Введение

Настоящее Руководство по установкам сжатого воздуха (шестое издание) предназначено для тех, кого интересуют самые разнообразные вопросы, связанные с эксплуатацией данных установок. Первое издание руководства вышло в свет более двадцати лет назад, в 1976 году. С тех пор произошло много изменений, которые собственно, и получили отражение в новом издании, хотя материал, составляющий его ядро, остался без измене-ний.

Руководство содержит основные сведения из теории и практики эксплуатации установок сжатого воздуха – от фундаментальных теоретических вопросов до практических советов и подсказок. Предлагаемое издание отличается от предыдущих в основном тем, что в нем особое внимание уделено вопросам охраны окружающей среды, качества воздуха, энергосбережения и экономическим аспектам производства сжатого воздуха. Кроме того, мы включили в Руководство примеры расчетов, а также разнообразную полезную информацию в виде таблиц и полный указатель ключевых слов. Это Руководство создано нашими ведущими специалистами в области сжатого воздуха, и мы надеемся, что оно станет полезным учебным пособием не только для начинающих, но и для опыт-ных работников, которые найдут в нем требуемую информацию.

Руководство, безусловно, необходимо всем работникам данной отрасли, поскольку оно призвано значительно облегчить их труд. В нем есть исчерпывающие ответы на многие вопросы, оно подскажет путь решения самых сложных проблем. Неразрешимых проблем не бывает! Наши клиенты всегда могут рассчитывать на нас. Обращайтесь к нам, пишите, и мы ответим на все ваши вопросы.

Руководитель проектов по компрессорному оборудованию

Горошков В.Н.

Казань, 2015

Компания KRAFMARKET24

Глава 1
Теория

1.1. Основы физики 10
1.1.1. Строение вещества 10
1.1.2. Молекулы и различные агрегатные состояния вещества 10

1.2. Физические единицы измерения 11
1.2.1. Давление 11
1.2.2. Температура 12
1.2.3. Теплоемкость 12
1.2.4. Работа 13
1.2.5. Мощность 13
1.2.6. Объемный расход 13

1.3. Термодинамика 14
1.3.1. Основные законы 14
1.3.2. Газовые законы 14
1.3.3. Теплопередача 15
1.3.4. Изменения состояния 16
1.3.4.1. Изохорный процесс 16
1.3.4.2. Изобарный процесс 17
1.3.4.3. Изотермический процесс 17
1.3.4.4. Изоэнтропический процесс 18
1.3.4.5. Политропический процесс 18
1.3.5. Поток газа через сопло 18
1.3.6. Поток, протекающий по трубе 19
1.3.7. Дросселирование 19

1.4. Воздух 20
1.4.1. Общие сведения 20
1.4.2. Влажный воздух 20

1.5. Типы компрессоров 21
1.5.1. Два основных принципа 21
1.5.2. Объемные компрессоры 21
1.5.3. Диаграмма сжатия для объемных компрессоров 23
1.5.4. Динамические компрессоры 24
1.5.5. Несколько ступеней сжатия 24
1.5.6. Объемный компрессор или центробежный? 25

1.6. Электричество 25
1.6.1. Терминология и основные определения 25
1.6.2. Закон Ома для переменного тока 26
1.6.3. Трехфазная система 27
1.6.4. Мощность 27
1.6.5. Электродвигатель 28
1.6.5.1. Скорость вращения 28
1.6.5.2. Коэффициент полезного действия 28
1.6.5.3. Класс изоляции 28
1.6.5.4. Классы защиты 28
1.6.5.5. Способы охлаждения 29
1.6.5.6. Способ монтажа 29
1.6.5.7. Подключение звездой (Y) и треугольником (Δ) 29
1.6.5.8. Вращающий момент 31

Глава 2
Компрессоры и вспомогательное оборудование

2.1. Объемные компрессоры 34
2.1.1. Общие сведения 34
2.1.2. Поршневые компрессоры 34
2.1.3. Безмасляные поршневые компрессоры 36
2.1.4. Мембранные компрессоры 37
2.1.5. Винтовые компрессоры 37
2.1.5.1. Безмасляные компрессоры 38
2.1.5.2. Компрессоры с нагнетанием жидкости 39
2.1.6. Зубчатый компрессор 40
2.1.7. Спиральный компрессор 41
2.1.8. Роторно-пластинчатый компрессор 42
2.1.9. Жидкостно-кольцевой компрессор 43
2.1.10. Воздуходувки 43

