$$Q_{дополн} = \left(1 - \frac{\eta_{\text{среднегод}}}{100}\right) \cdot Q_{полн}$$

где

$Q_{дополн}$  — годовая тепловая нагрузка по обогреву, кВт·ч/год, с теплообменником;  
 $\eta_{\text{среднегод}}$  — среднегодовая энергоэффективность (КПД) теплообменника, %;  
 $Q_{полн}$  — годовая тепловая нагрузка по обогреву, кВт·ч/год, без теплообменника.

Средняя энергоэффективность будет превышать указанное производителем значение, если температура удаляемого воздуха обычно превышает требуемую температуру приточного воздуха. При использовании энергоэффективного теплообменника среднегодовая энергоэффективность может достигать 85-95%.

Если система работает не непрерывно, то тепловую нагрузку обычно можно с достаточной точностью считать пропорциональной времени работы. Для увеличения точности необходимо учесть, что дневные и ночные кривые несколько отличаются от усредненной кривой.

При проведении расчетов на основе графиков, подобных приведенному ниже, необходимо также помнить, что при этом не учитывается так называемая скрытая энергия, обусловленная присутствием влаги в воздухе.

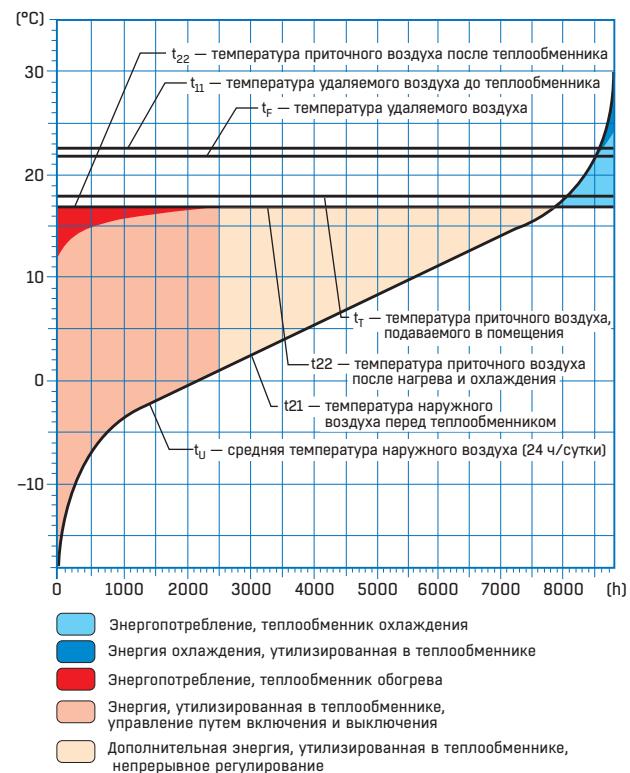
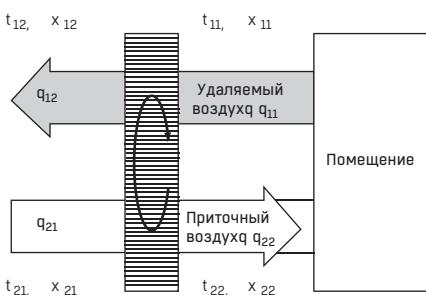


График энергоэффективности

## Определения

На рисунке ниже показан принцип утилизации теплоты на примере роторного теплообменника. Удаляемый воздух проходит через теплообменник, после чего выбрасывается в атмосферу. Приточный воздух нагревается за счет тепла удаляемого воздуха, после чего подается в помещение.



Эффективность теплообмена

$$\eta_t = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}} \cdot 100$$

Эффективность влагообмена

$$\eta_x = \frac{X_{22} - X_{21}}{X_{11} - X_{21}} \cdot 100$$

## Обозначения

q — расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;

t — температура, °С;

φ — относительная влажность воздуха, %;

$\eta_t$  — эффективность теплообмена, %;

$\eta_x$  — эффективность влагообмена, %;

X — содержание влаги, кг/кг.

## Подстрочные индексы

1 — сторона удаляемого воздуха;

2 — сторона приточного воздуха;

11 — удаляемый воздух, выпуск;

12 — удаляемый воздух, выпуск;

21 — приточный воздух, выпуск;

22 — приточный воздух, выпуск.

## Эффективность

Энергоэффективность — это мера продуктивности теплообменника. Данная величина выражается в процентах от теоретически возможной утилизации теплоты и влаги, т.е. утилизации, при которой приточный воздух имеет ту же температуру и то же содержание влаги, что и удаляемый. Теоретически возможная утилизация соответствует эффективности 100%.

Эффективность теплообмена отражает изменение температуры в теплообменнике (утилизацию явной энергии), а эффективность влагообмена — изменение содержания влаги (утилизацию латентной энергии).

Оба данных коэффициента являются безразмерными.

Это означает, что даже если два коэффициента были измерены в разных условиях (в условиях утилизации энергии обогрева и охлаждения соответственно), при сильно различающихся температурах наружного воздуха, они могут использоваться в любых расчетах температуры приточного воздуха.

Чем выше расход воздуха в теплообменнике, тем ниже его эффективность. Помимо этого, эффективность падает при увеличении отношения расходов приточного и удаляемого воздуха.

Ниже перечислены основные параметры, определяющие эффективность теплообменника:

- Геометрия потоков внутри теплообменника: параллельные, встречные или перекрестные потоки.
- Число единиц переноса тепла NTU.

- Тип теплообмена: непосредственно между воздушными потоками или через жидкость.

Из графика видно, что эффективность теплообменника увеличивается с ростом числа единиц переноса тепла NTU.

Согласно приведенной ниже формуле, увеличение числа единиц переноса тепла может быть достигнуто путем увеличения коэффициента поверхностной теплопередачи и площади поверхности теплопередачи F, а также путем уменьшения  $C_{min}$ . Для увеличения площади поверхности теплопередачи F необходимо увеличить количество листов фольги в теплообменнике. Однако это приведет к увеличению перепада давления. Коэффициент поверхностной теплопередачи возрастает, если поток воздуха становится турбулентным. Однако в теплообменнике достичь этого чрезвычайно сложно.

Из формулы для расчета  $C_{min}$  видно, что эффективность теплообменника также возрастает при снижении скорости движения воздуха в теплообменнике.

Число единиц переноса тепла рассчитывается по формуле:

$$N_{TU} = \frac{\alpha \cdot F}{C_{min}}$$

$$C_{min} = q_{min} \cdot \rho \cdot c_p,$$

где

$N_{TU}$  — число единиц переноса тепла;

$\alpha$  — коэффициент поверхностной теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>, °С;

$F$  — площадь поверхности теплопередачи, м<sup>2</sup>;

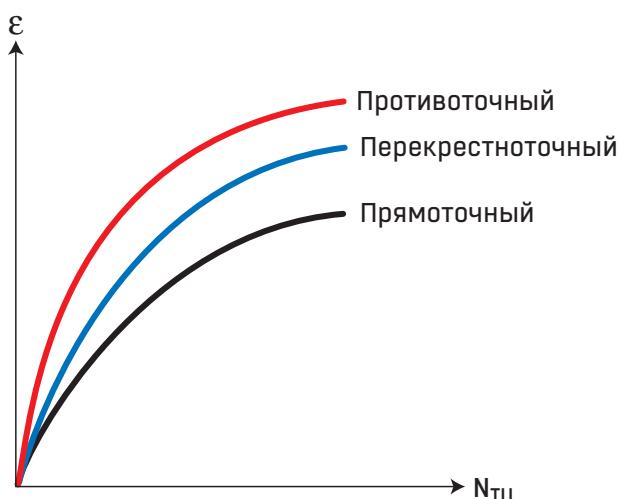
$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$q_{mi}$  — наименьший расход, м<sup>3</sup>/с;

$c_p$  — удельная теплоемкость.

Противоточные теплообменники отличаются более высокой эффективностью по сравнению с перекрестноточными и прямоточными.

На рисунке ниже показана зависимость эффективности теплообменника от числа единиц переноса тепла NTU.



Зависимость эффективности теплообменника от числа единиц переноса тепла



## Резюме

Утилизация энергии обогрева и охлаждения позволяет сэкономить финансовые ресурсы и снизить нагрузку на окружающую среду.

### Временной график

Временной график показывает усредненную температуру вне помещения в выбранной местности в течение года. Исходя из графика

может быть рассчитана средняя годовая тепловая нагрузка

Qполн без теплообменника в условиях непрерывной работы, а также аналогичная нагрузка при наличии эффективного теплообменника Qдополн.

### Эффективность

Эффективность (КПД) – это доля израсходованной энергии в процентах, затраченная на выполнение полезного действия.

Эффективность теплообменника зависит главным образом от следующих параметров:

- Геометрия потоков внутри теплообменника:
  - параллельные, встречные или перекрестные потоки.
- Число единиц переноса тепла NTU.
- Тип теплообмена: непосредственно между воздушными потоками или через жидкость.

# 8

## Расчеты затрат на срок службы и энергопотребления



## Краткое содержание главы

- Энергоэффективность является важнейшим параметром оборудования.
- Затраты на срок службы.
- Затраты на электроэнергию на срок службы.
- Затраты на электроэнергию и выбросы углекислого газа.
- Снижение затрат на электроэнергию.
- Параметры для расчетов энергопотребления и стоимости энергии на срок службы.

Согласно исследованиям, стоимость эксплуатации вентиляционной установки в течение срока ее службы превышает стоимость ее приобретения. В ряде случаев эксплуатационные затраты могут достигать 90% от суммарных затрат на срок службы установки в течение 20 лет. При этом стоимость самой установки составляет лишь 10% от этих затрат. По мере роста стоимости энергии все большее значение приобретают суммарные затраты на срок службы, тогда как стоимость самой установки становится менее значима. Экологические проблемы современности, в частности, глобальное потепление, разрушение озонового слоя, увеличение площади пустынь и необходимость соблюдения Киотского протокола, делают увеличение энергоэффективности одной из глобальных задач человечества. Поэтому столь важным является расчет затрат на срок службы для всех единиц оборудования, потребляющих энергию. И, в частности, для вентиляционных установок.

Затраты на срок службы – это сумма всех затрат, связанных с изделием на протяжении его срока службы.

Затраты на срок службы рассчитываются методом текущей стоимости. Это значит, что все будущие затраты учитываются в сегодняшних ценах.

Таким образом, затраты на срок службы складыва-

ются из стоимости оборудования, а также затрат на электроэнергию, техническое обслуживание и экологические сборы за весь срок службы в сегодняшних ценах.

Затраты на срок службы = стоимость оборудования + затраты на электроэнергию на срок службы + затраты на техническое обслуживание на срок службы + затраты на экологические отчисления на срок службы – доход от утилизации

## Затраты на электроэнергию на срок службы

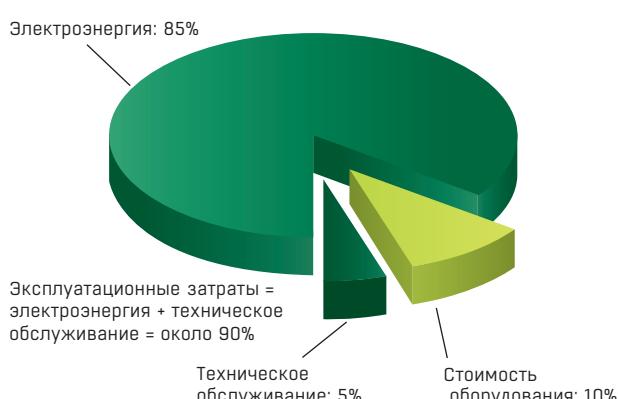
Самой значительной частью затрат, связанных с вентиляционной установкой, являются затраты на электроэнергию. Заказчики вентиляционных систем все чаще выдвигают поставщикам требования, касающиеся заранее установленных затрат на электроэнергию на срок службы. И поставщики сталкиваются с необходимостью удовлетворять эти требования. В связи с этим компания Fläkt Woods доработала соответствующий модуль в своей программе выбора продукции. Данный модуль позволяет сравнить и оптимизировать различные функции и решения в рамках вентиляционной установки с целью максимального снижения указанных затрат.

## Затраты на электроэнергию и выбросы углекислого газа

Затраты на электроэнергию для вентиляционной установки складываются из двух частей. Первая часть – это электроэнергия, потребляемая вентиляторами и электродвигателями, а вторая – электроэнергия, превращаемая в тепловую энергию. В свою очередь, вторая часть делится на электроэнергию для обогрева и электроэнергию для охлаждения. В Северной Европе большая часть суммарной потребляемой энергии расходуется на обогрев. Затраты на обогрев могут быть существенно снижены за счет использования теплообменника. В будущем предполагается рост затрат на охлаждение. В Центральной и Южной Европе охлаждение уже сейчас составляет значительную часть общего энергопотребления. В связи с данной тенденцией возрастает важность утилизации холода.

В ряде случаев заказчики также желают знать, какой объем выбросов углекислого газа соответствует потребляемой установкой энергии.

Такой расчет может быть выполнен исходя из количества углекислого газа, выбрасываемого в атмосферу при производстве одного киловатта электроэнергии, в дальнейшем используемой для обогрева, охлаждения и питания электродвигателей.





## Снижение затрат на электроэнергию

Для получения достоверного значения затрат на электроэнергию чрезвычайно важно использовать точные исходные данные.

Конечный результат расчета будет в значительной мере зависеть от учета перечисленных ниже соображений:

- Наиболее дешевые и малогабаритные вентиляционные установки, как правило, не являются оптимальными с точки зрения затрат на электроэнергию на срок службы.  
Исследования показывают, что более крупногабаритные установки часто демонстрируют чрезвычайно быструю окупаемость. В подобных установках перепад давления незначителен и утилизация энергии производится более эффективно.
- Вентиляционная система должна быть оптимизирована с целью обеспечения ее максимальной экономичности. Чем меньше перепад давления в системе воздуховодов, тем меньшее количество электроэнергии потребляется вентиляторами.
- В процессе проектирования вентиляционной системы важнейшую роль играет правильный выбор вентиляторов и их приводов. Вентиляторы должны обеспечивать надлежащие расход и давление, соответствующие решаемым задачам.
- Столь же важным является выбор оптимального теплообменника: надлежащего типа, соответствующего исходным данным проектирования и имеющим оптимальную эффективность утилизации теплоты. Максимальная эффективность утилизации теплоты не всегда является лучшим решением, т.к. большие теплообменники увеличивают потери давления в установке. Это, в свою очередь, приводит к увеличению потребления электроэнергии вентиляторами.
- Все большую важность приобретает выбор теплообменника, характеризующегося также оптимальной утилизацией холода.
- По возможности следует использовать вентиляционную систему с переменным расходом воздуха, обеспечивающую вентиляцию здания в соответствии с текущими потребностями.
- Вентиляционная установка должна использоваться по прямому назначению. Например, в офисных зданиях вентиляционные установки должны обеспечивать вентиляцию помещений и, в ряде случаев, охлаждение воздуха, но не обогрев. Последняя задача решается с помощью батарей центрального отопления.
- Использование вентиляционных установок с наименьшими возможными габаритными размерами далеко не всегда является экономически оправданным.

Принципы расчета энергопотребления и затрат на электроэнергию на срок службы

Для увеличения точности расчетов, связанных с энергопотреблением, необходимо руководствоваться перечисленными ниже принципами:

- Расчеты теплообмена воздухонагревателей, воздухоохладителей и теплообменников основываются на параметрах поступающего в них воздуха. Поэтому данные параметры (температура, энтальпия, скорость и давление) должны быть рассчитаны для каждой точки вентиляционной установки.
- Расчет производительности по охлаждению для охлаждающего теплообменника является весьма сложным. Для получения достаточно точного результата необходимо принять во внимание образование капель конденсата. Данное явление приводит к увеличению перепада давления в теплообменнике. При этом необходимо рассчитать энергию адиабатического охлаждения.
- Если утилизация теплоты осуществляется с помощью роторного теплообменника, в расчете должны быть учтены расход утечек и уравновешивающее давление. Дополнительное давление и дополнительный расход воздуха влияют на работу вытяжного вентилятора.
- Перепад давления на фильтрах должен рассчитываться как среднее значение от первоначального и конечного перепада давления.
- В расчете должны быть учтены все элементы оборудования, потребляющие электроэнергию, включая электродвигатели насосов и иные приводные электродвигатели, являющиеся частью вентиляционной установки.

## Расчет температуры

В расчетах температур должны фигурировать температуры проточного и удаляемого воздуха для теплого и холодного времени года. Температуры представляются как линейные зависимости на временном графике для определенного периода времени. На вентиляторах происходит дополнительное увеличение температуры. Данное увеличение должно быть рассчитано для каждой конкретной вентиляционной установки. От него зависят тепловая и холодильная нагрузка. Помимо этого, для получения точных значений температуры и влажности в расчетах должны фигурировать уставки температуры и влажности.

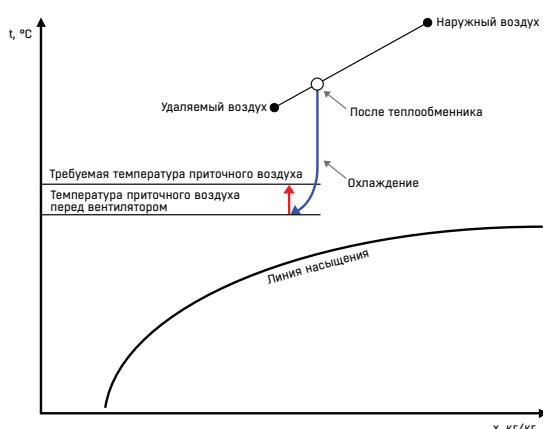
Расчет производительности по охлаждению может быть выполнен двумя способами:

1. Расчет с получением точной температуры.
2. Расчет с получением точной температуры и точного содержания влаги в воздухе.

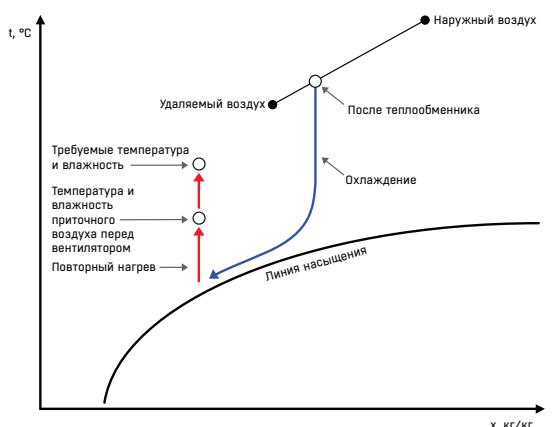
## Если необходимо обеспечить точное соответствие

температуры и относительной влажности воздуха требуемым значениям, в состав вентиляционной установки должны входить воздухонагреватель, охладитель и нагреватель для повторного нагрева. Функционирование данной конфигурации сопряжено с потреблением значительного количества электроэнергии, поэтому в данном случае особую важность приобретает точность расчетов.

На первом графике показано охлаждение до требуемой температуры. На втором графике показано охлаждение воздуха до требуемого содержания влаги с последующим нагревом до требуемой температуры и относительной влажности.



Расчет эффекта охлаждения для получения надлежащей температуры



Расчет эффекта охлаждения для получения надлежащей температуры и влажности

## Компенсация температуры наружного воздуха

В большинстве случаев, когда в состав вентиляционной установки входит воздухоохладитель, температура приточного воздуха изменяется в течение года в зависимости от нагрузки. Для получения более точного значения энергетической нагрузки в этих случаях рекомендуется добавить в расчет компенсацию температуры наружного воздуха.

С помощью функции компенсации температуры наружного воздуха температура приточного воздуха рассчитывается как функция температуры наружного воздуха. Состояние приточного воздуха указывается как фактическая температура для различных значений температуры наружного воздуха. Между этими точками температура линейно зависит от времени.

Температура удаляемого воздуха указывается как температура в теплое время года и температура в холодное время года. Между ними температура линейно зависит от времени.

Ниже показаны примеры подобных графиков с компенсацией и без нее.

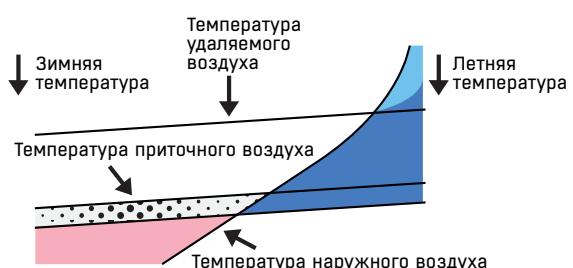


График без компенсации температуры наружного воздуха

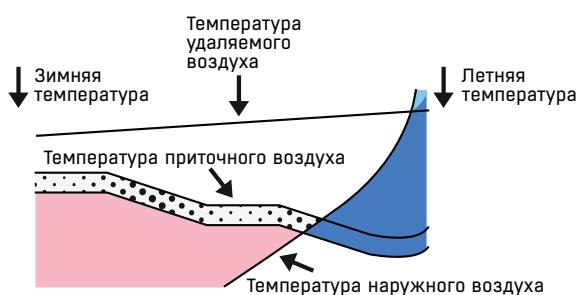


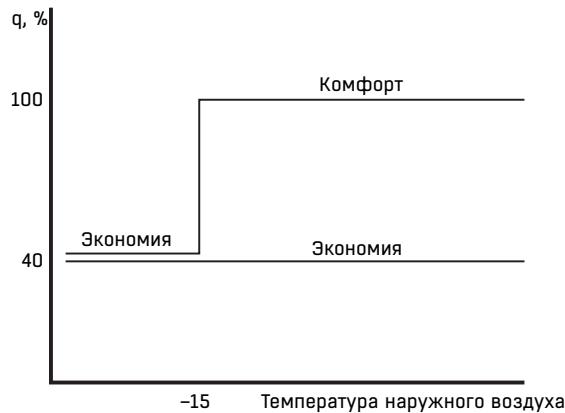
График с компенсацией температуры наружного воздуха

## Продолжительность работы

Энергопотребление установки в значительной степени зависит от продолжительности ее работы. Например, непрерывной работе вентиляционной установки соответствуют приблизительно 8 760 часов работы в год. Однако в реальности вентиляционная установка, предназначенная для вентиляции офисных помещений, работает от 3 000 до 4 000 часов в год.

Таким образом, в рамках расчетов энергопотребления целесообразно различать два режима работы установки: дневной и ночной. Каждый из этих режимов может иметь собственные уставки расхода и температуры воздуха. Ночная температура несколько ниже дневной, что отображается на временном графике в виде ступеньки.

### Дневной и ночной режимы работы



Временной график, дневной и ночной режим работы

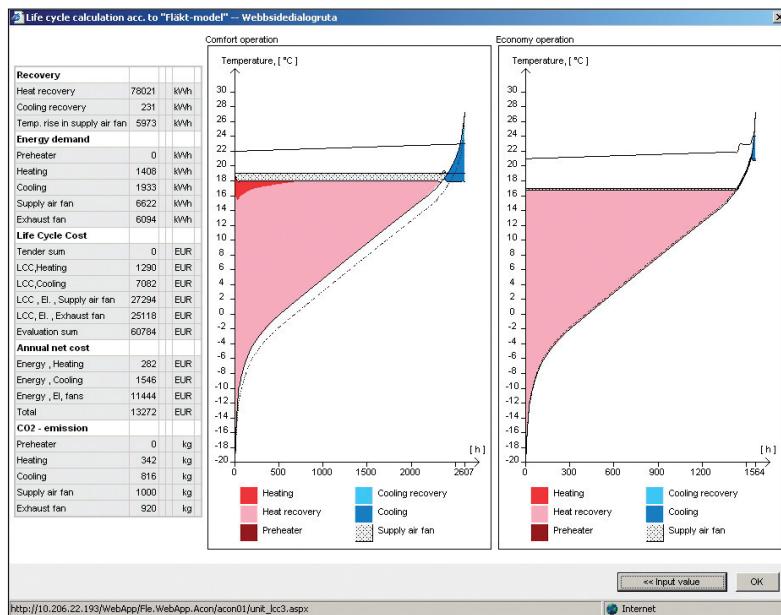
## Вентиляционная система с переменным расходом воздуха

При расчете энергопотребления вентиляционной установки, давление в которой регулируется для обеспечения работы вентиляционной системы с переменным расходом воздуха, необходимо указать минимальное и максимальное значение расхода воздуха для каждого значения температуры наружного воздуха. Если температура падает ниже минимального установленного значения или поднимается выше максимального установленного значения, расход воздуха считается постоянным. Линия, соединяющая две температуры на графике, является прямой.

## Временной график

Энергопотребление может быть отображено на временном графике. Примеры подобных графиков представлены ниже.

На графике показаны температуры приточного и удаляемого воздуха для некой вентиляционной установки на протяжении года. На графике можно видеть количество утилизированной энергии (розовая область), количество дополнительного тепла (красная область) и количество дополнительного тепла от электродвигателя вентилятора (область с точками) в течение отопительного периода. Также на графике видны количество утилизированной энергии охлаждения (голубая область), количество необходимой энергии охлаждения (синяя область) и количество дополнительного тепла от электродвигателя вентилятора (область с точками) в течение периода кондиционирования воздуха. Помимо этого, показан повторный нагрев для охлаждения для требуемой температуры и требуемого содержания влаги в воздухе. Следует помнить, что на графике отображены только явные энергии нагрева и охлаждения.



Временной график в программе выбора продукции ACON компании Fläkt Woods.



## Резюме

Затраты на срок службы — это сумма всех затрат, связанных с изделием на протяжении его срока службы. До 90% от всех затрат на срок службы вентиляционной установки составляют затраты на электроэнергию. Важнейшим фактором, определяющим общую экономичность вентиляционной системы, является энергоэффективность ее компонентов. Поэтому столь важным является расчет затрат на электроэнергию на срок службы вентиляционной установки. Помимо этого, исходя из количества потребляемой установкой электроэнергии, можно рассчитать соответствующий объем выбросов углекислого газа.

Для увеличения точности расчетов, связанных с энергопотреблением, необходимо руководствоваться перечисленными ниже принципами:

- Параметры воздуха (температура, энталпия, скорость и давление) должны быть рассчитаны для каждой точки вентиляционной установки.
- Расчет производительности по охлаждению для охлаждающего теплообменника является весьма сложным. Для получения достаточно точного результата необходимо принять во внимание образование капель конденсата.
- Если утилизация теплоты осуществляется с помощью роторного теплообменника, в расчете должны быть учтены расход утечек и уравновешивающее давление.
- Перепад давления на фильтрах должен рассчитываться как среднее значение от первоначального и конечного перепада давления.
- В расчете должны быть учтены все элементы оборудования, потребляющие электроэнергию, включая электродвигатели

насосов и иные приводные электродвигатели, являющиеся частью вентиляционной установки.

- В расчетах температур должны фигурировать температуры проточного и удалаемого воздуха для теплого и холодного времени года.

Расчет производительности по охлаждению может быть выполнен двумя способами:

- Расчет с получением точной температуры. Расчет с получением точной температуры и точного содержания влаги в воздухе.

При расчете затрат на электроэнергию чрезвычайно важно для получения достоверных результатов является использование точных значений требуемых параметров.

На результаты расчетов в значительной степени влияют перечисленные ниже факторы:

- Наиболее дешевые и малогабаритные вентиляционные установки, как правило, не являются оптимальными с точки зрения затрат на электроэнергию на срок службы.
- Оптимизация вентиляционных систем с целью обеспечения их максимальной экономичности.
- Правильный выбор вентиляторов.
- Оптимизированные теплообменники.
- Выбор теплообменников, характеризующихся также оптимальной утилизацией энергии охлаждения.
- Подача воздуха по мере необходимости.
- Использование вентиляционной установки по прямому назначению.

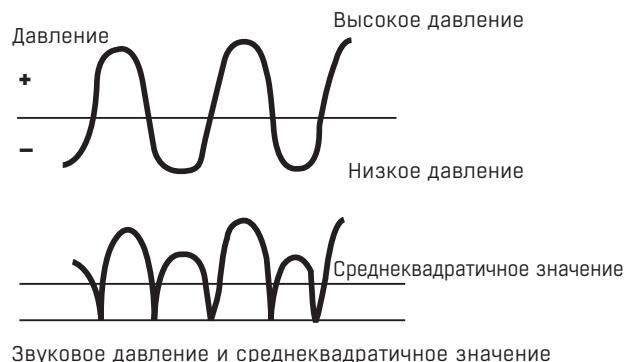
9

ЗВУК



## Краткое содержание главы

- Общие представления о звуке
- Звуковое давление и уровень звукового давления.
- Среднеквадратичное значение.
- Уровень звуковой мощности.
- Сложение уровней звукового давления и звуковой мощности.
- Частота.
- Коррекция по шкале А



Звуковое давление и среднеквадратичное значение

**Уровень звукового давления рассчитывается по формуле:**

$$L_p = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right) = 20 \log \left( \frac{p}{2 \cdot 10^{-5}} \right)$$

где

$L_p$  – уровень звукового давления, дБ;

$p$  – звуковое давление, Па;

$p_0$  – опорное значение звукового давления, Па.

Для того, чтобы давление воздуха изменялось, необходим источник энергии. Таким образом, звуковое давление создается одним или несколькими источниками звука, т.е. источниками звуковой энергии определенной звуковой мощности. Звуковая мощность сравнивается с опорным значением  $W_0 = 10^{-12}$  Вт.

**Уровень звуковой мощности рассчитывается по формуле:**

$$L_w = 10 \log \left( \frac{W}{W_0} \right) = 10 \log \left( \frac{W}{2 \cdot 10^{-12}} \right)$$

где

$L_w$  – уровень звуковой мощности, дБ;

$W$  – звуковая мощность, Вт;

$W_0$  – опорное значение звуковой мощности, Вт.

С помощью понятия звуковой мощности можно описать общее количество звуковой энергии, производимой механизмом. При этом состояние окружающей среды не рассматривается. Напротив, понятие звукового давления описывает интенсивность звука в какой-либо точке окружающей среды. Звук распространяется от корпуса вибрирующего механизма.

Звуковые волны передаются от вибрирующей поверхности воздуху. Это похоже на распространение кругов на поверхности воды. Распространяясь в воздухе, звуковые волны постепенно затухают вследствие трения.

Чем больше расстояние от источника звука, тем звук тише.

## Общие представления о звуке

Однородный и не беспокоящий звук является, наряду с оптимальной температурой и оптимальной скоростью воздуха, одним из важнейших требований к вентиляционной системе. Вентиляционная установка необходимой мощности позволяет решить целый ряд вопросов, связанных с микроклиматом в помещении. Такое решение предполагает тщательную разработку проекта здания, включая такой немаловажный аспект, как акустические расчеты.

Важнейшими источниками шума в вентиляционной системе являются вентиляторы, вентиляционная установка, воздушные клапаны и воздухораспределители. В частности, шум вентиляторов может распространяться по зданию как через его конструктивные элементы, так и по системе воздуховодов. Для подавления шума должны быть приняты специальные меры. В системах приточного и удаляемого воздуха вблизи вентиляторов и воздушных клапанов обычно необходима установка глушителей.

В случае диффузоров уровень шума может быть снижен только путем использования диффузоров другого типа, размера и т.п.

## Звук

Звук представляет собой изменения давления воздуха (или иной среды), вызывающие колебания барабанной перепонки уха.

Среднеквадратичное значение этих изменений давления называется эффективным звуковым давлением  $p$ , Па. Звуковое давление  $p$  сравнивается со опорным значением  $p_0 = 2 \times 10^{-5}$  Па, которое считается наименьшим слышимым уровнем звука, порогом слышимости.

Уровень звукового давления зависит от уровня звуковой мощности источника звука, от характеристик окружающей среды, в частности, ее звукопоглощающих свойств, а также от расстояния до источника звука. В связи с этим в каталоге продукции для различных устройств указаны значения звуковой мощности, на основании которых могут быть рассчитаны уровни звукового давления для каждого конкретного случая.

Уровни звукового давления и звуковой мощности являются логарифмическими величинами, поэтому они не могут складываться как линейные величины. При наличии двух источников звука с уровнями звуковой мощности 50 дБ их общий уровень звуковой мощности не будет равен 100 дБ. Уровни звукового давления и звуковой мощности должны складываться логарифмически.

$$L_p = 10 \log \left( 10 \frac{L_{p1}}{10} + 10 \frac{L_{p2}}{10} \right)$$

Общий уровень звуковой мощности двух источников звука с уровнями звуковой мощности 50 дБ будет равен  $10 \times \log (100000 + 100000) = 53$  дБ.

Это означает, что если два источника звука с одинаковыми уровнями звуковой мощности будут работать вместе, общий уровень мощности будет на 3 дБ выше уровня мощности отдельного источника.

Если же вместе работают два источника звука с разными уровнями звуковой мощности, результатом станет увеличение мощности менее чем на 3 дБ. Это увеличение незначительно, если разница уровней звуковой мощности двух источников превышает приблизительно 12 дБ. В случае разницы 2 дБ увеличение составит приблизительно 2 дБ, а в случае разницы 6 дБ — приблизительно 1 дБ. Для сложения уровней звуковой мощности можно использовать приведенный ниже график.

Когда звуковая волна встречается с поверх-

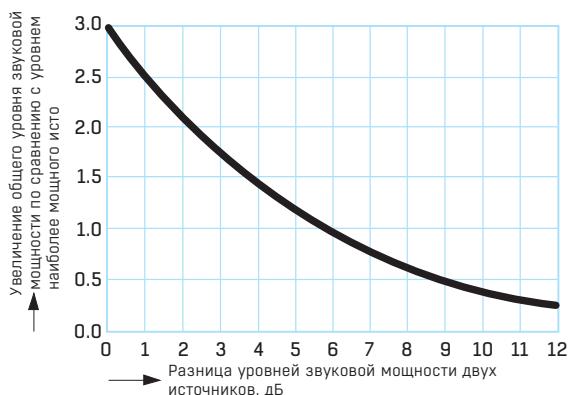
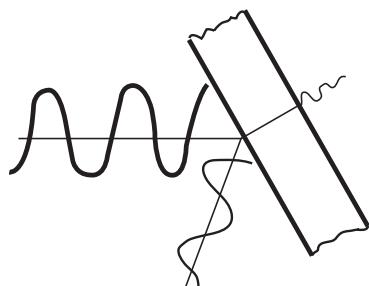


График для логарифмического сложения уровней звуковой мощности двух источников

ностью твердого тела, происходят три процесса. Часть энергии волны поглощается твердым телом, часть проходит через него насквозь и часть отражается от его поверхности.

См. рисунок ниже. Разница между уровнем

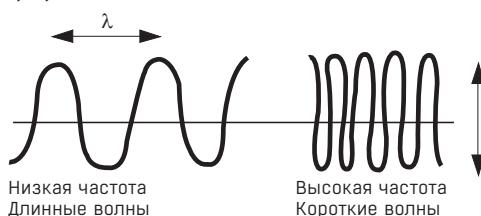


Звуковые волны сталкиваются с поверхностью

звуковой мощности первоначальной волны и уровнем звуковой мощности исходящих из тела звуковых волн называется звукопоглощением. Звукопоглощение линейно вычитается из первоначального уровня звуковой мощности.

## Частота

Количество волн, ударяющихся о нашу барабанную перепонку в течение одной секунды, называется частотой,  $f$ , Гц. Расстояние между гребнями двух соседних волн называется длиной волны,  $\lambda$ , м.



Низкие и высокие частоты

Скорость распространения звука,  $c$ , зависит от свойств среды, в которой он распространяется. Скорость распространения звука в воздухе составляет приблизительно 340 м/с. Зависимость между тремя описанными величинами представлена ниже:

$$c = f \lambda,$$

где

$c$  — скорость, м/с;

$f$  — частота, Гц;

$\lambda$  — длина волны, м.

Музыкальные инструменты способны давать чистые тона, т.е. звуки одной частоты. Механизмы обычно производят шумы в широком спектре частот, иногда с пиками мощности на определенных частотах.

Человеческое ухо воспринимает звуки в диапазоне частот от 20 до 20 000 Гц. Диапазон от 100 до 5 000 Гц мы слышим лучше всего. Для практических целей акустические данные представлены в каталогах как суммарные величины для каждой из восьми октавных полос:

Октавная полоса							
1	2	3	4	5	6	7	8
Центральная частота, Гц							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Диапазон частот, Гц							
44– 88	88– 177	177– 354	354– 707	707– 1410	1410– 2830	2830– 5660	5660– 11300

## Коррекция по шкале А

Уровень звуковой мощности удобно представлять в виде одного числа. Для этого необходимо сложить как логарифмические величины уровни звуковой мощности всех октав источника. В результате источник будет характеризоваться одним значением звуковой мощности. Данный метод часто используется для указания уровней шума вентиляторов в таблицах технических характеристик. Однако человеческое ухо не способно одинаково хорошо слышать все частоты. Мы слышим высокие частоты гораздо лучше, чем низкие. Чтобы указать уровень звукового давления с учетом нашего восприятия звуков различных частот, было предложено несколько стандартных шкал. Одной из них является шкала А.

Шкала А хорошо отображает восприятие звуков нашим ухом приблизительно до уровня 55 дБ, однако она часто используется и для более громких шумов. Например, вентиляторы нередко производят шум громкостью от 80 до 100 дБ. В каждой октавной полосе к исходным значениям уровня звукового давления добавляются корректирующие значения шкалы А. Путем логарифмического сложения полученных результатов получается суммарное значение уровня звукового давления, дБ (A).

При низких уровнях звукового давления, например, в жилых зданиях, шкала А показывает, насколько чувствительно наше ухо к различ-

ным октавным диапазонам. В таблице показаны значения коррекции по шкале А для различных октавных диапазонов.

Октавная полоса							
1	2	3	4	5	6	7	8
Центральная частота, Гц							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Коррекция, дБ (А)							
-26	-16	-9	-3	0	1	1	-1

При высоких уровнях звукового давления, например, в шумных цехах, шкала А показывает подверженность человека заболеваниям органов слуха. Во многих странах законодательно установлены максимальные допустимые уровни звукового давления на рабочем месте.

## Источники шума в вентиляционных установках

Основными источниками шума в вентиляционных установках являются вентиляторы. Как и иные механизмы, вентиляторы производят шумы в широком диапазоне частот. Интенсивность и иные характеристики этих шумов зависят от скорости воздушного потока и создаваемого вентилятором давления, а также от ряда других факторов. Акустические данные, имеющиеся в каталоге компании, основаны на результатах испытаний, проводимых в специальных камерах для испытания вентиляторов. Акустические данные представлены в таблицах технических характеристик вентиляторов в виде суммарных уровней звуковой мощности, Lwt. Прочие компоненты вентиляционных систем обычно способствуют снижению уровня шума, однако могут и сами являться его источниками. Воздуховоды должны быть надлежащим образом изолированы, т.к. звук изнутри воздуховода может проходить через его стенку в помещение вентиляционной установки.

Уровень звукового давления в помещении вентиляционной установки определяется его формой, размерами и количеством имеющихся в нем звукопоглощающих материалов.

Помимо этого, в суммарный уровень звукового давления в помещении могут вносить свой вклад другие установленные в нем механизмы.

## Связь уровня звуковой мощности и уровня звукового давления

Уровень звукового давления может быть оценен исходя из уровня звуковой мощности с помощью приведенных ниже формул.

Уровень звукового давления в воздуховоде:

$$L_p = L_w - 10 \log A,$$

где

$L_p$  — уровень звукового давления, дБ;

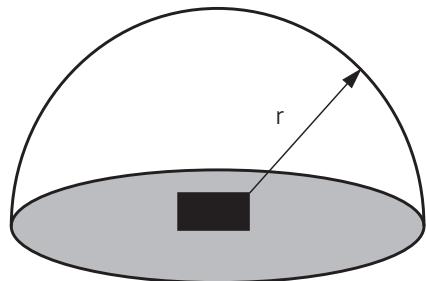
$L_w$  — уровень звуковой мощности, дБ;

$A$  — площадь поперечного сечения воздуховода, м<sup>2</sup>.

Если воздуховод имеет площадь поперечного сечения менее 1 м<sup>2</sup>, уровень звукового давления будет превышать уровень звуковой мощности. Если же площадь поперечного сечения воздуховода превышает 1 м<sup>2</sup>, наблюдается обратная картина.

## Вне помещения

Звук распространяется от источника во всех направлениях. В случае отсутствия стен и потолков распространение звука можно представить в виде полусферы.



Расстояние от источника звука

Уровень звукового давления на расстоянии  $r$  от источника выражается формулой:

$$L_p = L_w - 10 \log 2\pi r^2,$$

где

$L_p$  — уровень звукового давления, дБ;

$L_w$  — уровень звуковой мощности, дБ;

$r$  — расстояние (радиус полусфера), м.

В реальности на уровень звукового давления вне помещения влияют форма и размеры стоящих рядом зданий, а также сила и направление ветра.

## В помещении

Распространение звука в помещении определяется местонахождением его источника относительно стен, полов и потолков. Имеющиеся в помещении поверхности поглощают звук. При этом мягкие поверхности поглощают больше звуковой энергии, чем твердые. Способность поверхности поглощать звуковую энергию определяется коэффициентом звукопоглощения  $\alpha$ .

Коэффициент  $\alpha$  принимает значения от 0 до 1 и обычно зависит от частоты звука. Для описания звукопоглощения в помещении площади поверхности различных имеющихся в нем материалов умножаются на соответствующие коэффициенты звукопоглощения с суммированием полученных значений.

$$A = A_1 \cdot \alpha_1 + A_2 \cdot \alpha_2 + A_3 \cdot \alpha_3 + \dots + A_n \cdot \alpha_n,$$

где

$A$  — эквивалентная площадь звукопоглощения, м<sup>2</sup>;

$A_i$  — площади отдельных поверхностей в помещении, м<sup>2</sup>,  $i = 1 \dots n$ ;

$\alpha_i$  — коэффициенты звукопоглощения соответствующих поверхностей,  $i = 1 \dots n$ .

Помещение вентиляционной установки, как правило, имеет твердые поверхности. Стены, пол и потолок этого помещения обычно не покрыты мягкими материалами. Однако воздуховоды имеют изоляцию, благодаря чему звукопоглощение в помещении несколько увеличивается.

Другим параметром, описывающим звукопоглощение в помещении, является время реверберации. Время реверберации — это время, необходимое для того, чтобы после внезапного отключения источника звука уровень звукового давления в помещении упал на 60 дБ.

$$T = 0,16 \cdot \frac{V}{A}$$

где

$T$  — время реверберации, с;

$V$  — объем помещения, м<sup>3</sup>;

$A$  — эквивалентная площадь звукопоглощения, м<sup>2</sup>.

Данная формула применима к помещениям с

низким звукопоглощением ( $\alpha < 0,2$ ), с которыми обычно и приходится иметь дело на практике.

В помещения вентиляционных установок коэффициент звукопоглощения чрезвычайно низок и обычно лежит в пределах от 0,05 до 0,1. Это означает, что уровень звукового давления в таком помещении обычно приблизительно равен сумме уровней звуковой мощности механизмов в помещении.

## Уровень звукового давления в рабочих и жилых помещениях

Вентиляционные установки подают воздух в помещения всех типов, от больших промышленных цехов до номеров в гостиницах. В некоторых помещениях поверхности чрезвычайно твердые, тогда как в других — мягкие. Существуют таблицы средних значений звукопоглощения для помещений различного типа.

Звук способен проникать в помещение не только по воздуховоду, но и через стены, пол и потолок, а также по воздуху. При расчете суммарного уровня звукового давления необходимо принять во внимание все указанные пути.

## Как выбрать тихую вентиляционную установку

Интенсивность шума от вентиляционной установки определяется несколькими факторами.

**Ниже перечислены некоторые особенности конструкции вентиляционных установок, способствующие снижению шума:**

1. Низкая скорость движения воздуха.
2. Большой диаметр вентилятора.
3. Корпус с толстой изоляцией (в разумных пределах).

Следует помнить, что звук может проникать в воздуховод из помещения вентиляционной установки, тем самым сводя на нет усилия, направленные на обеспечение тишины. Отводы воздуховодов и иные их компоненты также могут стать источниками шума, поэтому в ряде случаев целесообразна установка концевого глушителя рядом с помещением.

Также не следует забывать о том, что даже глушители сами являются источниками шума. Это минимальный уровень шума, который может быть достигнут при использовании обычных глушителей.



## Резюме

Однородный и не беспокоящий звук является, наряду с оптимальной температурой и оптимальной скоростью воздуха, одним из важнейших требований к вентиляционной системе. Звук представляет собой изменения давления воздуха (или иной среды), вызывающие колебания барабанной перепонки уха. Среднеквадратичное значение этих изменений давления называется эффективным звуковым давлением  $p$ , Па.

Исходя из эффективного звукового давления и опорного значения звукового давления (наименьшего слышимого уровня звука), можно рассчитать уровень звукового давления.

Понятие уровня звукового давления описывает интенсивность звука в какой-либо точке окружающей среды. Для описания суммарного количества звуковой энергии, производимой механизмом, используется понятие звуковой мощности.

Уровни звукового давления и звуковой мощности являются логарифмическими величинами, поэтому они должны складываться логарифмически.

Количество волн, ударяющихся о нашу барабанную перепонку в течение одной секунды, называется частотой,  $f$ , Гц. Расстояние между гребнями двух соседних волн называется длиной волны,  $\lambda$ , м. Скорость распространения звука,  $c$ , зависит от свойств среды, в которой он распространяется.

Эта скорость может быть рассчитана исходя из длины волны  $\lambda$  и частоты  $f$ .

Уровень звуковой мощности удобно представлять в виде одного числа. Для этого необходимо сложить как логарифмические величины уровни звуковой мощности всех октав источника. В результате источник будет характеризоваться одним значением звуковой мощности. Чтобы указать уровень звукового давления с учетом нашего восприятия звуков различных частот, было предложено несколько стандартных шкал. Одной из них является шкала А.

Звук распространяется от источника во всех направлениях. В случае отсутствия стен и потолков распространение звука можно представить в виде полусферы. Аналогично звук распространяется и в помещении, однако часть его энергии поглощается встречающимися на его пути поверхностями.

При этом мягкие поверхности поглощают больше звуковой энергии, чем твердые. Способность поверхности поглощать звуковую энергию определяется коэффициентом звукопоглощения .

Интенсивность шума от вентиляционной установки определяется несколькими факторами.