2.2. Динамические компрессоры 44
2.2.1. Общие сведения 44
2.2.2. Центробежные компрессоры 44
2.2.3. Осевые компрессоры 46

2.3. Прочие компрессоры 47
2.3.1. Вакуумные насосы 47
2.3.2. Бустер-компрессоры 47
2.3.3. Напорные усилители 48

2.4. Подготовка сжатого воздуха 48
2.4.1. Осушение сжатого воздуха 48
2.4.1.1. Концевой охладитель 50
2.4.1.2. Холодильный осушитель 50
2.4.1.3. Чрезмерное сжатие 51
2.4.1.4. Абсорбционное осушение 51
2.4.1.5. Адсорбционное осушение 52
2.4.2. Фильтры 54

2.5. Системы управления и регулирования 56
2.5.1. Общие сведения о регулировании 56
2.5.2. Принципы регулирования объемных компрессоров 57
2.5.2.1. Сброс давления 57
2.5.2.2. Байпас 57
2.5.2.3. Дросселирование входа 57
2.5.2.4. Сброс давления с дросселированием входа 58
2.5.2.5. Пуск/останов 58
2.5.2.6. Регулирование скорости вращения 58
2.5.2.7. Регулируемый выпускной канал 59
2.5.2.8. Разгрузка впускным клапаном 59
2.5.2.9. Объем мертвого пространства цилиндра 59
2.5.2.10. Нагрузка – разгрузка – останов 60
2.5.3. Принципы регулирования динамических компрессоров 60
2.5.3.1. Дросселирование входа 60
2.5.3.2. Лопатки входного направляющего аппарата 60
2.5.3.3. Лопатки выходного направляющего аппарата (диффузор) 60
2.5.3.4. Сброс давления 60

2.5.3.5. Нагрузка – разгрузка – останов 60
2.5.3.6. Регулирование числа оборотов 61
2.5.4. Управление и контроль 62
2.5.4.1. Общие сведения 62
2.5.4.2. Нагрузка – разгрузка – останов 62
2.5.4.3. Регулирование числа оборотов 63
2.5.5. Системы контроля 63
2.5.5.1. Измерение температуры 63
2.5.5.2. Измерение давления 64
2.5.5.3. Контроль 64
2.5.6. Комплексная система управления 65
2.5.6.1. Селектор пусковой последовательности 66
2.5.7. Центральное управление 66
2.5.8. Дистанционный контроль 67

Глава 3 Расчет компрессорных установок

3.1. Определение параметров компрессорных установок 70
3.1.1. Общие сведения 70
3.1.1.1. Расчет рабочего давления 70
3.1.1.2. Расчет потребления сжатого воздуха 71
3.1.1.3. Измерение потребления сжатого воздуха 73
3.1.2. Централизация или децентрализация? 72
3.1.2.1. Общие сведения 73
3.1.2.2. Централизованные компрессорные установки 73
3.1.2.3. Децентрализованные компрессорные установки 74
3.1.3. Расчет компрессорной установки, работающей на большой высоте 74
3.1.3.1. Общие сведения 74
3.1.3.2. Воздействие окружающей среды на компрессор 75
3.1.3.3. Источник питания 76
3.1.3.3.1. Электродвигатели 76
3.1.3.3.2. Двигатели внутреннего сгорания 76

3.2. Подготовка воздуха 77
3.2.1. Общие сведения 77
3.2.2. Водяной пар в сжатом воздухе 77
3.2.3. Масло в сжатом воздухе 78
3.2.4. Микроорганизмы в сжатом воздухе 79
3.2.5. Фильтры 79
3.2.6. Концевой охладитель 80
3.2.7. Влагоотделитель 81
3.2.8. Масло в виде мелких капель 81

3.3. Система охлаждения 81
3.3.1. Компрессоры с водяным охлаждением 81
3.3.1.1. Общие сведения 81
3.3.1.2. Открытая система без циркуляции воды 82
3.3.1.3. Открытая система с циркуляцией воды 82
3.3.1.4. Замкнутая система 83

3.4. Рекуперация тепловой энергии 84
3.4.1. Общие сведения 84
3.4.2. Расчет потенциала рекуперации 85
3.4.3. Способы рекуперации 87
3.4.3.1. Общие сведения 87
3.4.3.2. Системы с воздушным охлаждением 87
3.4.3.3. Система с водяным охлаждением 88

3.5. Компрессорная 90
3.5.1. Общие сведения 90
3.5.2. Расположение и конструкция 91
3.5.3. Основание 91
3.5.4. Всасываемый воздух 92
3.5.5. Вентиляция компрессорного зала 93

3.6. Устройство сети сжатого воздуха 96
3.6.1. Общие сведения 96
3.6.1.1. Воздушный ресивер 96
3.6.2. Конструкция сети сжатого воздуха 98
3.6.3. Определение параметров сети сжатого воздуха 99
3.6.4. Измерение расхода 101

3.7. Передвижные компрессоры 101
3.7.1. Общие сведения 101
3.7.2. Шум и выхлопные газы 101
3.7.3. Диапазон давлений 102

3.8. Электрическая часть 102
3.8.1. Общие сведения 102
3.8.2. Двигатели 102
3.8.3. Способы пуска 103
3.8.4. Управляющее напряжение 103
3.8.5. Защита от короткого замыкания 104
3.8.6. Кабели 104
3.8.7. Компенсация сдвига фаз 104

3.9. Шум 105
3.9.1. Общие сведения 105
3.9.2. Звуковое давление 105
3.9.3. Поглощение звука 106
3.9.4. Константа помещения 106
3.9.5. Реверберация 106
3.9.6. Соотношение между звуковой мощностью и звуковым давлением 106
3.9.7. Звукометрия 107
3.9.8. Взаимодействие нескольких источников звука 108
3.9.9. Уменьшение шума 108
3.9.10. Шум компрессорной установки 109

3.10. Стандарты, законы и постановления 109
3.10.1. Общие сведения 109
3.10.2. Стандарты 110

Глава 4
Экономика

4.1. Экономика 112
4.1.1. Затраты на производство сжатого воздуха 112
4.1.1.1. Общие сведения 112
4.1.1.2. Структура затрат 113

4.2. Возможности энергосбережения 113
4.2.1. Потребление энергии 113
4.2.2. Рабочее давление 114
4.2.3. Потребление воздуха 115
4.2.4. Способ регулирования 116
4.2.5. Качество сжатого воздуха 117
4.2.6. Рекуперация тепловой энергии 118
4.2.7. Техническое обслуживание 118
4.2.7.1. Планирование технического обслуживания 119
4.2.7.2. Вспомогательное оборудование 120

4.3. Прочие экономические факторы 120
4.3.1. Общие сведения 120
4.3.2. Издержки за срок службы 120

Глава 5
Расчеты

5.1. Пример определения параметров установок по производству сжатого воздуха 124

5.2. Исходные данные 125
5.2.1. Потребление 125
5.2.2. Условия окружающей среды 125
5.2.3. Разное 125

5.3. Выбор компонентов 126
5.3.1. Определение параметров компрессора 127
5.3.2. Допущения для дальнейших расчетов 127
5.3.3. Расчет объема воздушного резервуара 128
5.3.4. Определение параметров осушителя 129
5.3.5. Допущения для дальнейших расчетов 129
5.3.6. Проверочный расчет 130

5.4. Прочие параметры 131
5.4.1. Вычисление количества конденсата 131
5.4.2. Требования к вентиляции компрессорного зала 132

5.5. (Дополнение 1) Работа на большой высоте 133

5.6. (Дополнение 2) Пиковая производительность 134

5.7. (Дополнение 3) Рекуперация тепловой энергии с помощью воды 135
5.7.1. Допущения 136
5.7.2. Расчет расхода охлаждающей воды в контуре охлаждения 136
5.7.3. Энергетический баланс теплообменника рекуперации тепловой энергии 137
5.7.4. Ответ на задачу 137