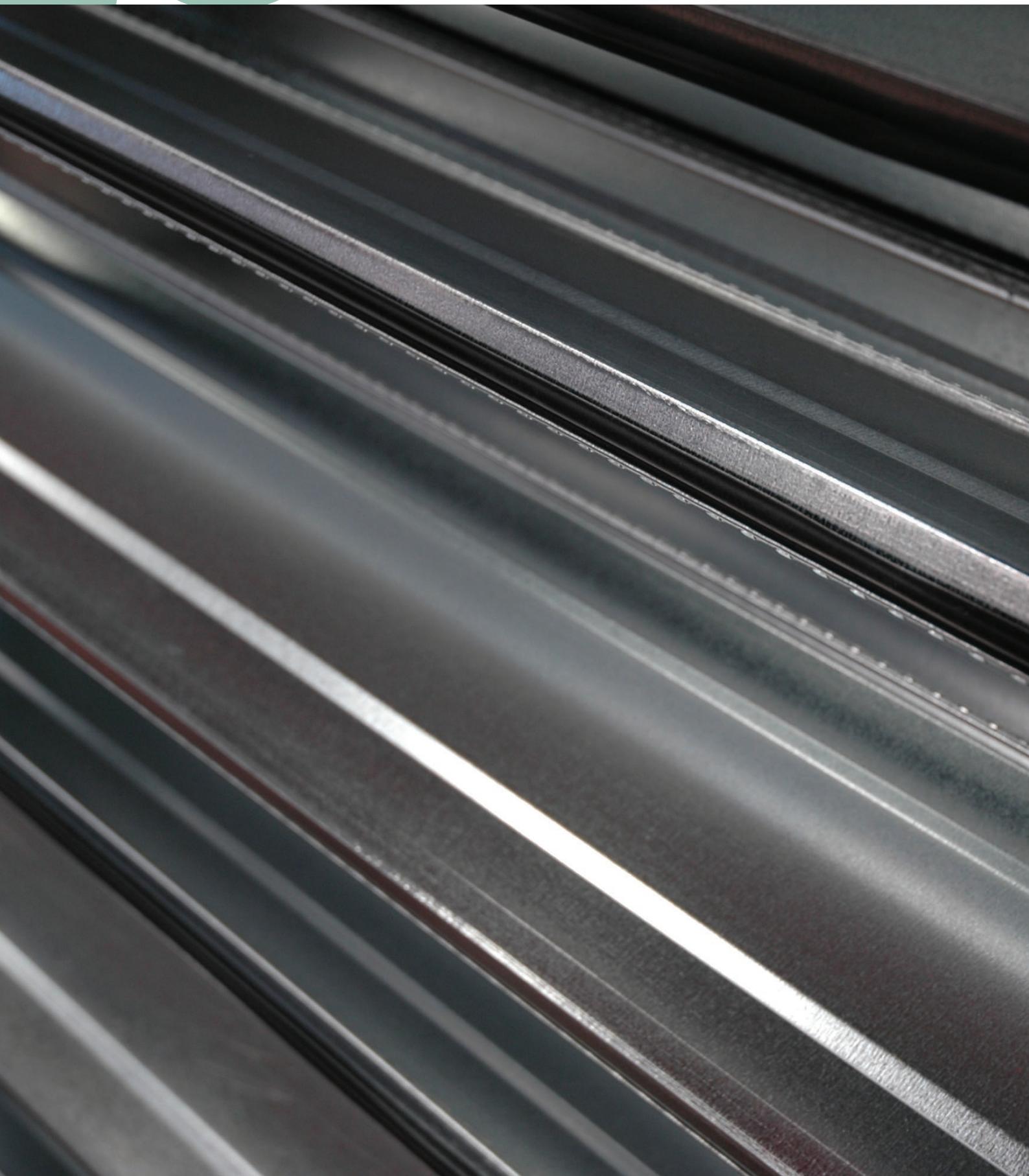
**Ниже перечислены некоторые особенности конструкции вентиляционных установок, способствующие снижению шума:**

1. Низкая скорость движения воздуха.
2. Большой диаметр вентилятора.
3. Корпус с толстой изоляцией.



# 10

Воздушные клапаны



## Краткое содержание главы

- Воздушные клапаны в вентиляционных установках.
  - Регулирование расхода воздуха.
  - Смешение потоков воздуха.
  - Регулирование расхода воздуха в режиме обхода.
  - Запорные воздушные клапаны.
- Функциональные свойства воздушных клапанов.
- Свойства смеси.
- Утечки воздуха.



Воздушные клапаны предназначены для регулирования расхода воздуха в воздуховоде или вентиляционной установке.

В вентиляционных установках воздушные клапаны выполняют следующие функции:

- Регулирование расхода воздуха.
- Смешение потоков воздуха.
- Регулирование расхода воздуха в режиме обхода.
- Запорные воздушные клапаны.



Функционирование воздушного клапана

## Регулирование расхода воздуха

В процессе поворота створок клапана из горизонтального положения в вертикальное происходит постепенное увеличение перепада давления на клапане. Увеличение перепада давления приводит к снижению расхода воздуха.

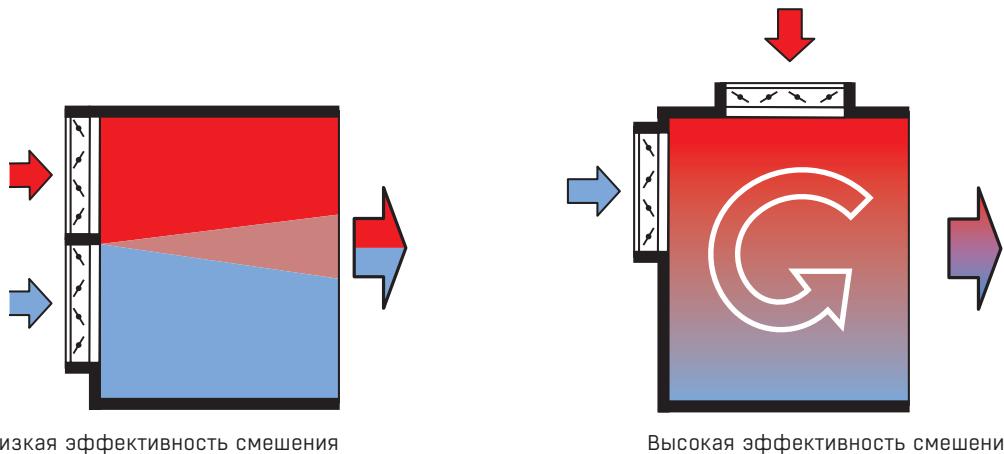
## Смешение потоков воздуха

В системах, допускающих использование возвратного воздуха, воздушные клапаны используются для регулирования расхода возвратного, свежего и удаляемого воздуха.

Процесс смешения регулируется таким образом, чтобы обеспечить минимальное требуемое содержание свежего воздуха в полученной смеси, сведя при этом к минимуму потребность в обогреве или охлаждении.



Смешение



## Свойства смеси

С практической точки зрения в вопросе свойств смеси представляет интерес лишь случай двух воздушных клапанов в секции приточного воздуха вентиляционной установки.

Два клапана установлены перед смесительной камерой. Один из них предназначен для регулирования расхода наружного воздуха, а другой – для регулирования расхода возвратного воздуха.

Два потока воздуха встречаются друг с другом в смесительной камере. Здесь по возможности должно достигаться полное смешение потоков, результатом чего должен стать выходящий из камеры поток воздуха с постоянной температурой на всей площади его поперечного сечения.

Способность смесительной камеры смешивать теплый и холодный воздух количественно выражается с помощью эффективности смешения. Определение данного параметра дается в стандарте Европейского комитета по стандартизации.

Высокую эффективность смешения демонстрируют смесительные камеры, в которых воздушные потоки встречаются под прямым углом. Если же потоки выходят из одной стенки камеры, эффективность смешения оказывается более низкой.

При низкой эффективности смешения выходящий из камеры поток воздуха имеет неоднородную температуру. В нижней части функциональной секции воздух является более холодным. Это может стать причиной ненадлежащего функционирования следующего далее оборудования, например, теплообменников и фильтров.

Поток холодного воздуха может даже вызвать замерзание и разрыв теплообменника. Подобные аварии возможны в случае неисправности датчика температуры, расположенного после смесительной камеры.

## Регулирование расхода воздуха в режиме байпас

Воздушные клапаны могут также использоваться для регулирования расхода воздуха, подаваемого через байпас в обход какого-либо узла вентиляционной установки, например, пластинчатого теплообменника.

Подача части воздуха в обход пластинчатого теплообменника позволяет регулировать количество утилизированной теплоты и, таким образом, температуру приточного воздуха. Помимо этого, функция байпас может использоваться в условиях оттаивания. В вентиляционных установках с роторными теплообменниками воздушные клапаны могут применяться для снижения давления на стороне удаляемого воздуха с целью предотвращения утечек на стороне приточного воздуха.

Функция байпас иногда используется для регулирования расхода через охлаждающий и нагревающий теплообменники. Функциональная секция вентиляционной установки разделена на две подсекции, одна из которых представляет собой теплообменник, а другая — воздушный клапан. Для регулирования расхода воздуха в максимально широких пределах теплообменник также может быть оснащен передним воздушным клапаном. В случае нагревающих теплообменников данный метод позволяет регулировать температуру приточного воздуха без снижения расхода воды в теплообменнике. Благодаря этому удается предотвратить замерзание теплообменника в условиях холодного климата. В

случае охлаждающих теплообменников обходной воздушный клапан может использоваться для регулирования параметров приточного воздуха в определенных пределах путем смешения потоков различной температуры и влажности. Однако при этом существует риск образования конденсата на внутренних поверхностях оборудования, расположенного после теплообменника.

## Запорные воздушные клапаны

Существует несколько различных типов запорных воздушных клапанов. Каждый из этих типов имеет собственное назначение. Регулирующие клапаны простой конструкции, такие как воздушные клапаны с непараллельными створками, используются для перекрытия воздуховода при остановке вентилятора. Клапаны более сложной конструкции используются для противопожарной и противодымной защиты. Эти клапаны в штатном режиме полностью открыты, а при обнаружении дыма или повышения температуры быстро закрываются для предотвращения распространения огня и дыма.

Еще одним типом запорных клапанов являются воздушные клапаны прямого действия. Клапаны данного типа часто используются на стороне выпуска вытяжного вентилятора с целью предотвратить вызываемое ветром движение воздуха в воздуховоде в обратном направлении при отключенном вентиляторе.



Открытый воздушный клапан. За клапаном виден фильтр



Закрытый воздушный клапан

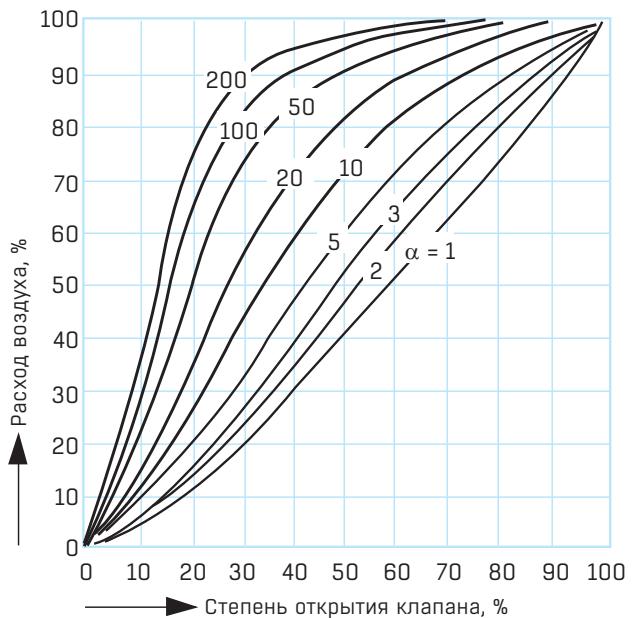
## Створки воздушного клапана

Воздушные клапаны могут иметь параллельные или непараллельные створки. Эти два типа клапанов различаются по своим функциональным характеристикам. Помимо этого, функциональные характеристики воздушных клапанов зависят от перепада давления в системе. Если он велик, необходим большой перепад давления на воздушном клапане, при условии что расход воздуха будет регулироваться с помощью клапана. Обычно перепад давления в системе значительно превышает перепад давления на открытом воздушном клапане.

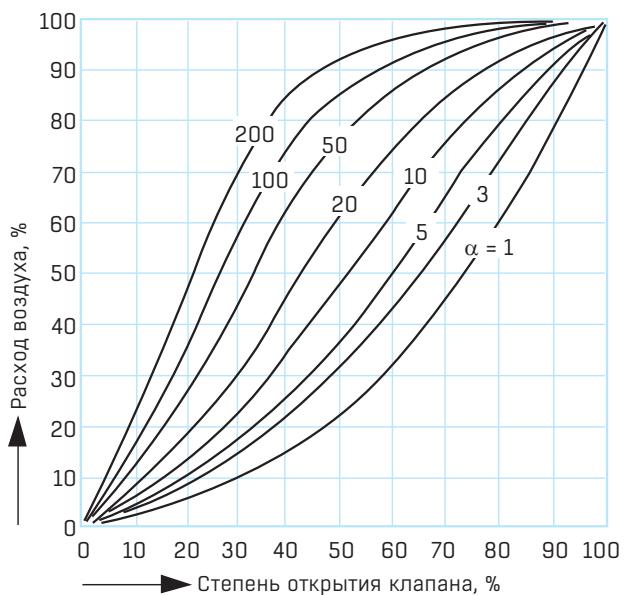
На графиках показаны примеры зависимости расхода воздуха от степени открытия воздушных клапанов при различных значениях параметра  $\alpha$ , являющегося отношением перепада давления во всей системе к перепаду давления на полностью открытом воздушном клапане.

Оптимальным для данного параметра является значение, при котором наблюдается линейная зависимость между степенью открытия воздушного клапана и расходом воздуха. Из графиков видно, что при больших значениях параметра  $\alpha$  клапаны с непараллельными створками обеспечивают более линейную зависимость между степенью открытия и расходом, т.е. являются более предпочтительными.

Поэтому в вентиляционных установках обычно используются клапаны данного типа.



Воздушный клапан с параллельными створками.



Воздушный клапан с непараллельными створками

## Утечка воздуха из закрытого воздушного клапана

Объем утечки воздуха из закрытого воздушного клапана является важной характеристикой клапана, описанной в стандарте Европейского комитета по стандартизации.

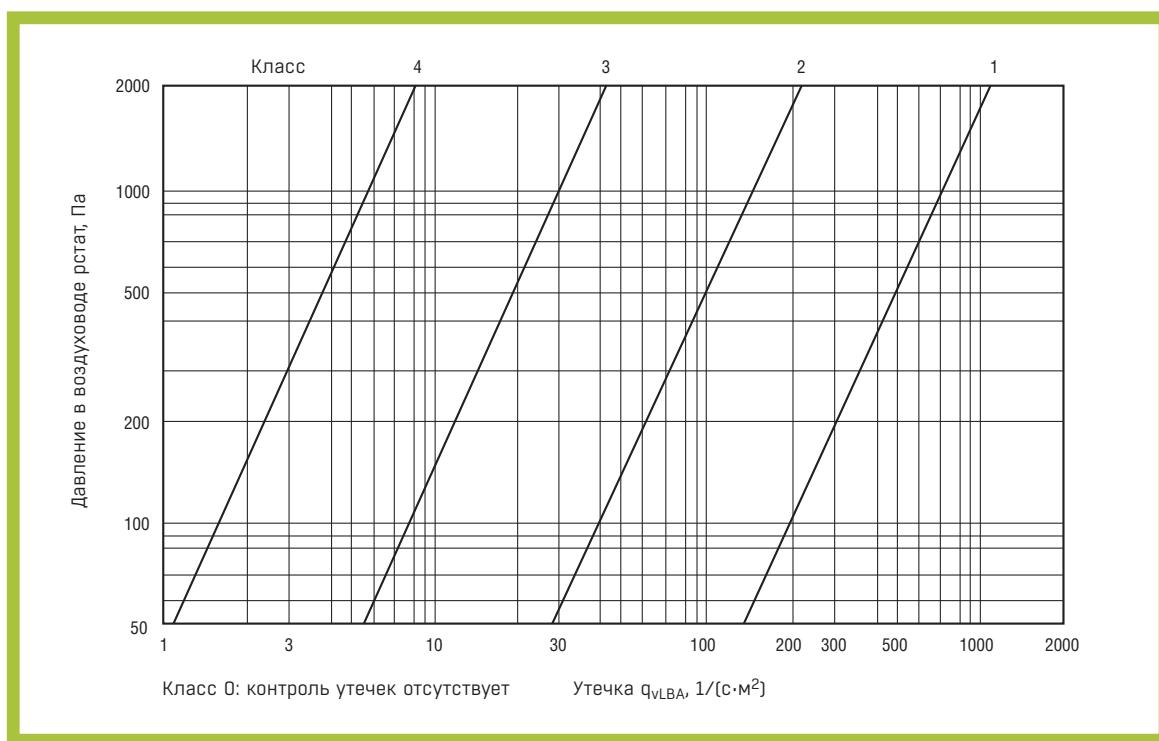
Герметичность закрытых воздушных клапанов определяется жесткостью створок, а также качеством прокладок в местах контактов створок друг с другом и с корпусом клапана.

### Классы герметичности клапанов вентиляционных установок

Классы Европейского комитета по стандартизации	4	3	2	1
------------------------------------------------	---	---	---	---

По герметичности клапаны подразделяются на классы 0, 1, 2, 3 и 4.

Классы 1, 2, 3, 4 На рисунке показаны допустимые максимальные утечки  $q_{VLBA}$ ,  $1 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$  через закрытые створки клапана в зависимости от статического давления в воздуховоде  $p_s$ , Па.



Классификация клапанов по объему утечек через закрытые створки

## Утечка воздуха через корпус воздушного клапана

Объем утечки воздуха через корпус воздушного клапана также является характеристикой, описанной в стандарте Европейского комитета по стандартизации.

### Необходимый крутящий момент

При выборе подходящего привода воздушного клапана требуется знать величину крутящего момента, необходимого для поворота створок клапана.

### Давление

Каждый воздушный клапан рассчитан на определенный перепад давления, который не должен превышаться. Поэтому при проектировании вентиляционных установок следует принимать во внимание технические характеристики клапанов.



## Резюме

Воздушные клапаны предназначены для регулирования расхода воздуха, смешения потоков воздуха и перекрытия воздуховодов.

### **В вентиляционных установках воздушные клапаны выполняют следующие функции:**

- Регулирование расхода воздуха.
- Смешение потоков воздуха
- Регулирование расхода воздуха в режиме обхода.
- Перекрытие воздуховодов.

#### Створки воздушного клапана

Воздушные клапаны могут иметь параллельные или непараллельные створки. Эти два типа клапанов различаются возможностями регулировки. Функциональные характеристики воздушных клапанов зависят от перепада давления в системе. В вентиляционных установках обычно используются воздушные клапаны с непараллельными створками как более подходящие по своим характеристикам.

### **Свойства смеси**

Смесительные камеры, в которых воздушные потоки встречаются под прямым углом, демонстрируют более высокую эффективность смешения.

Если же потоки выходят из одной стенки камеры, эффективность смешения оказывается не столь высокой. При низкой эффективности смешения выходящий из камеры поток воздуха имеет неоднородную температуру. В нижней части функциональной секции воздух является более холодным.

### **Герметичность и утечки**

Герметичность закрытых воздушных клапанов определяется жесткостью створок, а также качеством прокладок в местах контактов створок друг с другом и с корпусом клапана. Допустимые объемы утечек для клапанов описаны в стандарте Европейского комитета по стандартизации. При выборе подходящего привода воздушного клапана требуется знать величину крутящего момента, необходимого для поворота створок клапана.



# 11

## Фильтры



## Краткое содержание главы

- Назначение фильтров.
- Загрязнения в окружающем воздухе.
- Принцип работы фильтра твердых частиц.
- Испытания и классификация фильтров твердых частиц.
- Перепад давления на фильтре твердых частиц.
- Угольные фильтры.
- Фильтры в вентиляционных установках.
- Монтаж



воздуха, причем большая часть этого объема (около 80%) приходится на воздух в помещениях. По данным исследований, воздух в помещениях имеет столь низкое качество, что это часто приводит к различным заболеваниям. Требования к качеству воздуха зависят от назначения помещения.

Требования к воздуху в офисных помещениях с одной стороны, и в операционных и чистых производственных помещениях с другой стороны, различаются кардинально. Соответственно различаются и требования к фильтрам.

## Загрязнения в окружающем воздухе.

Воздух вокруг нас содержит огромное количество загрязнений. Многие из них имеют естественное происхождение. Это, например, вирусы, пыльца, споры растений. Другие являются результатом деятельности человека. Например, продукты горения, выхлопы автомобилей, промышленные выбросы. Вторая категория обычно является более опасной для здоровья, поскольку содержит большее количество вредных веществ и чаще попадает в легкие. Загрязнения в виде твердых частиц или агломератов удаляются фильтрами твердых частиц, а газообразные загрязнения — угольными фильтрами.

Частицы загрязнений имеют самые разные размеры, см. рисунок на следующей странице. Это могут быть молекулы, вирусы размером менее 0,01 мкм или, например, частицы пыльцы и пыли размером до 100 мкм.

Частицы размером более 10 мкм достаточно быстро осаждаются. Вблизи поверхности земли их концентрация в три-четыре раза выше. Лишь примерно 0,1% частиц в атмосфере вблизи поверхности земли имеет диаметр более 1 мкм, однако на них приходится около 70% всей массы пыли.

Для удаления частиц различных размеров используются разные фильтры. Чтобы отфильтровать крупные частицы, достаточно простого фильтра с довольно грубыми волокнами и большими расстояниями между ними. Для удаления мелких частиц используются тонкие фильтры или высокоеффективные фильтры HEPA с тканью из волокон малого диаметра и с малым расстоянием между волокнами.

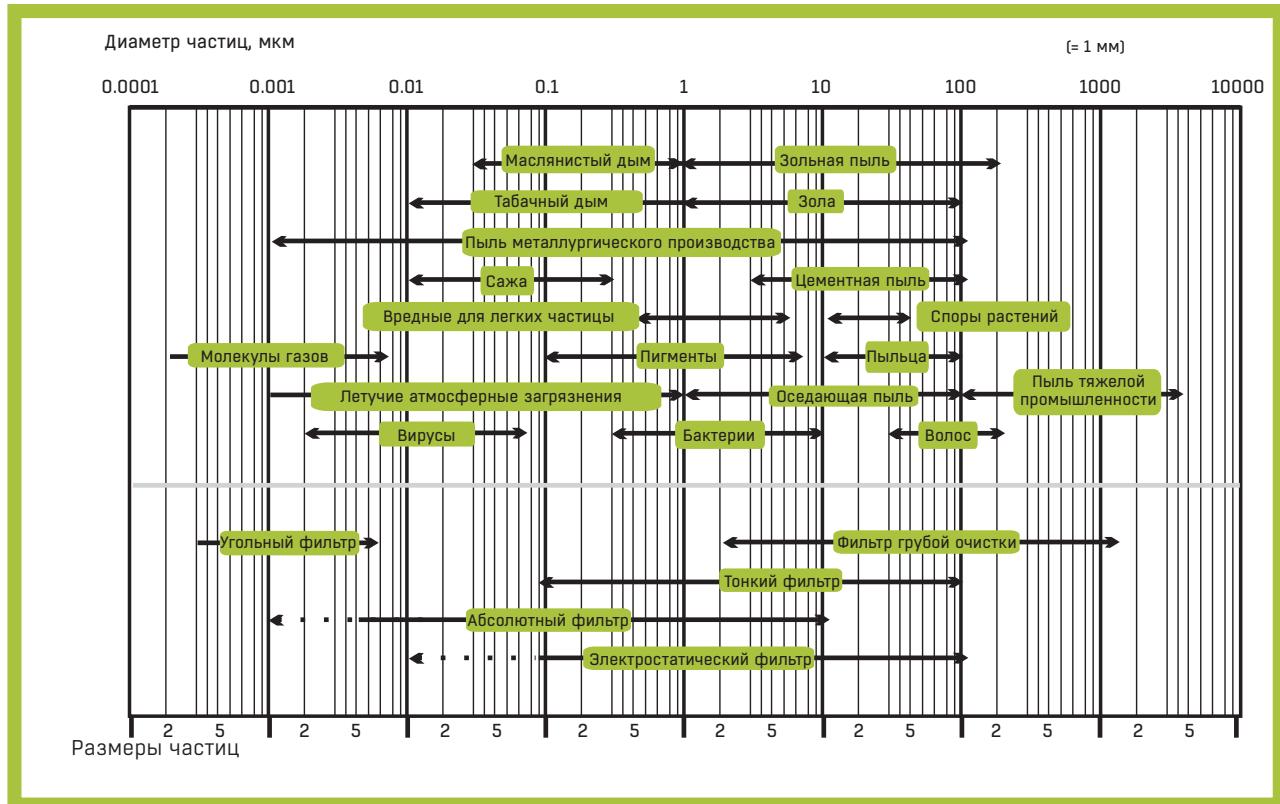
Загрязнения воздуха, источниками которых являются человек, а также различные материалы и технологические процессы, должны удаляться с помощью вентиляционных систем. Наружный воздух, подаваемый в помещение, должен быть максимально чистым.

Очистка воздуха осуществляется с помощью фильтров. В большинстве вентиляционных систем фильтры располагаются непосредственно за впускным отверстием вентиляционной установки. Благодаря этому далее в установку попадает уже очищенный воздух. Удаляемый воздух, т.е. воздух из помещений, нередко очищается тем же способом. Фильтр позволяет защитить вентиляционную установку и воздуховоды приточного воздуха от загрязнений, тем самым сокращая потребность в чистке и улучшая качество воздуха в помещениях без увеличения кратности воздухообмена.

Если воздух подается в операционные или в чистые производственные помещения, он должен подвергаться особо тщательной фильтрации. Для этого применяются высокоеффективные фильтры твердых частиц HEPA.

Угольные фильтры используются в аэропортах, музеях, а также для очистки удаляемого воздуха кухонь, например, для очистки воздуха от посторонних газов.

Вентиляционные системы предназначены для обеспечения высокого качества воздуха в помещениях. Ежедневно мы вдыхаем 20–30 м<sup>3</sup>



## Принцип работы фильтра твердых частиц

В фильтре твердых частиц имеются один или нескольких слоев ткани, состоящей тонких стеклянных или полимерных волокон. Эта ткань уложена в мешки и закреплена на стеклянной, пластмассовой или деревянной раме. Диаметр волокна варьируется в пределах 1-10 мкм. Стекловолокно имеет меньший диаметр, чем полимерные волокна. Также встречаются простые фильтры с алюминиевым волокном. Они являются моющимися.

По мере прохождения воздуха через фильтр некоторая часть содержащихся в нем частиц застревает на волокнах фильтра или между ними. Чем больше в фильтре волокон и чем они тоньше, тем больше частиц будет удалено из воздуха.

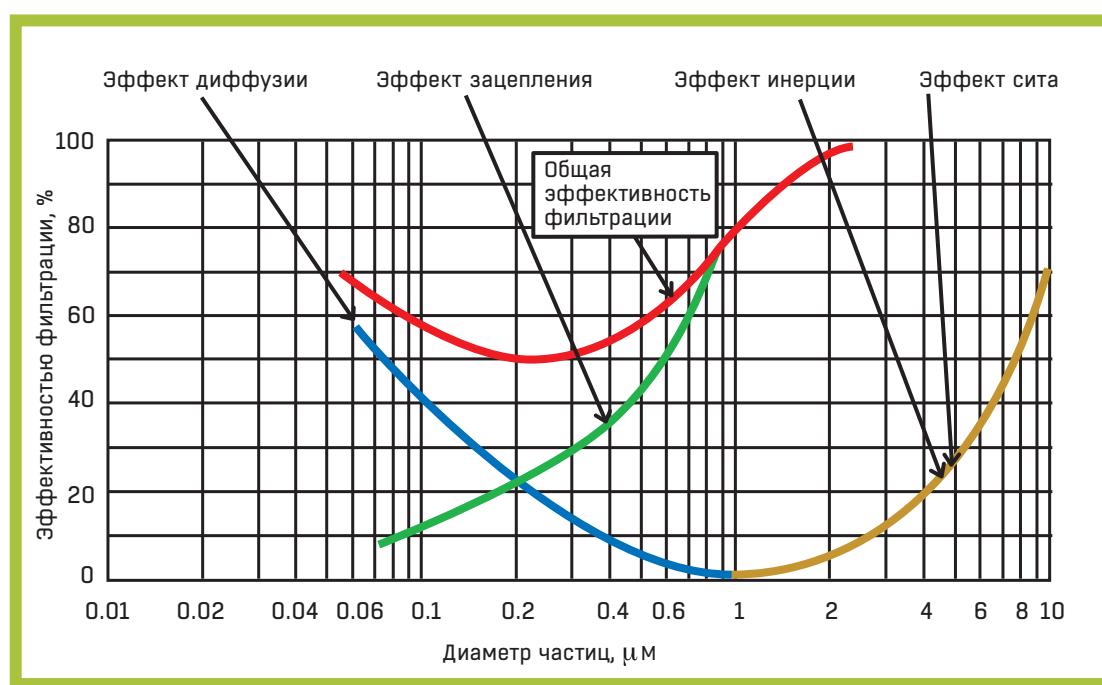
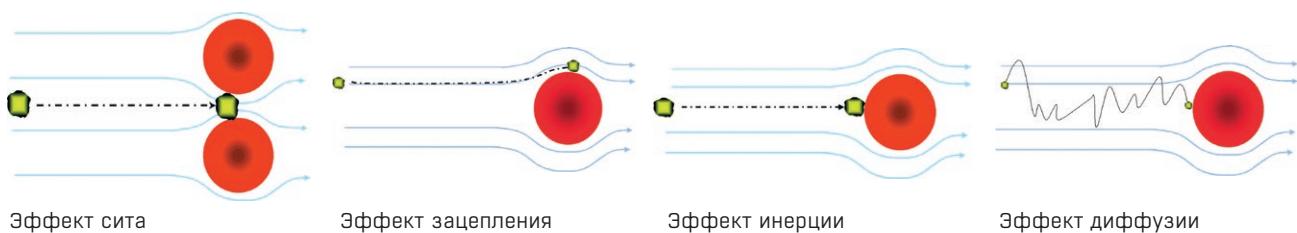
По мере забивания фильтра пылью на нем увеличивается перепад давления. При этом его способность задерживать пыль также возрастает. Увеличение перепада давления снижает расход воздуха в вентиляционной системе или приводит к росту энергопотребления вентиляторов, если в конструкции вентиляционной установки предусмотрено автоматическое поддержание постоянного расхода. Для снижения перепада давления на фильтре и увеличения срока его службы используются фильтры с несколькими мешками. Способность фильтра задерживать частицы пыли определяется главным образом четырьмя механическими эффектами и одним

электростатическим. Механическими эффектами являются эффект сите, эффект зацепления, эффект инерции и эффект диффузии.

Электростатический эффект наблюдается в фильтрах из некоторых синтетических материалов. Данный эффект проявляется одновременно с механическими эффектами, однако довольно быстро угасает. После этого остаются лишь механические эффекты. Общая эффективность фильтрации определяется суммарным действием всех указанных эффектов. На рисунке ниже показана значимость каждого из четырех механических эффектов для стекловолоконного фильтра класса F7. Как видно из рисунка,

эффективность фильтрации зависит от размера частиц и является минимально для частиц диаметром около 0,25 мкм. Наличие подобного минимума характерно для всех фильтров частиц. Соответствующий размер частиц называется размером частиц с наибольшей проникающей способностью. Проникающая способность частиц, %, определяется как 100% минус эффективность фильтрации, %.

Для частиц малого размера основным эффектом является эффект диффузии. Для обеспечения высокой эффективности фильтрации частиц малого размера фильтр должен иметь большое количество тонких волокон.



Эффективность фильтрации фильтра класса F7

## Испытания и классификация фильтров твердых частиц

Фильтры твердых частиц, предназначенные для вентиляционных установок, испытываются и классифицируются согласно стандарту Европейского комитета по стандартизации EN 779: 2002.

Эффективность фильтрации, выраженная в процентах, изменяется с помощью аэрозоля с диаметром частиц 0,4 мкм. Испытания проводятся в несколько этапов, на каждом из которых в воздух добавляется синтетическая пыль вплоть до достижения конечного перепада давления. Затем рассчитывается среднее значение эффективности фильтрации  $E_m$ .

Если эффективность фильтрации  $E_m$  ниже 40%, это грубый фильтр (класс G). Такие фильтры классифицируются в соответствии с их способностью задерживать синтетическую пыль  $A_m$ . Если значение  $E_m$  больше или равно 40%, это тонкий фильтр (класс F). Такие фильтры классифицируются в соответствии со средним значением их способности задерживать частицы диаметром 0,4 мкм в условиях испытания, в котором синтетическая пыль подается на фильтр поэтапно вплоть до достижения конечного пере-

пада давления 450 Па.

В стандарте EN 779 имеется приложение, в котором описана методика удаления электрического заряда с волокон фильтра.

Благодаря этой методике имеется возможность исключить действие электростатического эффекта. После удаления заряда фильтр должен быть подвергнут испытаниям, результаты которых заносятся в протокол испытаний.

Фильтры с чрезвычайно высокой эффективностью фильтрации, например, фильтры HEPA и ULPA, классифицируются согласно стандарту EN 1822.

В основе данной классификации лежит эффективность фильтрации частиц с наибольшей проникающей способностью, т.е. частиц, на которых фильтр демонстрирует наиболее низкую эффективность фильтрации. Каждый фильтр HEPA класса H13 и H14 проходит индивидуальные испытания на заводе-изготовителе.

Классификация фильтра согласно стандарту EN779				Другие классификации фильтров	
Класс	Конечный перепад давления, Па	Способность задерживать синтетическую пыль $A_m$	Среднее значение эффективности фильтрации $E_m$	EUROVENT 4/5	ASHRAE
G 1	250	$50 \leq A_m < 65$	-		
G 2	250	$65 \leq A_m < 80$	-		
G 3	250	$80 \leq A_m < 90$	-	EU3	G85
G 4	250	$90 \leq A_m$	-	EU3	G90
F 5	450	-	$40 \leq E_m < 60$	EU5	F45
F 6	450	-	$60 \leq E_m < 80$	EU6	F65
F 7	450	-	$80 \leq E_m < 90$	EU7	F85
F 8	450	-	$90 \leq E_m < 95$	EU8	F95
F 9	450	-	$95 \leq E_m$		

## Перепад давления на фильтре твердых частиц

В процессе работы фильтров твердых частиц в них накапливается пыль, в результате чего перепад давления на них постоянно увеличивается. Чем больше площадь фильтра, тем медленнее происходит это увеличение. Поставщики вентиляционного оборудования указывают надлежащие конечные значения перепада давления на фильтре, а также соответствующие штатные значения. Последнее обычно рассчитывается как среднее между начальным (демонстрируемым чистым фильтром) и конечным значениями перепада давления. Штатное значение перепада давления учитывается при выборе вентилятора.

Если вентилятор в вентиляционной системе

работает с постоянной скоростью, расход воздуха может падать по мере засорения фильтра. Величина этого падения зависит от характеристик вентилятора, а также от отношения перепада давления на фильтре к общему перепаду давления в вентиляционной системе.

Если же скорость вентилятора регулируется с целью обеспечения постоянного расхода воздуха, она будет расти по мере засорения фильтра.

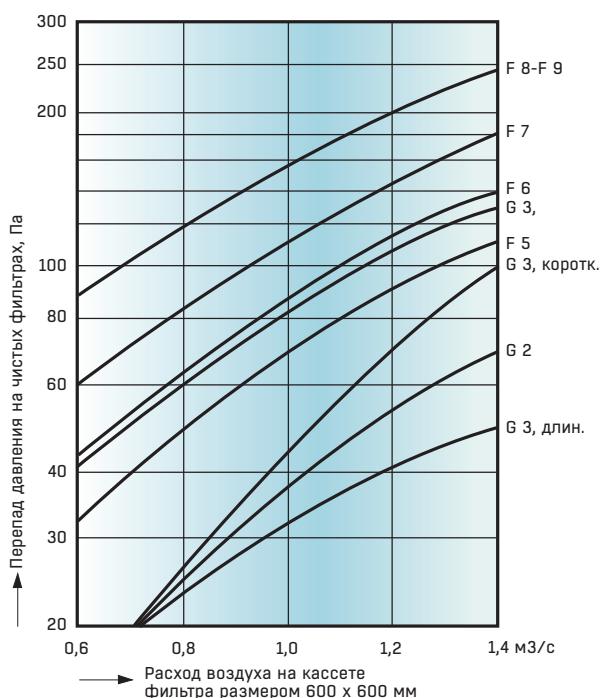
Ниже представлены типовые графики зависимости перепада давления на чистых фильтрах от расхода воздуха при использовании кассет фильтра размером 600 x 600 мм.

В таблице приводятся значения рекомендуемого увеличения давления для фильтров различных классов для определения конструкции и конечного перепада давления.

### Рекомендуемое увеличение давления для чистого фильтра, Па

	G 2	G 3 – G 4	F 5	F 6 – F 9
Для уменьш. перепада давления	35	35	50	50
Для конечного перепада давления	70	70	100	100

### Перепад давления на чистых фильтрах, Па



## Угольные (сорбционные) фильтры

Фильтры, удерживающие газообразные вещества, позволяют удалить нежелательные запахи, а также очистить воздух от иных газообразных примесей. Как правило, в качестве таковых используются угольные фильтры. В них воздух проходит через слой активированного угля. Это микропористый материал, площадь активной поверхности которого достигает 1500 м<sup>2</sup> на грамм. Для активированного угля характерна плотная сеть пор и трещин, в которых особенно эффективно адсорбируются большие молекулы, в частности, молекулы пахучих веществ.

Путем пропитки угля различными химическими веществами он может быть превращен в селективный адсорбент одного или нескольких газов, например, сероводорода, оксида серы или аммиака. Угольные фильтры характеризуются эффективностью фильтрации, близкой к 100%. Данное значение остается практически неизменным до приближения к адсорбционному насыщению, после чего резко падает. После этого фильтр может быть реактивирован путем нагрева. Важным параметром, влияющим на эффективность фильтрации, является продолжительность контакта воздуха с углем. Чем ниже концентрация удаляемого вещества, тем более длительным должен быть контакт.

В настоящее время не существует европейских стандартов испытания и классификации угольных фильтров. Имеется лишь стандарт компании Nordtest.

## Предварительные фильтры

Предварительные фильтры вентиляционных установок позволяют продлить срок службы более дорогостоящих тонких фильтров. В качестве предварительных фильтров обычно используются грубые фильтры классов G3–G4. Несмотря на то, что эти фильтры простой конструкции задерживают лишь крупные частицы загрязнений, наибольшая массовая доля пыли остается именно на них.

## Фильтры в вентиляционных установках

Кассеты фильтров выпускаются в нескольких типоразмерах. Наиболее распространены так называемые полноразмерные (600 x 600 мм) и половинчатые (600 x 300 мм) кассеты.

При достижении конечного значения перепада давления фильтры должны заменяться. Если воздух достаточно чист, достижение указанного значения может потребовать весьма продолжительного времени. Поэтому из гигиенических соображений рекомендуется заменять фильтры не реже одного раза в год. Это можно делать, например, по окончании теплого времени года, когда заканчивается сезон пыльцы и иных загрязнителей биологического происхождения. После этого фильтр будет оставаться сравнительно чистым в течение длительного времени.



## Тонкие фильтры

В тонких фильтрах используются волокна меньшего диаметра по сравнению с грубыми фильтрами. Такие фильтры способны задерживать частицы любого диаметра вплоть до субмикронных. Частицы малого диаметра обычно считаются более опасными для здоровья, чем крупные.

Тонкие фильтры выпускаются в мешочном и компактном исполнениях. Мешочные фильтры имеют значительную поверхность, что способствует снижению перепада давления на фильтре и повышению эффективности фильтрации. Компактные фильтры используются в условиях ограниченного пространства. Такой фильтр представляет собой плотно уложенный гармошкой фильтрующий материал, закрепленный на раме. Несмотря на незначительную общую длину компактных фильтров, их плотная укладка в сочетании с использованием тонкого фильтрующего материала обеспечивают достаточно большую площадь фильтра при приемлемом перепаде давления.

В большинстве случаев для обеспечения удовлетворительной защиты вентиляционной



Мешочный фильтр



Компактный фильтр

установки, трубопроводов приточного воздуха и помещений от загрязнений достаточно использовать фильтры твердых частиц классов F5–F7. В черте города воздух является значительно более загрязненным по причине наличия большого количества автомобилей. В этих условиях со стороны приточного воздуха рекомендуется использовать тонкие стекловолоконные фильтры классов F8–F9.

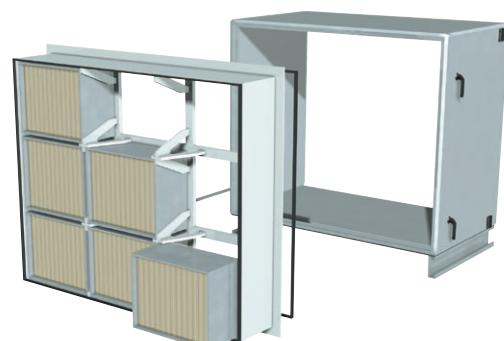
## Высокоэффективные фильтры HEPA

Высокоэффективные фильтры HEPA применяются для особо тонкой очистки воздуха. Фильтр данного типа представляет собой тонкий фильтрующий материал с диаметром волокон около 1 мкм, чрезвычайно плотно уложенный гармошкой в деревянную или металлическую раму. Площадь фильтрующего материала может более чем в 70 раз превосходить площадь фронтального сечения рамы, в связи с чем скорость движения воздуха через фильтр является незначительной.

Эта особенность фильтра способствует снижению перепада давления и повышению эффективности фильтрации.

Тем не менее, данные фильтры характеризуются довольно большим перепадом давления по сравнению с традиционными тонкими фильтрами. С другой стороны, в правильно спроектированной и собранной вентиляционной установке с предварительной фильтрацией рост перепада давления на фильтре HEPA с течением времени является незначительным.

Для обеспечения многолетнего функционирования фильтров HEPA перед ними в обязательном порядке должны быть установлены предварительные и тонкие фильтры высокого класса. Фильтры HEPA используются в случаях, когда их



защита с помощью предварительных фильтров (например, класса G3) является экономически обоснованной.

Как правило, используются длинные фильтры, что позволяет повысить общую рентабельность вентиляционной системы. Короткие фильтры следует использовать лишь при недостатке свободного пространства. Фильтры HEPA с рамой из листовой стали способны работать в условиях влажности воздуха 100%, однако при этом не следует допускать конденсации влаги на фильтрах.

## Угольные фильтры

Угольные фильтры, в т.ч. фильтры с пропиткой, позволяют удалить кухонные запахи в помещениях ресторанов быстрого питания, снизить концентрацию паров авиационного топлива в зданиях аэропортов, а также удалить вызывающие коррозию вещества и иные вредные примеси из воздуха в помещениях архивов, музеев и других подобных учреждений.

Срок службы угольного фильтра плохо поддается прогнозированию. Он зависит от расхода воздуха, концентрации загрязняющих веществ в воздухе (которые обычно известны лишь приблизительно), а также от количества угля в фильтрующем слое.

Также бывает непросто определить, что угольный фильтр нуждается в замене. Долгое время находящийся в работе фильтр может задерживать большую часть загрязнителей в условиях их значительной концентрации, однако при этом демонстрировать нехарактерную для свежего



фильтра низкую эффективность в условиях малой концентрации загрязнителей.

Угольные фильтры с пропиткой могут быть эффективны в отношении ряда веществ, не адсорбируемых обычными угольными фильтрами.

## Монтаж

Поток воздуха через поперечное сечение впускного отверстия фильтра должен быть по возможности однородным. В связи с этим резкие изгибы воздуховодов не допускаются. Наружные решетки и впускные воздуховоды должны иметь конструкцию, препятствующую попаданию влаги в фильтр. В прибрежных районах фильтры могут отсыревать вследствие часто возникающих туманов, засасываемых в вентиляционные системы через воздухозаборники. В подобных случаях под фильтрами должен быть установлен поддон из нержавеющей стали, позволяющий предотвратить коррозию нижней части вентиляционной установки. В конструкции вентиляционной установки с теплообменником сторона удаляемого воздуха также должна иметь фильтр. Для увеличения срока службы высокоеффективных фильтров HEPA и угольных фильтров перед ними должны быть установлены стекловолоконные фильтры класса F8 или выше. Высокоэффективные фильтры следует устанавливать со стороны нагнетания приточного вентилятора и, при необходимости, со стороны всасывания вытяжного вентилятора. Если в удаляемом воздухе могут содержаться особо ядовитые и сильнодействующие вещества, фильтры должны устанавливаться не в корпусе вентиляционной

установки, а в так называемых шкафах без опасной переработки.

Перед вентиляционными установками, в состав которых входят фильтры, следует предусмотреть достаточное свободное пространство, необходимое для замены фильтров со стороны впуска и проведения измерений со стороны выпуска. Фильтры должны монтироваться в вентиляционной установке таким образом, чтобы свести к минимуму протечки воздуха в обход фильтров. Это особенно важно в случае фильтров с высокой эффективностью фильтрации. Согласно стандарту Европейского комитета по стандартизации, в случае фильтров классов F и G протечки в обход фильтров могут достигать по меньшей мере 10% от объема фильтруемого воздуха. Данное значение включает всасывание воздуха на участке между фильтром и вентилятором. Поэтому фильтры классов F8 и F9 должны устанавливаться со стороны нагнетания вентилятора, чтобы исключить возможность всасывания воздуха в вентиляционную установку после фильтра.

В случае высокоеффективных фильтров с эффективностью фильтрации порядка 99,99% протечки в обход фильтра должны быть крайне незначительными.



## Резюме

Очистка воздуха от загрязнений осуществляется с помощью фильтров. Фильтры твердых частиц обеспечивают очистку воздуха от взвешенных в нем твердых частиц, а угольные фильтры — от газообразных загрязнений. Типичными видами загрязнений являются частицы пыли, микроорганизмы, а также автомобильные выхлопы, продукты горения и промышленные отходы. В качестве фильтрующего материала в фильтрах твердых частиц используется слой ткани, состоящей из тонких стеклянных или полимерных волокон. В угольных фильтрах фильтрующим материалом является активированный уголь, иногда с химическими добавками.

Фильтры твердых частиц подразделяются на грубые фильтры, тонкие фильтры и высокоэффективные фильтры HEPA. Методики испытания и принципы классификации для каждой из этих групп описаны в соответствующих стандартах. Для грубых и тонких фильтров это стандарт EN 779, а для высокоэффективных фильтров HEPA — стандарт EN 1822.

Европейских стандартов испытания и классификации угольных фильтров в настоящее время не существует.