5.8. (Дополнение 4) Падение давления в трубопроводе 138

Глава 6
Единицы измерения и символы

6.1. Международная система единиц СИ 140

6.2. Условные обозначения на чертежах 143

6.3. Графики и таблицы 145

6.4. Перечень действующих стандартов и норм 150
6.4.1. Правила техники безопасности для машиностроения 150
6.4.1.1. Правила по технике безопасности для машиностроения 150
6.4.1.2. Безопасность установок под давлением 150
6.4.1.3. Охрана окружающей среды 151
6.4.1.4. Электробезопасность 151
6.4.2. Технические стандарты и нормы 151
6.4.2.1. Стандартизация 151
6.4.2.2. Технические условия 151
6.4.2.3. Измерения 151

Тематический указатель 152

Глава 1 Теория

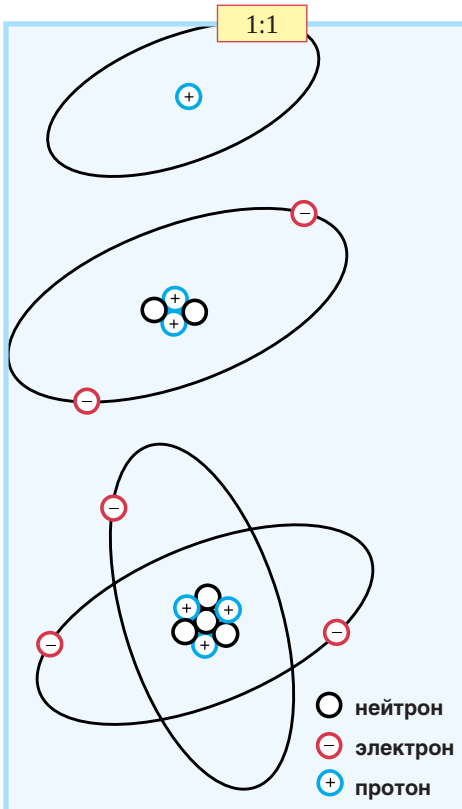
1.1 Основы физики

1.1.1. Строение вещества

Все вещества в основном состоят из протонов, нейтронов и электронов. Имеется еще множество других «строительных блоков», но они нестабильны.

Все эти частицы характеризуются четырьмя свойствами: электрическим зарядом, массой покоя, механическим моментом (спином) и магнитным моментом.

1:1



Электронная оболочка определяет химические свойства элемента. Приведем несколько простых примеров. В электронной оболочке атома водорода (вверху) – один электрон. Атом гелия (в середине) содержит в электронной оболочке два электрона. В атоме лития (внизу) третий электрон находится во второй электронной оболочке.

Количество протонов в ядре атома равно атомному номеру этого атома.

Сумма числа протонов и числа нейтронов примерно равна атомной массе.

Эта информация является частью информации, которую можно получить из таблицы Менделеева. Электронная оболочка содержит столько же электронов, сколько протонов содержит ядро атома. Это означает, что атом электрически нейтрален.

Датский физик Нильс Бор еще в 1913 г. разработал теорию (она находит все новые подтверждения и сегодня), в которой он, в частности, доказал, что атомы могут существовать только в так называемых стационарных состояниях с определенной энергией. Когда атом переходит из одного энергетического состояния в другое, испускается квант излучения, фотон.

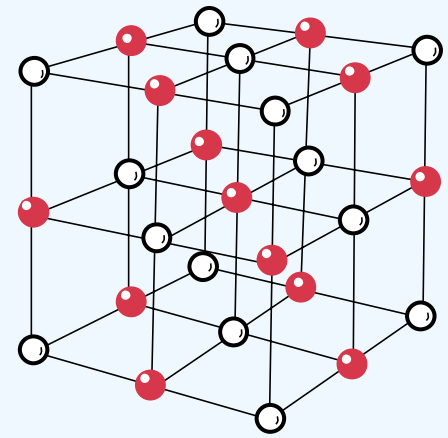
Эти различные переходы проявляют себя в виде световых излучений с различными длинами волн. В спектрографе они появляются в виде линий атомного спектра.