Частицы небольшого диаметра и малой массы обтекают волокна фильтра вместе с потоком воздуха. Если такие частицы оказываются вблизи волокна, они притягиваются к нему и остаются на его поверхности. Задержка частиц на фильтрах твердых частиц осуществляется благодаря четырем механическим эффектам. Помимо этого, в некоторых фильтрах также играет роль

эффект электростатического притяжения. Четырьмя механическими эффектами являются  
эффект сита, эффект зацепления, эффект инерции и эффект диффузии.  
Эффект сита и эффект инерции преобладают в случае частиц большого диаметра, а эффект диффузии абсолютно преобладает в случае субмикронных частиц.  
Электростатический эффект проявляется только в фильтрах из полимерных материалов.

В вентиляционных системах общего назначения в большинстве случаев в качестве фильтров приточного воздуха достаточно использовать фильтры класса F7. Если в помещении имеются повышенные требования к чистоте, а рядом проходит оживленная автомобильная магистраль, рекомендуется использовать фильтры класса F8 и выше. Для увеличения срока службы высокоэффективных фильтров HEPA и адсорбционных фильтров перед ними должны быть установлены тонкие фильтры класса F8 или выше. Фильтрующий материал этих фильтров должен быть выполнен из стекловолокна.

# Глушители



## Краткое содержание главы

- Диссипативные глушители
- Реактивные глушители.
- Зависимость эффективности глушителя от его ширины и длины.
- Переход давления на глушителе.
- Собственный шум глушителя.
- Место установки глушителя.
- Измерения.

Глушители предназначены для снижения уровня шума. Ниже описываются механизмы данного процесса и параметры, влияющие на его результат. Вне зависимости от того, установлен ли глушитель в вентиляционной установке или в воздуховоде, основные принципы его работы остаются неизменными. Функции глушителей могут выполнять даже компоненты, изначально не предназначенные для снижения уровня шума. При этом их функционирование будет основано на тех же принципах, что и функционирование глушителей.

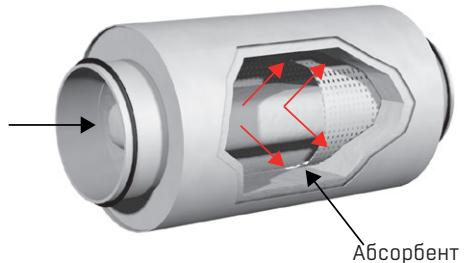
## Снижение уровня шума

Закон сохранения энергии гласит, что энергия не исчезает. Поэтому уровень шума может быть снижен либо путем превращения звуковой энергии в тепло, либо путем отведения ее туда, где она наносит меньший ущерб.

## Диссипативные глушители

Поглощением звука называется процесс, при котором звуковая энергия превращается в тепло. При прохождении звуковой волны через звукопоглотитель движутся не только молекулы воздуха, но и материал звукопоглотителя (обычно имеющего волокнистую или пористую структуру). В результате трения энергия этого движения преобразуется в тепло. Открытая волокнистая или пористая структура обеспечивает максимально эффективное звукопоглощение в максимально широком диапазоне частот.

Для предотвращения отделения волокон и их уноса потоком воздуха поверхность звукопоглотителя может быть прикрыта тканью из штапельного волокна, например, тканью Cleantec. Принцип работы диссипативного глушителя показан на рисунке ниже.



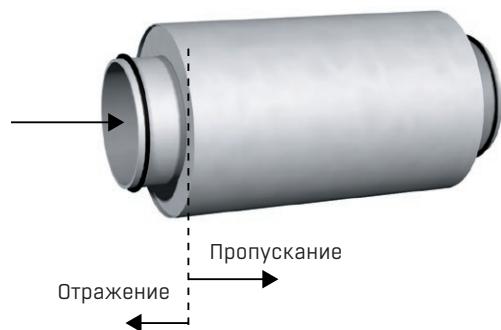
Принцип работы диссипативного глушителя

Для увеличения эффективности работы глушителя в центре его могут быть установлены звукопоглощающие перегородки. Эти элементы выполняют ту же звукопоглощающую функцию, что и остальные звукопоглощающие элементы глушителя.

## Реактивные глушители

Реактивные глушители снижают уровень шума путем отражения звука (отражательные глушители) или его гашения за счет эффекта резонанса (резонаторные глушители).

Принцип работы отражательного глушителя показан на рисунке ниже. При изменении поперечного сечения канала часть звуковых волн отражается в обратном направлении. Благодаря этому уровень шума за глушителем снижается. Изгибы и отводы воздуховодов, а также устанавливаемые в помещениях воздухораспределители, тоже отражают звук и, таким образом, выполняют функции глушителей.



Принцип работы реактивного глушителя

Еще одним способом снижения уровня шума является отвод звука за пределы системы. Стени воздуховодов имеют ограниченную звукоизолирующую способность, поэтому звук в той или иной степени проходит через них наружу. Недостатком здесь является, конечно же, увеличение уровня шума в помещении, через которое проходит воздуховод.

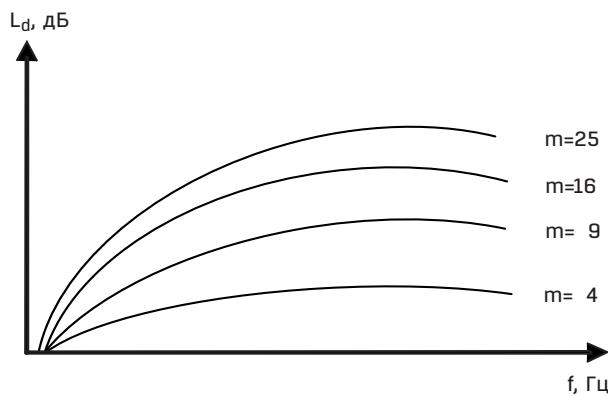
## Ширина

Широкие глушители обладают двумя преимуществами. Прежде всего, чем шире глушитель, тем больше разница площади сечения воздуховода и глушителя.

А чем больше эта разница, тем большим будет отражение звука и, следовательно, снижение уровня шума.

На рисунке ниже показаны кривые, демонстрирующие данный эффект. Кривые соответствуют снижению уровня шума для разных отношений площади поперечного сечения глушителя и воздуховода.

Например, при  $m = 4$  площадь поперечного сечения глушителя в четыре раза превышает площадь поперечного сечения воздуховода.



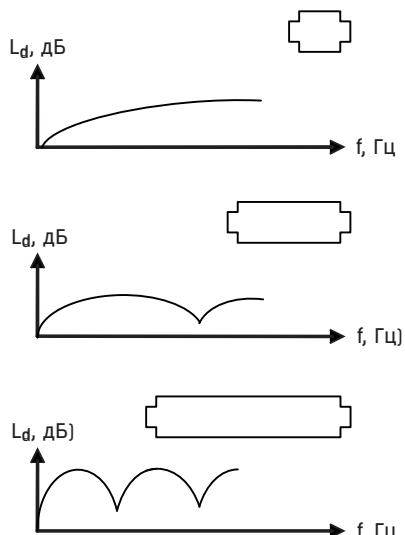
Снижение уровня шума  $L_d$  как функция частоты и отношения поперечных сечений глушителя и воздуховода. Параметр  $m$  представляет отношение площадей поперечного сечения глушителя  $A_d$  и воздуховода  $A_k$ , т.е.  $m = A_d/A_k$ .

Другим преимуществом широких глушителей является возможность разместить в них большее количество звукопоглощающего материала и таким образом увеличить звукопоглощение. В связи с вышесказанным при наличии в вентиляционной установке достаточного свободного пространства рекомендуется использовать максимально широкие глушители.

## Длина

Увеличение длины глушителей делает возможным снижение уровня шума более низких частот. Недостатком длинных глушителей является увеличение количества точек резонанса на высоких частотах.

На рисунке ниже видно, как меняется снижение уровня шума в зависимости от частоты для трех глушителей разной длины.



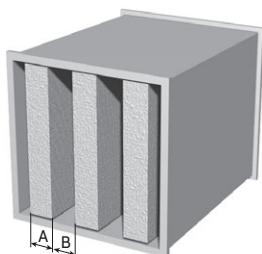
Увеличение длины глушителя позволяет снизить уровень шума  $L_d$  на высоких частотах, но создает точки резонанса.

Если необходимо заглушить низкие частоты, следует использовать глушитель значительной длины. Помимо всего сказанного, с увеличением длины глушителя, как и с увеличением его ширины, возрастает количество звукопоглощающего материала, который может быть в нем размещен и, следовательно, звукопоглощение.

## Перепад давления на глушителе

Выбор глушителя — это всегда компромисс между снижением уровня шума и увеличением перепада давления. Чем более значительный перепад давления является допустимым, тем большим может быть снижение уровня шума. Особенно важно учитывать перепад давления при проектировании звукопоглощающих перегородок глушителя.

На рисунке ниже показан глушитель со звукопоглощающими перегородками. Важнейшей задачей является поиск удовлетворительного соотношения между шириной звукопоглощающих перегородок А и свободного пространства В, позволяющего обеспечить надлежащий расход воздуха через глушитель. Если звукопоглощающие перегородки чрезмерно широки, будет обеспечено большее снижение уровня шума, однако увеличится перепад давления и собственный шум глушителя. Для уменьшения перепада давления перегородки сужаются навстречу потоку воздуха. Помимо этого, передние края перегородок обычно выполняются закругленными.



Глушитель прямоугольного сечения со звукопоглощающими перегородками.

## Собственный шум глушителя

Минимальный уровень шума, который может быть достигнут после глушителя, определяется уровнем собственного шума глушителя. Воздух, проходящий через глушитель, создает шум. Вне зависимости от уровня шума перед глушителем, минимальным возможным уровнем шума после глушителя является именно уровень, создаваемый воздухом в глушителе. Если скорость воздуха увеличивается, возрастает также и уровень собственного шума глушителя. В связи с производимым глушителями собственным шумом два установленных друг за другом глушителя не всегда обеспечивают большее снижение уровня шума, чем один глушитель. Уровень собственного шума глушителя зависит от качества монтажа его звукопоглощающих перегородок. Если у верхнего края перегородки появляется зазор, это может снизить эффективность работы глушителя и стать причиной появления свиста.

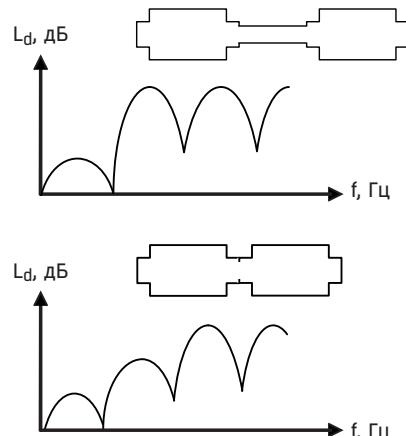
## Место установки глушителя

Как правило, глушители должны устанавливаться максимально близко к источнику шума. Это позволяет увеличить разность между уровнем исходного шума и уровнем собственного шума глушителя. Таким образом, снижается вероятность того, что эффект глушителя будет нивелирован его собственным шумом.

Глушители следует располагать на некотором расстоянии от оборудования, создающего турбулентность, в частности, от вентиляторов. Для оптимальной работы глушителя проходящий через него поток воздуха должен быть однородным. Если источник турбулентности находится чрезмерно близко, поток воздуха будет неоднородным и эффективность работы глушителя снизится.

Помимо этого, в случае чрезмерно неоднородного потока воздуха возрастет перепад давления на глушителе. Поэтому глушители не следует устанавливать непосредственно за вентиляторами, коленями, воздушными клапанами и другими компонентами, нарушающими однородность потока. При одновременном использовании двух глушителей их следует установить на достаточном расстоянии друг от друга. На рисунке ниже показано, как расстояние между глушителями влияет на снижение уровня шума.

Если это расстояние недостаточно велико, прежде всего усиливается низкочастотный шум.



При чрезмерно близком расположении двух глушителей значение снижения уровня шума  $L_d$  уменьшается.

## Методы измерений

Снижение уровня шума, указываемое производителями глушителя, должно измеряться согласно требованиям стандарта EN ISO 7235 или EN ISO 11691. В данных стандартах описываются методы присоединения к глушителю источника звука или источника потока воздуха, например, вентилятора. Снижение уровня шума рассчитывается как разность между уровнем шума в системе без глушителя и с глушителем. Для измерения уровня шума без глушителя он заменяется секцией воздуховода. Помимо снижения уровня шума, производитель обязан указать перепад давления, размеры, массу, использованные материалы, а также сведения о монтаже и техническом обслуживании глушителя.



## Резюме

Глушители предназначены для снижения уровня шума. Вне зависимости от того, установлен ли глушитель в вентиляционной установке или в воздуховоде, основные принципы его работы остаются неизменными.

Поэтому уровень шума может быть снижен либо путем превращения звуковой энергии в тепло, либо путем отведения ее туда, где она наносит меньший ущерб.

Поглощением звука называется процесс, при котором звуковая энергия превращается в тепло. При прохождении звуковой волны через звукопоглотитель движется материал звукопоглотителя (обычно имеющего волокнистую или пористую структуру). В результате трения энергия этого движения преобразуется в тепло. Реактивные глушители снижают уровень шума путем отражения звука (отражательные глушители) или его гашения за счет эффекта резонанса (резонаторные глушители). При изменении поперечного сечения канала часть звуковых волн отражается в обратном направлении. Благодаря этому уровень шума за глушителем снижается. Широкие глушители обладают двумя преимуществами.

- Чем больше разница между площадью сечения воздуховода и глушителя, тем большим будет отражение звука и, следовательно, снижение уровня шума.
- Чем шире глушитель, тем большее количество звукопоглощающего материала можно в нем разместить, увеличив за счет этого звукопоглощение.

Увеличение длины глушителей делает возможным снижение уровня шума более низких частот. Недостатком длинных глушителей является увеличение количества точек резонанса на высоких частотах.

Выбор глушителя — это всегда компромисс между снижением уровня шума и увеличением перепада давления. Если звукопоглощающие перегородки глушителя чрезмерно широки, будет обеспечено большее снижение уровня шума, однако увеличится перепад давления и собственный шум глушителя.

Минимальный уровень шума, который может быть достигнут после глушителя, определяется уровнем собственного шума глушителя. Воздух, проходящий через глушитель, создает шум.



# 13

## Вентиляторы



## Краткое содержание главы

- Центробежные вентиляторы.
- Прямоточные вентиляторы.
- Осевые вентиляторы.
- Графики вентиляторов.
- Кривые систем.
- Эффективность.
- Рост температуры.
- Шум.
- Собственная частота колебаний.
- Виброизоляция.
- Прямой привод.
- Ременный привод.
- Электродвигатели вентиляторов.
- Удельная мощность вентиляторов SFP.



В создаваемом вентилятором давлении можно выделить статический и динамический компоненты.

Скорость движения воздуха в воздуховоде должна быть невысокой. Это необходимо, чтобы избежать излишней потери давления, а также чрезмерного шума. Поэтому на вентиляторе не должно создаваться значительное динамическое давление. При скорости движения воздуха в воздуховоде, равной 10 м/с, динамическое давление составляет приблизительно 60 Па. Эта величина незначительна по сравнению с увеличением давления на вентиляторе. Следовательно, конструкция вентиляторов должна обеспечивать полное превращение динамического давления в статическое в выпускном патрубке вентилятора или сразу за ним.

## Типы вентиляторов

В вентиляционных системах общего назначения используются вентиляторы двух типов: центробежные и осевые.

В осевых вентиляторах воздух движется параллельно оси лопастного колеса.

В центробежных вентиляторах воздух поступает в вентилятор в направлении, параллельном оси лопастного колеса, а выходит из вентилятора в перпендикулярном направлении, т.е. по центробежной траектории.

Прямоточные вентиляторы – это центробежные вентиляторы без спирального кожуха. Вентиляторы всех перечисленных типов широко используются в вентиляционных установках. Однако наиболее часто, по крайней мере в Европе, встречаются центробежные и прямоточные вентиляторы (т.е. вентиляторы с лопастным колесом центробежного типа).

Спиральный кожух вентилятора обеспечивает превращение динамического давления в статическое.

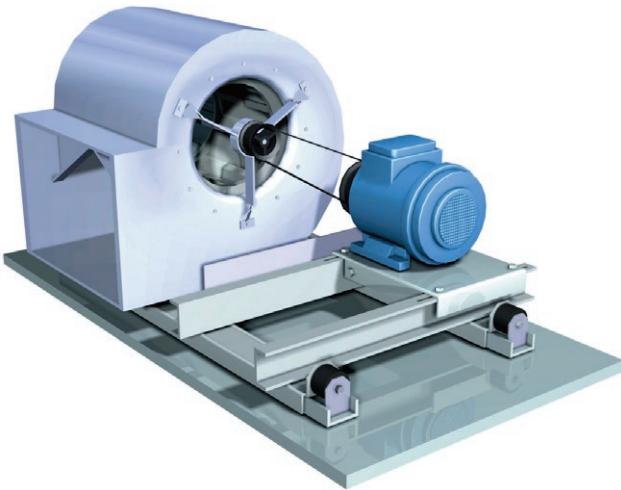


Прямоточный вентилятор



Радиальный вентилятор

# Центробежные вентиляторы



## Центробежные вентиляторы с загнутыми вперед лопастями

В центробежных вентиляторах с загнутыми вперед лопастями лопастное колесо создает преимущественно динамическое давление. Поэтому важным элементом конструкции таких вентиляторов является спиральный кожух.

Вентиляторы с загнутыми вперед лопастями создают наиболее высокое давление в сравнении с вентиляторами других типов при том же диаметре лопастного колеса и той же скорости его вращения. Таким образом, вентиляторы данного типа являются наиболее компактными среди вентиляторов различных типов, создающих одинаковое давление.

Помимо этого, вентиляторы данного типа создают стабильный поток воздуха. Наконец, они дешевы в производстве. Благодаря всем этим преимуществам вентиляторы с загнутыми вперед лопастями чрезвычайно широко используются в вентиляционных системах.

Основными недостатками вентиляторов данного типа являются их сравнительно низкая эффективность и невысокая максимальная скорость вращения. Это делает их непригодными для использования в условиях значительного расхода воздуха. Помимо этого, данные вентиляторы издают шум достаточно высокой интенсивности.

Центробежные вентиляторы с загнутыми вперед лопастями обычно используются в малогабаритных дешевых вентиляционных системах.

На графике вентилятора данного типа можно видеть, что кривые скорости являются пологими и вентилятор обычно стабильно работает на всем рабочем диапазоне.

Если частично перекрыть воздуховод у такого вентилятора, работающего с постоянной скоростью, это

приводит к снижению расхода воздуха и потребляемой мощности без существенного изменения давления. Это означает, что в качестве органа управления может с успехом использоваться простой воздушный клапан.

Исходя из формы кривых мощности видно, что эффективность вентилятора увеличивается с увеличением расхода воздуха. Значительные потери давления в вентиляционной системе могут стать причиной перегрузки электродвигателя вентилятора.

Центробежные вентиляторы с загнутыми назад лопастями

Центробежные вентиляторы с загнутыми назад лопастями состоят из нескольких лопастей, образующих центробежные диффузоры. Статическое давление создается при прохождении воздуха через лопастное колесо. При этом кожух вентилятора не играет столь важную роль, как в случае вентилятора с загнутыми вперед лопастями. Однако он выполняет ту же рассеивающую функцию и повышает эффективность вентилятора.

Лопастное колесо такого вентилятора должно вращаться вдвое быстрее лопастного колеса с загнутыми вперед лопастями того же диаметра для создания тех же давления и расхода. Вентиляторы с загнутыми назад лопастями также отличаются высокой эффективностью. При этом их прочная конструкция делает возможной более высокую скорость вращения рабочего колеса по сравнению с вентиляторами с загнутыми вперед лопастями.

Центробежные вентиляторы с загнутыми назад лопастями являются сравнительно тихими. На графике вентилятора можно видеть крутые кривые. Это означает, что изменения давления в вентиляционной системе оказывают сравнительно небольшое влияние на расход воздуха.

Исходя из формы кривых мощности видно, что при работе вентилятора с постоянной скоростью при изменении давления в системе не происходит перегрузки электродвигателя.

Центробежные вентиляторы с кожухом чаще всего соединены с электродвигателем приводным ремнем. Диаметры шкивов ременной передачи подбираются таким образом, чтобы обеспечить требуемую скорость вращения вентилятора.

Центробежные вентиляторы с кожухом имеют выпускные патрубки с небольшой площадью сечения. Поэтому за ними должны быть предусмотрены прямые участки воздуховодов без какого-либо оборудования. На этих участках поток воздуха становится однородным, что необходимо перед его подачей в следующую функциональную секцию.

## Прямоточные вентиляторы

---



Прямоточный вентилятор имеет одно всасывающее лопастное колесо с загнутыми назад лопастями и не имеет кожуха. Характеристики вентиляторов данного типа схожи с характеристиками центробежных вентиляторов с загнутыми назад лопастями. Однако в их случае отсутствует утилизация статического давления в кожухе.

Преимуществом прямоточных вентиляторов является прямой привод, т.е. отсутствие приводных ремней, нуждающихся в техническом обслуживании. Помимо этого, прямоточные вентиляторы являются более гигиеничными, т.к. они не загрязняют воздух пылью от приводных ремней. Открытая конструкция вентиляторов данного типа существенно облегчает их чистку и техническое обслуживание.

В вентиляторах с прямым приводом лопастное колесо устанавливается непосредственно на вал двигателя, благодаря чему становится возможна балансировка вентилятора для снижения уровня вибрации.

Регулировка скорости вращения вентилятора осуществляется путем изменения скорости вращения электродвигателя, например, с помощью частотного преобразователя. График прямоточного вентилятора приводится далее в настоящей главе. Некоторые производители выпускают также прямоточные вентиляторы с ременными приводами.

Еще одним преимуществом прямоточных вентиляторов является возможность установки последующего оборудования, например, воздухонагревателя или охлаждающего теплообменника, непосредственно за вентилятором.

## Оевые вентиляторы

---



Оевые вентиляторы обеспечивают большой расход воздуха при низком давлении. Давление увеличивается с ростом диаметра вентилятора и скорости его вращения. Центробежные вентиляторы имеют неизменные геометрические параметры и рабочие характеристики, поэтому в них можно регулировать лишь скорость вращения.

Напротив, оевые вентиляторы могут работать с лопастными колесами различных диаметров, имеющими различное количество лопастей. Таким образом, в

вентиляторах этого типа имеется возможность регулировать не только скорость вращения, но и уровень вибрации. В связи с этим оевые вентиляторы обычно имеют прямой привод.

Оевые вентиляторы, за выпускными патрубками которых установлены направляющие лопатки, демонстрируют высокую эффективность. Для обеспечения необходимого давления оевые вентиляторы в вентиляционных установках должны вращаться с высокой скоростью.

Такие вентиляторы непригодны для использования в малогабаритных вентиляционных установках, т.к. в этом случае они должны иметь малый диаметр, предполагающий чрезвычайно высокую скорость вращения.

На графиках осевого вентилятора можно видеть крутые кривые скорости и пологие кривые мощности. При этом в условиях низкого расхода мощность возрастает.

Это означает, что если частично перекрыть воздуховод, сильно сократив расход воздуха, осевой вентилятор будет потреблять больше энергии.

## Графики вентиляторов

Рабочие характеристики вентиляторов обычно представляются в виде графиков, на горизонтальной оси которых откладывается расход воздуха, а на вертикальной — давление.

В случае центробежных вентиляторов кривые вычерчиваются для различных скоростей вращения, а в случае осевых — для различных углов лопастей. Помимо этого, строятся кривые эффективности, уровня шума и мощности вентилятора.

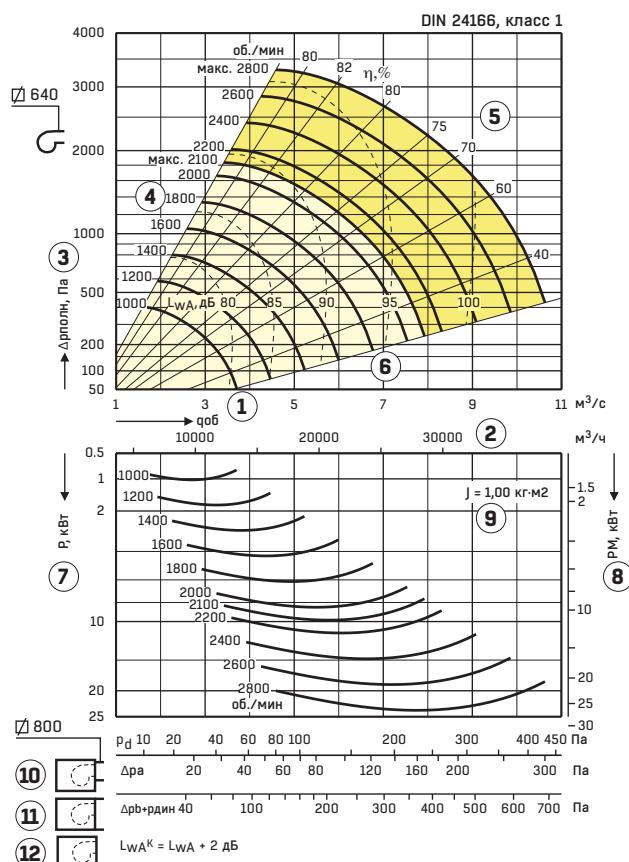
На представленных ниже графиках для центробежного вентилятора показаны увеличение полного давления  $\Delta p_{полн}$ , Па, и мощность на валу лопастного колеса  $P$ , кВт, как функции расхода воздуха  $q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  для ряда фиксированных скоростей вентилятора. Помимо этого, показаны линии постоянной эффективности.

Также представлен уровень звуковой мощности по шкале А со стороны выпуска вентилятора  $L_{WA}$ ,

дБ. Уровень звуковой мощности для октавного диапазона  $L_w$ , дБ (не по шкале А) со стороны выпуска, со стороны впуска, а также в окружающем пространстве за счет звукопроницаемости кожуха, может быть рассчитан с использованием поправок, указанных в главе «Звук».

Для облегчения подбора электродвигателей для центробежных вентиляторов используются такой параметр, как минимальная допустимая мощность электродвигателя  $PM$ , кВт. Данное значение учитывает мощность вентилятора, потери ременной передачи и время пуска. В случае вентиляторов с загнутыми вперед лопастями используется мощность вентилятора в рабочей точке, а в случае вентиляторов с загнутыми назад лопастями — максимальное значение на кривой мощности при текущей скорости.

Помимо этого, на графиках показаны динамическое давление со стороны выпуска вентилятора  $\Delta p_{дин}$ , а также потери на оборудовании и соединениях  $\Delta p_a$  и  $\Delta p_b + \Delta p_{дин}$ .



Графики вентилятора построены для воздуха плотностью  $1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Обозначения

- (1) — расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$  (по продольной оси).
- (2) — расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{ч}$  (по продольной оси)
- (3) — увеличение полного давления, Па (по вертикальной оси).
- (4) — скорость вращения вентилятора, об./мин.
- (5) — эффективность вентилятора, %.
- (6) — уровень звуковой мощности  $L_{WA}$ , дБ (пунктирная линия).
- (7) — энергопотребление вентилятора,  $P$ , кВт.
- (8) — выходная мощность электродвигателя,  $PM$ , кВт.
- (9) — момент инерции лопастного колеса,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ .
- (10) — потеря давления в стандартизированном выпускном воздуховоде,  $\Delta p_a$ , Па.
- (11) — потеря давления на соединении с вентиляционной установкой,  $\Delta p_b$ , Па.
- (12) —  $L_{WA^K}$  уровень звукового давления вентилятора в кожухе.

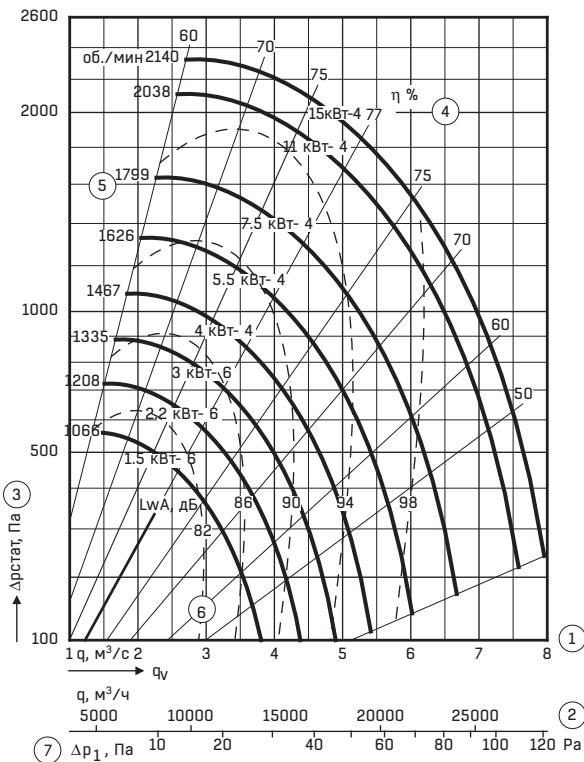
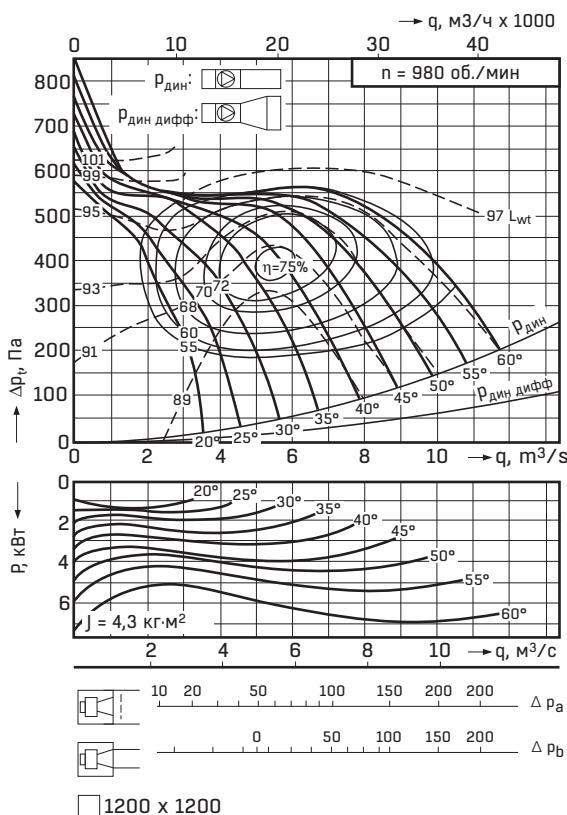


График для прямоточного вентилятора



Графики для осевого вентилятора

График построен для вентилятора без кожуха и воздуха плотностью  $1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Потеря на встраивании  $\Delta p_1$  возникает вследствие встраивания в секцию вентиляционной установки.

Кривые на графике вентилятора показывают максимальную скорость для сочетаний вентиляторов и электродвигателей различных размеров.

- ① — расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$  (по продольной оси).
- ② — расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{ч}$  (по продольной оси).
- ③ — увеличение полного давления  $\Delta p_{\text{ст}}$ , Па (по вертикальной оси).
- ④ — полная мощность вентилятора  $\eta_{\text{ст}}$ , %.
- ⑤ — максимальная скорость вращения каждого электродвигателя, кВт — количество полюсов.
- ⑥ — суммарный уровень звуковой мощности  $L_wA$ , дБ (пунктирная линия).
- ⑦ — потеря на встраивании  $\Delta p_1$ , Па.

## Формулы для расчета вентиляторов

**Ниже приведены формулы для расчетов вентилятора при изменении скорости вращения без изменения характеристики вентилятора и кривой системы.**

$$\text{Расход воздуха } \frac{q_1}{q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\text{Давление } \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

$$\text{Мощность } \frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^3$$

где

$q$  — расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$n$  — скорость вращения, об./мин;

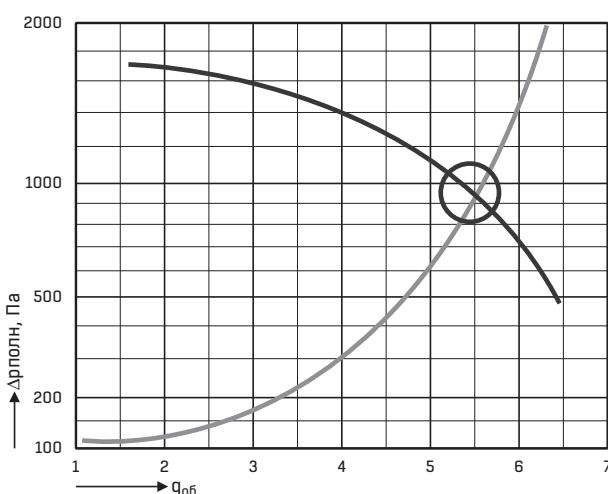
$p$  — давление, Па;

$P$  — мощность, кВт.

# Кривые систем

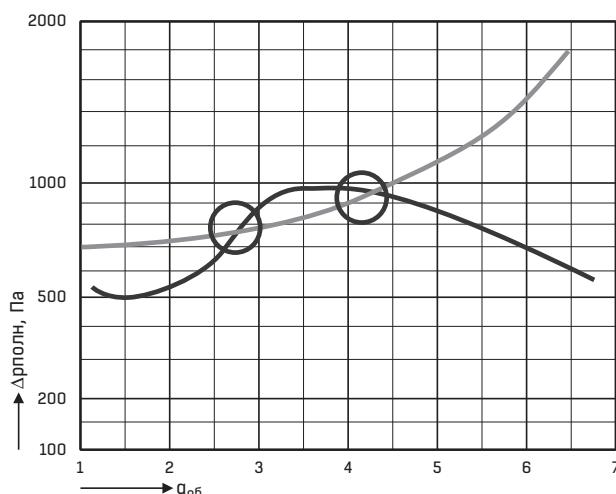
## Совместимость вентиляционной системы и вентилятора

Кривые вентиляторов имеют различные формы, определяемые типами вентиляторов. Кривые систем также могут различаться, см. ниже. В случае наличия очевидной точки пересечения между кривыми никаких трудностей обычно не возникает. Вентилятор будет работать в точке пересечения кривых, см. график ниже.



Пересечение кривых вентиляционной системы и вентилятора. Если кривая вентилятора пересекает кривую системы в двух точках, это может вызвать затруднения, см. график ниже.

Данное затруднение обычно возникает только в



Кривая вентилятора пересекает кривую системы в двух точках

случае вентиляторов, имеющих погодные кривые с «седлом», например, в случае вентиляторов с загнутыми вперед лопастями, работающими в системе с высоким постоянным давлением и отсутствием расхода воздуха.

## Влияние изменений характеристик вентиляционной системы

Характеристики типовой системы воздуховодов обычно связаны следующим соотношением:

$$p = p_0 + k \cdot q^n,$$

где

$p$  — давление, Па;

$p_0$  — давление при отсутствии расхода воздуха (постоянное), Па;

$k$  — константа системы;

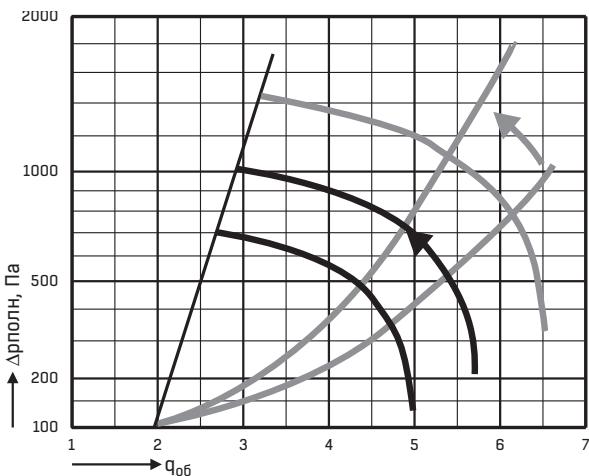
$n$  — показатель степени для системы, обычно близок к 2.

Как правило, в случае обычной вентиляционной системы значение показателя степени  $n$  остается неизменным. Практически для всех компонентов в пределах системы данный показатель обычно равен 2. Однако в случае ламинарного течения это значение снижается. Данное явление характерно для фильтров, а также для некоторых типов теплообменников.

Поэтому наличие указанного оборудования способствует снижению общего показателя степени  $n$  для всей вентиляционной системы. В вентиляционных системах с тщательной фильтрацией воздуха, например, в вентиляционных системах чистых помещений, это снижение может быть значительным.

Значение  $k$  может изменяться, в частности, при изменении настроек воздушного клапана и при засорении фильтров. В простой вентиляционной системе засорение фильтров являются главной причиной увеличения перепада давления. В каче-

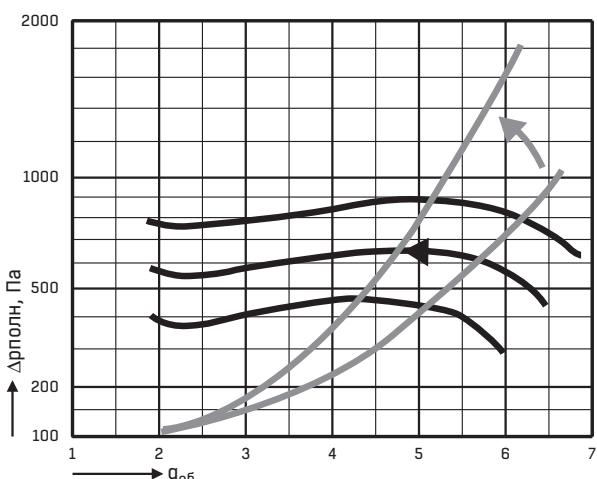
стве приводов вентиляторов обычно используются трехфазные асинхронные электродвигатели полностью закрытого исполнения с короткозамкнутым ротором, которые врачаются практически с постоянной скоростью вне зависимости от нагрузки. Это означает, что при изменении давления рабочая точка вентилятора должна смещаться вдоль кривой скорости. Данный эффект показан на приведенном ниже графике. Из графика видно, что по мере увеличения перепада давления в системе рабочая точка смещается влево вдоль кривой. При этом расход воздуха падает.



Рабочая точка вентилятора смещается вдоль кривой скорости (центробежный вентилятор с загнутыми вперед лопастями)

Ниже показан график для центробежного вентилятора с загнутыми вперед лопастями. Кривые имеют характерную для данного типа вентиляторов пологую форму.

Из графика видно, что снижение расхода воздуха становится значительно более выраженным.



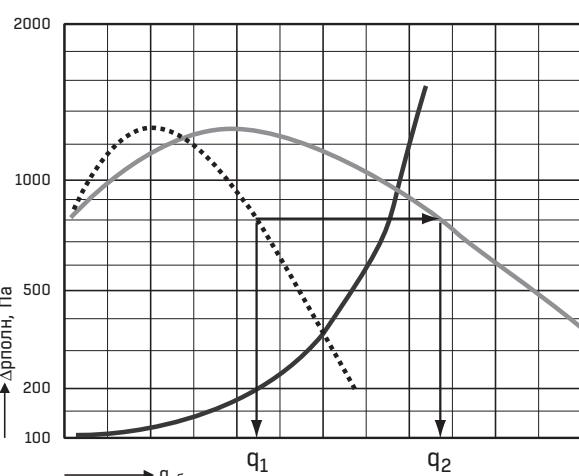
Рабочая точка вентилятора смещается вдоль кривой скорости (центробежный вентилятор с загнутыми назад лопастями)

## Параллельная работа вентиляторов

Если два вентилятора работают параллельно, создаваемое ими давление не отличается от давления, создаваемого одним вентилятором. При этом расход воздуха удваивается. Общая кривая двух вентиляторов имеет значительно более пологую форму, чем кривая одного вентилятора. При параллельной работе более чем двух вентиляторов кривая становится особо пологой. При одновременном запуске обоих вентиляторов обычно не возникает затруднений, если рабочая точка достаточно смешена вправо от точки максимума.

Однако вентиляторы с характеристиками типа показанных ниже слева, центробежные вентиляторы с загнутыми вперед лопастями, могут создавать одинаковое давление при двух различных значениях расхода воздуха. В рабочих точках слева от максимума могут возникать повышенная нестабильность, сниженный расход воздуха и даже обратный поток на одном из вентиляторов.

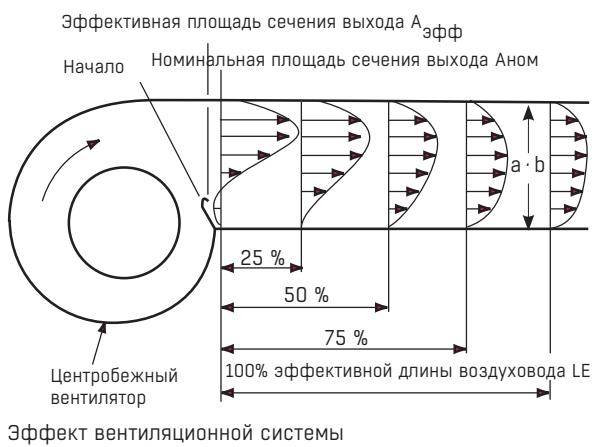
Обычно этого не происходит, однако подобные явления возможны в случае очень значительного частичного перекрытия воздуховода, а также при использовании вентиляторов избыточного размера.



Одинарное давление при двух различных расходах воздуха

## Эффект вентиляционной системы

Эффектом вентиляционной системы называется потеря давления, вызванные особенностями конструкции воздуховода за выпуском вентилятора. Возникновению эффекта вентиляционной системы способствуют высокая скорость воздуха на выходе вентилятора и отсутствие симметрии. При скорости воздуха 12 м/с профиль его скорости выравнивается до нормальной формы на расстоянии от выхода вентилятора, равном 2,5 диаметрам воздуховода. Данное расстояние называется эффективной длиной воздуховода.

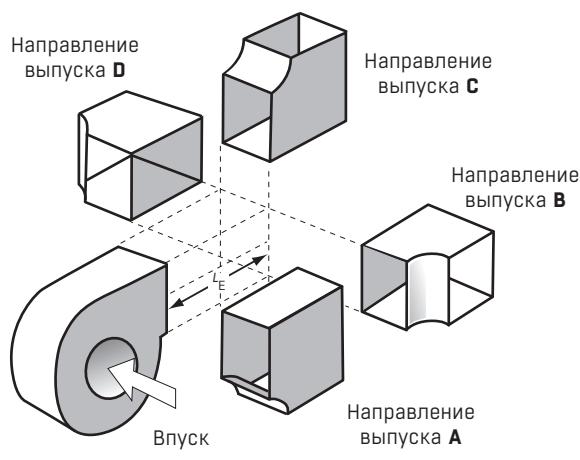


Эффект вентиляционной системы

## Колени воздуховодов

Форма воздуховода, непосредственно следующего за вентилятором, определяет выраженность эффектов вентиляционной системы. Причиной является несимметричность профиля скорости. В случае вентиляторов двустороннего всасывания, используемых в вентиляционных системах, на возникновение эффекта вентиляционной системы в равной степени влияют колени воздуховодов, изгибающиеся вправо и влево.

В случае прямоточных вентиляторов потери давления по причине изгибов воздуховода отсутствуют.



Колени воздуховодов

## Жалюзийный воздушный клапан

Жалюзийный воздушный клапан, установленный на выходе вентилятора, является причиной возникновения эффекта вентиляционной системы. Перепад давления на таком клапане в пять раз превышает перепад давления на клапане обычной конструкции.

## Эффективность вентилятора

Эффективность вентилятора определяется как произведение расхода воздуха и увеличения полного давления, разделенное на мощность на валу лопастного колеса.

$$\eta_{\text{вент}} = \frac{P_{\text{вент}}}{P_{\text{колес}}} = \frac{k_p \cdot q_{vi} \cdot P_{\text{полн вент}}}{P_{\text{колес}}}$$

где

$\eta_{\text{вент}}$  — эффективность вентилятора, %;

$P_{\text{вент}}$  — мощность вентилятора, Вт;

$P_{\text{колес}}$  — мощность на валу лопастного колеса, Вт;

$k_p$  — коэффициент сжатия;

$q_{vi}$  — расход воздуха на впуске вентилятора,  $\text{м}^3/\text{s}$ ;

$P_{\text{полн вент}}$  — увеличение полного давления на вентиляторе, Па.

В случае вентиляционных систем общего назначения коэффициентом сжатия можно пренебречь, т.к. рост давления на вентиляторе незначителен. Мощность вентилятора показана на графике вентилятора.

## Нагрев воздуха на вентиляторе

При прохождении воздуха через вентилятор его температура возрастает вследствие совершающей работы. Рост температуры рассчитывается по формуле:

$$\Delta_t = \frac{k_p \cdot P_{\text{полн вент}}}{\rho \cdot \eta \cdot C_p}$$

где

$\Delta_t$  — рост температуры,  $^{\circ}\text{C}$  или К;

$k_p$  — коэффициент сжатия, которым можно пренебречь;

$P_{\text{полн вент}}$  — увеличение полного давления на вентиляторе, Па;

$\eta$  — мощность вентилятора;

$\rho$  — плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$C_p$  — удельная теплоемкость.

Для приближенной оценки можно принять, что  $\rho = 1,2$ ,  $\eta = 0,80$  и  $C_p = 1008$ . В результате получим  $\Delta_t \approx P/1000$  или  $1^{\circ}\text{C}$  на 1000 Па.

Важно отметить, что данная формула не учитывает тепло, вырабатываемое электродвигателем привода. У большинства вентиляторов вентиляционных установок электродвигатель и ременный привод расположаются внутри кожуха, поэтому воздух дополнитель но нагревается за счет тепла указанных узлов.

$$\Delta t = \frac{k_p \cdot p_{\text{полн вент}}}{\rho \cdot \eta_{\text{вент}} \cdot \eta_{\text{двиг}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot c_p}$$

где

- $\Delta t$  — рост температуры, °С или К;
- $k_p$  — коэффициент сжатия, которым можно пренебречь;
- $p_{\text{полн вент}}$  — увеличение полного давления на вентиляторе, Па;
- $\eta_{\text{вент}}$  — мощность вентилятора;
- $\eta_{\text{двиг}}$  — мощность электродвигателя;
- $\eta_{\text{тр}}$  — мощность трансмиссии;
- $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;
- $c_p$  — удельная теплоемкость.

## Балансировка лопастного колеса вентилятора

Все лопастные колеса вентилятора динамически сбалансированы согласно стандарту ISO 1940/1 – 1973.

Ниже приводятся классы точности балансировки для вентиляторов Fläkt Woods:

Класс точности балансировки для лопастных колес прямоточных вентиляторов размером 022-031: G 6.3. Класс точности балансировки для лопастных колес прямоточных вентиляторов размером 035-100: G 2.5. Класс точности балансировки для лопастных колес вентиляторов двустороннего всасывания размером 022-031: G 6.3.

Класс точности балансировки для лопастных колес вентиляторов двустороннего всасывания размером 035-100: G 2.5.

## Собственная частота колебаний

Любое колеблющееся тело характеризуется собственной частотой колебаний. Это частота, к которой тело будет стремиться в условиях отсутствия внешних воздействий.