1.1.2. Молекулы и различные агрегатные состояния вещества

Атомы, удерживаемые вместе химическими связями, называются молекулами. Они так малы, что, например, 1 мм^3 воздуха при атмосферном давлении содержит примерно 2,55x10^{16} молекул.

Все вещества могут, в принципе, существовать в разных состояниях: твердом, жидком, газообразном и в состоянии плазмы. В твердом состоянии молекулы сильными связями плотно упакованы в кристаллическую решетку. При всех температурах выше абсолютного нуля происходит некоторое движение молекул. В твердом состоянии это проявляется в виде колебаний молекул около положения равновесия, которые тем быстрее, чем выше становится температура. Когда вещество в твердом состоянии нагревается

1:2



Кристалл соли имеет кубическую структуру. Типичным примером является всем известная поваренная соль (NaCl). Линиями показаны связи между атомами натрия (красные) и хлора (белые).

так сильно, что жесткая структура (кристаллическая решетка) не может сдерживать движение молекул, молекулы освобождаются, вещество плавится и превращается в жидкость. Если жидкость нагревать еще больше, то связи между молекулами разрываются и жидкость переходит в газообразное состояние, что сопровождается расширением во всех направлениях и смешиванием с другими окружающими газами. Когда молекулы газа охлаждаются, их скорость уменьшается, и они вновь начинают сцепляться друг с другом. Происходит конденсация. Если же продолжать нагревать молекулы газа, они распадаются на отдельные частицы и образуют плазму, состоящую из электронов и атомных ядер.

1.2 Физические единицы измерения

1.2.1. Давление

Сила, с которой на квадратный сантиметр площади действует столб воздуха, поднимающийся от уровня моря и доходящий до верхнего края атмосферы, составляет примерно 10,13 Н. Поэтому абсолютное атмосферное давление на уровне моря приблизительно равно 10,13x10^{4}Н на квадратный метр и называется 1 Па (паскаль). Паскаль — единица измерения давления в системе СИ. Расчет основных величин показывает, что 1 бар = 1 x 10^5 Па. Чем выше вы находитесь над уровнем моря, тем ниже атмосферное давление, и наоборот.

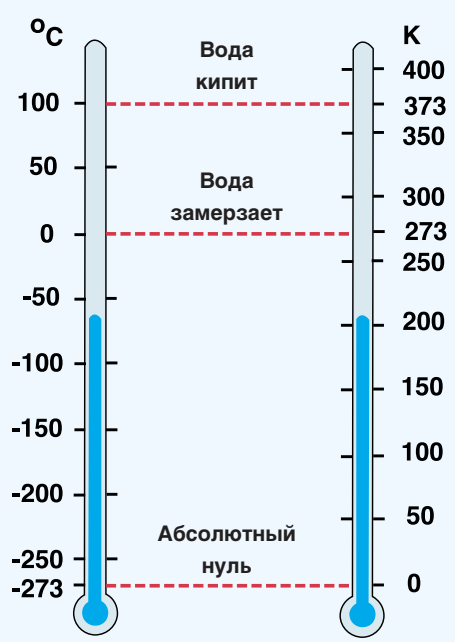
1:3

Когда вещество отдает или получает тепловую энергию, его агрегатное состояние изменяется. Здесь показано, как это проявляется для обычной воды.

1:4

Большинство манометров регистрируют разность между давлением в сосуде и местным атмосферным давлением. Поэтому, чтобы определить абсолютное давление, нужно прибавить значение местного атмосферного давления.

1:5



Здесь показано соотношение между шкалами Цельсия и Кельвина. На шкале Цельсия 0° установлен в точке замерзания воды; на шкале Кельвина 0° установлен на абсолютном нуле.