Резонансом называется явление, при котором периодическое действие сравнительно небольшой внешней силы вызывает резкое увеличение амплитуды колебаний системы.

Резонанс является причиной множества серьезных проблем, связанных с вибрацией.

Например, если собственная частота колебаний шасси автомобиля

совпадает с частотой двигателя, возможна вибрация шасси.

Подобная вибрация может быть устранена путем виброизоляции двигателя с помощью эластичных материалов типа резины. Все сказанное также касается и вентиляторов.

## Собственная частота колебаний виброизолирующих опор

Резиновые виброизолирующие опоры вентиляторов Fläkt Woods имеют собственную частоту колебаний менее 8 Гц, что соответствует 480 об./мин, а виброизолирующие опоры со стальными пружинами — менее 4 Гц, что соответствует 240 об./мин.

## Максимальная допустимая скорость вибрации

Для вентиляторного агрегата, состоящего из вентилятора, электродвигателя, ременной передачи и несущей рамы, установленный на виброизолирующие опоры, максимальная допустимая скорость вибрации составляет 7,1 мм/с.

Вибрация должна измеряться на несущих кронштейнах и на опорных плитах электродвигателя.

## Шум

Уровни звуковой мощности по шкале А  $L_{WA}$  на стороне выпуска вентилятора, к которой подключается воздуховод, указана в технических характеристиках вентилятора. Для расчета уровня звуковой мощности для каждого октавного диапазона и пути распространения звука используется следующая формула:

$$L_{\text{окт}} = L_{WA} + K_{\text{окт}}$$

где

- $L_{\text{окт}}$  — уровень звуковой мощности для октавного диапазона, дБ;
- $L_{WA}$  — уровни звуковой мощности по шкале А, дБ;
- $K_{\text{окт}}$  — величина коррекции каждого отдельного октавного диапазона, зависящая от скорости вращения вентилятора.

Более подробные сведения о шуме вентиляторов приводятся в главе «Звук».

## Виброизоляция

Виброизоляция предназначена для защиты опорной поверхности от действия сил, создаваемых вентилятором. Данные силы возникают главным образом по причине неизбежного остаточного дисбаланса ротора вентилятора.

Виброизолирующие опоры позволяют эффективно защитить опорную поверхность от действия этих сил. Эффективность виброизолирующих опор возрастает с ростом частоты колебаний. Поэтому силы, действующие на опорную поверхность, остаются незначительными даже при высоких скоростях вращения вентиляторов.

Данный эффект хорошо виден на приведенном ниже графике. На нем представлена зависимость действующей на опорную поверхность силы  $T$ , выраженной в процентах от веса ротора вентилятора, от скорости вращения вентилятора для резиновых виброизолирующих опор и виброизолирующих опор со стальными пружинами различной степени деформированности.

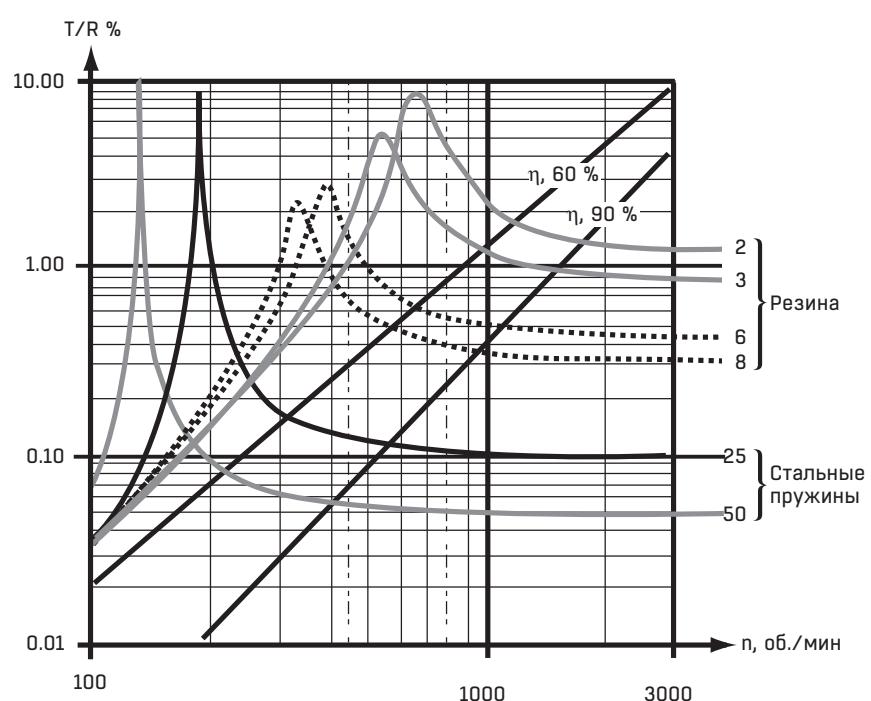
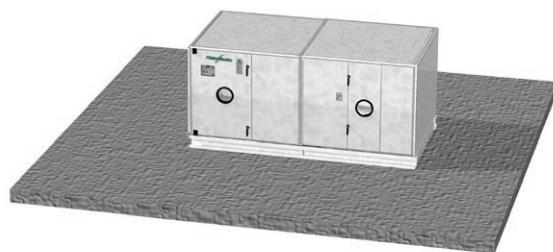
При использовании мягких стальных пружин опорная поверхность подвергается действию значительных сил в момент запуска вентилятора. Это связано с тем, что сила противодействия воздушного потока заставляет вентилятор отклоняться от прямой линии.

В результате возможны резкое падение давления, увеличение уровня шума и передача вибрации от вентилятора системе воздуховодов через гибкий соединитель. Сильная вибрация вентилятора может также стать причиной износа гибкого соединителя и привести к возникновению неисправности.

Опытным путем было установлено, что для предотвращения резонанса опорная поверхность должна иметь достаточно большую площадь и массу.

### Эмпирическое правило

Опорная поверхность, площадь которой в четыре раза превышает площадь установки, должна иметь массу, не менее чем в пять раз превышающую массу установки.



Снижение уровня вибрации

## Система привода вентилятора

Вентиляторы могут либо иметь прямой привод, т.е. быть установленными на вал электродвигателя, либо быть соединенными с электродвигателем с помощью системы привода.

### Прямой привод

Прямыми приводом называется конструкция, в которой лопастное колесо устанавливается непосредственно на вал электродвигателя или, в случае электродвигателей с внешним ротором и электродвигателей с плоским якорем, на вращающуюся наружную секцию.

Прямые приводы требуют минимального технического обслуживания. Помимо этого, в них отсутствуют потери на трение и они не загрязняют воздух пылью, возникающей вследствие движения приводных ремней. При использовании прямого привода скорость вращения лопастного колеса

идентична скорости вращения электродвигателя.

Однако у большинства осевых вентиляторов предусмотрена возможность регулирования угла лопастей, что позволяет изменять положение рабочей точки вентилятора. Напротив, у центробежных вентиляторов угол лопастей постоянен, поэтому положение рабочей точки такого вентилятора может быть изменено только путем изменения скорости вращения электродвигателя.

Скорость вращения электродвигателя обычно регулируется с помощью частотного преобразователя. Экономия энергии, достигаемая благодаря отсутствию трансмиссии, может компенсироваться потерей энергии на частотном преобразователе, т.к. эффективность устройства зависит от нагрузки на электродвигатель и частотный преобразователь.

Прямой привод неприменим для центробежных вентиляторов двустороннего всасывания за исключением особо малых вентиляторов данного типа.

Необходимый в такой конструкции длинный вал вентилятора будет подвержен изгибам колебаниям недопустимо большой амплитуды.



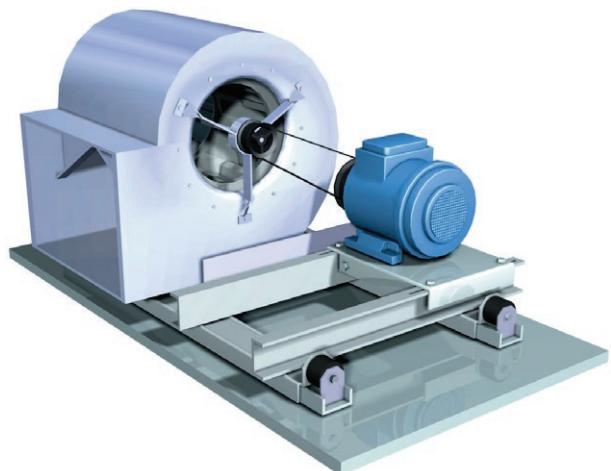
Прямоточный вентилятор с прямым приводом

# Система ременного привода

## Ременный привод

Ременный привод позволяет обеспечить необходимую скорость вращения вентилятора, приводимого в движение асинхронным трехфазным электродвигателем с питанием непосредственно от электросети, вращающимся с постоянной скоростью. Помимо этого, ременный привод позволяет свободно выбирать местоположение электродвигателя, что является немаловажным при проектировании вентиляционных установок.

Промышленность производит ременные приводы нескольких типов, наиболее распространенным из которых стал привод с клиновидным ремнем.



## Привод с клиновидным ремнем

Клиновидные ремни предназначены для использования со шкивами, имеющими желоба соответствующей формы. При выходной мощности выше 3 кВт эффективность таких приводов составляет приблизительно 95%, однако при менее высоких мощностях она может существенно падать.

Шкивы и ремни легкодоступны и просты в обслуживании. Износ ремней определяется силой трения между ремнем и шкивом в процессе работы. Изнашивающиеся ремни должны регулярно заменяться. В процессе износа ремней образуется пыль. При отсутствии фильтра за вентилятором эта пыль может разноситься потоком воздуха по воздуховодам. Помимо этого, обычные клиновидные ремни несколько растягиваются. Поэтому их необходимо подтягивать согласно указаниям производителя.

## Привод с плоским ремнем

Технический прогресс в данной области привел к появлению ремней, практически не подверженных растяжению и износу. Такие свойства демонстрируют, в частности, плоские ремни.

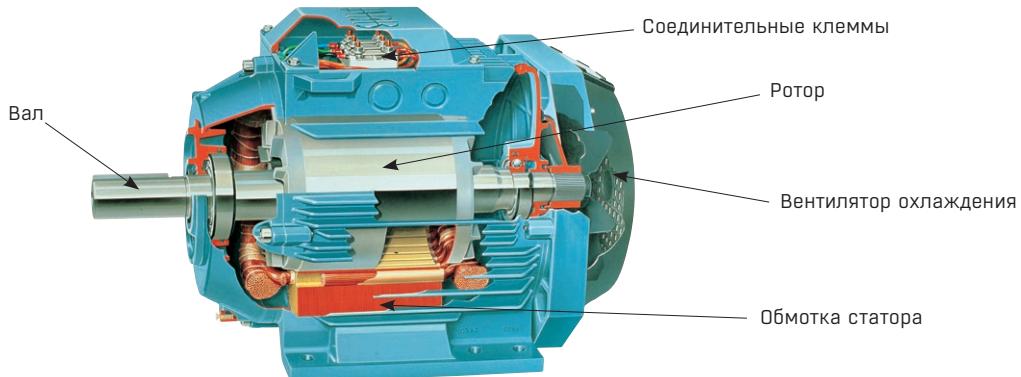
Их преимуществом является отсутствие износа, отсутствие необходимости в подтягивании, более высокая мощность трансмиссии, длительный срок службы (около пяти лет), высокая эффективность (около 98%) и незначительное образование пыли.

Ремни этого типа не должны оставаться неподвижными в условиях низких температур. Помимо этого, данные ремни непригодны для эксплуатации в условиях частых запусков и остановов вентилятора. Напротив, при непрерывной работе вентилятора они демонстрируют прекрасные результаты.

## Привод с микроклиновидным (поликлиновидным) ремнем

Микроклиновидные или поликлиновидные ремни объединяют в себе признаки клиновидных и плоских ремней. Они обладают недостатками клиновидных ремней, такими как необходимость в подтягивании, износ, ограниченный срок службы, необходимость в техническом обслуживании и образование пыли. Однако их эффективность несколько выше, чем у клиновидных ремней.

# Электродвигатели вентиляторов



## Трехфазные асинхронные электродвигатели

В трехфазном асинхронном электродвигателе вращающийся магнитный поток создается обмоткой из медной проволоки. Сердечник ротора представляет собой изолированные алюминиевые стержни, закороченные на концах.

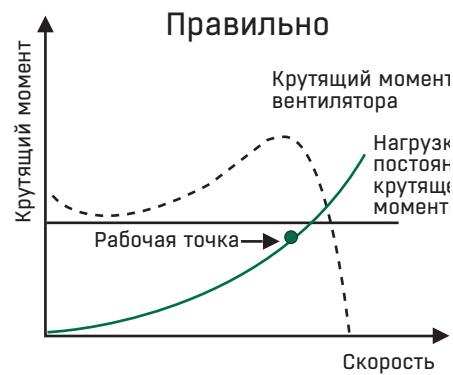
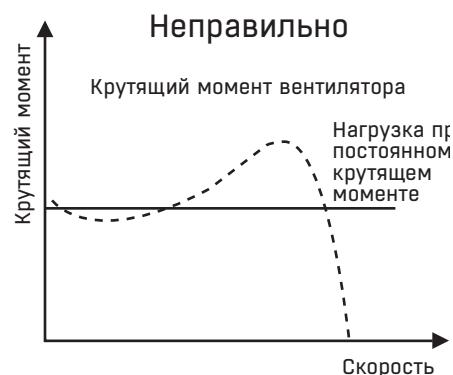
В проводнике ротора создается электродвижущая сила (ЭДС). Она заставляет магнитный поток вращаться, в результате чего он огибает проводник и усиливается с одной стороны, одновременно ослабевая с другой. Вследствие этого возникает сила, приводящая ротор во вращательное движение.

Магнитный поток вращается быстрее ротора. Чем значительнее эта разница в скорости, тем больше возникающая ЭДС и, соответственно, крутящий момент. Если ротор будет вращаться синхронно с магнитным потоком, ЭДС исчезнет, а вместе с ней исчезнет и сила, приводящая ротор во вращение. Если ротор замедляет вращение в связи с увеличением нагрузки на электродвигатель, крутящий момент электродвигателя возрастает до тех пор, пока он не станет равен сумме крутящего момента нагрузки и потерь в роторе.

Разница между скоростью вращения ротора и магнитного потока называется скольжением. В условиях полной нагрузки скольжение колеблется в пределах 2–7%, поэтому асинхронный электродвигатель можно считать механизмом с практически постоянной скоростью вращения. Скорость вращения при полной нагрузке указывается в технических характеристиках электродвигателя.

## Крутящий момент

Кривые крутящего момента для электродвигателей имеют формы, схожие с формами пунктирных кривых на показанных слева графиках. При выборе электродвигателя необходимо учесть, что крутящий момент нагрузки должен быть меньше минимального крутящего момента.



Крутящие моменты электродвигателя и нагрузки

### Мощность вращающегося механизма

$$P = M \cdot f$$

где

$P$  – мощность, Вт;

$M$  – крутящий момент, Н·м;

$f$  – частота вращения, Гц.

## Эффективность электродвигателя

Эффективностью электродвигателя называется степень превращения им электроэнергии в полезную работу. Потерянная в электродвигателе энергия превращается в тепло, рассеивающееся в окружающей среде.

## Прямой пуск односкоростного электродвигателя от сети

Простейшим способом пуска электродвигателя с короткозамкнутым ротором является подача электропитания на его обмотки через выключатель. При этом необходим лишь пускател для прямого пуска от сети. Однако использование прямого пуска от сети связано с определенными ограничениями ввиду возникающего при этом тока большой силы.

Электрические сети обычно не пригодны для прямого пуска от сети асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, мощность которых превышает 3–5 кВт. Однако имеются исключения из данного правила.

В случаях, когда из кривой зависимости тока от времени для защиты от перегрузки (пускател) видно, что защита электродвигателя должна сработать вследствие чрезмерно большой продолжительности пуска, может быть выбран либо электродвигатель с большей мощностью, либо пускател с оборудованием для тяжелого пуска.

## Пуск односкоростного электродвигателя переключением со звезды на треугольник

Данный тип пуска должен использоваться лишь в случае недопустимости прямого пуска от сети. При этом обмотки электродвигателя должна быть рассчитана на напряжение питания при подключении треугольником, например, на перепад напряжения 400 В. Для осуществления пуска необходимо использовать пусковой переключатель со звезды на треугольник, подключающий обмотки электродвигателя звездой на первом этапе пуска.

При пуске переключением со звезды на треугольник следует удостовериться, что кривая крутящего момента электродвигателя при подключении звездой находится над кривой крутящего момента вентилятора на участке от 0 до 90% конечной скорости. В связи с данным требованием для выполнения пуска переключением со звезды на треугольник обычно требуется электродвигатель большей мощности, чем для выполнения прямого пуска от сети.

## Пуск двухскоростного электродвигателя и управление его работой

Если вентилятор должен работать на двух скоростях, обычно используется двухскоростной электродвигатель, в котором изменение скорости вращения осуществляется путем переключения полюсов. Запуск электродвигателя и переключение между двумя скоростями (двумя числами пар полюсов) осуществляется с помощью переключателя полюсов.

### Внимание!

Двухскоростные электродвигатели обычно не предназначены для пуска переключением со звезды на треугольник. Электродвигатель следует запускать на низкой или высокой скорости.

## Защита электродвигателя от перегрузки

Защита электродвигателя призвана не допустить возникновения в нем токов чрезмерной силы, могущих стать причиной выхода двигателя из строя. Данная защита встроена в пускател электродвигателя. Возникновение токов чрезмерной силы приводит к нагреву реле с биметаллической пластиной, в результате чего происходит его срабатывание с размыканием цепи и отключением питания электродвигателя.

## Оборудование для тяжелого пуска

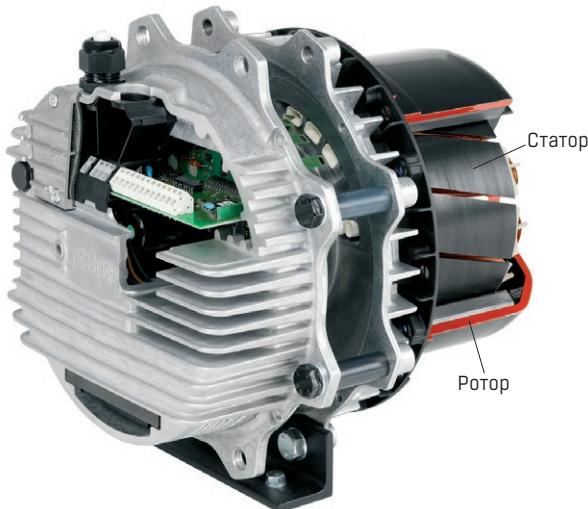
Пуск электродвигателя в течение особо продолжительного времени может стать причиной срабатывания защиты.

Во избежание этого, защита двигателя может быть дополнена оборудованием для тяжелого пуска.

## Защита от выпадения из синхронизма

Трехфазные электродвигатели могут выйти из строя вследствие обрыва одной фазы. Поэтому используемая защита от перегрузки должна включать в себя защиту от выпадения из синхронизма. Функционирование данной защиты основано на способности реле максимального тока срабатывать в случае различия в силе тока на разных фазах, в частности, в случае обрыва одной фазы.

## Электродвигатели с электронной коммутацией



Электродвигатели с электронной коммутацией представляют одно из направлений развития электродвигателей. Двигатели данного типа имеют большие перспективы использования в качестве приводов вентиляторов.

Питание этих двигателей осуществляется от источников постоянного тока. Благодаря электронному коммутатору, в качестве которого используется датчик Холла, направление тока в статоре двигателя меняется в зависимости от положения ротора.

Двигатели постоянного тока могут иметь разные конструкции.

В традиционных двигателях постоянного тока используется механическая коммутация с помощью угольных щеток.

Электродвигатели такой конструкции имеют ограниченный срок службы и нуждаются в дорогостоящем техническом обслуживании.

Электронная коммутация позволяет чрезвычайно эффективно регулировать скорость вращения электродвигателя.

В электродвигателях данной конструкции скорость вращения определяется скоростью изменения магнитных полей. В конструкции ротора электродвигателя предусмотрены постоянные магниты, создающие магнитное поле.

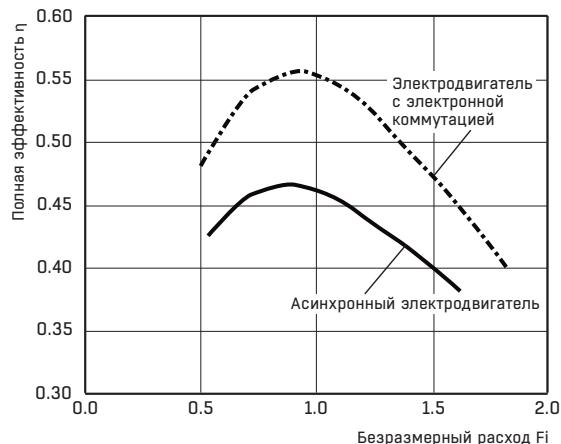
### Высокая эффективность

Эффективностью электродвигателя называется степень превращения им электроэнергии в полезную работу. Потерянная в электродвигателе энергия превращается в тепло, рассеивающееся в окружающей среде.

Электродвигатели с электронной коммутацией характеризуются меньшими потерями энергии в сравнении с асинхронными электродвигателями. В соответствии с этим электродвигатели данного типа меньше нагреваются.

На рисунке ниже представлены кривые полной эффективности прямоточных вентиляторов типа GPEB-031, приводимых от электродвигателя с электронной коммутацией и асинхронного электродвигателя. Полная эффективность рассчитывалась исходя из входной мощности.

Полная эффективность = эффективность лопастного колеса x эффективность электродвигателя x эффективность блока управления



### Регулирование скорости

Электронная коммутация обеспечивает чрезвычайно эффективное управление скоростью вращения электродвигателя. В электродвигателях с электронной коммутацией скорость вращения определяется скоростью изменения магнитных полей. В отличие от асинхронных двигателей, в данном случае отсутствуют ограничения, обусловленные количеством полюсов электродвигателя.

Электродвигатели с электронной коммутацией способны работать в широком диапазоне скоростей, демонстрируя при этом прекрасную эффективность. Поэтому они могут использоваться в качестве прямых приводов вентиляторов. Агрегат вентилятора и электродвигателя может быть оптимизирован в своем оптимальном рабочем диапазоне. Для работы электродвигателя с электронной коммутацией необходим блок управления. Он может быть встроенным или внешним. В электродвигателях Fläkt Woods используются встроенные контроллеры.

### Особенности электродвигателей с электронной коммутацией

- Малая габаритная длина.
- Меньшие габаритные размеры по сравнению с асинхронными электродвигателями.
- Низкий уровень шума.
- Низкий уровень вибраций.
- Однофазное электропитание при низкой выходной мощности.
- Трехфазное электропитание.

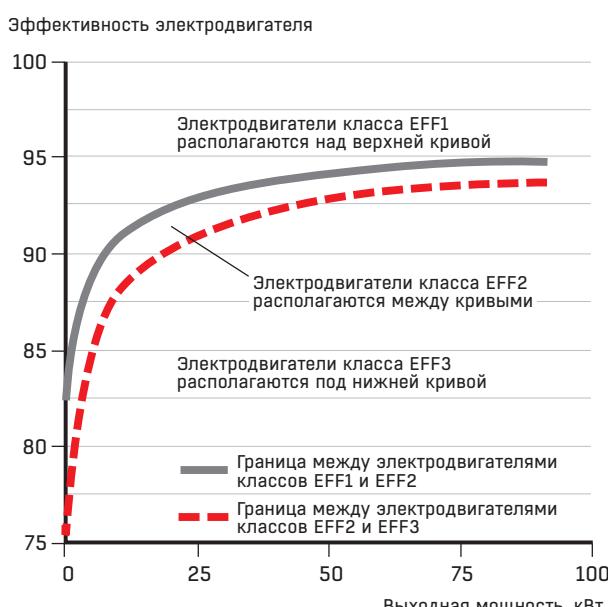
## Классификация электродвигателей по эффективности

ЕС и Европейская организация производителей электродвигателей СЕМЕР разработали классификацию низковольтных электродвигателей переменного тока по их эффективности, а также соответствующую систему обозначений.

В настоящее время классификация распространяется на трехфазные асинхронные электродвигатели, двухполюсные и четырехполюсные, с питанием от источника с частотой 50 Гц и напряжением 400 В, с名义альной выходной мощностью от 1 до 90 кВт.

Имеются три класса эффективности электродвигателей: EFF1, EFF2 и EFF3. Двигатели класса EFF1 являются наиболее энергоэффективными.

На рисунке ниже показаны кривые эффективности для различных классов. По возможности следует использовать электродвигатели класса EFF1.



## Время пуска электродвигателей без частотного преобразователя

Время пуска электродвигателя определяется с целью удостовериться, что оно не превышает допустимое значение, а также что в процессе пуска не происходит срабатывания защиты.

### Для расчета времени пуска необходимо:

- Выбрать номинальную выходную мощность электродвигателя Р исходя из требуемой мощности вентилятора Рвент для штатного режима работы (открытые направляющие лопатки или открытый воздушный клапан).
- В формулу для расчета времени пуска подставить значение требуемой мощности вентилятора при закрытых направляющих лопатках или закрытом воздушном клапане Рвент.

### Произвести расчет по формуле:

$$t = \frac{J \cdot n_{\text{вент}}^2 \cdot 10^{-3}}{46 \left( \frac{P}{M} \left( \frac{M_{\text{ макс}}}{M} + \frac{M_{\text{пуск}}}{M} \right) - P_{\text{вент}} \right)}$$

Рассчитанное время пуска является временем, необходимым для разгона вентилятора до максимальной скорости из состояния покоя.

### Для расчета времени пуска переключением со звезды на треугольник используется формула:

$$t = \frac{J \cdot n_{\text{вент}}^2 \cdot 10^{-3}}{46 \left( P \left( \frac{1}{3} \times \frac{M_{\text{ макс}}}{M} + \frac{1}{4} \times \frac{M_{\text{пуск}}}{M} \right) + P_{\text{вент}} \right)}$$

Рассчитанное время пуска является временем, в течение которого пускателем звезда-треугольник должен обеспечивать подключение звездой, чтобы вентилятор набрал приблизительно 90% от максимальной скорости вращения. По прошествии этого времени происходит переключение на треугольник. Перед пуском переключением со звезды на треугольник необходимо удостовериться, что крутящий момент электродвигателя при подключении звездой превышает крутящий момент вентилятора.

См. продолжение на следующей

## странице. Обозначения

P	— номинальная выходная мощность электродвигателя, кВт;
Рвент	— потребляемая мощность вентилятора при штатной скорости вращения, кВт (включая потери ременного привода);
РУ/Д	— минимальная мощность электродвигателя, при которой возможен пуск переключением со звезды на треугольник, кВт;
Мпуск/М	— отношение крутящего момента электродвигателя во время пуска к его крутящему моменту в штатном режиме;
Мmax/М	— отношение максимального крутящего момента электродвигателя к его крутящему моменту в штатном режиме;
нвент	— скорость вращения электродвигателя в штатном режиме, об./мин;
J	— момент инерции на вале вентилятора, кг·м <sup>2</sup> .

Момент инерции лопастного колеса вентилятора указан в его технических характеристиках, а моментом инерции ротора обычно можно пренебречь.

## Сравнение времени пуска электродвигателя с максимальным допустимым значением

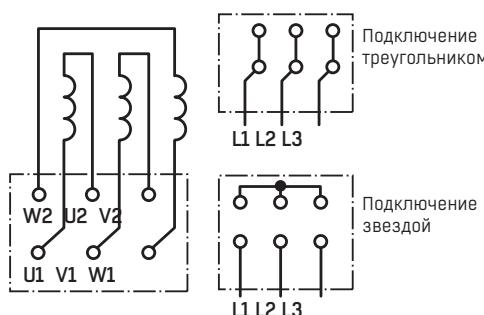
Максимальное допустимое время пуска электродвигателя зависит от используемого метода пуска и типоразмера электродвигателя, а также от числа его полюсов. При этом оно может различаться для двигателей разных модификаций.

## Сравнение времени пуска электродвигателя со временем срабатывания защиты от перегрузки

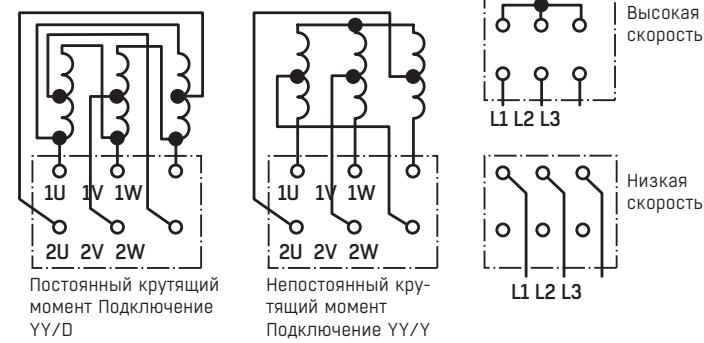
Время срабатывания защиты от перегрузки при пуске представляется на графиках с помощью кривых зависимости тока от времени. Данное время может зависеть от модификации защиты от перегрузки.

## Схемы электрического подключения электродвигателей

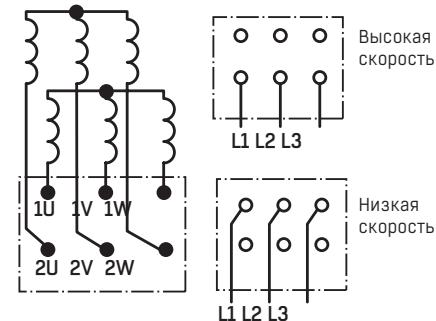
### Односкоростной электродвигатель



### Двухскоростной электродвигатель с одной обмоткой статора для переключения полюсов, так называемое подключение Даландера



### Двухскоростной электродвигатель с разделенными обмотками



Двухскоростные электродвигатели с одной обмоткой статора для переключения полюсов (так называемое подключение Даландера) имеют более высокую выходную мощность, чем электродвигатели того же типоразмера с раздельными обмотками.

## Удельная мощность вентилятора SFP

Удельная мощность вентилятора SFP вентиляционной установки отражает эффективность использования электроэнергии, потребляемой вентиляционной системой. Удельная мощность вентиляторов SFP всего здания — это суммарная мощность, потребляемая всеми вентиляторами здания, кВт, разделенная на максимальный штатный измеряемый расход приточного или удаляемого воздуха, м<sup>3</sup>/с, во всех помещениях здания. Примечание! Расчеты должны проводиться именно по расходу воздуха на границах помещений, а не по расходу воздуха, поступающего в вентиляционную установку снаружи здания или выбрасываемого вентиляционной установкой наружу.

### Удельная выходная мощность вентиляторов для всего здания

$$SFP = \frac{\sum P_{\text{электр}}}{q_{\max}}$$

SFP — удельная потребляемая мощность вентиляторов для здания;  
 $P_{\text{электр}}$  — суммарная мощность, подаваемая на все вентиляторы здания, кВт;  
 $q_{\max}$  — максимальный штатный измеряемый расход приточного или удаляемого воздуха, м<sup>3</sup>/с, во всех помещениях здания.

В вентиляционных системах с постоянным объемом воздуха расход SFP составляет 100% от штатного расхода воздуха, тогда как в вентиляционных системах с переменным объемом воздуха это значение достигает лишь 65%. Перепад давления, который необходимо преодолеть за счет вентиляторов, включает перепад давления в системе распределения воздуха и прочих устройствах, таких как воздухораспределители, фильтры и системы утилизации тепла. Помимо этого, должны быть учтены эффекты вентиляционной системы.



## Удельная мощность вентилятора SFP<sub>V</sub>

Выше был описан принцип расчета удельной выходной мощности вентиляторов для всего здания SFP. Как известно, многие здания состоят из нескольких частей, каждая из которых обслуживается собственной вентиляционной установкой. В процессе разработки проекта может потребоваться проверить, удовлетворяет ли отдельная вентиляционная установка специфическим требованиям в отношении энергоэффективности. В связи с этим Шведская ассоциация специалистов в сфере отопления, вентиляции и кондиционирования ввела дополнительное значение удельной мощности вентилятора SFP с индексом V.

Удельная мощность вентиляторов для вентиляционной установки с утилизацией теплоты, в состав которой входят приточные и вытяжные вентиляторы

$$SFP_V = \frac{P_{\text{электр приточ}} + P_{\text{электр вытяж}}}{q_{\max}}$$

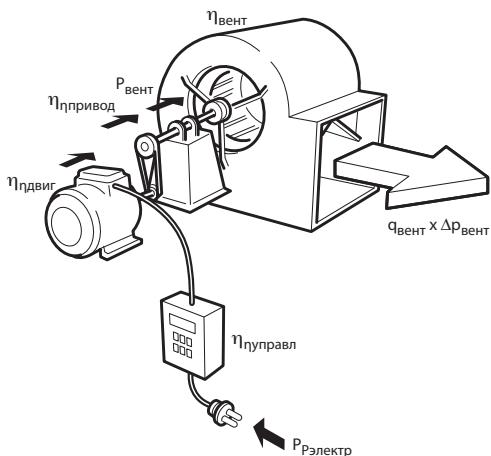
$SFP_V$  — потребляемая удельная электрическая мощность вентилятора вентиляционной установки с утилизацией теплоты, кВт/(м<sup>3</sup>/с);  
 $P_{\text{электр приточ}}$  — мощность, подаваемая на приточный вентилятор, кВт;  
 $P_{\text{электр вытяж}}$  — мощность, подаваемая на вытяжной вентилятор, кВт;  
 $q_{\max}$  — максимальный расход приточного или удаляемого воздуха в вентиляционной установке, м<sup>3</sup>/с.

Значение SFP<sub>V</sub> рассчитывается в условиях сухих теплообменников, чистых фильтров и плотности воздуха 1,2 кг/м<sup>3</sup>. Энергопотребление зависит не только от давления в вентиляционной установке, но и от давления в воздуховоде. Для снижения энергопотребления необходимо руководствоваться следующими правилами:

Для получения значения SFP<sub>V</sub> = 1,5 давление в воздуховоде не должно превышать 150 Па.

Для получения значения SFP<sub>V</sub> = 2,0 давление в воздуховоде не должно превышать 200 Па.

Для получения значения SFP<sub>V</sub> = 2,5 давление в воздуховоде не должно превышать 250 Па



#### Расчет мощности вентилятора $P_{электр}$

$$P_{электр} = \frac{q_{вент} \cdot \Delta p_{вент}}{\eta_{вент} \cdot \eta_{привод} \cdot \eta_{двиг} \cdot \eta_{управл} \cdot 1000}$$

$\eta$  – эффективности вентилятора, привода, электродвигателя и управляющего оборудования (см. рис.).

Для вентиляционной установки с роторным теплообменником расчет потребляемой электрической мощности для электродвигателя вытяжного вентилятора предполагает учет мощности, затрачиваемой на протечки и на продувку теплообменника. Помимо этого, следует учесть любые частичные перекрытия воздуховода со стороны удаляемого воздуха, необходимые для достижения надлежащего соотношения давлений и надлежащего направления протечек в вентиляционной установке.

## Энергоэффективные вентиляторы

Для обеспечения низкой удельной мощности вентилятора в системе распределения воздуха необходимо прежде всего по возможности снизить перепад давления в вентиляционной установке и системе распределения воздуха. Данное требование обусловлено тем, что расход электроэнергии прямо пропорционален создаваемому вентилятором повышению давления.

Помимо этого, расход электроэнергии обратно пропорционален эффективности вентилятора, электродвигателя, приводов (в случае их наличия) и управляющего оборудования, поэтому они должны быть максимально энергоэффективными.

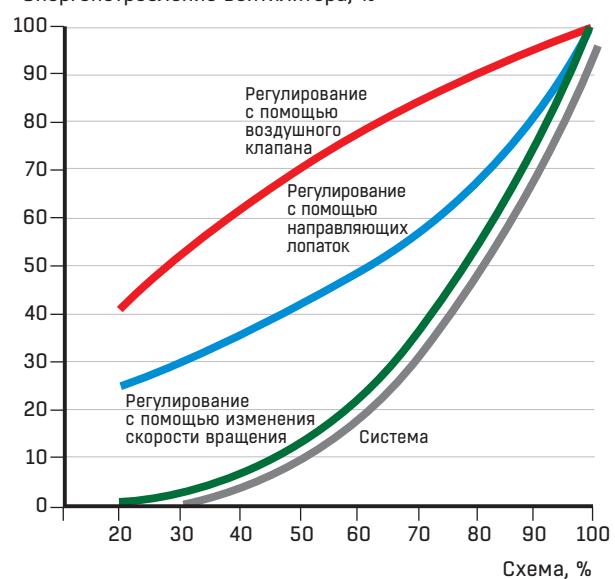
## Управление вентилятором

Простейшим и наиболее дешевым способом регулирования расхода воздуха на вентиляторе является изменение сопротивления воздушному потоку, т.е. использование воздушного клапана для частичного перекрытия воздуховода. Однако данный способ характеризуется низкой энергоэффективностью. Другим способом регулирования расхода является использование регулируемых направляющих лопаток перед вентилятором. Данный способ является более энергоэффективным.

Наиболее энергоэффективным способом является непрерывное регулирование скорости вращения

вентилятора с помощью частотного преобразователя. Эксплуатация вентилятора на скорости, в точности соответствующей потребностям в воздухе, позволяет снизить потребность в электроэнергии на 50% по сравнению со случаем использования воздушного клапана. На графике ниже показана зависимость энергопотребления вентилятора от объемного расхода воздуха при использовании различных методов управления.

Энергопотребление вентилятора, %



Энергопотребление вентилятора при различном объемном расходе воздуха

## Резюме

В состав вентилятора входит лопастное колесо, состоящее из лопастей, закрепленных на втулке. Вращение лопастей приводит к увеличению давления. Разность давлений между вентилятором и, например, помещением, в который приводят воздуховод, вызывает движение воздуха. В качестве привода лопастного колеса обычно используется электродвигатель. В создаваемом вентилятором давлении можно выделить статический и динамический компоненты.

Скорость движения воздуха в воздуховоде должна быть невысокой. Это необходимо, чтобы избежать излишней потери давления, а также чрезмерного шума. Поэтому на вентиляторе не должно создаваться значительное динамическое давление. Следовательно, конструкция вентиляторов должна обеспечивать полное превращение динамического давления в статическое в выпускном патрубке вентилятора или сразу за ним.

В вентиляционных системах общего назначения используются вентиляторы двух типов: центробежные и осевые.

В центробежных вентиляторах воздух поступает в вентилятор в направлении, параллельном оси лопастного колеса, а выходит из вентилятора в перпендикулярном направлении. Прямоточные вентиляторы — это центробежные вентиляторы без спирального кожуха.

Вентиляторы с загнутыми вперед лопастями создают наиболее высокое давление в сравнении с вентиляторами других типов при том же диаметре лопастного колеса и той же скорости его вращения. Таким образом, вентиляторы данного типа являются наиболее компактными среди вентиляторов различных типов, создающими одинаковое давление. Помимо этого, вентиляторы данного типа создают стабильный поток воздуха. Основными недостатками таких вентиляторов являются их сравнительно низкая эффективность и невысокая максимальная скорость вращения. Вентиляторы с загнутыми вперед лопастями обычно используются в малогабаритных вентиляционных системах.

Центробежные вентиляторы с загнутыми назад лопастями состоят из нескольких лопастей, образующих центробежные диффузоры. Статическое давление создается при прохождении воздуха через лопастное колесо. При этом кожух вентилятора не играет столь важную роль, как в случае вентилятора с загнутыми вперед лопастями. Однако он выполняет ту же рассеивающую

функцию и повышает эффективность вентилятора. Лопастное колесо такого вентилятора должно вращаться вдвое быстрее лопастного колеса с загнутыми вперед лопастями того же диаметра для создания тех же давления и расхода. Вентиляторы с загнутыми назад лопастями также отличаются высокой эффективностью. При этом их прочная конструкция делает возможной более высокую скорость вращения рабочего колеса по сравнению с вентиляторами с загнутыми вперед лопастями.

Прямоточный вентилятор имеет лопастное колесо с загнутыми назад лопастями и не имеет кожуха. Характеристики вентиляторов данного типа схожи с характеристиками центробежных вентиляторов с загнутыми назад лопастями. Однако в их случае отсутствует утилизация статического давления в кожухе. Преимуществом прямоточных вентиляторов является прямой привод, т.е. отсутствие приводных ремней, нуждающихся в техническом обслуживании.

Осевые вентиляторы обеспечивают большой расход воздуха при низком давлении. Давление увеличивается с ростом диаметра вентилятора и скорости его вращения. Осевые вентиляторы в наибольшей степени пригодны для использования в крупногабаритных вентиляционных системах.

Рабочие характеристики вентиляторов обычно представляются в виде графиков, на горизонтальной оси которых откладывается расход воздуха, а на вертикальной — давление.

Эффективность вентилятора определяется как произведение расхода воздуха и увеличения полного давления, разделенное на мощность на валу лопастного колеса.

При выборе электродвигателя необходимо учесть, что крутящий момент нагрузки должен быть меньше минимального крутящего момента.

Эффективность электродвигателя называется степень превращения им электроэнергии в полезную работу. Пуск электродвигателя может быть произведен прямо от сети или переключением со звезды на треугольник. Электродвигатели с электронной коммутацией являются сравнительно новым типом электродвигателей, характеризующимся повышенной эффективностью. Удельная мощность вентилятора SFP вентиляционной установки отражает эффективность использования электроэнергии, подаваемой в вентиляционную систему.



# 14 ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛИ И ВОЗДУХОХЛАДИТЕЛИ



## Краткое содержание главы



- Воздухонагреватели и воздухоохладители, теплообменники.
- Модули охлаждения.
- Непрямое испарительное охлаждение, система охлаждения Coolmaster®
- Электрические воздухонагреватели.

Теплообменники вентиляционной системы предназначены для нагревания и охлаждения воздуха. Каждый теплообменник выполняет специфические функции, поэтому разные модели теплообменников значительно отличаются друг от друга. Однако общие принципы работы теплообменников остаются неизменными.

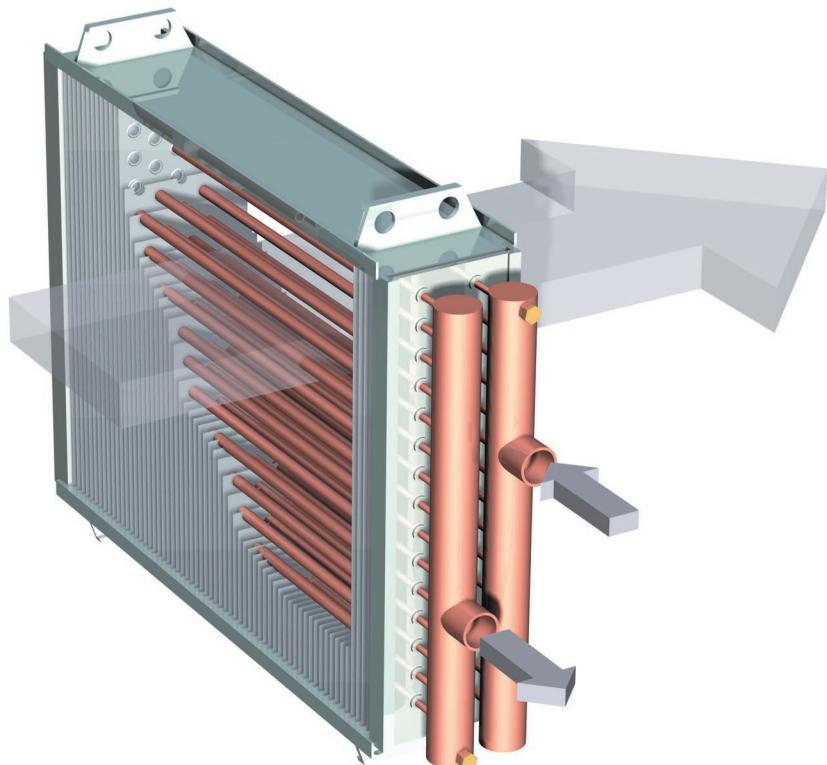
Теплообменники состоят из большого количества тонких пластин, называемых ребрами, в которых имеются отверстия для труб. Трубы вставляются в отверстия ребер и развализываются для плотного закрепления в ребрах.

Благодаря данной конструкции воздух, проходящий через теплообменник, эффективно нагревается или охлаждается подаваемой по трубам водой. Ребра теплообменника обычно выполняются из алюминия, а трубы — из меди. Однако возможно использование и иных материалов.

Основным назначением теплообменников является нагрев и охлаждение воздуха или иных газов.

В качестве теплоносителей для нагрева используются, в частности, теплая и горячая вода, испаряющийся хладагент, масло, технологические жидкости и пары.

В качестве теплоносителей для охлаждения используются, в частности, холодная вода, испаряющийся хладагент и масло.

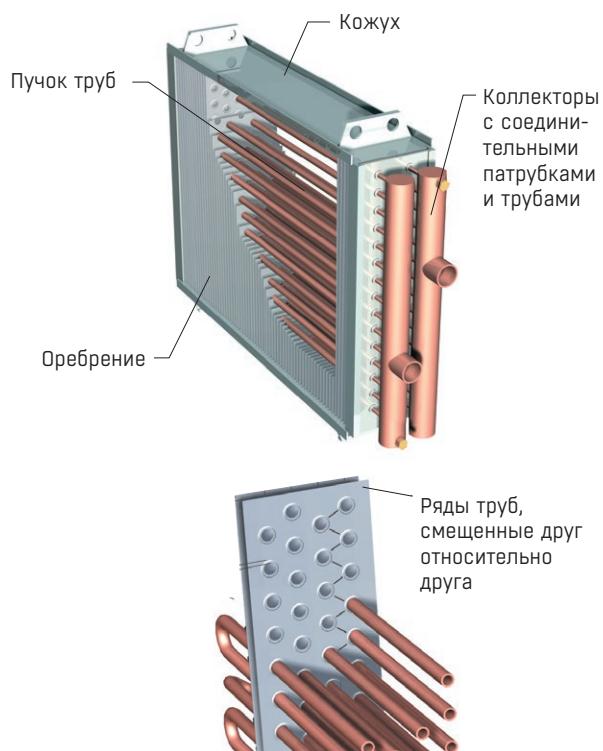


## Конструкция

Теплообменник состоит из множества труб, расположенных в один или несколько рядов в направлении течения воздуха. Для увеличения эффективности теплообменника ряды трубы могут быть расположены в шахматном порядке. Такая схема расположения обычно используется в теплообменниках вентиляционных установок компании Fläkt Woods. Трубы подключаются к контурам, длина которых соответствует температуре воды. Теплоноситель, используемый для нагрева или охлаждения, течет по трубам, а поток воздуха – вне труб.

Трубы имеют оребрение, обеспечивающая достаточно большую поверхность теплообмена, необходимую ввиду низкого коэффициента теплообмена со стороны воздуха. Оребрение крепится на трубах за счет развалцовки каждой трубы. Благодаря этому обеспечивается эффективный теплообмен между трубами и ребрами. Медные трубы полностью защищены оребрением. Трубы припаиваются к коллекторам, имеющим соединительные патрубки с наружной резьбой.

Коллекторы теплообменников, входящих в состав вентиляционных установок компании Fläkt Woods, также имеют закрытие воздушники и сливы. Сливы могут быть снабжены датчиками реле температуры, обеспечивающимо защиту от замерзания.

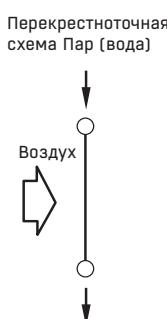


## Различные схемы теплообменников

Существует несколько схем движения теплоносителя и воздуха через теплообменник. См. рисунок ниже.

### ПЕРЕКРЕСТНОТОЧНАЯ СХЕМА

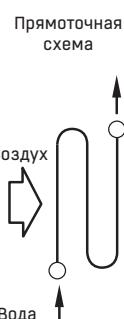
используется в теплообменниках, предназначенных для конденсации пара, а также в воздухонагревателях малой мощности.



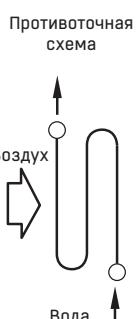
### ПРЯМОТОЧНАЯ СХЕМА

иногда используется в теплообменниках, в которых необходимо создать условия для работы датчика реле температуры, обеспечивающего защиту от замерзания. Если монтаж такого теплообменника был выполнен неправильно, падение его мощности может достигать 1%. В теплообменниках, эффективность которых зависит от направления течения воздуха или теплоносителя, надлежащие направления отмечены стрелками на кожухе.

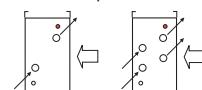
### ПРОТИВОТОЧНАЯ СХЕМА



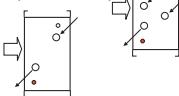
является наиболее распространенной. Она используется в охлаждающих теплообменниках, воздухонагревателях и теплообменниках утилизации теплоты большой мощности. Данная схема обеспечивает максимальную мощность теплообменника.



### Левый вариант



### Правый вариант

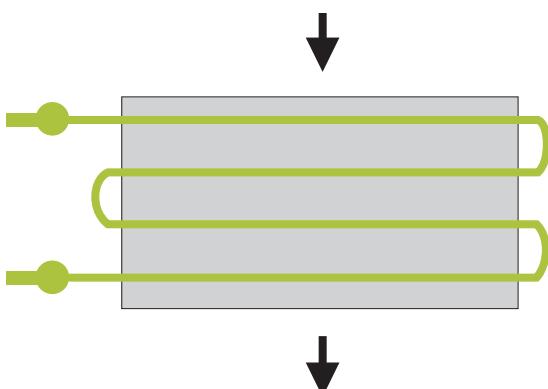
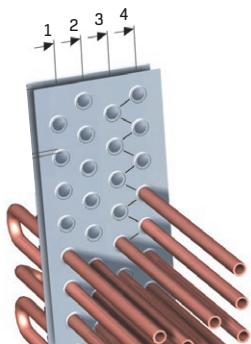


## Контуры теплообменника

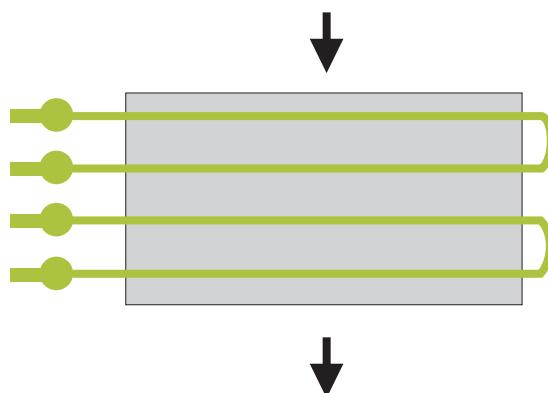
Увеличение числа трубных рядов или глубины теплообменника приводит к увеличению его мощности. Однако при этом возрастает перепад давления воздуха, что приводит к росту энергопотребления вентилятора. Увеличение мощности теплообменника должно осуществляться прежде всего за счет увеличения числа проходов воды. Число трубных рядов следует увеличивать только при превышении максимального допустимого перепада давления воды или при недостаточной мощности.

**Числом трубных рядов или трубной глубиной называется количество труб в направлении движения воздуха. Эта величина определяет физическую глубину оребрения.**

Число трубных рядов или трубная глубина



4 прохода воды, 1 контур



2 прохода воды, 2 контура

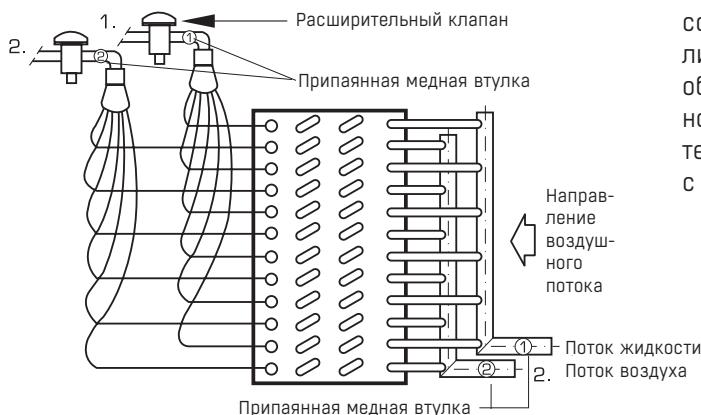
Перепады давления и температуры воды увеличиваются при увеличении количества проходов. Теплообменник может иметь один или несколько контуров. Чем длиннее контур, тем выше в нем перепад давления. Перед увеличением числа трубных рядов с целью увеличения мощности теплообменника необходимо удостовериться, что полученная конструкция является оптимальной с точки зрения требуемых температур воды.

## Теплообменники для испаряющегося хладагента

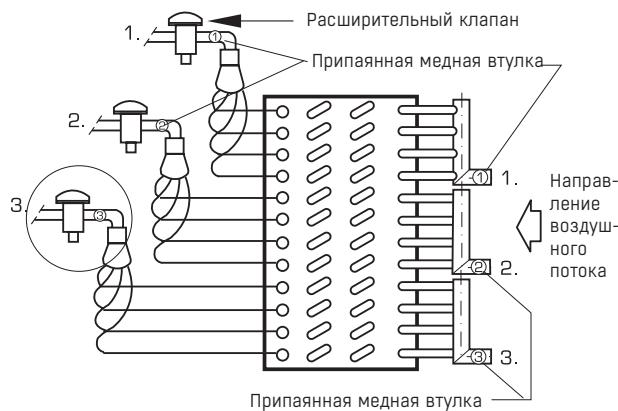
Теплообменники для испаряющегося хладагента могут быть разделены на две и более выходных ступени (количество зависит от высоты теплообменника).

Две выходных ступени обычно соединены таким образом, что каждый второй контур принадлежит выходной ступени 1, а оставшиеся – выходной ступени 2 (перекрестное соединение)

### Схема разделение контуров по выходным ступеням



Если выходных ступеней три и более, контуры обычно подключаются к ним последовательно по вертикали



### Нормальные скорости движения жидкости в теплообменниках

Охлаждающий теплообменник, м/с	Воздухо-нагреватель, м/с
Скорость воздуха 2 – 3 <sup>1)</sup>	2 – 5
Скорость жидкости 0,2 <sup>2)</sup> – 2 <sup>3)</sup>	0,2 <sup>2)</sup> – 1,5 <sup>3)</sup>

1) В случае скоростей выше 3 м/с необходимо предусмотреть каплеотделитель.

2) Минимальная скорость зависит от температуры воды.

3) Максимальная скорость для медных труб ограничена риском эрозии. Скорость воды в теплообменниках со стальными трубами не должна превышать 3 м/с.

В конструкции охлаждающих теплообменников со стороны впуска предусмотрены распределители, показанные выше. Расширительные клапаны обычно не установлены. Коллекторные трубы установлены на стороне выпуска. В конденсирующих теплообменниках коллекторные трубы установлены с обеих сторон.

# Модули охлаждения

Модуль охлаждения поставляется готовым к эксплуатации и полностью укомплектованным всеми необходимыми компонентами, включая системы управления. Модули охлаждения компании Fläkt Woods производятся под торговой маркой Cooler.

Функционирование модулей охлаждения основано на непосредственном испарении хладагента. Модули имеют три уровня мощности.

Конденсатор расположен со стороны удаляемого воздуха, а испаритель – со стороны приточного воздуха.

## Испаритель

Хладагент кипит внутри испарителя, превращаясь из жидкости в газ. Теплота испарения забирается из приточного воздуха, благодаря чему он охлаждается.

Испаритель представляет собой теплообменник, состоящий из медных труб с алюминиевым оребрением.

В конструкции испарителя также предусмотрен сливной поддон, выполненный из листовой нержавеющей стали.

## Компрессор

Газообразный хладагент поступает в компрессор, где сжимается до высокого давления. В результате также возрастает его температура.

## Конденсатор

Хладагент конденсируется внутри конденсатора, превращаясь из газа в жидкость. Термо конденсации отводится потоком удаляемого воздуха. Конденсатор представляет собой теплообменник, состоящий из медных труб с алюминиевым оребрением.

## Расширительный клапан

Расширительный клапан представляет собой дроссельный клапан, предназначенный для регулирования количества хладагента, циркулирующего в контуре хладагента. Это необходимо для поддержания оптимальной температуры за испарителем. Кроме того, это позволяет предотвратить попадание жидкости в компрессор. Компрессор предназначен для перекачивания газа, и в случае попадания в него жидкости он выйдет из строя. Для надлежащего функционирования расширительного клапана подаваемая на него жидкость должна быть чистой и не должна содержать примеси газа.



## Реле высокого давления

На стороне выпуска компрессора установлены реле давления, обеспечивающие остановку компрессора в случае чрезмерного роста давления. Данные реле обеспечивают защиту системы от избыточного давления. В условиях штатной работы модуля данные реле срабатывать не должны. В конструкции реле предусмотрены кнопки ручного сброса.

## Реле высокого давления (функционирующее)

Первый компрессор в системе также снабжен вторым реле высокого давления. Сброс данного реле производится автоматически. Реле установлено на срабатывание при более низком давлении, чем описанные выше реле.

Данное реле срабатывает, когда оба компрессора функционируют и нагрузка на конденсатор становится чрезмерно высока. Срабатывание реле приводит к отключению первого компрессора, в результате чего модуль охлаждения переключается с третьей ступени охлаждения на вторую. Это приводит к снижению нагрузки на конденсатор, благодаря чему модуль охлаждения может продолжать функционировать, но с меньшей охлаждающей мощностью. Данное переключение происходит при выходе за пределы штатных условий эксплуатации. В дальнейшем при снижении давления происходит автоматический сброс реле и модуль охлаждения вновь переключается на третью ступень.

## Реле низкого давления

На стороне впуска компрессоров установлены реле низкого давления. Данные реле обеспечивают остановку компрессоров в условиях чрезмерно низкого давления, могущего возникать вследствие чрезмерного падения температуры воздуха. Помимо этого, данные реле срабатывают в случае утечки хладагента.

## Жидкостной фильтр

Жидкостной фильтр установлен непосредственно перед расширительным клапаном. Фильтр предназначен для удаления твердых частиц и водяного пара.

## Смотровое окно

После фильтров располагается смотровое окно с индикатором влажности. При изменении влажности меняется цвет колбочки индикатора. Помимо этого, смотровое окно позволяет обнаружить утечки хладагента.

## Приемники хладагента

В конструкции некоторых охладителей предусмотрены приемники хладагента. Эти приемники представляют собой емкости, которые могут использоваться для хранения хладагента во время замены компонентов контура. В штатном режиме эксплуатации модуля приемники не используются, поэтому они отделены от остальной системы отсечными клапанами.

## Конденсатор с водяным охлаждением

Конденсатор с водяным охлаждением является дополнительным устройством, используемым наряду с конденсатором с воздушным охлаждением. Он может быть выбран в качестве дополнительного оборудования, если конденсатор с воздушным охлаждением не обеспечивает отвод достаточного количества теплоты. Данная ситуация может возникать в случае чрезмерно высокой температуры удаляемого воздуха, а также если скорость потока ниже скорости на стороне приточного воздуха. Помимо этого, конденсатор с водяным охлаждением может использоваться для утилизации тепла с целью его использования в системе горячей воды здания.

## Выбор модуля охлаждения

При выборе модуля охлаждения следует прежде всего исходить из размера вентиляционной установки. Из подходящих по этому параметру модулей охлаждения следует выбрать модуль, мощность которого соответствует имеющейся потребности в охлаждении.

# непрямое испарительное охлаждение

Одним из инновационных способов охлаждения помещений является непрямое испарительное охлаждение. Компания Fläkt Wood предлагает систему охлаждения COOLMASTER®, в которой используется данный способ охлаждения. Непрямое испарительное охлаждение предполагает охлаждение удалаемого или наружного воздуха с помощью испарительного увлажнителя (подробнее см. раздел, посвященный увлажнителям) и передачу холода приточному воздуху с помощью эффективного теплообменника, в котором не происходит передачи влаги. Данный способ особенно хорошо подходит для использования в сухом климате.

Во многих случаях непрямое испарительное охлаждение может применяться для снижения температуры в помещениях в теплое время года. Данный способ позволяет снизить температуру в помещении на 7–8°C, что делает микроклимат в помещении значительно более комфортным и в значительное степени способствует повышению производительности труда.

Испаряющаяся вода забирает тепло из окружающей среды. Таким образом, испаритель, увлажняющий воздух, одновременно охлаждает его.

Основными частями системы охлаждения COOLMASTER® являются увлажнитель, охлаждающий удалаемый воздух, и эффективный теплообменник, в котором приточный воздух охлаждается удалаемым воздухом.

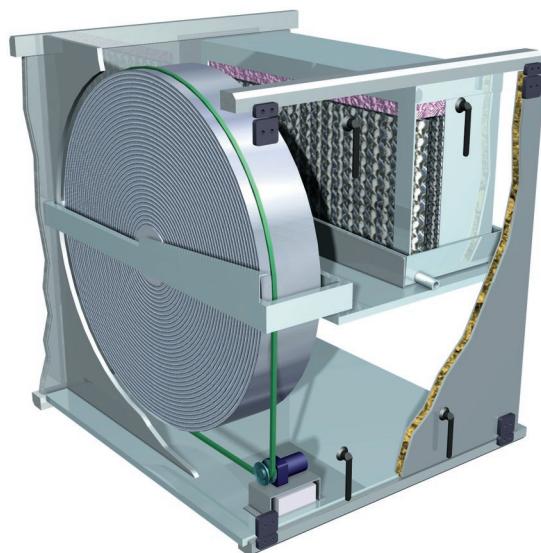
Если температура вне помещения высока, увлажнитель охлаждает удалаемый из помещения воздух. Затем в теплообменнике удалаемый воздух охлаждает наружный воздух перед его подачей в помещение.

Если система должна работать с максимальной производительностью, важно, чтобы увлажнитель и теплообменник работали с максимальной возможной эффективностью. Помимо этого желательно, чтобы перепад давления в системе (особенно со стороны приточного воздуха) был незначителен. Также рекомендуется использовать наиболее энергоэффективные вентилятор и электродвигатель. Это позволит свести к минимуму рост температуры на вентиляторе и в воздуховодах со стороны приточного воздуха.

Система охлаждения COOLMASTER® может быть дополнена увлажнителем на стороне приточного воздуха, обеспечивающим дополнительное охлаждение. В некоторых случаях наружный воздух содержит столь малое количество влаги, что некоторое его увлажнение является допустимым и не приводит к ухудшению микроклимата в помещении. Вместо роторного теплообменника для утилизации энергии могут использоваться пластинчатый теплообменник или систему с промежуточным теплоносителем. При этом мощность охлаждения снижается приблизительно на 15–20%.

Система охлаждения COOLMASTER®, укомплектованная установкой утилизации энергии ECONET®, способна обеспечивать ту же производительность, что и система с роторным теплообменником. Система COOLMASTER® демонстрирует максимальную производительность в следующих случаях:

- В условиях небольших внутренних нагрузок (температура и влажность).
- В условиях вытесняющей вентиляции (воздухораспределители с незначительным движением).
- В условиях достаточно сухого климата.

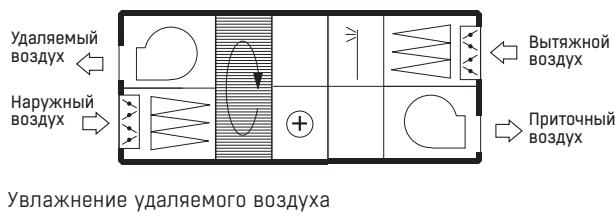


система охлаждения COOLMASTER®

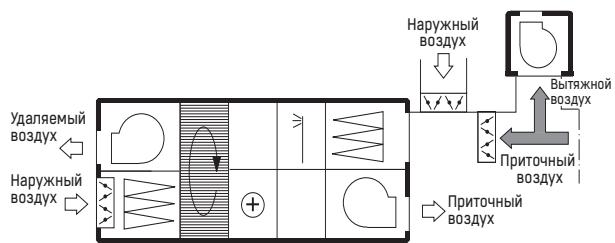
## Увлажнение удаляемого воздуха или наружного воздуха

При использовании испарительного охлаждения со стороны удаляемого воздуха стоимость оборудования является более низкой.

Пример конфигурации оборудования показан на рисунке.

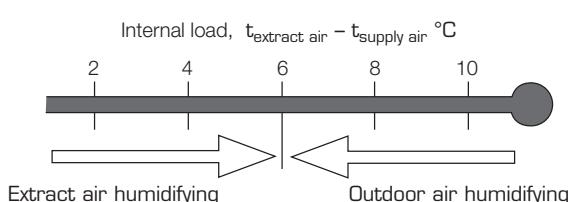


В случае значительной внутренней нагрузки температура удаляемого воздуха будет превышать температуру наружного воздуха. В этом случае целесообразно охлаждать не удаляемый, а наружный воздух. При этом стоимость оборудования возрастает, т.к. к нему добавляются вентилятор и воздушный клапан. Пример конфигурации оборудования показан на рисунке.



Увлажнение удаляемого воздуха предпочтительно, если внутренняя нагрузка  $\Delta t_{\text{внутр}}$  равна 6°C или менее.

$$(\Delta t_{\text{внутр}} = t_{\text{удал}} - t_{\text{приточ}})$$



Данная схема используется в большинстве офисных и промышленных помещений. Увлажнение наружного воздуха предпочтительно, если внутренняя нагрузка равна 6°C или более.

## Расчет производительности по охлаждению

Производительность по охлаждению системы охлаждения COOLMASTER® зависит от абсолютной влажности наружного воздуха. Чем более сухим является воздух, тем проще его охладить и тем производительность по охлаждению выше.

В случае охлаждения удаляемого воздуха производительность по охлаждению также зависит от внутренней нагрузки (температуры и влажности).

## Охлаждение в ночное время

Для максимального охлаждения помещения система охлаждения COOLMASTER® может эксплуатироваться также в ночное время. При этом происходит охлаждение конструкций здания, что способствует поддержанию комфортной температуры в дневное время. Благодаря этому удается сохранять в здании комфортный микроклимат даже в периоды продолжительной жаркой погоды.

## Энергозатраты и стоимость эксплуатации

Стоимость эксплуатации системы определяется особенностями местного климата, режимом работы системы, а также местными тарифами на электроэнергию и воду.

Перепад давления в увлажнителе является причиной увеличения энергопотребления вытяжного вентилятора. Однако соответствующее увеличение затрат несравнимо с затратами на эксплуатацию традиционного кондиционера. Помимо этого, данное увеличение затрат может быть снижено вдвое, если перед началом холодного времени года кассета увлажнителя будет демонтирована.

## Гигиена

Влажность способствует росту бактерий. Это может происходить как в охлаждающих теплообменниках, так и в увлажнителях воздуха.

Во избежание загрязнения приточного воздуха необходимо исключить возможность образования аэрозолей, способствующих распространению бактерий. Помимо этого, следует надлежащим образом выполнять техническое обслуживание оборудования. Немаловажным также является наличие подходящих фильтров в воздуховодах удаляемого и приточного воздуха.

При испарении воды в испарителе аэрозоли не образуются. Помимо этого, увлажнитель в системе COOLMASTER® установлен со стороны удаляемого воздуха. Благодаря этому попадание влаги в секцию приточного воздуха вентиляционной установки сведено к минимуму.

# Электрические воздухонагреватели

Электрические воздухонагреватели представляют собой совокупность нагревательных элементов, расположенных внутри вентиляционной установки на пути воздушного потока.

При прохождении электрического тока через нагревательные элементы их температура повышается и они отдают тепло окружающему воздуху. Каждый нагревательный элемент характеризуется постоянной мощностью.

Температура воздуха может регулироваться путем изменения количества работающих элементов. Данная регулировка обеспечивается с помощью ступенчатого переключателя, соединенного с реле. Подобная конструкция подразумевает ступенчатое изменение температуры воздуха, что может быть нежелательно. Мощность нагрева может регулироваться с помощью тиристора.

HS Вентиляционные установки с электрическими воздухонагревателями могут использоваться в сухих помещениях, в которых отсутствует опасность пожара и взрыва, а также в помещениях авторе-



монтных мастерских, в которых обычно не работают с бензином.

Скорость прохождения воздуха через воздухонагреватель не должна быть ниже 1,5 м/с. Максимальная температура воздуха после воздухонагревателя не должна превышать 40°C.

В условиях отсутствия горячего водоснабжения установка электрических воздухонагревателей является достаточно дешевым решением в отношении общей стоимости оборудования. Однако стоимость их эксплуатации весьма высока.

## Резюме

### Теплообменники в качестве воздухонагревателей и воздухоохладителей

Теплообменники используются, в частности, для нагревания и охлаждения воздуха в вентиляционных системах.

Теплообменники состоят из большого количества тонких пластин, называемых ребрами, в которых имеются отверстия для труб. Трубы вставляются в отверстия ребер и развализываются для плотного закрепления в ребрах.

Благодаря данной конструкции воздух, проходящий через теплообменник, эффективно нагревается или охлаждается подаваемой по трубам водой.

Существует несколько схем движения теплоносителя и воздуха через теплообменник: перекрестоточная, противоточная и прямоточная.

Противоточная схема является наиболее распространенной. Она используется в охлаждающих теплообменниках, воздухонагревателях и теплообменниках утилизации теплоты большой мощности. Данная схема обеспечивает максимальную мощность теплообменника.

### Модули охлаждения

Модуль охлаждения поставляется готовым к эксплуатации и полностью укомплектованным всеми необходимыми компонентами, включая системы управления. Функционирование модулей охлаж-



дения основано на непосредственном испарении хладагента. Модули имеют три уровня мощности. Конструкция модуля охлаждения включает испаритель, компрессор, конденсатор, расширительный клапан, реле высокого давления (функционирующее), реле низкого давления, жидкостной фильтр, смотровое окно, приемник хладагента и конденсатор с водяным охлаждением.

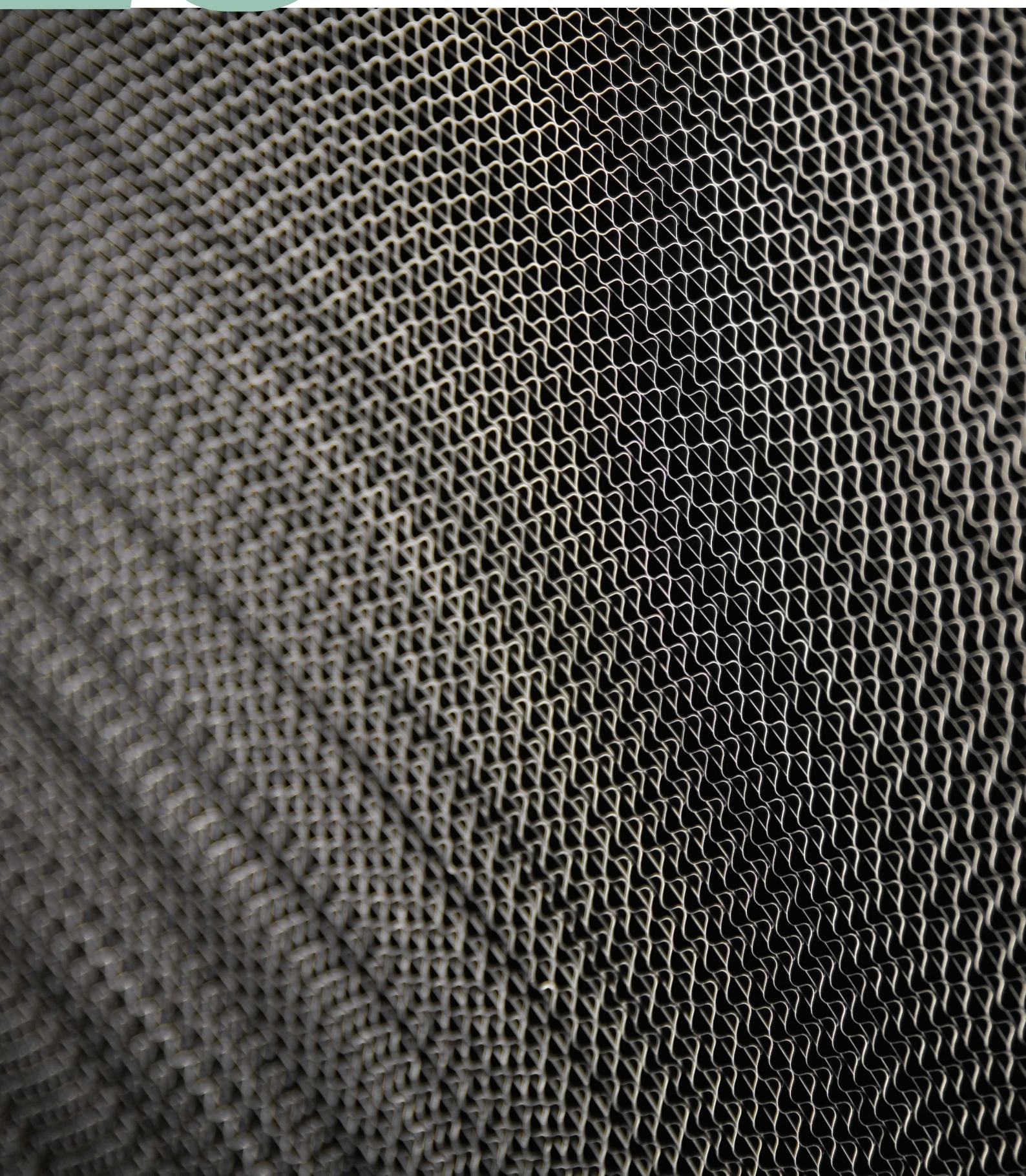
### Непрямое испарительное охлаждение

Одним из инновационных способов охлаждения помещений является непрямое испарительное охлаждение. Оно предполагает охлаждение удалаемого или наружного воздуха с помощью испарительного увлажнителя и передачу холода приточному воздуху с помощью эффективного теплообменника, в котором не происходит передачи влаги.

### Электрические воздухонагреватели

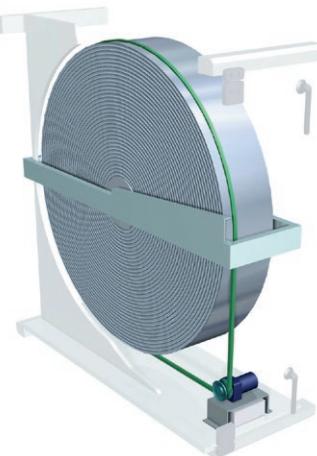
Электрические воздухонагреватели представляют собой совокупность нагревательных элементов, расположенных внутри вентиляционной установки на пути воздушного потока. При прохождении электрического тока через нагревательные элементы их температура повышается и они отдают тепло окружающему воздуху. Электрические воздухонагреватели сравнительно дешевы.

# Теплообменники для утилизации энергии обогрева и охлаждения



## Краткое содержание главы

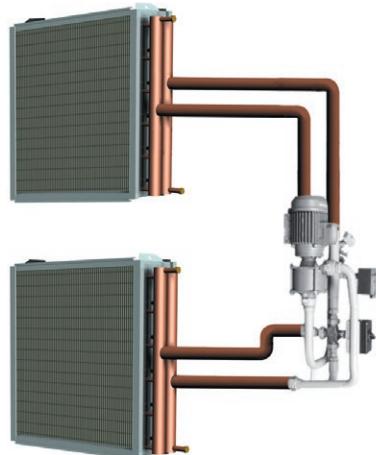
- Роторные теплообменники.
  - Продувочный сектор.
  - Замораживание и оттаивание.
  - Антикоррозийная защита.
  - Гигроскопичные и негигроскопичные роторы.
- Пластинчатые теплообменники.
  - Оттаивание.
  - Утечки.
- Системы с промежуточным теплоносителем.
  - Эффективность.
  - Управление и защита от замораживания.
  - Система ECONET®.



Роторный теплообменник



Пластинчатый теплообменник



Теплообменник с промежуточным теплоносителем

В вентиляционных системах общего назначения используются различные системы утилизации энергии обогрева и охлаждения. Наибольшее распространение получили

- роторные теплообменники;
- пластинчатые теплообменники;
- системы с промежуточным теплоносителем.

При выборе системы утилизации энергии необходимо учесть целый ряд факторов. Важнейшими из них являются

- эффективность и перепад давления (энергия);
- наличие свободного пространства;
- возможность присоединения воздуховодов;
- перетекание, перенос запахов;
- назначение здания;
- потребность в скрытом охлаждении;
- тип источника энергии.

Помимо этого, при выборе системы необходимо принять во внимание условия, в которых она будет функционировать большую часть времени.

## Роторные теплообменники

Роторный теплообменник включает в себя ротор, корпус и систему привода. Ротор обычно представляет собой совокупность каналов треугольного сечения, выполненных из тонкой алюминиевой фольги. Если необходим перенос влаги, поверхность каналов выполняется гигроскопичной. Ввиду достаточно малой площади сечения каналов течение в них является ламинарным или частично турбулентным. Компания Fläkt Woods производит роторные теплообменники REGOTERM® и TURBOTERM®.

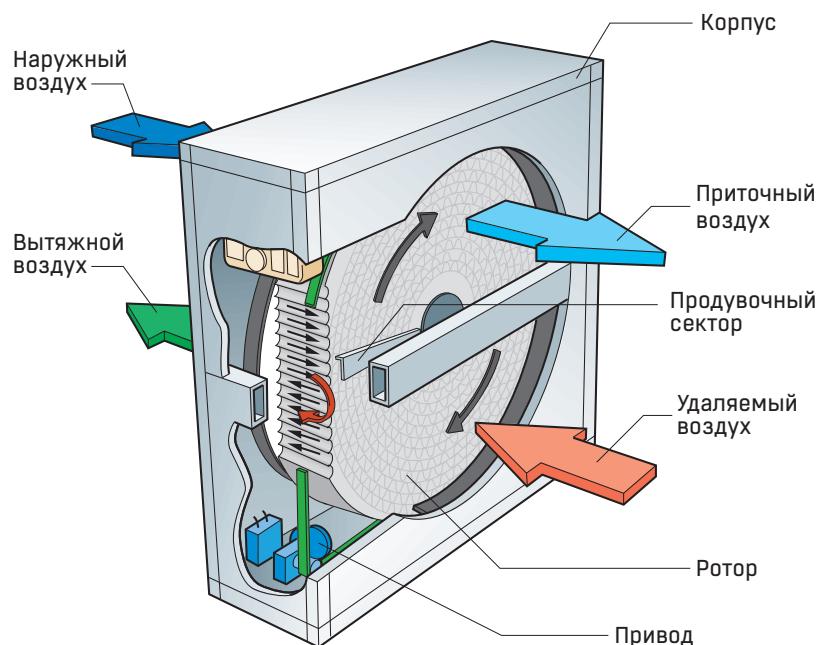
Ротор функционирует в условиях противотока и без промежуточного теплоносителя. Поэтому он характеризуется чрезвычайно высокой эффективностью, значительно превышающей эффективность других систем утилизации энергии (при сравнении систем с одинаковым перепадом давления).

Эффективность теплообмена регулируется путем изменения скорости вращения ротора или с помощью байпасного воздушного клапана.

Привод включает в себя электродвигатель с регулируемой или постоянной скоростью, шкивы и приводной ремень. Система привода позволяет регулировать скорость вращения ротора в пределах от приблизительно 20 об./мин до приблизительно 0,5 об./мин. Благодаря этому обеспечивается бесступенчатое регулирование мощности теплообменника на всем ее диапазоне.

Если необходимо начать оттаивание ротора, проще всего снизить скорость его вращения с помощью привода с регулируемой скоростью. Если ротор подвергается значительному замораживанию, может потребоваться поддон-каплесборник со сливом. Однако такая ситуация может возникнуть лишь в экстремальных условиях.

В условиях тропического климата ротор, предназначенный для утилизации энергии охлаждения, может вращаться с постоянной скоростью, т.к. потребность в утилизации остается неизменной.



Принцип работы роторного теплообменника

## Продувочный сектор

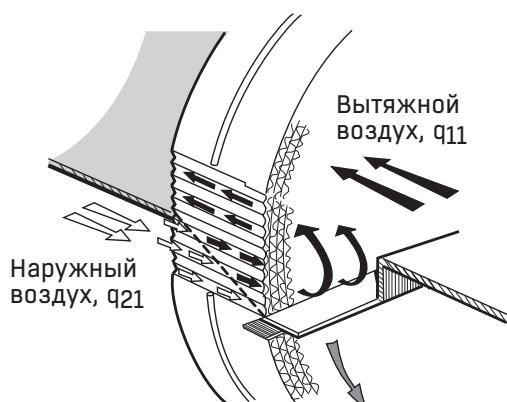
Продувочный сектор позволяет предотвратить перенос вращающимся ротором удаляемого воздуха на сторону приточного воздуха. В продувочном секторе предусмотрен проход между областями приточного и удаляемого воздуха. Разность давлений приточного и удаляемого воздуха обеспечивает продувку каналов с целью их очистки от удаляемого воздуха. Благодаря этому предотвращается его перенос. Пример функционирования продувочного сектора показан на рисунке ниже.

В условиях надлежащего соотношения давлений расход воздуха на продувку является пренебрежимо малым. Если размеры сектора слишком малы для обеспечения продувки при текущей скорости вращения и текущей разности давлений  $p_{21}-p_{11}$ , удаляемый воздух будет перетекать в приточный воздух, что может стать причиной переноса запахов. Если же сектор чрезмерно велик, некоторое количество чистого воздуха будет перетекать на сторону удаляемого воздуха. Даже при достаточно

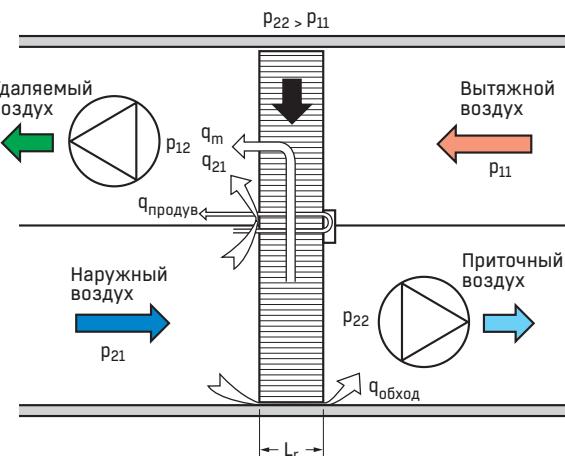
широком продувочном секторе содержащиеся в удаляемом воздухе газы с сильным запахом и частицы пыли (например, сигаретный дым и кухонные запахи) могут переноситься в приточный воздух за счет адсорбции на поверхностях ротора.

В роторных теплообменниках Semco компании Fläkt Woods данная проблема решена путем нанесения на поверхности ротора специального слоя толщиной 3 Å.

В ходе работы ротора возникают поток перетекания  $q_{21}$ , поток переноса  $q_m$ , обходной поток  $q_{\text{обход}}$  и в ряде случаев также поток продувки  $q_{\text{продув}}$ . Поток перетекания сведен к минимуму и движется в требуемом направлении благодаря надлежащей разности давлений между разными частями ротора. Данная разность давлений обеспечивается благодаря правильному местоположению вентилятора и эффективной герметизации оборудования. При необходимости в воздуховоде удаляемого воздуха может быть установлен дроссельный воздушный клапан.



Пример функционирования продувочного сектора



Перетекание и перенос

## Замораживание

При низких температурах вне помещения на стороне удаляемого воздуха происходит осаждение конденсата, который затем обычно испаряется на стороне приточного воздуха. При высокой влажности удаляемого воздуха и чрезвычайно низкой температуре вне помещения скорость конденсации превышает скорость испарения и на роторе скапливается влага.

Если средняя температура ротора в течение полного оборота ниже 0°C, влага превращается в иней. В таких условиях необходима система оттаивания. В обычной вентиляционной системе общего назначения без функции увлажнения воздуха гигроскопичный ротор может функционировать без накопления влаги и образования инея при температуре приблизительно до -25°C.

Негигроскопичный ротор может функционировать при температуре приблизительно до -15°C. Указанные температурные границы можно проверить по диаграмме Молье. Если прямая линия между удаляемым воздухом и условиями вне помещения не пересекает линию насыщения, избыточная влага не образуется.

## Оттаивание

Оттаивание может быть инициировано путем снижения скорости вращения ротора приблизительно до 0,5 об./мин. Процесс запускается по сигналу реле давления, когда давление приблизительно на 50 Па превышает давление после оттаивания, которое, в свою очередь, приблизительно на 30% превышает нормальный перепад давления вследствие наличия воды в роторе.

Альтернативным средством запуска оттаивания является таймер, включающийся при падении температуры ниже -15°C и инициирующий оттаивание 2–3 раза в сутки. Процесс замораживания может продолжаться много часов. Оттаивание может занять 15–20 минут.

В течение этого времени эффективность теплообмена низка (20–30%) и в воздухонагреватель должно подаваться тепло.

Альтернативой оттаиванию является предварительный нагрев наружного воздуха до температуры, при которой замораживание не происходит. Если ротор является гигроскопичным, предельная температура может быть определена из психрометрической таблицы.

## Антикоррозийная защита

В определенных условиях может возникнуть необходимость в антикоррозийной защите ротора. При этом в конструкции ротора должно быть предусмотрено усиление краев.

В особо агрессивных средах могут использоваться алюминиевые детали с эпоксидным покрытием.

## Области применения

Благодаря своей высокой эффективности роторные теплообменники являются приоритетным решением в следующих условиях:

- Удаляемый воздух является достаточно чистым.
- Воздуховоды приточного и удаляемого воздуха сходятся в одной точке.
- Возможна утилизация влаги.
- Допустима незначительная рециркуляция газов и твердых частиц из удаляемого воздуха.

# Гигроскопичные и негигроскопичные роторы

Роторные теплообменники могут быть разделены на гигроскопичные и негигроскопичные.

Негигроскопичные роторы осуществляют перенос только явной теплоты (если пренебречь переносом влаги, могущим происходить при определенных температурах).

Напротив, гигроскопичные роторы в любых условиях переносят как явную, так и скрытую теплоту.

Эффективность негигроскопичных роторов в целом определяется площадью поверхности теплопередачи и скоростью вращения, тогда как эффективность гигроскопичных роторов зависит от большего количества факторов.

В этой связи большое значение приобретают свойства гигроскопичного покрытия.

Характеристики гигроскопичных роторов с различными покрытиями могут кардинально различаться.

## Негигроскопичные роторы

Негигроскопичные роторы выполнены из тонких листов алюминия без покрытия или, в некоторых случаях, с эпоксидным покрытием для защиты от коррозии. Роторы данного типа переносят только явную теплоту за исключением случаев переноса небольшого количества влаги в виде конденсата.

Если наружный воздух является достаточно холодным, а удаляемый — теплым и влажным, происходит конденсация влаги на стороне удаляемого воздуха и ее испарение на стороне приточного воздуха, т.е. перенос некоторого ее количества.

Если температура наружного воздуха чрезвычайно низка, внутри ротора образуется иней. Для его удаления необходима процедура оттаивания. Наличие или отсутствие инея, а также скорость его образования, определяются главным образом температурой наружного воздуха и влажностью удаляемого воздуха.

В вентиляционной системе общего назначения без подачи увлажненного воздуха в помещения иней на роторе не образуется, пока температура наружного воздуха не падает приблизительно до  $-15^{\circ}\text{C}$ .

Негигроскопичные роторы используются главным образом для утилизации теплоты в холодное время года. Утилизация энергии охлаждения в теплое время года с помощью роторов данного типа весьма неэффективна, т.к. они осуществляют перенос только явной теплоты.

## Гигроскопичные роторы

Гигроскопичные роторы выполнены из тонких листов алюминия, прошедших специальную обработку, в результате которой их поверхность стала гигроскопичной. Это означает, что поверхность приобрела способность адсорбировать и десорбировать большое количество молекул воды. Помимо этого, существуют роторы, выполненные из тонкого стекловолокна с различными покрытиями, делающими его гигроскопичным.

Проходя сторону с высокой влажностью, поверхность ротора адсорбирует молекулы воды, которые затем десорбируют на стороне с меньшей влажностью.

Благодаря этому наряду с переносом явной теплоты происходит перенос влаги и скрытой теплоты. Гигроскопичные роторы меньше подвержены замораживанию, чем негигроскопичные.

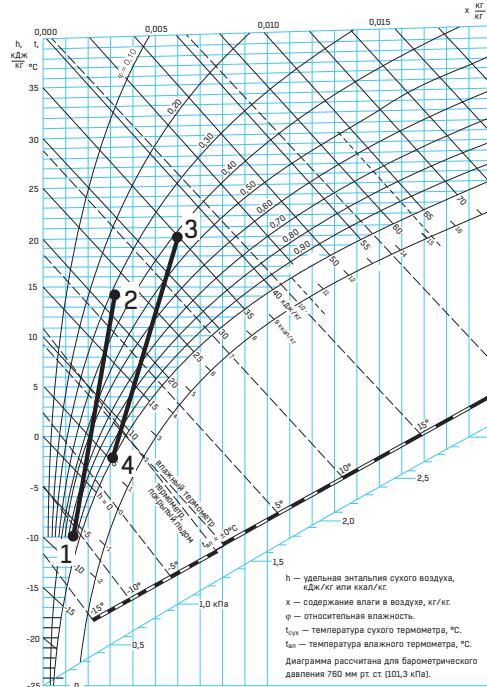
В обычной вентиляционной системе общего назначения такие роторы способны функционировать без образования инея, пока температура наружного воздуха не упадет приблизительно до  $-25^{\circ}\text{C}$ .

Однако если вследствие наличия каких-либо источников влаги в помещениях относительная влажность удаляемого воздуха достигает 50%, образование инея может начаться уже при  $-8^{\circ}\text{C}$ .

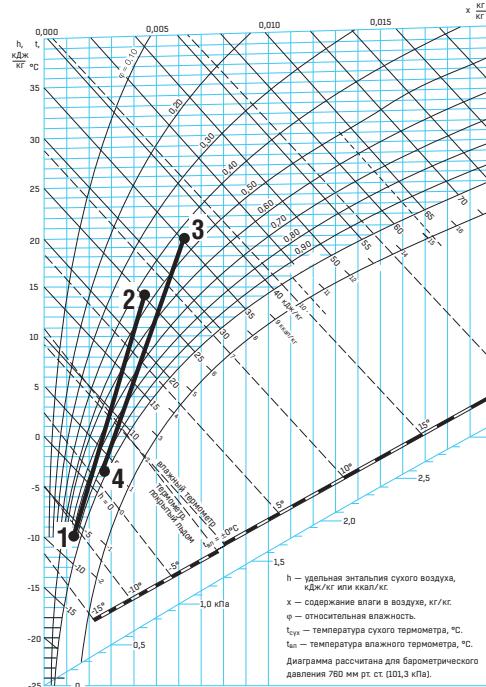
Процесс замораживания поверхностей ротора в вентиляционной системе общего назначения занимает несколько часов. Поэтому если вентиляционная система используется только днем, оттаивание может быть проведено вочные часы. Перенося влагу, гигроскопичный ротор способствует улучшению микроклимата в помещении в холодное время года, когда воздух в помещении становится слишком сухим. Летом, когда наружный воздух становится теплым и влажным, ротор, напротив, сушит приточный воздух, делая микроклимат в помещении более сухим и прохладным.

В жарком климате гигроскопичный ротор обеспечивает существенную экономию энергии охлаждения.

Приведенные ниже графики позволяют сравнить процессы переноса влаги в холодное время года в случаях негигроскопичного (слева) и гигроскопичного (справа) роторов. Из графиков видно, что гигроскопичный ротор обеспечивает более высокую влажность воздуха.

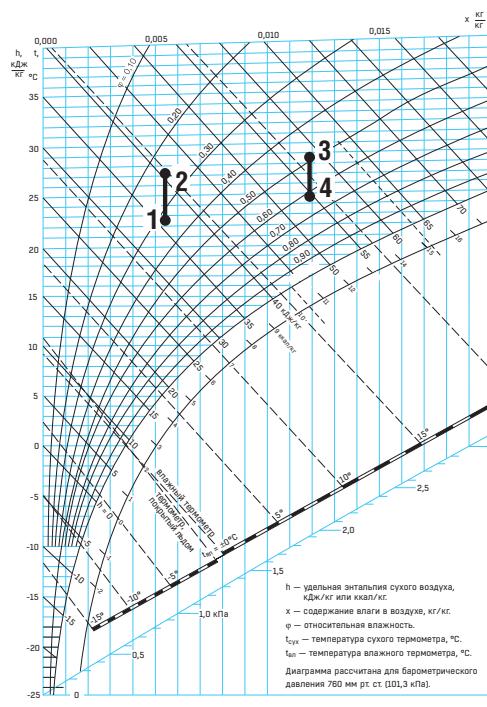


Негигроскопичный ротор

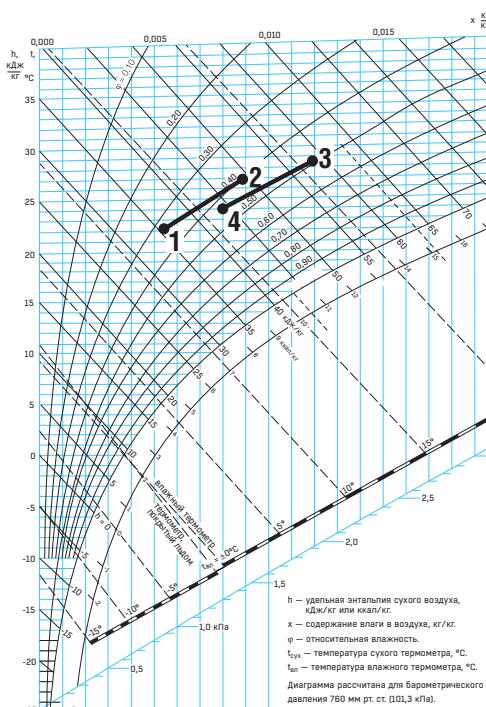


Гигроскопичный ротор

Приведенные ниже графики позволяют сравнить процессы переноса влаги в теплое время года в случаях негигроскопичного (слева) и гигроскопичного (справа) роторов. Из графиков видно, что гигроскопичный ротор обеспечивает передачу большего количества энергии (линия 3–4), чем негигроскопичный. Это объясняется тем, что гигроскопичный ротор переносит как явную, так и скрытую энергию.