1.2.2. Температура

Температуру газа, в отличие от давления, четко определить значительно труднее. Температура — показатель величины кинетической энергии молекул. Они движутся тем быстрее, чем выше температура, и всякое движение прекращается при абсолютном нуле. На этом основана шкала Кельвина. В остальных отношениях она градуирована точно так же, как и шкала Цельсия. Соотношения между температурами:

$T = t + 273{,}2$
T — абсолютная температура, К
t — температура, °C

1.2.3. Теплоемкость

Удельная теплоемкость вещества представляет собой количество теплоты, необходимой для повышения температуры 1 кг этого вещества на 1 К. Соответственно, размерность теплоемкости будет Дж/(кг х К). Следовательно, размерность мольной теплоемкости будет Дж/(моль х К). Обычно используются следующие обозначения:

c_p – теплоемкость при постоянном давлении
c_v – теплоемкость при постоянном объеме
C_p – мольная теплоемкость при постоянном давлении
C_v – мольная теплоемкость при постоянном объеме

Теплоемкость при постоянном давлении всегда больше, чем теплоемкость при постоянном объеме. Теплоемкость вещества не является постоянной величиной и обычно возрастает с повышением температуры.

Для практического применения чаще всего может использоваться среднее значение. Для жидкостей и твердых веществ это $c_p \approx c_v \approx c$. Тогда мощность, потребляемая на нагрев массового расхода с t_1 до t_2, составит:

$Q \approx m \times c \times (T_2 - T_1)$, где
Q – тепловая мощность, Вт
m – массовый расход, кг/с
c – удельная теплоемкость, Дж/(кг х К)
T – температура, К

Объяснением того, почему c_p превышает c_v, является работа по расширению, которую газ должен выполнить при постоянном давлении. Отношение c_p к c_v, называемое *k*, является функцией от количества атомов в молекуле:

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{C_p}{C_v}$$

1.2.4. Работа

Механическую работу можно определить как произведение силы на расстояние, на протяжении которого на тело действует сила.

Точно так же и для теплоты: работа представляет собой энергию, которая передается от одного тела к другому. Разница заключается в том, что вместо силы действует температура.

Примером может послужить сжатие газа в цилиндре за счет перемещения поршня. Сжатие происходит под действием силы, движущей поршень. В то же время энергия передается от поршня к находящемуся в цилиндре газу. Эта энергия преобразуется в работу в термодинамическом смысле. Сумма подводимой и передаваемой энергии всегда постоянна. Работа может дать разные результаты, например, изменение потенциальной энергии, кинетической энергии или тепловой энергии.

Механическая работа, связанная с изменениями объема газа или газовой смеси, является одним из важнейших процессов в термодинамике. Единицей работы в системе СИ является джоуль. 1 Дж = 1 Н¢м = 1 Вт¢с.

1.2.5. Мощность

Мощность представляет собой работу, выполняемую за единицу времени. Единицей мощности в системе СИ является ватт. 1 Вт = 1 Дж/с.

Например, мощность, подводимая к приводному валу компрессора расходуется на теплоту, излучаемую системой и теплоту, затрачиваемую на увеличение потенциальной энергии газа.

1.2.6. Объемный расход

Единицей измерения объемного расхода служит $м^3$/с. Однако, когда говорят об объемном расходе, часто используют литры в секунду (л/с), как, например, в случае с компрессорами. Этот объемный расход называется производительностью компрессора и выражается либо в виде нормальных литров в секунду (Nл/с), либо в виде расхода газа со свободным выпуском (л/с).

При использовании единицы измерения «нормальный литр в секунду» (Nл/с) расход воздуха пересчитывается и приводится к «нормальному состоянию», т.е. 1,013 бар и 0°С. Эта единица используется преимущественно в том случае, когда вы хотите точно определить массовый расход.