Негигроскопичный ротор



Гигроскопичный ротор

## Системы с двумя роторами

Система с двумя роторами состоит из гигроскопичного ротора, охлаждающего теплообменника и негигроскопичного ротора. Компания Fläkt Woods производит систему с двумя роторами Twin Wheel. Данная система предназначена для охлаждения и осушения воздуха.

Осушение может быть важно в некоторых вентиляционных системах, например в системах с охлаждающими балками, где низкая влажность необходима для предотвращения конденсации. В традиционных вентиляционных системах осушение часто осуществляется путем охлаждения воздуха в охлаждающем теплообменнике с конденсацией излишней влаги. Затем воздух проходит через воздухонагреватель, где нагревается до требуемой температуры. Недостатком данной схемы являются значительные эксплуатационные затраты, связанные с работой теплообменников охлаждения и нагрева.

Если необходимо охлаждение и температура наружного воздуха превышает температуру удаляемого воздуха, гигроскопичный ротор обеспечивает снижение температуры поступающего наружного воздуха. При этом если абсолютная влажность наружного воздуха выше абсолютной влажности удаляемого воздуха, гигроскопичный ротор также обеспечивает перенос некоторого количества влаги от наружного воздуха к удаляемому.

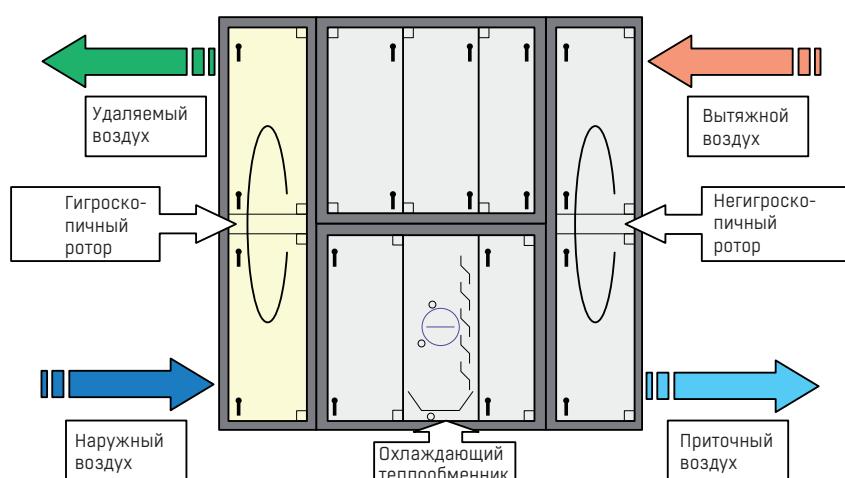
После того, как наружный воздух прошел гигроскопичный ротор, он попадает в охлаждающий теплообменник, где происходит дальнейшее снижение его температуры и конденсация содержащейся в нем влаги. Благодаря этому обеспечивается необходимое осушение воздуха. Охлажденный и осушенный воздух поступает на негигроскопичный ротор, где он нагревается до требуемой температуры за счет теплоты удаляемого воздуха. После этого воздух подается в помещения.

Результатом работы системы является воздух требуемой температуры и влажности. Благодаря этому данная система особенно хорошо подходит для подачи воздуха в помещения с охлаждающими балками, т.к. в этом случае приточный воздух должен быть максимально сухим.

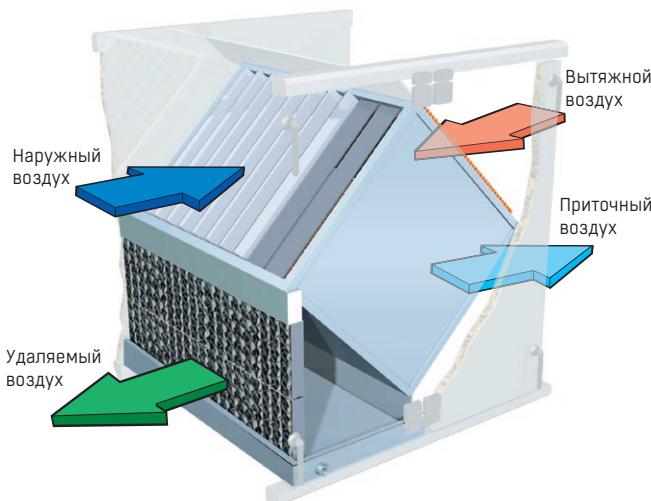
В процессе нагрева приточного воздуха на негигроскопичном роторе происходит снижение температуры удаляемого воздуха, благодаря чему возрастает эффективность утилизации холода на гигроскопичном роторе.

Если температура приточного воздуха перед его поступлением в охлаждающий теплообменник снижается, это ведет к снижению нагрузки на охлаждающий теплообменник.

В связи с этим в системе может использоваться теплообменник меньшей мощности. Потребность в производительности по охлаждению снижается вдвое. В то же время, в большинстве систем исчезает необходимость в воздухонагревателе.



# Пластинчатые теплообменники



## Конструкция

Пластинчатый теплообменник состоит из квадратных пластин, расположенных параллельно друг другу. Через каждый второй канал между пластинами пропускается теплый воздух, а через оставшиеся — холодный. Теплопередача осуществляется через пластины. Компания Fläkt Woods производит пластинчатый теплообменник RECUTERM®.

Пластины теплообменника являются достаточно тонкими и выполнены из материала с высокой теплопроводностью, поэтому коэффициент теплопередачи между двумя потоками воздуха весьма велик. Для обеспечения подвода воздуха пластинчатый теплообменник должен иметь перекрестноточную схему. Вследствие этого эффективность теплообмена в пластинчатом теплообменнике значительно уступает таковой в роторном теплообменнике. Помимо этого, перекрестная схема обуславливает наличие угла между стороной наружного воздуха и стороной удаляемого воздуха (т.н. «холодного угла»), характеризующегося низкой температурой приточного воздуха.

При низкой температуре наружного воздуха удаляемый воздух охлаждается ниже точки росы, в результате чего происходит образование конденсата. Поэтому под секцией удаляемого воздуха необходимо предусмотреть наличие поддона-каплесборника со сливным соединением. Если скорость движения удаляемого воздуха превышает приблизительно 3 м/с, возникает риск уноса воды воздушным потоком. В этом случае на стороне удаляемого воздуха необходимо предусмотреть наличие каплеотделителя. При высокой влажности приточного воздуха сторона приточного воздуха также должна быть снабжена поддоном-каплесборником. Конструкция пластинчатых теплообменников часто предусматривает наличие обходного канала для наружного воздуха. Это необходимо для регулирования температуры приточного воздуха и предотвращения замораживания. Для обеспечения надлежащего перепада давления в теплообменнике расстояние между его пластинами выбирается с учетом размера теплообменника.

## Замораживание и оттаивание

Когда температура вне помещения падает ниже приблизительно  $-7^{\circ}\text{C}$ , конденсат в теплообменнике может превращаться в лед.

Существует несколько методов, позволяющих предотвратить забивание теплообменника льдом:

- Непрерывное посекционное оттаивание, начинающееся при падении температуры вне помещения ниже установленного значения.
- Направление наружного воздуха по обходному каналу с помощью байпасного воздушного клапана с целью постоянного поддержания температуры удаляемого воздуха выше  $0^{\circ}\text{C}$  и, таким образом, предотвращения образования льда.
- Отключение приточного вентилятора на время, необходимое для оттаивания.

Метод посекционного оттаивания демонстрирует высокую эффективность. В рамках данного метода сторона приточного воздуха теплообменника разделяется на несколько секций (от двух до четырех). Эти секции последовательно перекрываются, чтобы лед, образовавшийся в каналах удаляемого воздуха, имел возможность растаять. В процессе посекционного оттаивания расход приточного воздуха несколько понижается. Эффективность теплообменника также падает, при этом величина падения зависит от количества секций. При наличии четырех секций эффективность падает приблизительно на 10%. Это обусловлено изменением соотношения расходов приточного и удаляемого воздуха в действующих секциях.

При наличии двух секций эффективность падает на 50%. Другим методом борьбы с замораживанием является использование байпасного воздушного клапана. Воздушный клапан автоматически регулируется таким образом, чтобы температура удаляемого воздуха в холодном углу не опускалась ниже заданного значения, например,  $2^{\circ}\text{C}$ . При использовании данного метода в условиях низкой температуры наружного воздуха и одинаковом массовом расходе приточного и удаляемого воздуха эффективность теплообменника ограничивается 20-25%.

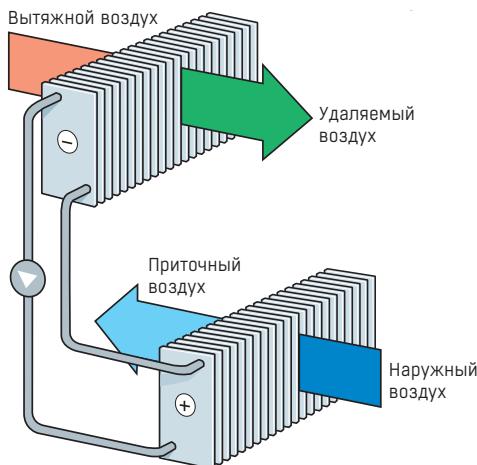
## Утечки

Конструкция пластинчатых теплообменников может обеспечивать чрезвычайно высокую герметичность, соответствующую утечкам в объеме менее 0,5% при перепаде давления 400 Па. При этом ввиду того, что давление приточного воздуха превышает давление удаляемого воздуха, перенос газов и твердых частиц из удаляемого воздуха в приточный не происходит.

## Антикоррозийная защита

Пластинчатые теплообменники, предназначенные для работы в особо агрессивных средах, выполняются из листового алюминия с эпоксидным покрытием. Данное покрытие обеспечивает необходимую антикоррозийную защиту.

# Системы с промежуточным теплоносителем



## Конструкция

Система с промежуточным теплоносителем представляет собой два отдельных теплообменника – один для приточного воздуха, а другой для удаляемого. Компания Fläkt Woods производит системы с промежуточным теплоносителем ECOTERM® и ECONET®. В качестве промежуточного теплоносителя, перекачиваемого по замкнутому контуру и переносящему тепло от горячего теплообменника к холодному, используется вода с добавкой антифриза.

Теплообменник на теплой стороне обычно снабжается поддоном-каплесборником из нержавеющей стали для сбора конденсата. Помимо этого, при необходимости данный теплообменник может быть оснащен каплеотделителем. Теплообменники выполнены из медных труб с профилированным алюминиевым или медным оребрением. Расстояние между ребрами обычно составляет 2 мм. Водяной контур оснащен насосом и контроллером с двух- или трехходовым клапаном (система ECOTERM®) либо насосом с частотным регулированием (система ECONET®), обеспечивающими регулирование мощности и предотвращающими замораживания. Системы с промежуточным теплоносителем могут использоваться в вентиляционных системах с различным расходом воздуха, от незначительного до чрезвычайно большого. В большинстве случаев для каждого размера системы имеется несколько ее модификаций различной мощности, обусловленной количеством трубных рядов в составе теплообменников. Теплообменники должны быть подключены таким образом, чтобы вместе образовывать противоточную схему.

## Характеристики

Система с промежуточным теплоносителем обладает рядом преимуществ, отсутствующих в других системах:

- Потоки приточного и удаляемого воздуха эффективно разделены, поэтому перетекание воздуха между ними невозможно.

- Благодаря гибкости конструкции система может использоваться в вентиляционных установках, в которых воздуховоды приточного и удаляемого

## Эффективность

Эффективность теплообмена в системах с промежуточным теплоносителем зависит главным образом от количества трубных рядов в составе теплообменников. Таким образом, высокая эффективность неизбежно сопровождается значительным перепадом давления. Эффективность 50% можно ожидать при наличии шести трубных рядов, 55% – восьми, 60% – десяти.

## Регулирование и предотвращение замерзания

### Обход

В рамках регулирования данного типа теплоноситель может направляться в обход теплообменника приточного воздуха. Регулируя количество пущенного в обход теплоносителя можно изменять количество утилизируемой теплоты. Помимо этого, данный метод позволяет управлять температурой удаляемого воздуха, выходящего из теплообменника, и не допускать ее чрезмерного падения, при котором возможно замораживание. Данный тип регулирования может использоваться и в системах с несколькими воздушными теплообменниками, работающими параллельно.

### Регулирование расхода

Регулирование расхода используется в больших системах с несколькими теплообменниками приточного воздуха, если имеется необходимость в индивидуальном регулировании работы каждого из них. В системе ECONET® для изменения количества утилизируемой теплоты и предотвращения замораживания используются оба описанных типа регулирования.

## Незамерзающий теплоноситель

Использование незамерзающих теплоносителей позволяет исключить риск замерзания при остановке насоса, а также эксплуатировать систему при более низких температурах. В то же время использование таких теплоносителей, в состав которых входят антифризы, неизбежно снижает эффективность системы. Например, увеличение концентрации этиленгликоля в смеси на каждые 10% снижает эффективность системы приблизительно на 1%. Теоретически концентрация этиленгликоля 15% является достаточной, однако рекомендуется использовать раствор с концентрацией 30%. Это позволит гарантированно избежать риска замерзания даже при очень низких температурах.

# Система ECONET®

В запатентованной системе ECONET® все функции теплообмена (утилизация тепла и холода, нагрев и охлаждение) объединены в одном общем контуре. Благодаря этому удается сократить количество компонентов системы, таких как теплообменники обогрева и охлаждения, насосы, клапаны, трубы, изоляция и т.п. В результате уменьшаются габаритные размеры установки.

Если утилизации энергии обогрева и охлаждения недостаточно, в теплообменник приточного воздуха направляется дополнительная энергия обогрева или охлаждения. На стороне приточного воздуха используется теплообменник, отличающийся чрезвычайно высокой эффективностью благодаря значительным размерам (10–12 трубных рядов). Помимо этого, в теплообменнике в качестве дополнительного источника теплоты может использоваться вода низкой температуры. Все это обеспечивает превосходную утилизацию теплоты. Степень утилизации отходящей теплоты и избыточной энергии охлаждения возрастает.

В разделе, посвященном системам с промежуточным теплоносителем, было указано, что использование теплообменника с 10 трубными рядами связано с ростом перепада давления. Однако в системах ECONET® это компенсируется отсутствием дополнительных воздухонагревателей и воздухоохладителей — все необходимые устройства данного типа встроены непосредственно в систему.

Система ECONET® состоит из двух или трех теплообменников — одного или двух для приточного воздуха и одного для удаляемого воздуха. Если в секции приточного воздуха предусмотрены два теплообменника, один из них обеспечивает защиту фильтра наружного воздуха. В рамках данной схемы для утилизации энергии могут использоваться как теплообменник приточного воздуха, так и теплообменник наружного воздуха, что делает систему более эффективной и простой в сравнении с традиционными решениями. В комплект поставки системы также входит насосный агрегат с системой управления, позволяющей оптимизировать утилизацию энергии. Все необходимые датчики насосного агрегата, а также программное обеспечение, установлены производителем. Помимо этого, в заводских условиях выполняются все требуемые настройки частотного преобразователя и пульта управления для каждого конкретного проекта.

Трубы насосного агрегата снабжены необходимой теплоизоляцией. Насосный агрегат установлен вертикально на собственной несущей конструкции. В качестве опции в конструкции системы ECONET® могут быть предусмотрены оборудование для измерения эффективности и второй насос.

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

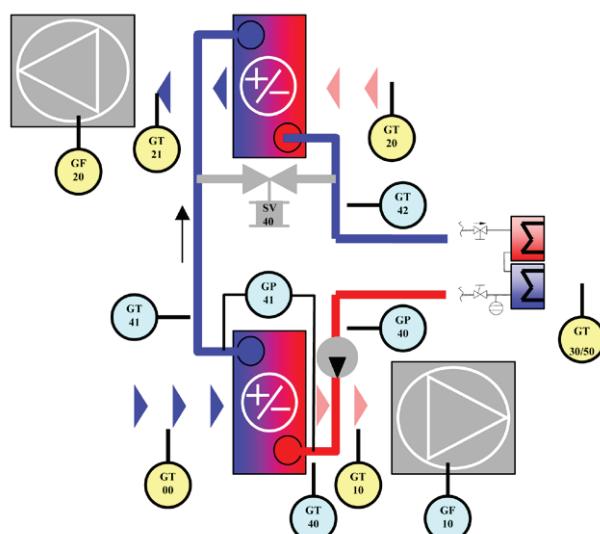
**Утилизация теплоты.** В рамках функционирования системы происходит оптимизация расхода жидкости в теплообменниках с целью обеспечения максимальной утилизации теплоты. Расход жидкости регулируется с помощью частотного преобразователя насоса.

### Утилизация теплоты и дополнительная теплота.

В рамках функционирования системы происходит оптимизация расхода жидкости в теплообменниках с целью обеспечения максимальной утилизации теплоты. Дополнительное тепло может быть направлено в контур либо непосредственно, либо через теплообменник.

**Энергия охлаждения.** Теплообменник удаляемого воздуха отсоединен, и дополнительная энергия охлаждения направляется в контур таким образом, что охлаждающая жидкость циркулирует только через теплообменник приточного воздуха. Дополнительная энергия охлаждения может быть направлена в контур либо непосредственно, либо через теплообменник охлаждения.

**Утилизация холода (например, непрямое испарительное охлаждение).** Удаляемый воздух охлаждается за счет увлажнения посредством непрямого



испарительного охлаждения в системе охлаждения COOLMASTER®.

Эффективность охлаждения передается приточному воздуху с помощью системы утилизации. Расход жидкости оптимизируется. При необходимости возможно использование дополнительной энергии охлаждения..

## Эффективность теплообмена и перепад давления

Данные по эффективности теплообмена и перепаду давления для трех систем представлены в таблице. Для сравнения использовались системы, установленные в идентичных вентиляционных установках. В ряде случаев габаритные размеры корпуса ротора могут превышать габаритные размеры корпуса вентиляционной установки.

	Эффективность теплообмена, %	Перепад давления, Па
Роторный теплообменник	75	150
Пластиначатый теплообменник	58	150
Система с промежуточным теплоносителем <sup>1)</sup> ECOTERM®, 6 трубных рядов	50	210
Система с промежуточным теплоносителем <sup>1)</sup> ECOTERM®, 8 трубных рядов	55	270
Система с промежуточным теплоносителем ECONET®	65	330 <sup>2)</sup>

1) 30% этиленгликоля.  
2) Общий перепад давления для всей вентиляционной системы не увеличивается, т.к. воздухонагреватели и воздухоохладители встроены в систему ECONET®.

## Сравнение решений

Приведенная таблица позволяет сравнить преимущества различных решений.

	Роторный теплообменник	Пластиначатый теплообменник	Система с промежуточным теплоносителем ECOTERM®	Система с промежуточным теплоносителем ECONET®
Эффективность	++	+	-	+
Перепад давления	+	+	-	+
Экономия энергии	++	+	+	+
Утечки и перетекание воздуха	-	+	++	++
Габаритные размеры	+	-	+	++
Длина воздуховодов	-	-	++	++
Система управления	+	+	+	+
Перенос запахов	-	+	++	++
Проблема замораживания	++	+	+	+
Перенос влаги	++	-	-	-
Утилизация холода	++	+	+	+
Устойчивость к воздействию окружающей среды	+	+	++	++
Надежность	+	+	+	+
Дополнительная энергия охлаждения и обогрева	-	-	-	++

++ — очень хорошо.

+ — хорошо.

- — удовлетворительно.

Важность каждого из перечисленных преимуществ определяется требованиями конкретного проекта.

Утилизация энергии обогрева и охлаждения позволяет сэкономить финансовые ресурсы и снизить нагрузку на окружающую среду.

### Временной график

Временной график показывает среднюю температуру наружного воздуха в определенной местности в течение года. Исходя из графика может быть рассчитана годовая тепловая нагрузка без теплообменника в условиях непрерывной работы, а также аналогичная нагрузка при наличии теплообменника.

### Эффективность

Эффективность (КПД) – это доля израсходованной энергии в процентах, затраченная на выполнение полезного действия.

Существует множество различных систем утилизации энергии. Наибольшее распространение среди них получили следующие:

#### • Роторные теплообменники.

Роторные теплообменники характеризуются чрезвычайно высокой эффективностью, значительно превышающей эффективность других систем утилизации энергии (при сравнении систем с одинаковым перепадом давления)

Гигроскопичные роторы также снижают потребность в увлажнении.

Эффективность теплообмена регулируется путем изменения скорости вращения ротора. Привод включает в себя электродвигатель с регулируемой или постоянной скоростью, шкивы и приводной ремень. Скорость вращения ротора регулируется с помощью управляющего оборудования. Продувочный сектор позволяет предотвратить передачу вращающимся ротором удалаемого воздуха на сторону приточного воздуха.

При низких температурах вне помещения на стороне удалаемого воздуха происходит осаждение конденсата, который затем обычно испаряется на стороне приточного воздуха. При высокой влажности удалаемого воздуха и чрезвычайно низкой температуре вне помещения скорость конденсации превышает скорость испарения и на роторе скапливается влага. Если средняя температура ротора в течение полного оборота ниже 0°C, влага превращается в иней. В таких условиях необходима система оттаивания.

#### • Пластинчатые теплообменники.

Пластинчатый теплообменник состоит из квадратных пластин, расположенных параллельно друг другу. Через каждый второй канал между пластинами пропускается теплый воздух, а через оставшиеся – холодный. Теплопередача осуществляется через пластины.

Пластины теплообменника являются достаточ-

но тонкими и выполнены из материала с высокой теплопроводностью, поэтому коэффициент теплоизделия между двумя потоками воздуха весьма велик. Эффективность теплообмена в пластинчатом теплообменнике значительно уступает таковой в роторном теплообменнике.

При низкой температуре наружного воздуха удалаемый воздух охлаждается ниже точки росы, в результате чего происходит образование конденсата. Поэтому под секцией удалаемого воздуха необходимо предусмотреть наличие поддона-каплесборника со слившимся соединением.

Когда температура вне помещения падает ниже приблизительно -7°C, конденсат в теплообменнике может превращаться в лед. Существует несколько методов, позволяющих предотвратить забивание теплообменника льдом:

- Посекционное оттаивание.
- Направление наружного воздуха по обходному каналу.
- Отключение приточного вентилятора.

Конструкция пластинчатых теплообменников может обеспечивать чрезвычайно высокую герметичность. При этом виду того, что давление приточного воздуха превышает давление удалаемого воздуха, перенос газов и твердых частиц из удалаемого воздуха в приточный не происходит.

#### • Теплообменники с промежуточным теплоносителем.

Система с промежуточным теплоносителем представляет собой два отдельных теплообменника – один для приточного воздуха, а другой для удалаемого. В качестве промежуточного теплоносителя, перекачиваемого по замкнутому контуру и переносящему тепло от горячего теплообменника к холодному, используется вода с добавкой антифриза.

Система с промежуточным теплоносителем обладает рядом преимуществ, отсутствующих в других системах:

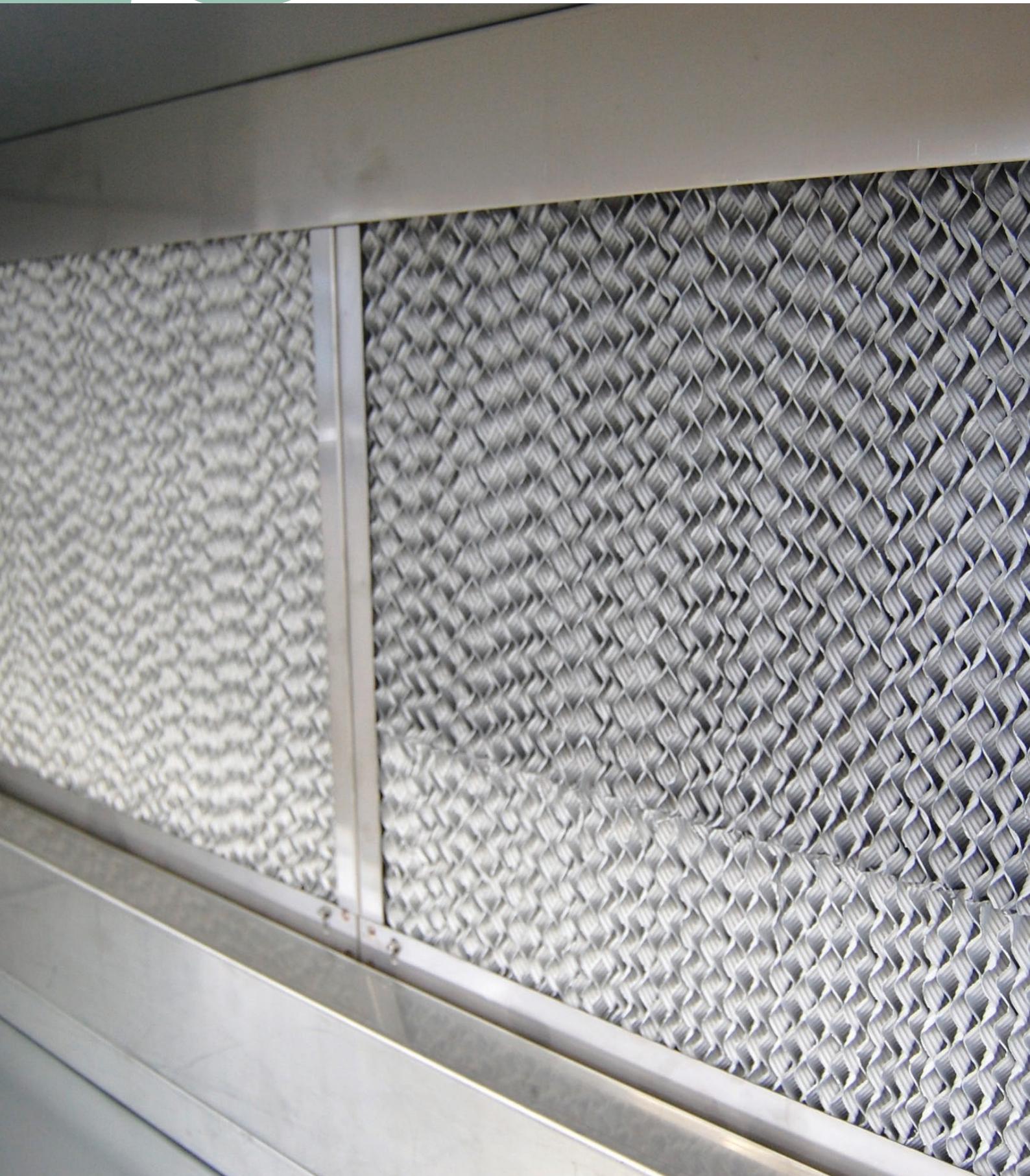
- Отсутствие перетекания из потока удалаемого воздуха в поток приточного.
- Возможность использования в вентиляционных установках, в которых воздуховоды приточного и удалаемого воздуха не могут быть сведены в одной точке.
- Простота встраивания в существующую систему распределения воздуха.

Одной из разновидностей системы с промежуточным теплоносителем является система ECONET®. В системе ECONET® все функции теплообмена (utiлизация тепла и холода, нагрев и охлаждение) объединены в одном общем контуре. Благодаря этому удается сократить количество компонентов системы. В результате уменьшаются габаритные размеры установки.



# 16

## Увлажнители



## Краткое содержание главы

- Общие сведения об увлажнителях.
- Контактные увлажнители.
- Паровые увлажнители.
- Форсуночные увлажнители.



иногда становится причиной различных заболеваний. Эти заболевания вызываются микроорганизмами, колонии которых могут расти в вентиляционной системе и распространяться по помещениям вместе с приточным воздухом. Среди таких микроорганизмов можно, в частности, отметить бактерии легионеллы, одноклеточные водоросли и грибы.

В отапливаемых помещениях стоимость увлажнения воздуха является существенной. Если необходимо охлаждение, оно может осуществляться с помощью испарительных увлажнителей.

## Принципы работы увлажнителей

Увлажнение может осуществляться либо путем добавления к воздуху пара в паровом увлажнителе, либо путем контакта воздуха с поверхностью воды с целью ее испарения в ходе так называемого испарительного увлажнения.

При работе паровых увлажнителей энергия пара передается воздуху. При работе испарительных увлажнителей энергия, необходимая для испарения воды, забирается из воздуха.

Существует два типа испарительных увлажнителей: контактные и форсуночные. В контактных увлажнителях с помощью влажного наполнителя создается большая поверхность контакта между жидкостью и воздухом.

В форсуночных увлажнителях (увлажнителях типа «мойка воздуха») создаются мельчайшие капли воды, испаряющиеся в потоке воздуха.

Здоровые люди малочувствительны к изменениям влажности воздуха. При температуре 20–22°C влажность воздуха может меняться в пределах от 30 до 65%, не вызывая дискомфорта.

При более высоких температурах наша чувствительность к низкой влажности возрастает.

Высокие температуры в сочетании с низкой влажностью вызывают высыхание нашей кожи, а также слизистых оболочек глаз и других органов. При этом возрастает риск заражения различными инфекциями, и мы чувствуем дискомфорт. Помимо этого, при относительной влажности воздуха менее 50% на синтетических половых покрытиях может возникать электростатический заряд. Наконец, для осуществления многих промышленных процессов необходима относительная влажность воздуха не ниже 45–50%.

В вопросах увлажнения воздуха немаловажным является учет гигиенических аспектов. Ненадлежащее использование оборудования, а также ненадлежащее его техническое обслуживание, могут

## Контактные увлажнители

В контактных увлажнителях вода испаряется с поверхности влажного ненагреваемого наполнителя. Движущей силой процесса является разница между парциальными давлениями водяного пара в воздухе рядом с поверхностью воды и в потоке на удалении от нее. Энергия, необходимая для испарения, забирается из воздуха. Температура воздуха падает на 2,5°C на каждый грамм испарившейся воды.

Наполнитель необходим для создания обширной поверхности контакта воды и воздуха. Наполнитель изготавливается либо из алюминия со специально обработанной гигроскопичной поверхностью, либо из тонкого стекловолокна.

Структура наполнителя способствует движению воды в направлении, противоположном направлению потока воздуха. Это необходимо, чтобы воспрепятствовать движению воды в направлении потока под его воздействием.

## Функционирование

Наполнитель орошается сверху, например, с помощью распылительных труб. Вода стекает по наполнителю и смачивает всю его поверхность. Как правило, небольшая часть воды испаряется, а основное ее количество попадает в поддон, расположенный под наполнителем.

Существует два типа систем орошения:

- Однoproходная.
- Циркуляционная.

В однoproходных увлажнителях вода из поддона сливается в канализацию. Наполнитель орошаются водопроводной водой. Однoproходные увлажнители гигиеничны, однако расходуют сравнительно много воды.

В циркуляционных увлажнителях вода из поддона с помощью насоса вновь подается в распылительные трубы. Водопроводная вода всегда содержит некоторое количество солей. Во избежание увеличения их концентрации и последующего осаждения на наполнителе вода из системы должна сливаться.

Если скорость течения воздуха в увлажнителе высока, поток воздуха может уносить с поверхности наполнителя капли воды. В случае алюминиевого наполнителя этот процесс начинается при скорости набегающего воздушного потока не менее 3,0 м/с. При превышении данного значения необходимо использовать каплеотделитель. Максимальная допустимая скорость составляет 4,0 м/с. Принцип работы циркуляционного увлажнителя показан на рисунке справа.

## Гигиена

Контактные увлажнители соответствуют весьма строгим гигиеническим требованиям.

- Вода в увлажнителе удерживается в виде пленки на поверхности наполнителя и не образует аэрозолей.
- Воздух, выходящий из увлажнителя, не насыщен водяным паром, благодаря чему риск образования конденсата в следующем далее оборудовании сведен к минимуму.

В случае особо строгих гигиенических требований рекомендуется использовать однoproходные увлажнители.

## Управление

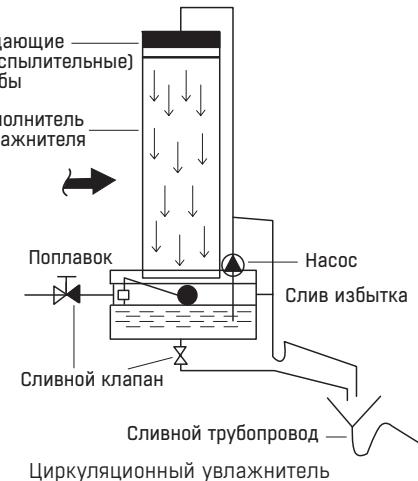
Управление контактными увлажнителями сводится к следующим аспектам:

- Включение и выключение.
- Разделение увлажнителя на ступени и обход ступеней.
- Управление по точке росы

Включение и выключение увлажнителя осуществляется по сигналу гидростата, установленного в воздуховоде удалаемого воздуха или в вентилируемом помещении. При необходимости в более точном управлении может использоваться многоступенчатая схема из двух и более ступеней. При необходимости в особо точном управлении может использоваться управление по точке росы.

При этом вначале воздух увлажняется до уровня влажности, превышающего необходимый. Затем воздух охлаждается до требуемой точки росы.

Наконец, воздух нагревается до необходимой температуры.



## Паровые увлажнители

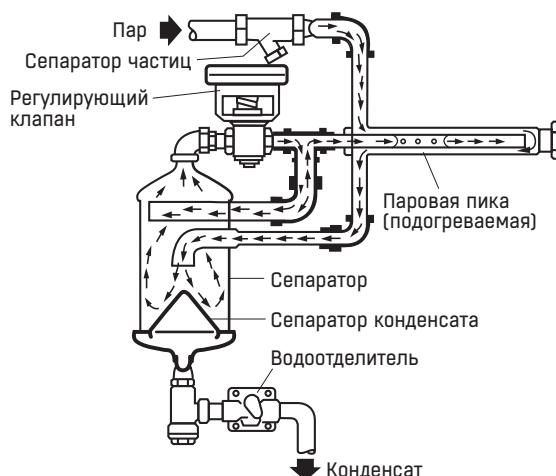
В паровых увлажнителях пар подается через так называемые паровые пики, расположенные в потоке воздуха.

Паровые увлажнители характеризуются следующими особенностями:

- Увлажнение может осуществляться без существенного изменения температуры воздуха.
- Воздух может увлажняться в любой точке системы воздуховодов.
- Соли отделяются от воды при производстве пара и не попадают в воздух.
- Простое и быстрое бесступенчатое регулирование.
- Пренебрежимо малое сопротивление воздуха.

Типичная конструкция парового увлажнителя представлена на рисунке справа. В процессе работы увлажнителя воздух не должен насыщаться водяным паром, в противном случае это может стать причиной образования конденсата в воздуховодах с последующим ростом колоний микроорганизмов. Помимо этого, необходимо предусмотреть достаточное расстояние между паровыми пиками и следующим за ними компонентом вентиляционной системы. В противном случае в этом компоненте

возможно образование конденсата. При вдувании пара в воздуховод вначале образуются капли воды, которые впоследствии испаряются. Таким образом, в следующих далее компонентах вентиляционной системы конденсация не происходит. Для производства пара необходима электроэнергия. Помимо этого, паровые увлажнители обычно нуждаются в специально подготовленной воде.



Паровой увлажнитель

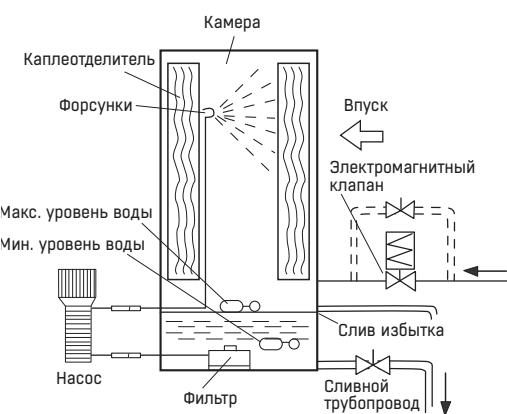
## Форсуночные увлажнители

В конструкции форсуночных увлажнителей имеется камера с несколькими форсунками, мелко разбрызгивающими струи воды в сторону дренажного наполнителя. Мощный насос увлажнителя создает сравнительно высокое давление в форсунках. В результате форсунки выпускают тонкие струи воды, распадающиеся на отдельные капли. За форсунками располагаются каплеотделители.

Как и в контактных увлажнителях, вода должна сливаться для уменьшения концентрации солей в ней. При испарении распыленных капель содержащиеся в воде примеси могут попадать в поток воздуха. Это является существенным недостатком форсуночных увлажнителей и может привести к нежелательному накоплению пыли, а также к несоответствию помещения гигиеническим требованиям, если вода содержит бактерии.

## Требования к качеству воды

Для обеспечения надлежащего функционирования наполнителей в течение всего срока их службы в увлажнитель должна подаваться вода питьевого качества с pH в пределах от 5,0 до 8,0.



Форсуночный увлажнитель



## Резюме

Увлажнение воздуха может осуществляться либо путем добавления к воздуху пара в паровом увлажнителе, либо путем контакта воздуха с поверхностью воды с целью ее испарения в ходе так называемого испарительного увлажнения. Существует два типа испарительных увлажнителей: контактные и форсуночные.

### Контактные увлажнители

В контактных увлажнителях вода испаряется с поверхности влажного ненагреваемого наполнителя. Движущей силой процесса является разница между парциальными давлениями водяного пара в воздухе рядом с поверхностью воды и в потоке на удалении от нее. Энергия, необходимая для испарения, забирается из воздуха. Температура воздуха падает на 2,5°C на каждый грамм испарившейся воды.

Наполнитель необходим для создания обширной поверхности контакта воды и воздуха.

Наполнитель изготавливается либо из алюминия со специально обработанной гигроскопичной поверхностью, либо из тонкого стекловолокна.

Структура наполнителя способствует движению воды в направлении, противоположном направлению потока воздуха. Это необходимо, чтобы воспрепятствовать дви-

жению воды в направлении потока под его воздействием. Наполнитель необходим для создания обширной поверхности контакта воды и воздуха.

### Паровые увлажнители

В паровых увлажнителях пар подается через так называемые паровые пики, расположенные в потоке воздуха (в воздуховодах). В процессе работы увлажнителя воздух не должен насыщаться водяным паром, в противном случае это может стать причиной образования конденсата в воздуховодах с последующим ростом колоний микроорганизмов. Помимо этого, необходимо предусмотреть достаточное расстояние между паровыми пиками и следующим за ними компонентом вентиляционной системы. В противном случае в этом компоненте возможно образование конденсата.

### Форсуночные увлажнители

В конструкции форсуночных увлажнителей имеется камера с несколькими форсунками, мелко разбрызгивающими струи воды в сторону дренажного наполнителя. Мощный насос увлажнителя создает сравнительно высокое давление в форсунках. В результате форсунки выпускают тонкие струи воды, распадающиеся на отдельные капли.



# 17 Системы управления



## Краткое содержание главы

- Общие сведения о системах управления.
- Динамические характеристики. Задержка в системах управления.
- Различные типы контроллеров и принципы их работы.
  - Пропорционально-интегрально-дифференциальное управление (ПИД-управление).
  - Каскадное управление.
  - Включение и выключение.
  - Многоступенчатое управление.
- Регулирование температуры.
- Регулирование расхода воздуха и давления.
- Защита от замораживания.
- Компенсация температуры наружного воздуха.
- Обогрев в ночное время.
- Охлаждение в ночное время.
- Регулирование концентрации углекислого газа.
- Аварийные сигналы.
- Коммуникация.

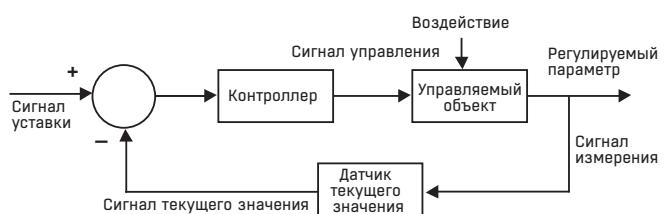
Основным назначением системы управления вентиляционной системой является создание в помещении комфортного микроклимата. Основными факторами, влияющими на микроклимат в помещении, являются температура и интенсивность вентиляции помещения, т.е. кратность воздухообмена. Поэтому необходимо контролировать температуру воздуха, подаваемого вентиляционной установкой, а также его расход.

Помимо этого, конструкция системы управления должна обеспечивать максимальную экономию электроэнергии при работе вентиляционной системы.

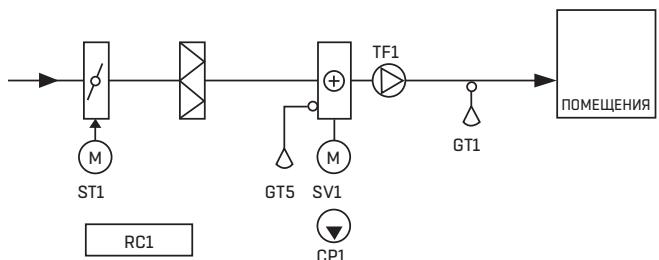
Наконец, необходимо свести к минимуму риск возникновения неисправностей вентиляционной системы, а также осуществлять ее техническое обслуживание. Поэтому система управления должна включать в себя устройства защиты и средства подачи аварийных сигналов.

Чтобы понять изложенную на следующих страницах информацию, необходимо ознакомиться с принципами управления компонентами вентиляционной установки

Для их демонстрации ниже представлена блок-схема замкнутой системы, т.е. системы с обратной связью.



Пусть на управляемый объект было оказано некое воздействие. Датчик текущего значения измеряет значение контролируемого параметра, например, температуры, управляемого объекта. Измеренное значение является текущим, т.е. только что полученным от объекта. Измеренное значение направляется в точку сравнения системы. Туда же приходит сигнал, содержащий информацию о требуемом значении данного параметра. Если значения этих двух сигналов не совпадают, далее на контроллер, управляющий объектом, передается сигнал ошибки.



Рассмотрим использование данного алгоритма в вентиляционной системе на примере температуры в воздухонагревателе. Датчик текущей температуры GT1 измеряет текущее значение температуры воздуха. Данное текущее значение передается на контроллер RC1. В контроллере имеется уставка температуры, с которой сравнивается текущее значение. В результате контроллер передает сигнал управления на привод клапана SV1 и клапан горячей воды открывается или закрывается.

## Динамические характеристики

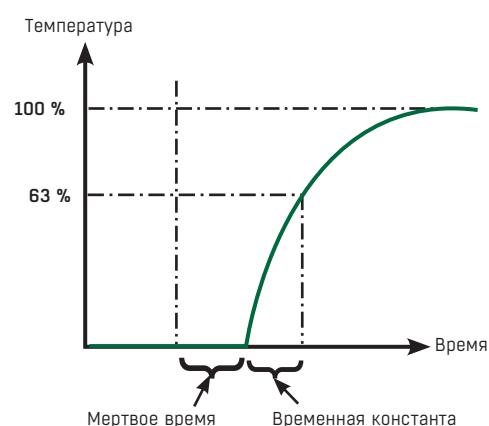
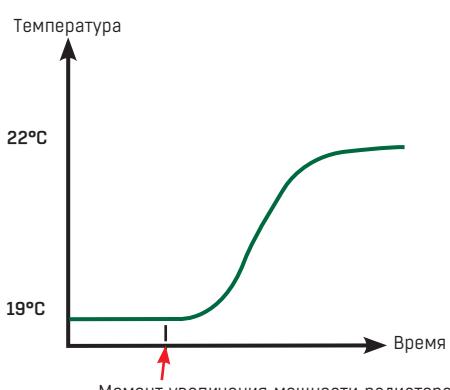
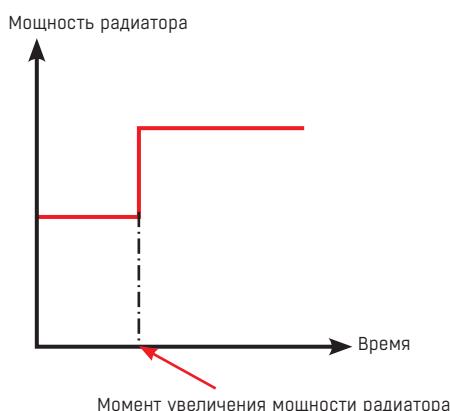
Системы управления, в которых изменение входного сигнала приводит к изменению выходного сигнала с некоторой задержкой, называются динамическими системами. Примером динамической системы является система управления температурой в помещении.

С момента увеличения мощности радиаторов до момента увеличения температуры в помещении проходит некоторое время.

Это время, называемое мертвым временем, лучше

всего видно на приведенном ниже графике. Также на графике показана временная константа, соответствующая времени, необходимому для достижения 63% от конечного значения.

Малое значение временной константы означает, что процесс происходит быстро. Однако в большинстве случаев, связанных с отоплением, вентиляцией и кондиционированием, быстрые процессы нежелательны.



# Различные типы контроллеров и принципы их работы

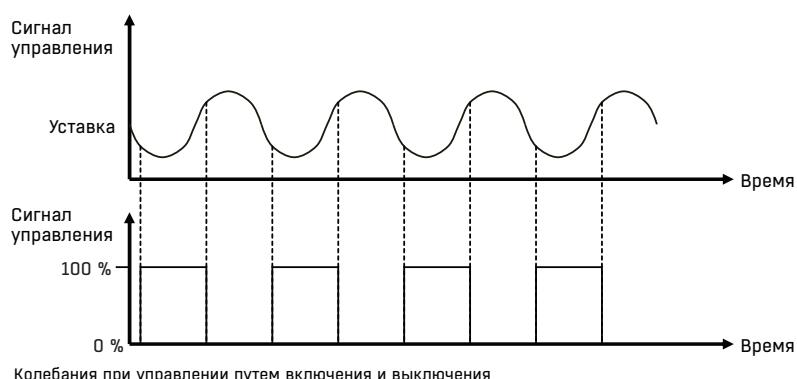
Ниже приводится краткое описание наиболее распространенных способов управления.

## Включение и выключение

Включение и выключение является простейшим способом управления. Для управления данного типа необходимо лишь устройство, способное менять сигнал управления в зависимости от того, являются ли выходной сигнал системы управления более сильным или более слабым по сравнению с выходным сигналом, например, реле температуры. Таким образом, контроллер включается и выключается в

зависимости от сигнала ошибки — разницы между возвращаемым значением и уставкой. Поэтому данный способ управления называется включением и выключением.

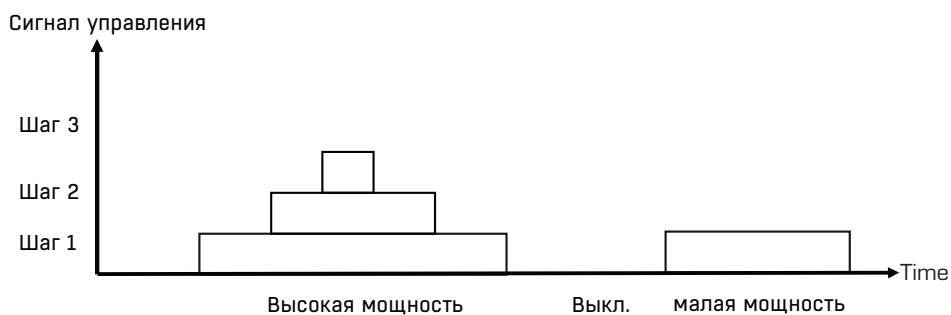
Преимуществами управления путем включения и выключения являются простота и дешевизна оборудования. Недостатками данного способа являются возможность значительных колебаний регулируемого параметра (см. рис. ниже), а также возможность быстрого механического износа оборудования.



## Многоступенчатое управление

Многоступенчатые контроллеры имеют несколько ступеней. Этим они отличаются от контроллеров включения и выключения, имеющих только две ступени. При использовании таких контроллеров колебания регулируемого параметра не столь

велики, как при использовании контроллеров включения и выключения. Многоступенчатое управление часто используется в электрических воздухонагревателях, а также в теплообменниках с непосредственным охлаждением.



## Пропорциональное управление

При пропорциональном управлении сигнал управления пропорционален входному сигналу, передаваемому на контроллер, т.е. сигналу ошибки.

$$u = P \times e,$$

где

u — сигнал управления;  
P — усиление;  
e — сигнал ошибки.

Если значение Р невелико, система управления работает стабильно, но медленно. При высоком значении Р система управления работает быстро, однако со значительными колебаниями регулируемого параметра. См. график ниже.

Недостатком данного способа регулирования яв-

## Интегральное управление

При использовании интегрального управления сила или скорость выходных сигналов зависит от размера сигнала ошибки.

Выходной сигнал контроллера получается интегрированием сигнала ошибки по формуле:

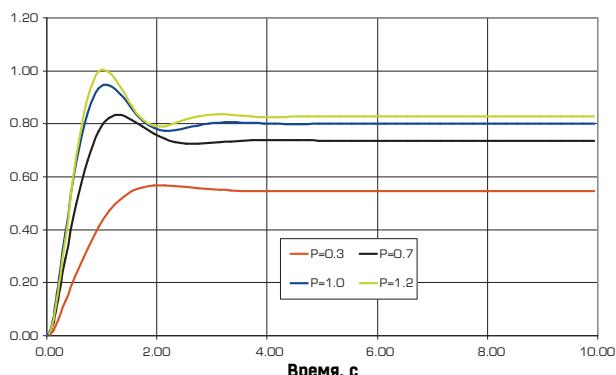
$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt,$$

где

u(t) — выходной сигнал от 0 до t;  
T<sub>I</sub> — период интегрирования;  
e — сигнал ошибки.

Если ошибка управления нарастает, сигнал управления будет уменьшаться или увеличиваться. Если затем ошибка исчезнет, новое значение сигнала управления будет поддерживаться неизменным.

Пропорциональное управление

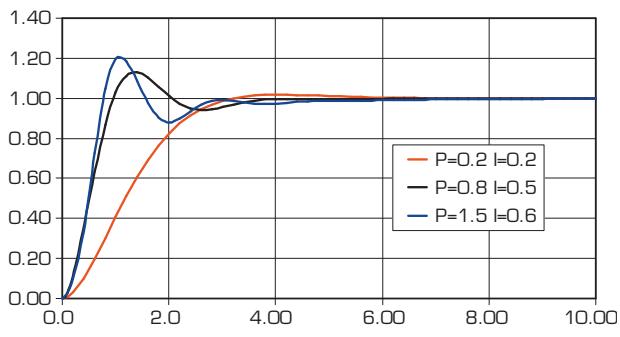


ляется принципиальная недостижимость точного значения уставки.

## Пропорционально-интегральное управление (ПИ-управление)

Пропорциональное и интегральное управление чаще всего совмещаются. Такое управление называется пропорционально-интегральным. Пропорционально-интегральные контроллеры являются наиболее распространенным типом контроллеров.

Данный способ управления объединяет в себе преимущества пропорционального и интегрального способов.



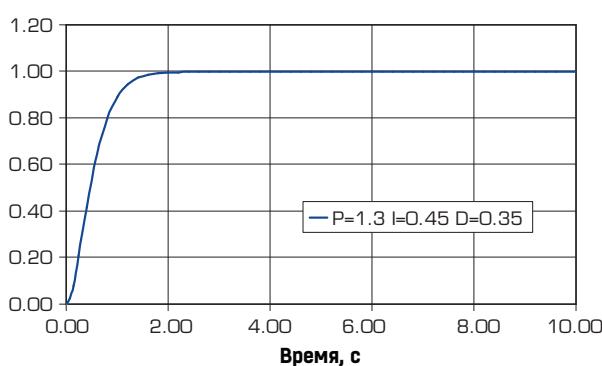
Влияние усиления на сигнал управления

Усиление и влияние на сигнал управления

## Пропорционально-интегрально-дифференциальное управление (ПИД-управление)

В сокращенном названии данного способа управления буква Д обозначает дифференциальную составляющую. Выходной сигнал из блока Д зависит от значения производной входного сигнала.

Дифференциальное управление никогда не используется отдельно. Оно предназначено для совместного использования с пропорционально-интегральным и пропорциональным управлением. Дифференциальное управление необходимо для стабилизации регулируемого параметра.

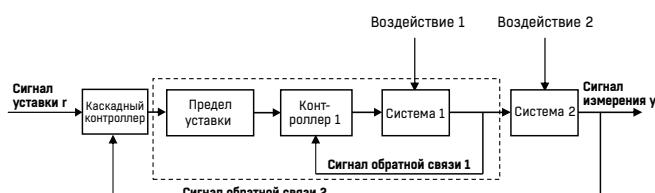


## Каскадное управление

Каскадное управление используется в случаях, когда процесс управления может быть разделен на несколько блоков, а на регулируемую систему воздействуют несколько факторов. См. рисунок ниже.

Данный способ управления часто используется в вентиляционных системах.

Значение уставки внутреннего контура обратной связи может быть ограничено.



Контроллер 1 предназначен для реагирования на воздействие 1 с целью сведенияния к минимуму его влияния на систему 2.

# Устройства управления в вентиляционных установках

Основным назначением устройства управления в вентиляционной установке является обеспечение требуемых свойств подаваемого воздуха, управление работой вентиляционной установки и реагирование на возможные аварийные сигналы.

## Например:

Основные функции

- Регулирование температуры.
- Регулирование расхода воздуха и давления.

## Дополнительные функции

- Защита от замораживания.
- Компенсация температуры наружного воздуха.
- Обогрев в ночное время.
- Охлаждение в ночное время.
- Регулирование концентрации углекислого газа.

## Регулирование температуры

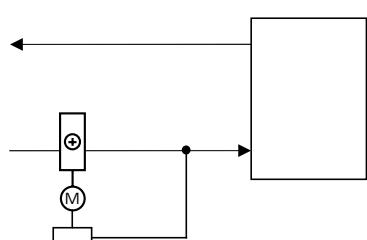
Устройство управления регулирует температуру приточного воздуха, поддерживая ее на требуемом уровне. Температура может регулироваться одним из трех описанных ниже основных способов.

### Регулирование исходя из температуры приточного воздуха

Данный способ предполагает установку датчика температуры в воздуховоде приточного воздуха и его подключение к устройству управления вентиляционной установки.

Требуемая температура приточного воздуха задана в виде уставки в устройстве управления. При этом контроллер приточного воздуха управляет, например, работой теплообменника и воздухонагревателя с целью передачи приточному воздуху требуемого количества теплоты.

Регулирование исходя из температуры приточного воздуха часто используется в вентиляционных установках, подающих воздух в несколько помещений. При этом в помещения обычно подается воздух весьма низкой температуры, а для регулирования температуры в каждом помещении используются различные локальные источники тепла.

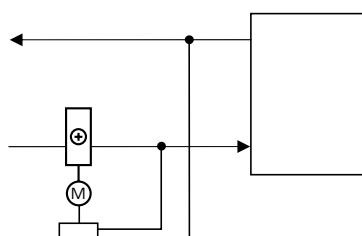


Принципиальная схема регулирования исходя из температуры приточного воздуха

### Регулирование исходя из температуры удаляемого воздуха

При использовании регулирования исходя из температуры приточного воздуха устройство управления не получает обратной связи по температуре воздуха в помещении или удаляемого воздуха. Поэтому информация о фактической температуре в помещениях отсутствует. Данный недостаток может быть устранен путем установки датчиков температуры в воздуховодах как приточного, так и удаляемого воздуха. Температура удаляемого воздуха с достаточно высокой точностью соответствует средней температуре в помещениях. Устройство управления поддерживает температуру приточного воздуха на уровне, обеспечивающем требуемую температуру удаляемого воздуха. Данный способ часто используется в вентиляционных системах, подающих воздух в несколько схожих по параметрам помещений. Напротив, если помещения сильно различаются по потребности в обогреве, данный способ может оказаться неприменимым. В этом случае в одних помещениях температура будет слишком низка, а в других слишком высока. Устройство управления вентиляционной установки не будет принимать в расчет эту разницу, т.к. оно получает лишь данные о средней температуре удаляемого воздуха. В подобных случаях гораздо более подходящим является регулирование исходя из температуры приточного воздуха.

Данный способ также используется для управления теплообменниками с непосредственным охлаждением.

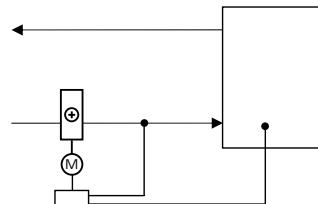


Принципиальная схема регулирования исходя из температуры удаляемого воздуха

## **Регулирование исходя из температуры воздуха в помещении**

Регулирование исходя из температуры воздуха в помещении является наилучшим способом регулирования температуры отдельном помещении и используется только в случае, когда помещение обслуживается собственной вентиляционной установкой. Датчик температуры устанавливается в помещении. Помимо этого, там же обычно монтируется устройство, позволяющее менять уставку температуры. Еще один датчик устанавливается в воздуховоде приточного воздуха. Оба датчика подключаются к устройству управления.

Данный способ регулирования обычно используется только в очень больших помещениях.



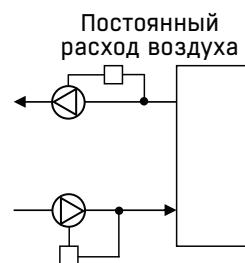
Принципиальная схема регулирования для помещения

## **Регулирование расхода воздуха и давления (управление вентилятором)**

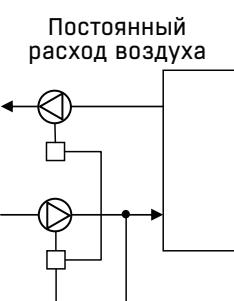
Вентиляционные системы могут быть с некоторой долей условности разделены на два типа:

- Вентиляционные системы с постоянным расходом воздуха.
- Вентиляционные системы с переменным расходом воздуха.

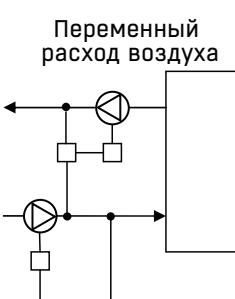
В вентиляционных системах с постоянным расходом воздуха вентилятор обеспечивает постоянный расход, тогда как в вентиляционных системах с переменным расходом воздуха вентилятор регулируется с целью поддержания в воздуховоде требуемого в данный момент давления.



Оба вентилятора управляются исходя из значений давления. Разница давлений может использоваться для создания уставки для вытяжного вентилятора. Данный способ обеспечивает более точное регулирование давления в помещении.



Приточный вентилятор управляется исходя из давления в воздуховоде. Параллельно управляется вытяжной вентилятор. Система проста, однако при ее использовании возможны колебания давления в помещении.



В вентиляционных системах с переменным расходом воздуха приточный вентилятор может управляться исходя из давления. Расход приточного и удаляемого воздуха измеряется, и разница между этими значениями играет роль сигнала ошибки, используемого при управлении вентилятором. Таким образом осуществляется регулирование расхода приточного воздуха, а вслед за ним изменяется расход удаляемого воздуха.

Расход воздуха, подаваемого вентилятором, а также создаваемое им давление, определяются положением точки пересечения кривой вентилятора и кривой вентиляционной системы. Чтобы изменить расход или давление, необходимо изменить либо кривую вентиляционной системы, либо кривую вентилятора. Форма кривой вентиляционной системы определяется перепадом давления в вентиляционной системе, поэтому для ее изменения необходимо каким-либо образом изменить этот перепад давления.

Форма кривой вентилятора определяется конструкцией лопастного колеса вентилятора и скоростью его вращения. Для ее изменения необходимо изменить либо конструкцию вентилятора, либо скорость его вращения.

Общепринятые методы, используемые для осуществления подобных изменений, перечислены ниже:

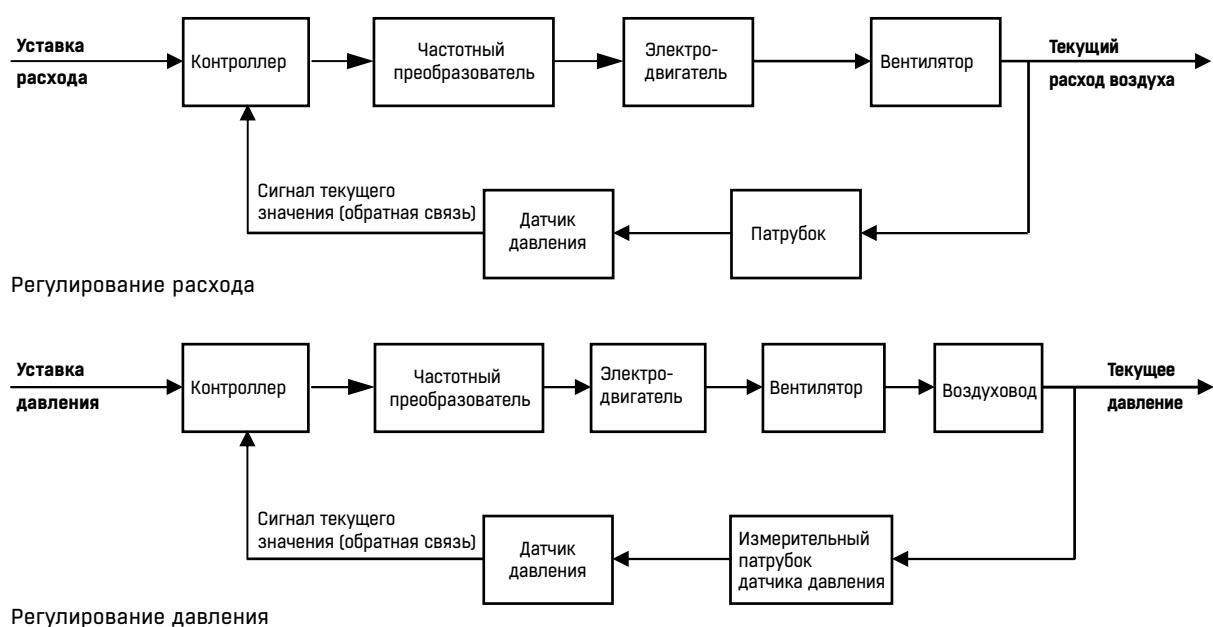
- Частичное перекрытие воздуховода с помощью воздушного клапана. Это позволяет изменить форму кривой вентиляционной системы.
- Использование впускных направляющих лопаток, влияющих на характеристики вентилятора. Это позволяет изменить форму кривой вентилятора.
- Регулирование угла лопастей вентилятора, также влияющего на характеристики вентилятора. Это позволяет изменить форму кривой вентилятора.

Однако в настоящее время наиболее часто используется регулирование скорости вращения вентилятора.

#### **• Использование частотного преобразователя.**

Это позволяет изменить форму кривой вентилятора.

Частотный преобразователь позволяет регулировать скорость вращения электродвигателя, благодаря чему можно удобно регулировать давление и расход воздуха. Использование частотного преобразователя дает возможность поддерживать требуемые значения давления и расхода в вентиляционных системах как с постоянным, так и с переменным расходом воздуха. В ряде случаев используются электродвигатели со встроенными частотными преобразователями. При этом функция частотного преобразователя остается прежней. Частотный преобразователь позволяет изменить частоту электрического тока перед его подачей на электродвигатель. Из кривой вентилятора видно, что при изменении скорости вращения вентилятора меняются создаваемые им давление и расход воздуха. Таким образом, меняя частоту вращения электродвигателя, можно регулировать давление или расход воздуха в вентиляционной системе. Датчики давления, используемые при регулировании давления в вентиляционных системах с переменным расходом воздуха, обычно располагаются в воздуховоде за вентилятором. Датчики расхода в вентиляционных системах с постоянным расходом воздуха располагаются в соплах вентиляторов, см. рис. ниже. Датчик передает сигнал обратной связи на пропорционально-интегральный контроллер, расположенный либо в частотном преобразователе, либо в устройстве управления вентиляционной установки. В пропорционально-интегральном контроллере измеренное значение сравнивается с текущей уставкой. Уставка обычно задается в контроллере в процессе ввода вентиляционной системы в эксплуатацию.



## Ступенчатое управление

Одной из важнейших функций устройства управления является поддержание требуемой температуры приточного воздуха.

Эта температура обычно отличается от температуры наружного воздуха, поэтому воздух необходимо нагревать или охлаждать.

Помимо этого, в большинстве вентиляционных систем предусмотрена какая-либо система утилизации теплоты, которая может использоваться для обогрева или охлаждения помещения. Температура в помещении должна поддерживаться наиболее энергоэффективными средствами. Поэтому необходимо максимально использовать систему утилизации теплоты. Используемый для этого метод называется ступенчатым управлением.

См. рисунок ниже.

На графике показан выходной сигнал контроллера, поступающий на различные компоненты вентиляционной установки, для различных температур. Согласно графику, имеются две уставки температуры: T2 для обогрева и T3 для охлаждения. Это требуемые температуры воздуха, которые были установлены в устройстве управления.

Обычно  $T_2 = 18^\circ\text{C}$ ,  $T_3 = 22^\circ\text{C}$ .

Это означает, что при температуре ниже  $18^\circ\text{C}$  необходим обогрев, а при температуре выше  $22^\circ\text{C}$  — охлаждение.

Две уставки необходимы для создания диапазона допустимых температур. В холодное время года температура будет находиться в нижней части диапазона, а в теплое время года — в его верхней

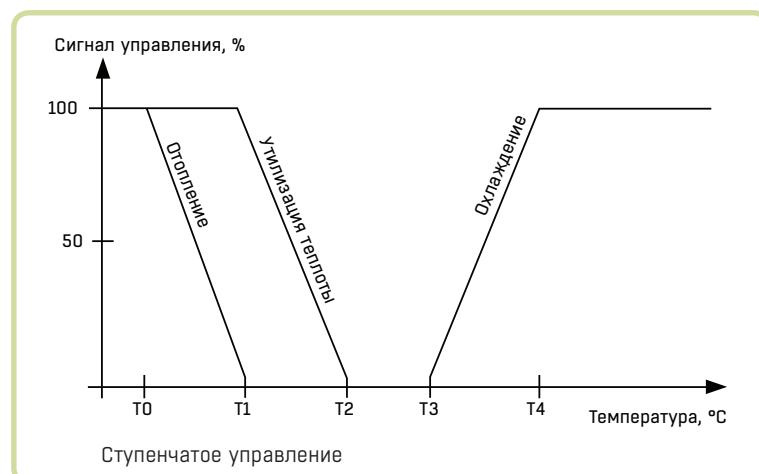
части. Это позволяет повысить энергоэффективность вентиляционной установки, а также создать более комфортный микроклимат в помещении.

Безусловно, имеется возможность задать одно и то же значение температуры для обеих установок. Однако чем меньшей будет разность их значений, тем больше энергии будет потреблять вентиляционная установка. Предположим, фактическая температура незначительно превышает уставку  $T_2$ .

При этом не требуется ни обогрева, ни охлаждения. Работают только вентиляторы. Если температура падает несколько ниже уставки  $T_2$ , включается система утилизации теплоты. Теплота, производимая находящимися в здании источниками тепла, будет утилизироваться.

Если температура продолжает падать, значение выходного сигнала, поступающего в систему утилизации теплоты, будет расти. В результате будет утилизироваться большее количество энергии.

Когда значение сигнала достигнет 100%, включится воздухонагреватель. По мере дальнейшего падения температуры мощность воздухонагревателя будет постепенно увеличиваться, пока не достигнет 100%. При этом система утилизации теплоты также продолжит работать с максимальной мощностью. Если температура превысит уставку  $T_3$ , возникнет необходимость в охлаждении. В случае использования системы утилизации холода она будет работать с максимальной мощностью, если температура наружного воздуха превышает температуру удалаемого воздуха.



## Примеры управления различными процессами в сфере отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха



### Роторный теплообменник

При использовании роторного теплообменника для регулирования температуры воздуха необходимо лишь регулировать скорость вращения приводного электродвигателя ротора. Из графика видно, что эффективность роторного теплообменника зависит от скорости его вращения. При этом эффективность, конечно же, определяется разностью температур в различных частях вентиляционной установки. Регулирование скорости вращения электродвигателя также используется для оттаивания ротора.

$$\eta = \frac{t_{\text{приточный воздух}} - t_{\text{наружный воздух}}}{t_{\text{удаляемый воздух}} - t_{\text{вытяжной воздух}}}$$

где

$t$  — температура различных потоков воздуха.

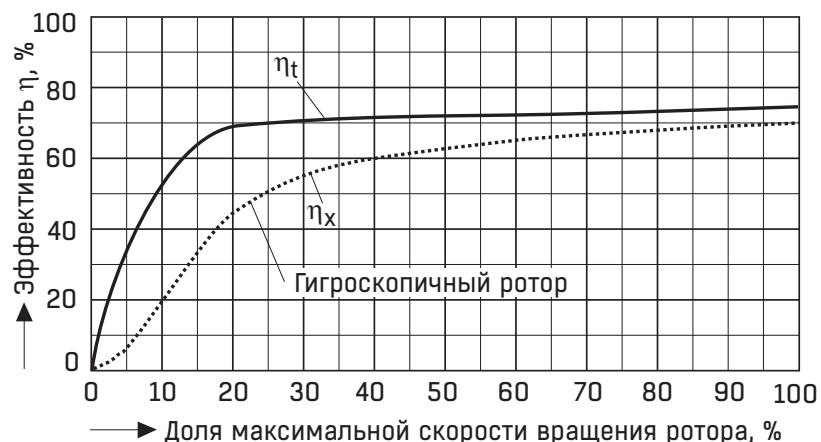


### Пластинчатый теплообменник

При использовании пластинчатого теплообменника температура воздуха регулируется с помощью воздушного клапана. Для достижения требуемой температуры часть воздуха направляется в обход теплообменника. Воздушный клапан позволяет регулировать расход идущего в обход воздуха. Помимо этого, воздушный клапан используется в процессе оттаивания пластинчатого теплообменника. Существует два основных способа оттаивания теплообменника:

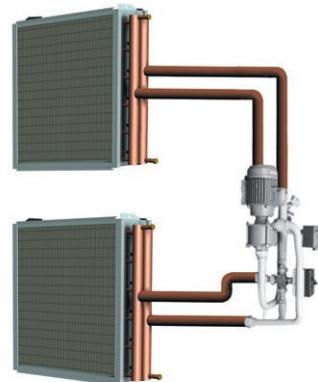
- Обходное оттаивание.
- Посекционное оттаивание.

При использовании обходного оттаивания обходная секция теплообменникакрыта, а передний воздушный клапан закрыт. Благодаря этому снижается эффективность теплообмена в теплообменнике, что приводит к таянию инея. При посекционном оттаивании последовательно закрывается каждая отдельная створка воздушного клапана теплообменника, при этом все остальные створки остаются открытymi.



## **Теплообменники с промежуточным теплоносителем**

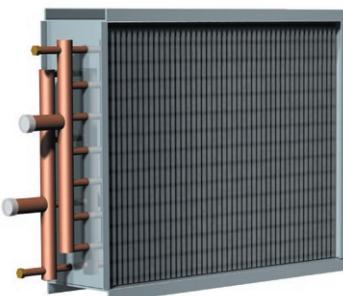
Первым способом регулирования температуры является направление части воды в обход теплообменника удалаемого воздуха. Благодаря этому снижается количество энергии, утилизируемой из удалаемого воздуха. Вторым способом, позволяющим регулировать температуру, является регулирование скорости вращения насосов.



## **Теплообменники обогрева и охлаждения**

Существует несколько путей регулирования мощности теплообменников обогрева и охлаждения. Это, в частности, регулирование расхода воды, температуры воды или обоих этих параметров одновременно. На практике используются главным образом следующие способы:

- Регулирование расхода воды с помощью клапана.
- Байпасное регулирование, т.е. направление части воды в обход теплообменника с помощью второго насоса и клапана.

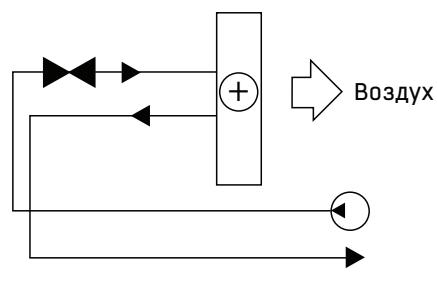


## **Регулирование расхода воды**

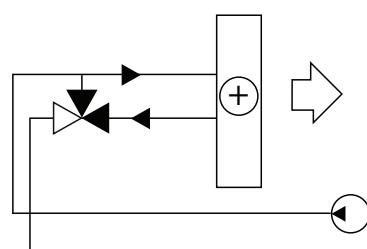
Горячая вода поступает из центрального бойлера и прокачивается по водяному контуру здания с помощью центрального насоса. Давление в системе должно быть достаточно высоким, чтобы обеспечивать прокачку воды через все теплообменники и трубы. Простейшим способом регулирования расхода воды в контуре является использование двухходового клапана.

Использование трехходового клапана позволяет в условиях неполной нагрузки поддерживать в теплообменнике на стороне воды более высокую температуру, что является желательным в котельных установках, работающих на газе и мазуте.

Низкая температура возвратного потока может стать причиной образования конденсата в дымовых газах. Это, в свою очередь, может привести к коррозии в котельной установке.



Двухходовой клапан



Трехходовой клапан

## Байпасное регулирование

Система обходных трубопроводов связывает первичную и вторичную системы в системе водяного обогрева и охлаждения. Например, система обходных трубопроводов может связывать бойлер (первичный контур) и радиаторы (вторичный контур). Температура и расход воды во вторичной системе нередко отличаются от таковых в первичной системе. Система обходных трубопроводов монтируется между первичной и вторичной системой. В ней происходит смешение двух сред, управляемое с помощью регулирующего клапана с приводом. В результате во вторичной системе поддерживается требуемая температура. Циркуляционный насос обеспечивает надлежащий расход воды, циркулирующей во вторичной системе.

Система обходных трубопроводов состоит из следующих компонентов:

- Регулирующий клапан, предназначенный для регулирования расхода в первичном и вторичном контурах системы обходных трубопроводов. Регулирующий клапан управляется приводным электродвигателем, подключенным к устройству управления здания. Клапан может быть двухходовым или трехходовым в зависимости от схемы подключения, используемой в системе обходных трубопроводов.
- Циркуляционный насос, обеспечивающий циркуляцию воды на вторичной стороне.
- Регулирующие клапаны, один или несколько, предназначенные для регулирования (уравновешивания) расхода и перепада давления в системе обходных трубопроводов на вторичной и (или) первичной стороне с целью обеспечения оптимального режима работы.
- Отсечные клапаны, установленные на всех трубопроводах подачи и возврата воды. Благодаря их наличию система обходных трубопроводов может быть демонтирована для технического обслуживания без слива воды из всей системы водяного обогрева и охлаждения.
- Тепловые / холодильные барьеры, предотвращаю-

щие нежелательный теплообмен между первичной и вторичной системами системы обходных трубопроводов. Барьеры могут быть механическими и термическими (см. последний на рисунке выше).

- Байпасный трубопровод, обеспечивающий циркуляцию во вторичном контуре системы обходных трубопроводов даже при его перекрытии с помощью регулирующего клапана (на рисунке показана конструкция с обратным клапаном).
- Обратный клапан, предотвращающий движение воды в ненадлежащем направлении в случае отсутствия электропитания на насосе вторичного контура.
- Термометры, установленные в трубопроводах подачи и возврата. Термометры необходимы исключительно для мониторинга текущего состояния различных элементов системы обходных трубопроводов и контроля ее функционирования.

Измерительные патрубки, необходимые для контроля состояния системы обходных трубопроводов и устранения неисправности.

Расход воды в теплообменниках поддерживается постоянным, тогда как ее температура может изменяться по мере необходимости путем байпасного регулирования. Для этого на трубопроводе подачи воды в теплообменник устанавливается насос, а на выпускном трубопроводе — трехходовой клапан (см. рисунок ниже).

Данная система позволяет поддерживать постоянную температуру возвратной воды. Это может быть необходимо, если горячая вода подается из системы центрального отопления. Насос в обходном трубопроводе обеспечивает постоянный расход воды через теплообменник. Трехходовой клапан обеспечивает смешение части горячей первичной воды с частью холодной возвратной воды теплообменника, благодаря чему поддерживается требуемая производительность по обогреву.

Регулирующие клапаны, установленные на трубопроводах воды, управляются приводами, подключенными к устройству управления вентиляционной установки.

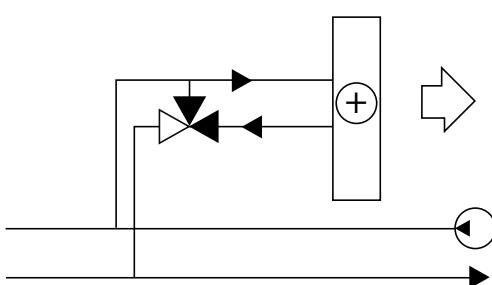


Схема системы обходных трубопроводов



### Электрический воздухонагреватель

В конструкции электрического воздухонагревателя предусмотрен ступенчатый переключатель, соединенный с реле температуры воздуха. Для уменьшения количества необходимых шагов используется бинарная система. Это позволяет максимально снизить стоимость эксплуатации.

Ступенчатый переключатель устроен таким образом, что при переходе на каждую последующую ступень мощность нагревателя удваивается.

Например:

1+2+4+8+16+32

или

3+6+12+24+48

Подобная конструкция подразумевает ступенчатое изменение температуры воздуха, что может быть нежелательно.

### Дополнительные функции

Компенсация температуры наружного воздуха  
Уставка температуры приточного воздуха или воздуха в помещении может быть увеличена или уменьшена в зависимости от температуры наружного воздуха.

Помимо этого, мощность нагрева может регулироваться с помощью тиристора. Это электронное устройство позволяет регулировать мощность воздухонагревателя путем периодического его включения на полную мощность (так называемый метод включения и выключения). Например, возможно включение нагревателя на 30 секунд с последующим отключением на 30 секунд.

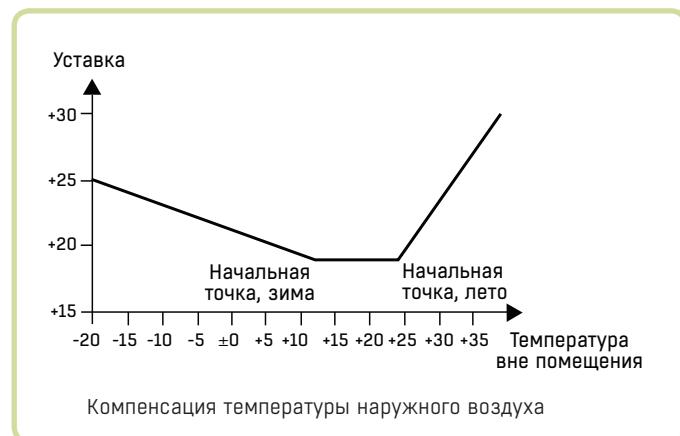
Данный метод обеспечивает точную регулировку температуры. Температура воздуха зависит от продолжительности включений и выключений нагревателя.

Для обеспечения максимальной надежности и снижения эксплуатационных затрат рекомендуется предусмотреть в конструкции воздухонагревателя возможность использования обоих описанных выше методов регулировки. При этом регулировка с помощью тиристора должна использоваться в условиях низкой мощности нагревателя, установленной с помощью ступенчатого переключателя.

На первой ступени мощность нагревателя может регулироваться на всем протяжении от 0 до 1. Таким образом, если необходима мощность 13,65 кВт, следует установить 0,65 кВт (использование тиристора на первой ступени) + 1 + 4 + 8.

Использование только тиристора может быть сопряжено с чрезмерными затратами.

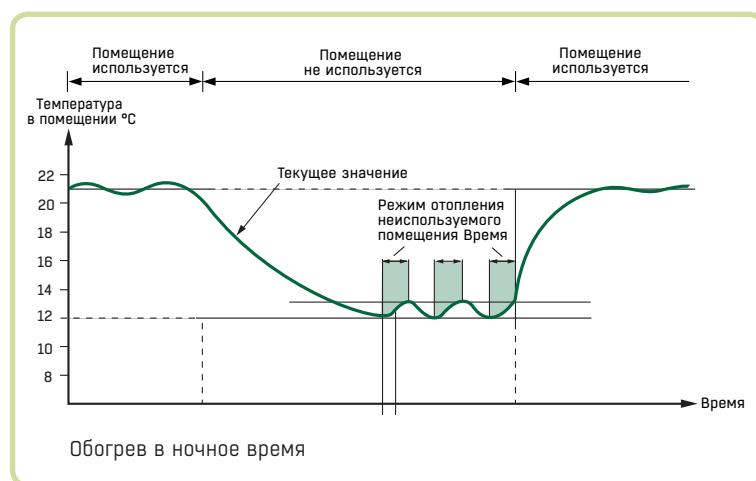
Увеличение уставки позволяет создать более комфортный микроклимат в помещении в условиях чрезвычайно низкой или чрезвычайно высокой температуры наружного воздуха. Помимо этого, в летний период такое увеличение позволяет экономить энергию.



## Обогрев в ночное время

Обогрев в ночное время позволяет избежать чрезмерного охлаждения здания в течение ночи. Благодаря такому обогреву в здании с самого утра поддерживается комфортный микроклимат. Помимо этого, обогрев в ночное время позволяет защитить здание и находящиеся в нем объекты от последствий чрезмерного охлаждения.

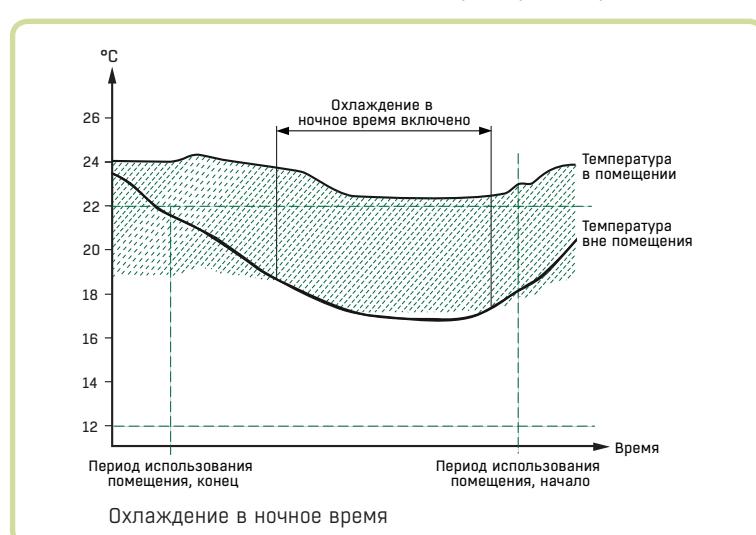
Если в состав вентиляционной установки входит теплообменник, необходимо предусмотреть обходной воздуховод, позволяющий приточному вентилятору и теплообменнику обеспечивать циркуляцию теплого воздуха.



## Охлаждение в ночное время (естественное охлаждение)

Охлаждение в ночное время позволяет снизить потребность в охлаждении при последующем включении вентиляционной установки, а также предот-

вратить чрезмерный рост температуры в нерабочие часы. При этом в качестве бесплатного источника холода используется прохладный ночной воздух. Энергия расходуется только на работу вентиляторов.



## **Регулирование концентрации углекислого газа**

Расход воздуха, подаваемого в помещение, может регулироваться в зависимости от концентрации углекислого газа в помещении.

## **Общее управление вентиляционной установкой**

Устройство управления обеспечивает пуск вентиляционной установки в надлежащей последовательности (например, вначале должны открываться воздушные клапаны, а затем включаться вентиляторы).

Помимо этого, устройство управления может быть запрограммировано на пуск и останов вентиляционной установки в определенное время суток или при возникновении определенных условий, таких как падение температуры в здании или присутствие дыма.

Еще одной обычно присутствующей функцией является включение насосов на несколько минут в текущий момент и затем в течение продолжительных периодов простоя вентиляционной установки.

## **Защита от замораживания**

В условиях низкой температуры наружного воздуха теплообменники с водяными контурами должны быть защищены от замораживания и разрыва.

Данная задача может быть решена либо путем измерения температуры воздуха рядом с теплообменником, либо путем измерения температуры воды в теплообменнике.

## **Аварийные сигналы**

Устройство управления также обеспечивает обработку различных аварийных сигналов. Аварийные

сигналы указывают на неисправности в вентиляционной системе, а также на необходимость ее технического обслуживания, например, замену фильтров.

Аварийные сигналы отображаются устройством управления. Также имеется возможность передачи общего аварийного сигнала в систему управления более высокого уровня, например, на главный пульт управления и в систему диспетчерского управления (SCADA/BMS\*) по линиям связи.

\* BMS – система управления зданием.

Примеры общих аварийных сигналов:

- Сигнал низкого расхода воздуха.**

Давление на вентиляторе контролируется с помощью реле давления. В случае падения давления ниже предустановленного минимального значения выдается аварийный сигнал.

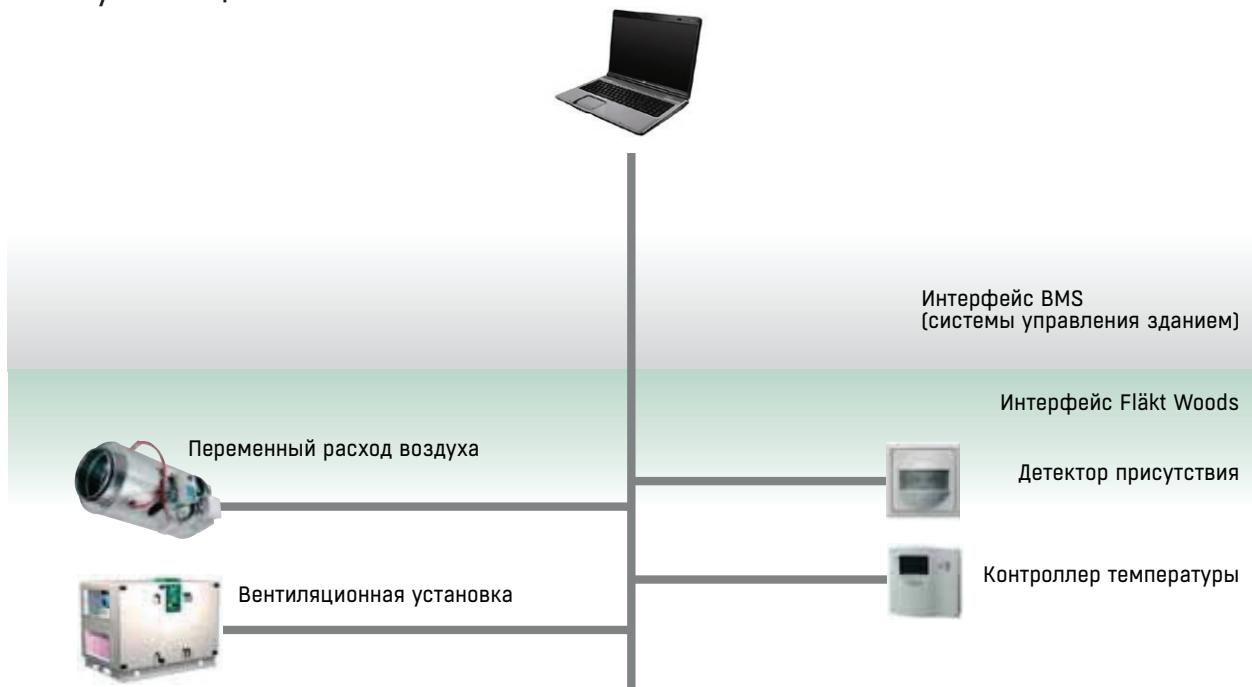
Нулевой расход воздуха может указывать на остановку вентилятора, например, вследствие неисправности электродвигателя или соскальзывания приводного ремня.

- Сигнал высокого перепада давления на фильтре.**

Перепад давления на фильтре также контролируется с помощью реле давления. В случае роста давления выше предустановленного максимального значения на устройство управления передается аварийный сигнал, указывающий на необходимость замены фильтра.

Прочие аварийные сигналы включают, в частности, сигналы защиты от замораживания, защиты от тепловой перегрузки и противопожарной защиты.

## Коммуникация



Вентиляционная установка может быть включена в качестве компонента в автоматизированную систему управления зданием (BMS). Современная автоматизированная система управления зданием должна состоять из стандартизированного оборудования, использующего открытые протоколы коммуникации.

Это позволяет интегрировать в систему компоненты различных производителей, благодаря чему удается снизить стоимость оборудования. Помимо этого, благодаря такому подходу оборудование становится более удобным в эксплуатации и функциональным. Наконец, это дает возможность адаптировать систему к индивидуальным потребностям заказчика.

Управляющее оборудование компании Fläkt Woods способно работать со следующими открытыми стандартами коммуникации:

### • **BACnet.**

BACnet является открытым общемировым стандартом, специально разработанным для автоматизированного управления зданием.

BACnet работает через сеть TCP/IP.

### • **OPC.**

OPC – это открытый отраслевой стандарт, упрощающий интеграцию различного оборудования в единую систему через общий интерфейс.

OPC работает через сеть TCP/IP.

### • **LonWorks.**

В конструкции платы Lon предусмотрена возможность автоматической передачи всех стандартных типов сетевых переменных (SNVT), что облегчает ввод оборудования в эксплуатацию.

Плата LonWorks работает через сеть Lon.

### • **Modbus.**

Modbus – это открытый неофициальный отраслевой стандарт, работающий через линию связи RS 485 или сеть TCP/IP.

Плата Modbus может быть настроена на работу в режиме ведущего или ведомого устройства.

### • **Веб-сервер.**

В настоящее время несколько производителей предлагают устройства управления со встроенным веб-сервером, что означает отсутствие необходимости в каком-либо управляющем программном обеспечении. Для работы с устройствами достаточно обычного веб-браузера на компьютере (не входящем в базовый комплект поставки), работающем в сети TCP/IP.



## Резюме

Основным назначением системы управления вентиляционной системой является создание в помещении комфорtnого микроклимата. Помимо этого, конструкция системы управления должна обеспечивать максимальную экономию электроэнергии при работе вентиляционной системы.

Наконец, необходимо свести к минимуму риск возникновения неисправностей вентиляционной системы, а также осуществлять ее техническое обслуживание. Поэтому система управления должна включать в себя устройства защиты и средства подачи аварийных сигналов.

Системы управления, в которых изменение входного сигнала приводит к изменению выходного сигнала с некоторой задержкой, называются динамическими системами. Типичным примером динамической системы является система управления температурой в помещении.

Существуют различные типы контроллеров, работа которых основывается на различных принципах:

- Включение и выключение.
- Многоступенчатое управление.
- Пропорциональное управление.
- Интегральное управление.
- Пропорционально-интегральное управление (ПИ-управление).
- Пропорционально-интегрально-дифференциальное управление (ПИД-управление).
- Каскадное управление.

Основным назначением устройства управления в вентиляционной установке является обеспечение требуемых свойств подаваемого воздуха, управление работой вентиляционной установки и реагирование на возможные аварийные сигналы.

### Основные функции

- Регулирование температуры.
- Регулирование расхода воздуха и давления.

### Дополнительные функции

- Защита от замораживания.
- Компенсация температуры наружного воздуха.
- Обогрев в ночное время.
- Охлаждение в ночное время.
- Регулирование концентрации углекислого газа.

Устройство управления также обеспечивает пуск вентиляционной установки в надлежащей последовательности.

Помимо этого, устройство управления отображает аварийные сигналы или передает общий аварийный сигнал в систему более высокого уровня, например, на главный пульт управления и в систему диспетчерского управления (SCADA/BMS\*) по линиям связи.

Вентиляционная установка может быть включена в качестве компонента в автоматизированную систему управления зданием (BMS). Современная автоматизированная система управления зданием должна состоять из стандартизированного оборудования, использующего открытые протоколы коммуникации. Управляющее оборудование компании Fläkt Woods способно работать со следующими открытыми стандартами коммуникации:

- BACnet.
- OPC.
- LonWorks.
- Modbus.
- Веб-сервер.

\* BMS – система управления зданием.

# 18

## Методы и стандарты измерений



## Краткое содержание главы

- Погрешность измерения.
- Измерение температуры.
  - Термопары.
  - Термометры сопротивления.
- Измерение давления.
  - Мембранные манометры.
  - Жидкостные манометры.
- Расчет расхода воздуха.
- Измерение атмосферной влажности.
- Стандарты.



В сфере отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха измерения имеют главным образом две цели. Первой целью является улучшение технических характеристик оборудования, повышение его энергоэффективности, разработка новых моделей оборудования и т.п. Второй целью является разработка справочной документации (каталогов и программного обеспечения), позволяющей выбрать системы и оборудование с требуемыми параметрами. Измерения, необходимые для достижения этих двух целей, проводятся в специальных лабораториях. В большинстве случаев при этом используются специальные стандарты. Помимо этого, измерения могут проводиться и на оборудовании, установленном на объектах. При этом измеряются параметры работы различных компонентов вентиляционных систем. Проведение измерений на объектах связано с рядом трудностей и в большинстве случаев не регламентируется стандартами.

Наука о методах измерений называется метрологией. Данная наука оперирует эталонами массы и других величин. В своем развитии метрология опирается на достижения физики и электроники. В рамках метрологии разрабатываются методы измерений различных физических величин. Метрология является чрезвычайно обширной и сложной областью знаний.

Среди основных трудностей, с которыми сталкивается метрология, стоит отметить невозможность измерения чего бы то ни было без оказания какого-либо влияния на объект измерения; помехи, вносимые окружающей средой; трудности при измерении незначительных различий между значительными величинами и т.д.

## Погрешность измерения

Любые измерения характеризуются определенной погрешностью. Погрешности могут быть разделены на три типа:

инструментальные  $m_1$  — погрешности средств измерения, методические  $m_2$  — погрешности методов измерения и субъективные  $m_3$  — погрешности, обусловленные личностью оператора.

Вероятная погрешность может быть рассчитана по формуле:

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2}$$

# Температура

Температура является наиболее часто измеряемой физической величиной. Данный параметр, вероятно, в наибольшей степени определяет состояние окружающей нас среды и жизнь человека.

Именно поэтому температура измеряется столь часто, а методы ее измерения столь разнообразны. Вещество, температура которого измеряется, может находиться в одном из трех агрегатных состояний: твердое тело, жидкость или газ. Измерительные приборы, используемые в каждом случае, должны иметь подходящую конструкцию, а также быть достаточно точными и надежными. Помимо этого, приборы должны работать надлежащим образом в широком диапазоне условий окружающей среды. Ниже описываются датчики температуры нескольких распространенных типов, а также некоторые практические аспекты их использования.

## Термопары

Работа термопары основана на том, что между двумя соединенными вместе проводниками, выполненнымными из металлических сплавов разного состава, создается электрическое напряжение, пропорциональное разности температур на концах этих проводников. Фактическое соотношение между электрическим напряжением и температурой может быть достаточно сложным. На практике термопара предоставляет собой два изолированных электрических провода, с одной стороны соединенных концами. Место соединения проводников называется измерительным концом термопары. На другом конце термопары обычно крепится специально предназначенный для этого разъем. Существует множество различных типов термопар с различными характеристиками. Наибольшее практическое применение находят термопары типов J, K и T. См. таблицу ниже.

Тип	Материал	Цвет, контакт	Диапазон измерений, °C
J	Fe - Cu/Ni	Черный (черный)	20 ... 700
K	Ni/Cr - Ni/Al	Желтый (зеленый)	0 ... 1100
T	Ni - Cu/Ni	Синий (коричневый)	-185 - 300

Термопары могут продаваться в виде проводов на катушках. При этом пользователю следует отмотать и отрезать провода требуемой длины, после чего превратить их в датчик, скрепив или сварив их концы. Помимо этого, существуют термопары в кожухах. Такие термопары имеют чрезвычайно малые размеры и предназначены для использования в качестве ручных датчиков.

Точность выполняемых с их помощью измерений невелика, в лучшем случае около  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Температура холодного спая термопары (точки отсчета) должна измеряться на работающей термопаре, что является источником значительных погрешностей. Для их уменьшения используются специальные компенсационные провода, позволяющие увеличить длину термопары.

Среди факторов, которые должны учитываться при выборе термопары, можно, в частности, отметить ее механическую конструкцию, диапазон измерений температуры и условия работы.

## Термометры сопротивления

Принцип работы термометров сопротивления отличается от принципа работы термопар. Термометр сопротивления — это резистор, сопротивление которого зависит от температуры.

Термометр сопротивления традиционной конструкции представляет собой металлический провод, намотанный вокруг изолированного стеклянного или керамического тела. В качестве материалов провода используются, в частности, платина (Pt) и никель (Ni). Многие термометры сопротивления маркируются в соответствии с их сопротивлением при  $0^{\circ}\text{C}$ , например, Pt100 ( $R = 100 \Omega$ ) и Ni1000 ( $R = 1000 \Omega$ ).

Зависимость сопротивления термометра от температуры хорошо известна (она близка к линейной) и описана в различных стандартах DIN с указанием погрешности. Термометры сопротивления весьма хрупки, поэтому они обычно заключены в корпуса из металлических трубок различных видов. Наиболее часто в промышленности, видимо, используется термометр сопротивления Pt100. Его характеристики описаны особенно подробно. Термометры Pt100 производятся в значительных количествах. Термометры заключены в защитные корпуса различных конструкций, предназначенных для различных областей применения.

Среди других преимуществ этих термометров следует отметить точно известную погрешность измерений и долгосрочную стабильность их показаний. Недостатком является слабый выходной сигнал, приблизительно равный  $0,39 \Omega/\text{°C}$ . Это может стать причиной возникновения ошибок, обусловленных сопротивлением соединительного кабеля. Для решения этой проблемы используется соединение с четырьмя проводниками, позволяющее исключить влияние сопротивления термометра. Термометр Pt100 стал стандартным решением в промышленности.

## Давление и расход

Ниже описаны несколько общепринятых способов измерения давления. Расход может быть рассчитан исходя из измеренного значения давления.

### Мембранные датчики давления

Данный тип датчиков давления является наиболее распространенным. Простейший мембранный датчик представляет собой упругую мембрану, положение которой определяется разностью давлений внутри и снаружи.

В современных электронных датчиках смещению диафрагмы препятствует электромагнитная катушка, регулирующая силу противодействия. В некоторых электрических датчиках показания определяются не только положением мембранны, но и опорной поверхностью, на которой они установлены.

## Жидкостные манометры (U-образные трубы)

Работа простейших жидкостных манометров основана на фундаментальных принципах, используемых в их конструкции. U-образные трубы заполнены жидкостью. Если диаметр U-образной трубы строго постоянен, капиллярной силой можно пренебречь. В этом случае давление выражается формулой:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot A}{A} = \rho \cdot g \cdot h$$

где

$\rho$  – давление, Па;

$F$  – сила, Н;

$A$  – площадь,  $\text{мм}^2$ ;

$\rho$  – плотность,  $\text{г}/\text{мм}^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$h$  – высота, м.

Для расчета давления в соответствии с данной формулой необходимо знать плотность жидкости. Для увеличения чувствительности U-образной трубы она может быть установлена в наклонное положение. В этом случае в приведенной выше формуле появляется дополнительный множитель – тангенс угла наклона  $\phi$ .



## Расчет расхода воздуха

Измерение расхода на объектах связано со значительными трудностями. Даже в лабораторных условиях погрешность подобных измерений составляет 5%. Лишь в отдельных случаях величину погрешности удается снизить до 1-2%.

Наиболее распространенные методы основаны либо на измерении скорости движения воздуха в нескольких точках и их суммировании на определенном диапазоне, либо на измерении перепада давления на дроссельных устройствах определенного типа.

Наиболее распространенные методы основаны либо на измерении скорости движения воздуха в нескольких точках и их суммировании на определенном диапазоне, либо на измерении перепада давления на дроссельных устройствах определенного типа.

Для движущихся газов и жидкостей рассчитывается их кинетическая энергия на единицу объема, которая затем преобразуется в динамическое давление  $p_{дин}$ .

При прохождении воздуха через вентилятор расходуется энергия, необходимая для увеличения его динамического давления  $p_{дин}$ . В то же время значительная часть энергии тратится на сжатие воздуха и увеличение статического давления  $p_{стат}$ , что можно рассматривать как увеличение количества энергии в единице объема воздуха. Сумма двух указанных значений называется полным давлением  $p_{полн}$ . В технической документации обычно указывается объемный расход воздуха  $q_v$ , рассчитывающийся по формуле:

$$q_v = A \cdot v,$$

где

$q_v$  – объемный расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$A$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$v$  – скорость,  $\text{м}/\text{с}$ .

В закрытой системе объемный расход изменяется при сжатии воздуха. Это сопровождается изменением его температуры и плотности. Массовый расход  $q_m$  выражается в  $\text{кг}/\text{с}$ .

В закрытой системе массовый расход остается постоянным.

$$q_m = \rho \cdot q_v$$

Пример

Типичные значения из технической документации:

Плотность = 1,2  $\text{кг}/\text{м}^3$

Давление = 101,325 кПа

Температура = 20°C

Относительная влажность = 46%

Те же параметры в жаркий летний день:

Давление = 97 325 кПа

Температура = 30 °C

Относительная влажность = 60%

Плотность воздуха в этих условиях рассчитывается по формуле:

$$\rho_1 = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_1} \cdot \frac{P_1}{P_0} \cdot \frac{1 + x}{1 + \frac{x}{0,622}} = 1,153 \text{ кг}/\text{м}^3$$

Как было указано выше, изменение плотности приводит к изменению объемного расхода. Ниже приводятся цифры, отражающие влияние различных параметров на объемный расход для данного примера:

Температура: 10%.

Давление: 4%.

Влажность: 1%.

## Атмосферная влажность

Традиционным методом измерения относительной влажности воздуха является использование сухого и влажного термометров с интерпретацией результатов измерений с помощью психрометрической диаграммы (см. раздел «Параметры состояния воздуха»).

Более современные датчики, работа которых основана на измерении электрического сопротивления, обычно имеют погрешность около 1%.

Основой таких датчиков является кубик желатина со вставленными в него платиновыми проводами. При изменении влажности окружающего воздуха изменяется количество воды, поглощенной желатином, и, соответственно, его электрическое сопротивление.

## Звук (см. главу, посвященную звуку)

### Стандарты



#### Звук

Реверберационная камера:	EN ISO 3741 AMCA 300-96 BS 848-2
Выход:	EN ISO 9614:2-3

#### Мощность

Вентиляционная установка:	EN 5801 AMCA 210-99 BS 848-1
---------------------------	------------------------------------

#### Механическая конструкция

Утечки:	EN 1886, класс L1-L3
Прочность на разрыв:	EN 1886, класс D1-D3
Фильтр:	EN 1886 G1-F9
Потери тепла:	EN 1886 TB1-TB5

Помимо этого, измеряется выходная мощность электродвигателей. Используемый при этом измеритель выходной мощности проходит ежегодную калибровку в Шведском опытно-исследовательском институте (Swedish Testing and Research Institute). Процедура калибровки позволяет обеспечить высокую точность измерений.



## Резюме

Наука о методах измерений называется метрологией. Данная наука оперирует эталонами массы и других величин. В своем развитии метрология опирается на достижения физики и электроники. В рамках метрологии разрабатываются методы измерений различных физических величин.

В сфере отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха измерения имеют главным образом две цели.

Первой целью является улучшение технических характеристик оборудования, повышение его энергоэффективности, разработка новых моделей оборудования и т.п. Второй целью является разработка справочной документации (каталогов и программного обеспечения), позволяющей выбрать системы и оборудование с требуемыми параметрами.

Помимо этого, измерения могут проводиться и на оборудовании, установленном на объектах. При этом измеряются параметры работы различных компонентов вентиляционных систем. Проведение измерений на объектах связано с рядом трудностей и в большинстве случаев не регламентируется стандартами. Любые измерения характеризуются определенной погрешностью. Погрешности могут быть разделены на три типа:

инструментальные (погрешности средств измерения), методические (погрешности методов измерения) и субъективные (погрешности, обусловленные личностью оператора).

## Температура

Температура является наиболее часто измеряемой физической величиной. Среди наиболее распространенных датчиков температуры можно отметить термопары и термометры сопротивления.

## Давление и расход

Давление воздуха может измеряться, в частности, с помощью мембранных датчиков и жидкостных манометров (U-образных трубок).

Наиболее распространенные методы определения расхода воздуха основаны либо на измерении скорости движения воздуха в нескольких точках и их суммировании на определенном диапазоне, либо на измерении перепада давления на дроссельных устройствах определенного типа.

## Влажность

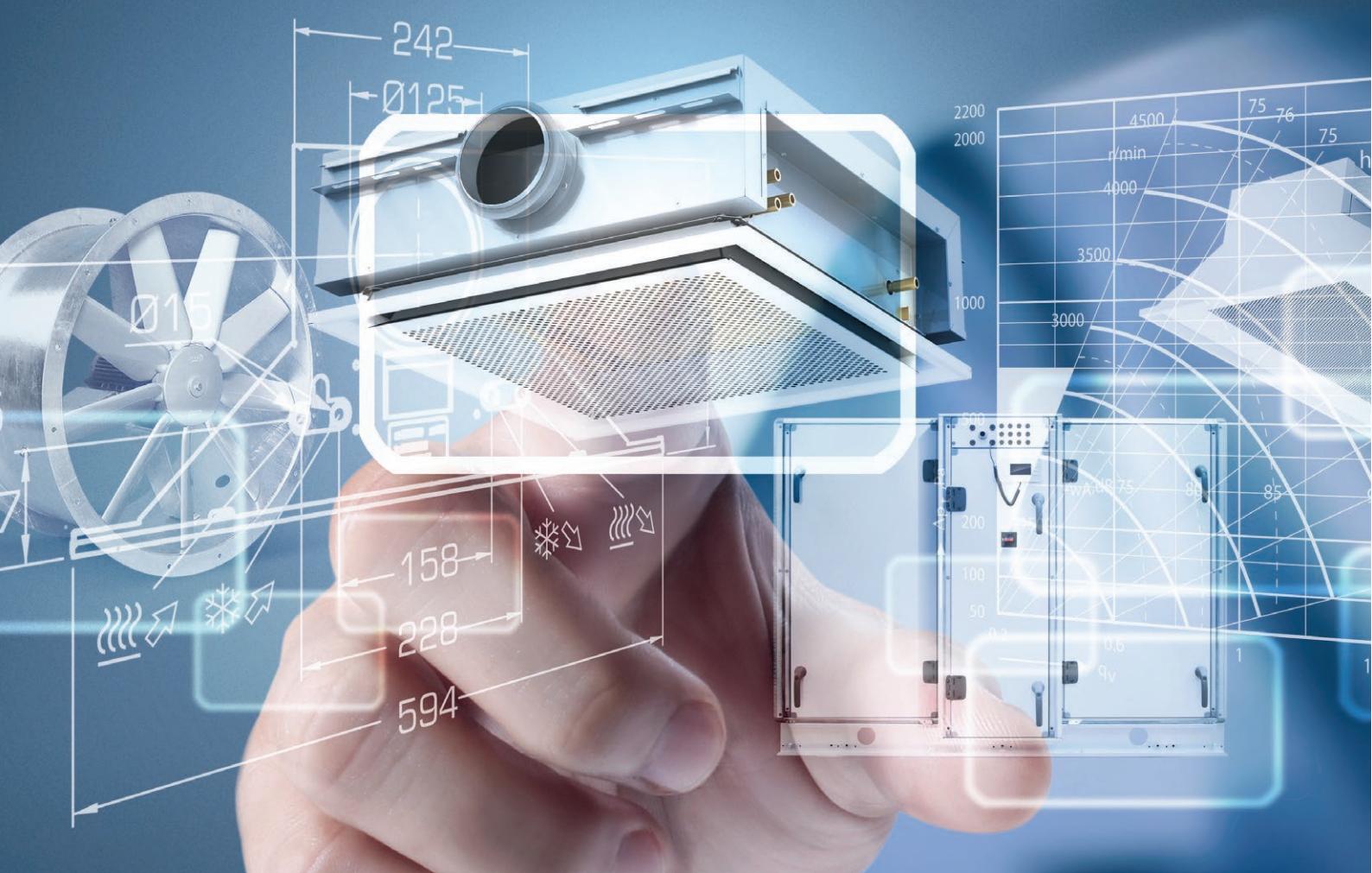
Традиционным методом измерения относительной влажности воздуха является использование сухого и влажного термометров с интерпретацией результатов измерений с помощью диаграммы Молье.

## Стандарты

В стандартах описываются методики проведения измерений. Соблюдение данных методик позволяет получать надежные результаты с минимальными погрешностями и на их основе сравнивать оборудование различных производителей.

# 19

## Формулы



# Сборник формул

## Физические величины и единицы измерений

Физическая величина		Единица измерений	
L	Длина	м	Метр
B	Ширина	м	Метр
H	Высота	м	Метр
A	Площадь	м <sup>2</sup>	Квадратный метр
V	Объем	м <sup>3</sup>	Кубический метр
t	Время	с	Секунда
f	Частота	Гц	Герц
v или c	Скорость движения воздуха	м/с	Метр в секунду
a	Ускорение	м/с <sup>2</sup>	Метр в секунду в квадрате
g	Ускорение свободного падения	м/с <sup>2</sup>	Метр в секунду в квадрате
q	Объемный расход	м <sup>3</sup> /с	Кубический метр в секунду
m	Массовый расход	кг/с	Килограмм в секунду
m	Масса	кг	Килограмм
ρ	Плотность	кг/м <sup>3</sup>	Килограмм на кубический метр
F	Сила	Н (= кг·м/с <sup>2</sup> )	Ньютон
E	Энергия	Дж (= Н·м)	Джоуль
P	Мощность	Вт (= Дж/с)	Ватт
p <sub>стат</sub>	Статическое давление	Па (= Н/м <sup>2</sup> )	Паскаль
p <sub>дин</sub>	Динамическое давление <sup>1)</sup>	Па	Паскаль
p <sub>полн</sub>	Полное давление	Па	Паскаль
ΔPf	Перепад давления	Па	Паскаль
W	Энергия, работа	Дж	Джоуль
T	Абсолютная температура	К	Кельвин
t	Температура сухого термометра	°С	Градус Цельсия
t <sub>вл</sub>	Температура влажного термометра	°С	Градус Цельсия
t <sub>p</sub>	Точка росы	°С	Градус Цельсия
Q	Количество теплоты	Дж	Джоуль
ср	Удельная теплоемкость	Дж/кг °С	Джоуль на килограмм на градус Цельсия
η	Эффективность (КПД)	— (%)	Процент
h	Удельная энталпия	Дж/кг	Джоуль на килограмм
φ	Относительная влажность	— (%)	Процент
M	Молярная масса	кг/кмоль	Килограмм на киломоль
n	Количество вещества (кол-во кмоль)	—	
R	Универсальная газовая постоянная <sup>2)</sup>	8,314 Дж/(моль·К)	
L <sub>p</sub>	Уровень звукового давления	дБ	Децибел
L <sub>w</sub>	Уровень звуковой мощности	дБ	Децибел

<sup>1)</sup>  $p_{\text{полн}} = p_{\text{стат}} + p_{\text{дин}} = p_{\text{стат}} + \left(\frac{\rho \cdot v^2}{2}\right)$

<sup>2)</sup>  $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$

## Энергия

Джоуль (Н·м, Вт·с)	кВт·ч	килофунт·м	ккал
1	$2,778 \cdot 10^{-7}$	0,1020	$0,2388 \cdot 10^{-3}$
$3,6 \cdot 10^6$	1	$3,671 \cdot 10^5$	859,8
9,807	$2,724 \cdot 10^{-6}$	1	$2,342 \cdot 10^{-3}$
$4,187 \cdot 10^3$	$1,163 \cdot 10^{-3}$	426,9	1

## Мощность

Ватт (Н·м/с, Дж·с)	килофунт·м/с	ккал/с	л.с. (метрич.)
1	0,1020	$0,2388 \cdot 10^{-3}$	$1,360 \cdot 10^{-3}$
9,807	1	$2,342 \cdot 10^{-3}$	$1,333 \cdot 10^{-2}$
$4,187 \cdot 10^3$	429,9	1	5,692
735,5	75	0,1757	1

## Давление

Па (Н/м <sup>2</sup> )	бар	килофунт/см <sup>2</sup>	мм рт. ст.	атм
1	$10^{-5}$	$1,021 \cdot 10^{-5}$	$7,501 \cdot 10^{-3}$	$9,869 \cdot 10^{-6}$
$10^5$	1	1,02	750,1	0,9869
$9,807 \cdot 10^3$	0,9807	1	735,6	0,9678
133,3	$1,333 \cdot 10^{-3}$	$1,360 \cdot 10^{-3}$	1	$1,316 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^5$	1 013	1 033	760	1

## Температура

Градусы Кельвина (К)	Градусы Цельсия (°C)	Градусы Фаренгейта (°F)
x	$x - 273,15$	$x \cdot 9/5 - 459,67$
$x + 273,15$	x	$x \cdot 9/5 + 32$
$5/9 \cdot (x - 32) + 273,15$	$5/9 \cdot (x - 32)$	x

## Физические свойства воды и воздуха

	Хими-ческая формула	Молекулярная масса u	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Динами-ческая вязкость, $10^6 \cdot h$ , Н·с/м <sup>2</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость $C_p$ , кДж/(кг·К)	Температура плавления, °C	Удельная энталпия плавления $I_f$ , (J <sub>s</sub> ), кДж/кг	Удельная температура кипения при давлении 1 бар, °C	Удельная энталпия испарения $I_v$ , (J <sub>s</sub> ), кДж/кг
Вода*	H <sub>2</sub> O	18	999	1005	0,60	4,18	0	334	100	2260
	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Динами-ческая вязкость $h \cdot 10^6$ , Н·с/м <sup>2</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость $C_p$ , кДж/(кг·К)	$C_p / C_v$	Температура плавления, °C	Температура кипения, °C	Удельная энталпия плавления $I_f$ , (J <sub>s</sub> ), кДж/кг		
Воздух**	1,28 1,225***	17,0	25	1,00	1,4	-213	-193	209		

\* Плотность и теплопроводность указаны для температуры 18°C.

\*\* Плотность указана для температуры 0°C и давления 1 бар.

\*\*\* Плотность указана для уровня моря.

Среда	Температура, °C	Удельная теплоемкость $C_p$ , Дж/(кг·°C)	Плотность $\rho$ , кг/м³	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°C)	Динамическая вязкость $\eta \cdot 10^6$ , Па·с	Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$ , м²/с	Температуропроводность, $\alpha \cdot 10^6$ , м²/с
Вода Жидкость при $p = \text{бар}$ $M = 18,016$ $R = 460$ $t_{\text{крит}} = 374,15 \text{ °C}$ $p_{\text{крит}} = 221,29 \text{ бар}$	0	4225	999,8	0,559	1792	1,792	0,132
	5	4206	1000	0,568	1519	1,519	0,135
	10	4194	999,7	0,577	1308	1,308	0,138
	20	4181	998,2	0,597	1005	1,004	0,143
	30	4175	995,7	0,615	801	0,805	0,148
	40	4175	992,2	0,633	656	0,661	0,153
	50	4177	988,1	0,647	549	0,556	0,157
	60	4180	983,2	0,659	469	0,477	0,161
	70	4186	977,8	0,668	406	0,417	0,163
	80	4193	971,8	0,674	357	0,367	0,165
	90	4201	965,3	0,678	317	0,328	0,167
	100	4210	958,4	0,682	284	0,296	0,169
	120	4231	943,5	0,685	232	0,245	0,171
	140	4256	926,3	0,684	196	0,210	0,173
Вода Жидкость при давление насыщения	160	4284	907,6	0,680	174	0,189	0,175
	180	4395	886,9	0,674	152	0,172	0,174
	200	4500	864,7	0,665	139	0,161	0,171
	220	4600	840,3	0,653	125	0,149	0,169
	240	4730	813,6	0,634	114	0,142	0,165
	260	4980	748	0,613	105	0,137	0,158
	280	5230	750,7	0,589	98	0,133	0,151
	300	5690	712,5	0,565	92	0,130	0,139
	320	6150	674,7	0,542	85	0,127	0,137
	340	6610	637,5	0,519	78	0,124	0,135
Вода насыщенный пар	-20	1846	0,00088	0,0172	—	—	8800
	0	1855	0,00484	0,0180	9	1900	2070
	20	1859	0,01734	0,0188	9,5	550	605
	40	1859	0,05118	0,0195	10	196	211
	60	1867	1301	0,0205	11	85	87
	100	1884	0,5984	0,0234	12,5	21	21,3
	200	[1935]	7,857	0,0356	18,6	2,37	1,55
	300	[1990]	46,24	0,0605	31,2	0,683	0,66
	374,5	[2040]	329	≈0,0110	≈50	≈0,155	≈0,164
	380	[2050]	329	≈0,0110	≈50	≈0,155	≈0,164
Воздух [сухой] газ при $p = \text{бар}$ $M = 28,96$ $R = 287$ $t_{\text{крит}} = -140,7^\circ\text{C}$ $p_{\text{крит}} = 36 \text{ бар}$	-190	4,2	0,0069	5,5	1,3		
	-150	1027	2,79	0,0115	8,2	3,1	4,0
	-100	1012	2,02	0,0158	11,4	5,6	7,18
	-80	1009	1,81	0,0177	12,6	6,9	8,95
	-40	1005	1,49	0,0209	15,0	10	13,9
	-20	1005	1,38	0,0226	16,0	11,6	16,4
	0	1005	1,276	0,0242	1701	13,4	18,9
	20	1005	1,189	0,0254	18,1	15,2	21,3
	40	1005	1,113	0,0267	19,1	17,2	24,0
	60	1009	1,046	0,0279	20,0	19,1	26,5
	80	1009	0,987	0,0303	20,9	21,2	29,6
	100	1010	0,934	0,0318	21,8	23,3	32,8
	200	1027	0,736	0,0386	25,8	35,0	50,6
	300	1045	0,608	0,0454	29,5	48,5	70,5
	400	1070	0,517	0,0515	32,9	63,5	92,0
	500	1093	0,450	0,0570	35,9	79,8	114
	600	1115	0,399	0,0623	38,8	97	138
	700	1135	0,358	0,0668	41,5	115	162
	800	1152	0,324	0,0707	44,0	135	186
	900	1168	0,297	0,0742	46,5	155	210
	1000	1184	0,273	0,0770	48,8	179	237
	1100	1192					
	1200	1205					
	1300	1215					
	1400	1222					
	1500	1230					
	1750	1245					
	2000	1260					

# Формулы

## Параметры состояния воздуха

Для расчета требуемой мощности обогрева  $P$  может использоваться следующая формула:

$$P = \Delta h \cdot q_v \cdot \rho_t = (h_b - h_a) \cdot q_v \cdot \rho_t$$

где

$P$  — мощность обогрева, кВт;

$\Delta h$  — изменение энталпии;

$q_v$  — расход влажного воздуха/с;

$\rho_t$  — плотность как отношение массы сухого воздуха к объему влажного воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

## Смешение двух потоков воздуха

$$B = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{m_1 + m_2}$$

где

$B$  — точка смешения, кг/кг;

$m_1$  и  $m_2$  — объем воздуха в точке и квадратный.

## Газодинамика

### Число Рейнольдса

$$Re = \frac{wd}{v}$$

где

$w$  — скорость движения среды, м/с;

$L$  — характерный размер

(при течении в трубе  $L$  равен диаметру трубы  $d$ , м);

$v$  — кинематическая вязкость среды, м<sup>2</sup>/с.

Упрощенное уравнение Бернулли

$$\frac{P_{\text{стат}}}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot v^2 = \text{const}$$

где

$P_{\text{стат}}$  — статическое давление, Па;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  — скорость движения воздуха, м/с.

Если обе части уравнения умножить на плотность, получим:

$$P_{\text{стат}} + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = P_{\text{стат}} + P_{\text{дин}} = P_{\text{полн}} = \text{const},$$

где

$P_{\text{стат}}$  — статическое давление, Па;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  — скорость движения воздуха, м/с;

$P_{\text{дин}}$  — динамическое давление, Па;

$P_{\text{полн}}$  — полное давление, Па.

### Потери давления

$$\Delta P_\lambda = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2,$$

где

$d$  — диаметр воздуховода, м.

$L$  — длина воздуховода, м;

$v$  — скорость движения воздуха, м/с;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  — коэффициент гидравлического трения, связанный с числом Рейнольдса и неровностью поверхности стенок воздуховода.

Для расчета коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  может использоваться следующая формула:

#### При ламинарном течении ( $Re \geq 2320$ ):

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

#### При турбулентном течении ( $Re \geq 2320$ ):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \log \cdot \frac{k}{d}$$

где

$k$  — неровность поверхности стенок воздуховода, мм;

$d$  — диаметр воздуховода, м.

### Потеря давления, вызванная изменением направления потока внутри воздуховода

Для расчета потери давления используется следующая формула:

$$\Delta P_f = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2,$$

где

$\zeta$  — коэффициент разового снижения давления;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  — скорость движения воздуха, м/с;

## Обобщенное уравнение Бернулли

$$P_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho g h_1 = P_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + \rho g h_2 + \Delta P_\lambda,$$

где

$P$  — статическое давление на высоте  $h = 0$ , Па;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  — скорость движения воздуха, м/с;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

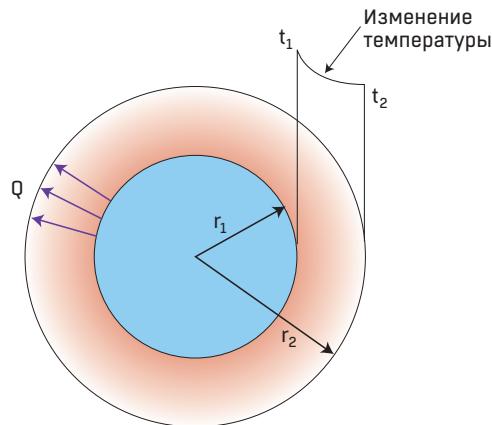
$h$  — высота, м;

$\Delta P_f$  — потери давления, Па;

$\rho \cdot \frac{v^2}{2}$  — динамическое давление;

$\rho g h$  — давление за счет разности высот.

## Для трубы круглого сечения:



$$Q = -2\pi \cdot r \cdot \lambda \cdot \frac{dt}{dr}, \text{ Вт}$$

В интегральной форме выражение приобретает вид:

$$Q = -2\pi \cdot \lambda \cdot \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \text{ Вт} r_1$$

## Теплообмен

### Закон теплопроводности Фурье

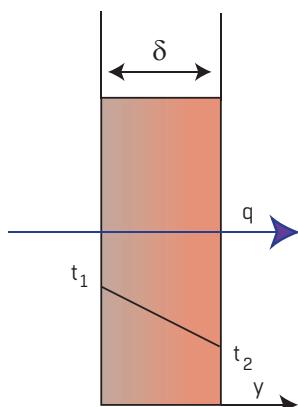
$$q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dn} \quad \text{Вт/м}^2$$

где

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности  
 $t$  — удельная теплопроводность  
материала; градиент температуры в  
направлении, перпендикулярном  
поверхности

Для плоской стенки выражение приобретает вид:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dy} = -\lambda \cdot \frac{[t_2 - t_1]}{\delta} = \lambda \cdot \frac{[t_1 - t_2]}{\delta}, \quad \text{Вт/м}^2$$



### Коэффициент теплоизоляции

$$K_b = \frac{[t_{\text{поверхн}} - t_{\text{внутр}}]}{[t_{\text{наруж}} - t_{\text{внутр}}]}$$

где

$t_{\text{внутр}}$  — температура воздуха внутри вентиляционной установки;

$t_{\text{наруж}}$  — температура воздуха снаружи вентиляционной установки;

$t_{\text{поверхн}}$  — наименьшая температура поверхности секций установки.

## Охлаждение

### Охлаждение

$$Q = m \cdot (h_c - h_b),$$

где

$Q$  — мощность охлаждения, кВт;

$m$  — массовый расход хладагента, кг/с;

$h_c - h_b$  — изменение энтальпии между точками  $b$  и  $c$ ,

см. рис. на стр. 34.

## Энергопотребление

$$P = m \cdot (h_d - h_c),$$

где

$P$  — энергопотребление, кВт;

$m$  — массовый расход хладагента, кг/с;

$h_d - h_c$  — изменение энталпии между точками с и д,  
см. рис. на стр. 34.

## КПД охлаждения

$$\text{COP}_2 = \frac{Q}{P} = \frac{m \cdot (h_c - h_b)}{(h_d - h_c)}$$

где

$\text{COP}_2$  — КПД охлаждения;

$Q$  — мощность охлаждения, кВт;

$P$  — энергопотребление, кВт.

$$\text{COP}_2 = \frac{(h_c - h_b)}{(h_d - h_c)}$$

## КПД обогрева

$$\text{COP}_1 = \frac{(h_d - h_a)}{(h_d - h_c)}$$

Ввиду того, что  $(h_d - h_a) = (h_c - h_b) + (h_d - h_c)$ ,

получаем:  $\text{COP}_1 = \text{COP}_2 + 1$

## Энергопотребление при нагреве воздуха

$$P = Cp \cdot \rho \cdot \Delta t$$

$$P = 1,2 \cdot \Delta t$$

где

$P$  — энергопотребление, кВт.

$Cp$  — удельная теплоемкость;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta t$  — изменение температуры, °С.

## Энергопотребление при нагреве чистой воды

$$P = Cp \cdot \rho \cdot \Delta t$$

$$P = 14,18 \cdot \Delta t$$

где

$P$  — энергопотребление, кВт.

$Cp$  — удельная теплоемкость;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta t$  — изменение температуры, °С.

## Утилизация энергии обогрева и охлаждения

### Годовая тепловая нагрузка

$$Q_{\text{полн}} = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot \text{количество градусо-часов},$$

где

$Q_{\text{полн}}$  — годовая тепловая нагрузка по обогреву, кВт·ч/год,  
без теплообменника;

$q$  — расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$c_p$  — удельная теплоемкость, Дж/кг · °С.

Нерегулярный дополнительный нагрев

$$Q_{\text{дополн}} = [1 - \frac{\eta_{\text{среднегод}}}{100}] \cdot Q_{\text{полн}}$$

где

$Q_{\text{дополн}}$  — годовая тепловая нагрузка по обогреву,  
кВт·ч/год, с теплообменником;

$\eta_{\text{среднегод}}$  — среднегодовая энергоэффективность (КПД)  
теплообменника, %.

$Q_{\text{полн}}$  — годовая тепловая нагрузка по обогреву,  
кВт·ч/год, без теплообменника;

Эффективность

$$\eta_t = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}$$

$$\eta_x = \frac{x_{22} - x_{21}}{x_{11} - x_{21}}$$

### Обозначения

$q$  — расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;

$t$  — температура, °С;

$\phi$  — относительная влажность воздуха, %;

$\eta_t$  — эффективность теплообмена, %;

$\eta_x$  — эффективность влагообмена, %;

### Подстрочные индексы

1 — сторона удаляемого воздуха;

2 — сторона приточного воздуха;

11 — удаляемый воздух, впуск;

12 — удаляемый воздух, выпуск;

21 — приточный воздух, впуск;

22 — приточный воздух, выпуск.

## Число единиц переноса тепла

Число единиц переноса тепла рассчитывается по формуле:

$$NTU = \frac{\alpha \cdot F}{C_{\min}}$$

$$C_{\min} = q_{\min} \cdot \rho \cdot C_p,$$

где

$\alpha$  — коэффициент поверхностной теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup> °С;  
 $F$  — площадь поверхности теплопередачи, м<sup>2</sup>;  
 $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  
 $q_{\min}$  — наименьший расход, м<sup>3</sup>/с;  
 $C_p$  — удельная теплоемкость.

## Шум

### Уровень звукового давления

Уровень звукового давления рассчитывается по формуле:

$$L_p = 20 \log \left( \frac{P}{P_0} \right) = 20 \log \left( \frac{P}{2 \cdot 10^{-5}} \right)$$

где

$L_p$  — уровень звукового давления, дБ;  
 $P$  — звуковое давление, Па;  
 $P_0$  — опорное значение звукового давления, Па.

### Уровень звуковой мощности

Уровень звуковой мощности рассчитывается по формуле:

$$L_w = 10 \log \left( \frac{W}{W_0} \right) = 10 \log \left( \frac{W}{10^{-12}} \right)$$

где

$L_w$  — уровень звуковой мощности, дБ;  
 $W$  — звуковая мощность, Вт;  
 $W_0$  — опорное значение звуковой мощности, Вт.

### Сложение уровней звукового давления и звуковой мощности

$$L_p = 10 \log \left( 10 \left( L_p \frac{1}{10} \right) + 10 \left( L_w \frac{2}{10} \right) \right)$$

## Скорость звука

$$c = f \lambda,$$

где

$c$  — скорость звука, м/с;  
 $f$  — частота звуковых колебаний, Гц;  
 $\lambda$  — длина звуковой волны, м.

### Уровень звукового давления в воздуховоде

Уровень звукового давления в воздуховоде:

$$L_p = L_w - 10 \log A,$$

где

$L_p$  — уровень звукового давления, дБ;  
 $L_w$  — уровень звуковой мощности, дБ;  
 $A$  — площадь поперечного сечения воздуховода, м<sup>2</sup>.

### Уровень звукового давления вне помещения

Уровень звукового давления на расстоянии  $r$  от источника выражается формулой:

$$L_p = L_w - 10 \log 2\pi r^2,$$

где

$L_p$  — уровень звукового давления, дБ;  
 $L_w$  — уровень звуковой мощности, дБ;  
 $r$  — радиус, м.

### Звукопоглощение в помещении

$$A = A_1 \cdot \alpha_1 + A_2 \cdot \alpha_2 + A_3 \cdot \alpha_3 + \dots + A_n \cdot \alpha_n,$$

где

$A$  — эквивалентная площадь звукопоглощения, м<sup>2</sup>;  
 $A_i$  — площади отдельных поверхностей в помещении,  
м<sup>2</sup>,  $i = 1 \dots n$ ;  
 $\alpha_i$  — коэффициенты звукопоглощения соответствующих  
поверхностей,  $i = 1 \dots n$ .

### Время реверберации

$$T = 0,16 \cdot \frac{V}{A}$$

где

$T$  — время реверберации, с;  
 $V$  — объем помещения, м<sup>3</sup>;  
 $A$  — эквивалентная площадь звукопоглощения, м<sup>2</sup>.

# Вентиляторы

## Формулы для расчета вентиляторов

**Расход воздуха**  $\frac{q_1}{q_2} = \frac{n_1}{n_2}$

**Давление**  $\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2$

**Энергопотребление**  $\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^3$

где

q — расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;

n — скорость вращения, об./мин;

p — давление, Па;

P — мощность, кВт.

## Характеристики типовой системы воздуховодов

$$P = P_0 + k \cdot q^n,$$

где

P — давление, Па;

P<sub>0</sub> — давление при отсутствии расхода воздуха (постоянное), Па;

k — константа системы;

n — показатель степени для системы, обычно близок к 2.

## Эффективность вентилятора

$$\eta_{вент} = \frac{P_{вент}}{PR} = \frac{k_p \cdot q_{vi} \cdot p_{полн вент}}{PR}$$

где

$\eta_{вент}$  — эффективность вентилятора, %;

P<sub>вент</sub> — энергопотребление вентилятора, кВт;

P<sub>колес</sub> — мощность на валу лопастного колеса вентилятора, Вт;

k<sub>p</sub> — коэффициент сжатия;

q<sub>vi</sub> — расход воздуха на впуске вентилятора, м<sup>3</sup>/с;

p<sub>полн вент</sub> — увеличение полного давления на вентиляторе, Па.

## Нагрев воздуха на вентиляторе

$$\Delta t = \frac{k_p \cdot P_{полн вент}}{\rho \cdot \eta \cdot C_p}$$

где

$\Delta t$  — рост температуры, °С или К;

k<sub>p</sub> — коэффициент сжатия, которым можно пренебречь;

p<sub>полн вент</sub> — увеличение полного давления на вентиляторе, Па.

$\eta$  — эффективность вентилятора;

$\eta$  — эффективность вентилятора;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

C<sub>p</sub> — удельная теплоемкость.

Для приближенной оценки можно принять, что  $\rho = 1,2$ ,  $\eta = 0,80$  и C<sub>p</sub> = 1008. В результате получим  $\Delta t \approx P/1000$  или 1°C на 1000 Па.

## Нагрев воздуха для электродвигателей с ременным приводом

$$\Delta t = \frac{k_p \cdot p_{полн вент}}{\rho \cdot \eta_{вент} \cdot \eta_{двиг} \cdot \eta_{тр} \cdot C_p}$$

где

$\Delta t$  — рост температуры, °С или К;

k<sub>p</sub> — коэффициент сжатия, которым можно пренебречь;

p<sub>полн вент</sub> — увеличение полного давления на вентиляторе, Па;

$\eta_{вент}$  — эффективность вентилятора;

$\eta_{двиг}$  — эффективность электродвигателя;

$\eta_{тр}$  — эффективность трансмиссии;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

C<sub>p</sub> — удельная теплоемкость.

## Уровень звуковой мощности для октавного диапазона

$$L_{WOKT} = L_{WA} + K_{OKT}$$

где

L<sub>WOKT</sub> — уровень звуковой мощности для октавного диапазона, дБ;

L<sub>WA</sub> — уровни звуковой мощности по шкале A, дБ;

K<sub>OKT</sub> — величина коррекции каждого отдельного октавного диапазона, зависящая от скорости вращения вентилятора.

## Время пуска электродвигателей без частотного преобразователя

Для расчета времени пуска необходимо:

- Выбрать номинальную выходную мощность электродвигателя P исходя из потребляемой мощности вентилятора P<sub>вент</sub> для штатного режима работы (открытые направляющие лопатки или открытый воздушный клапан).
- В формулу для расчета времени пуска подставить значение требуемой мощности вентилятора при закрытых направляющих лопатках или закрытом воздушном клапане P<sub>вент</sub>.

**Произвести расчет по формуле:**

$$t = \frac{J \cdot \eta_{\text{вент}}^2 \cdot 10^{-3}}{46 \left( P \left( \frac{M_{\text{max}}}{M} + \frac{M_{\text{пуск}}}{M} \right) - P_{\text{вент}} \right)}$$

Рассчитанное время пуска является временем, необходимым для разгона вентилятора до максимальной скорости из состояния покоя.

**Время пуска переключением со звезды на треугольник рассчитывается по формуле:**

$$t = \frac{J \cdot \eta_{\text{вент}}^2 \cdot 10^{-3}}{46 \left( P \left( \frac{1}{3} \cdot \frac{M_{\text{max}}}{M} + \frac{1}{4} \cdot \frac{M_{\text{пуск}}}{M} \right) - P_{\text{вент}} \right)}$$

Рассчитанное время пуска является временем, в течение которого пускатель звезды-треугольник должен обеспечивать подключение звездой, чтобы вентилятор набрал приблизительно 90% от максимальной скорости вращения. По прошествии этого времени происходит переключение на треугольник. Перед пуском переключением со звезды на треугольник необходимо удостовериться, что крутящий момент электродвигателя при подключении звездой превышает крутящий момент вентилятора.

### Обозначения

- P — номинальная выходная мощность электродвигателя, кВт;
- $P_{\text{вент}}$  — потребляемая мощность вентилятора при штатной скорости вращения, кВт (включая потери ременного привода);
- PY/D — минимальная мощность электродвигателя, при которой возможен пуск переключением со звезды на треугольник, кВт;
- $M_{\text{пуск}}/M$  — отношение крутящего момента электродвигателя во время пуска к его крутящему моменту в штатном режиме;
- $M_{\text{max}}/M$  — отношение максимального крутящего момента электродвигателя к его крутящему моменту в штатном режиме;
- $\eta_{\text{вент}}$  — скорость вращения электродвигателя в штатном режиме, об./мин;
- J — момент инерции на вале вентилятора, кг·м<sup>2</sup>.

### Удельная мощность вентиляторов SFP

#### Удельная мощность вентиляторов для всего здания

$$SFP = \frac{\sum P_{\text{электр}}}{Q_{\text{max}}}$$

где

SFP — удельная потребляемая мощность вентиляторов для здания;

$P_{\text{электр}}$  — суммарная электрическая мощность, подаваемая на все вентиляторы здания, кВт;

$Q_{\text{max}}$  — максимальный штатный измеряемый расход приточного или удаляемого воздуха в здании, м<sup>3</sup>/с.

### Удельная мощность вентиляторов на единицу объема воздуха SFPv

#### Удельная потребляемая мощность вентиляторов для вентиляционной установки с утилизацией теплоты, в состав которой входят приточные и вытяжные вентиляторы

$$SFP_v = \frac{P_{\text{электр приточ}} + P_{\text{электр вытяж}}}{Q_{\text{max}}}$$

где

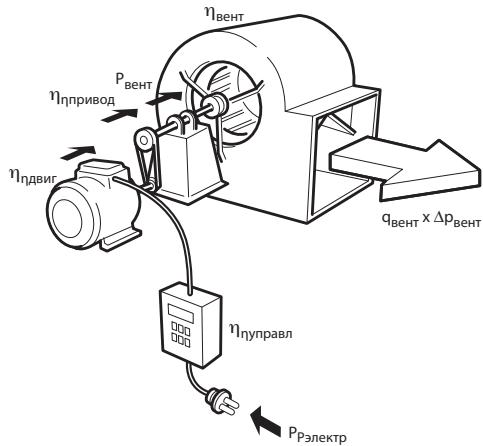
$SFP_v$  — удельная потребляемая мощность вентиляторов для вентиляционной установки с утилизацией теплоты, кВт/(м<sup>3</sup>/с);

$P_{\text{электр приточ}}$  — мощность, подаваемая на приточный вентилятор, кВт;

$P_{\text{электр вытяж}}$  — мощность, подаваемая на вытяжной вентилятор, кВт;

$Q_{\text{max}}$  — максимальный расход приточного или удаляемого воздуха в вентиляционной установке, м<sup>3</sup>/с.

## Мощность вентилятора



## Расчет электрической мощности вентилятора Рэлектр

$$P_{\text{электр}} = \frac{q_{\text{вент}} \cdot \Delta p_{\text{вент}}}{\eta_{\text{вент}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{двиг}} \cdot \eta_{\text{управл}} \cdot 1000}$$

$\eta$  – эффективности вентилятора, трансмиссии, электродвигателя и управляющего оборудования (см. рис.).

Для вентиляционной установки с роторным теплообменником расчет требуемой электрической мощности для электродвигателя вытяжного вентилятора предполагает учет мощности, затрачиваемой на протечки и на продувку теплообменника. Помимо этого, следует учесть любые частичные перекрытия воздуховода со стороны удаляемого воздуха, необходимые для достижения надлежащего соотношения давлений и надлежащего направления протечек в вентиляционной установке.

## Давление

$$p = \frac{F}{A} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot A}{A} = \rho \cdot g \cdot h,$$

где

$p$  – давление, Па;

$F$  – сила, Н;

$A$  – площадь,  $\text{мм}^2$ ;

$\rho$  – плотность,  $\text{г}/\text{мм}^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$h$  – высота, м.

## Объемный расход

$$q_v = A \cdot v,$$

где

$A$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$v$  – скорость,  $\text{м}/\text{с}$ .