Если вы имеете дело с расходом воздуха со свободным выпуском, то такой расход пересчитывается для стандартных условий впуска (давление впуска и температура впуска). Соответственно, вы определяете, сколько литров воздуха перекачивается, если бы он мог снова расшириться до состояния внешней среды. Соотношение между двумя объемными расходами (обратите внимание, что в приведенной ниже формуле не учитывается влажность):

$$Q_i = \frac{Q_n \times (273+t_i) \times 1{,}013}{273 \times p_i}, \text{ где}$$

Q_i – объемный расход как расход со свободным выпуском, л/с
Q_n – объемный расход в нормальных литрах в секунду, Nл/с
t_i – температура воздуха на впуске, °С
p_i – давление воздуха на впуске, бар

1.3 Термодинамика

1.3.1. Основные законы

Первый закон термодинамики представляет собой закон природы, который не может быть доказан и принимается безоговорочно. Он гласит, что энергия не может быть создана и не может быть уничтожена. Отсюда следует, что внутренняя энергия изолированной системы остается неизменной (закон сохранения энергии). Второй закон термодинамики гласит, что теплота никогда не может самопроизвольно перетекать от более холодного тела к более нагретому. Это значит, что энергия преобразуется в работу только в том случае, когда она переходит с более высокого на более низкий уровень температуры. Поэтому, например, в тепловой машине преобразование количества теплоты в механическую работу может происходить только в том случае, если часть этого количества теплоты выводится без преобразования в работу.

1.3.2. Газовые законы

Закон Бойля – Мариотта гласит, что при постоянной температуре произведение давления на объем является постоянной величиной. Он описывается следующим уравнением:

$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2$, где
p – абсолютное давление, Па
V – объем, м³

Это значит, что если при сжатии объем уменьшается вдвое, то давление также повышается вдвое.

Закон Гей-Люссака гласит, что объем газа изменяется прямо пропорционально изменению температуры. Он описывается следующим уравнением:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow \Delta V = \frac{V_1}{T_1} \times \Delta T, \text{ где}$$

V – объем, м³
T – абсолютная температура, К
ΔV – разность объемов
ΔT – разность температур

Общий газовый закон объединяет закон Менделеева-Клайперона описывает взаимные влияния давления, объема и температуры. Изменение одной из этих переменных воздействует, по меньшей мере, на одну из двух остальных переменных. Это можно записать так:

$(p \times v)/T = R = \text{const}$, где
p – абсолютное давление, Па
v – удельный объем, м³/кг
T – абсолютная температура, К
R = $\bar{R}$/M – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг x К)

Постоянная R называется индивидуальной газовой постоянной и относится только к характеристикам определенного газа. Если газ массой m занимает объем V, соотношение можно записать в таком виде:

$p \times V = m \times \bar{R} \times T$, где
p – абсолютное давление, Па
V – объем, м³
m – количество газа, кмоль
$\bar{R}$ – универсальная газовая постоянная = 8314 Дж/(кмоль x К)
T – абсолютная температура, К

1.3.3. Теплопередача

Разность температур в пределах одного тела или между разными телами обязательно приводит к такому переносу теплоты, при котором устанавливается тепловое равновесие. Теплопередача может происходить тремя разными способами: путем теплопроводности, конвекции и излучения. Часто теплопередача происходит одновременно всеми тремя способами.

Теплопроводность наблюдается в твердых телах или в тонких слоях жидкости или газа. Движущиеся молекулы передают свою кинетическую энергию соседним молекулам.

Конвекция может быть свободной, когда происходит естественное движение в среде или принудительной, вызванной, например, вентилятором или насосом. Принудительная конвекция дает значительно больший теплообмен.

Все тела с температурой выше 0К испускают тепловое излучение. Когда тепловые лучи попадают на тело, часть энергии поглощается телом и преобразуется в теплоту. Те лучи, что не поглощаются телом, проходят сквозь него или отражаются. Только абсолютно черное тело теоретически может поглощать всю излучаемую энергию.

На практике теплопередача является суммой теплопередач, происходящих вследствие теплопроводности, конвекции и излучения. В общем случае применяется следующее соотношение:

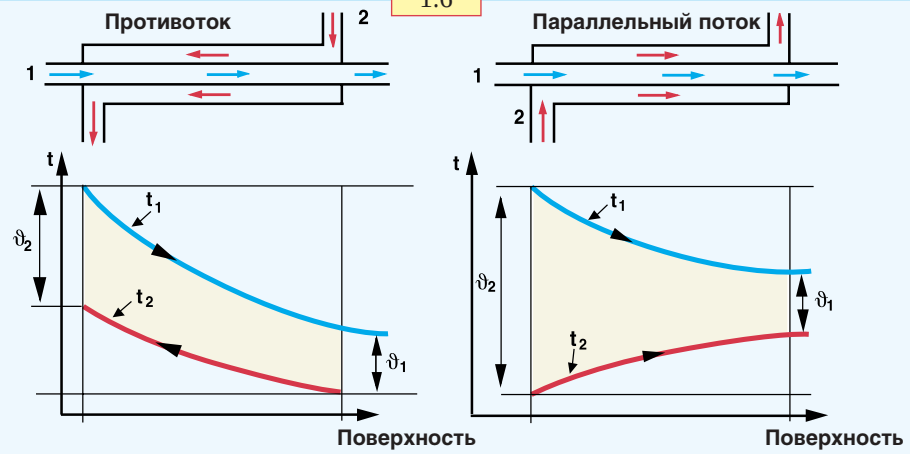
$q = k \times A \times \Delta T \times t$, где
q – количество теплоты, Дж
k – общий коэффициент теплопередачи, Вт/(м² x К)
A – площадь, м²
ΔT – разность температур, К
t – время, с

Теплопередача часто происходит между двумя телами, разделенными стенкой. Общий коэффициент теплопередачи зависит от коэффициента теплопередачи на соответствующих сторонах стенки и коэффициента теплопроводности стенки. Для чистой плоской стенки применяется следующее соотношение:

$1/k = 1/\alpha_1 + d/\lambda + 1/\alpha_2$, где
α – коэффициент теплопередачи на соответствующих сторонах стенки, Вт/(м² x К)
d – толщина стенки, м
λ – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м x К)
k – общий коэффициент теплопередачи, Вт/(м² x К)

Количество переданной теплоты, например в теплообменнике, является в каждой точке функцией разности температур и общего коэффициента теплопередачи. Для всей поверхности теплообмена применимо следующее соотношение:

1:6



Здесь показан температурный процесс в теплообменниках с противотоком и параллельным потоком.

$Q = k \times A \times \vartheta_m$, где
Q – количество переданной теплоты, Вт
k – общий коэффициент теплопередачи, Вт/(м² x К)
A – площадь теплопередающей поверхности, м²
ϑ_m – логарифмическая средняя разность температур, К

Логарифмическая средняя разность температур определяется как соотношение между разностями температур на двух сторонах теплообменника в соответствии со следующим выражением:

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\ln \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}}, \text{ где}$$

ϑ_m – логарифмическая средняя разность температур (К)
ϑ – разность температур (К) согласно графикам на рис. 1:6.

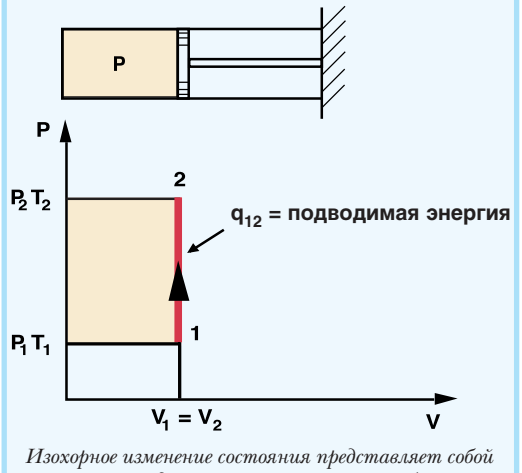
1.3.4. Изменения состояния

Вы можете проследить изменения состояния газа при переходе от одной до другой точки на графике p/V. В действительности были бы нужны три оси для переменных p, V и T. При изменении состояния вы перемещаетесь вдоль кривой на поверхности, которая при этом образуется в пространстве.

Однако обычно вы рассматриваете проекцию кривой на одну из трех плоскостей, чаще всего на плоскость p/V. В основном различают между собой пять изменений состояния: изохорный процесс (при постоянном объеме), изобарный процесс (при постоянном давлении), изотермический процесс (при постоянной температуре), изоэнтропический или адиабатический процесс (без теплообмена с окружающей средой) и политропический процесс (когда теплообмен с окружающей средой описывается простыми математическими функциями).

1.3.4.1. Изохорный процесс

1:7



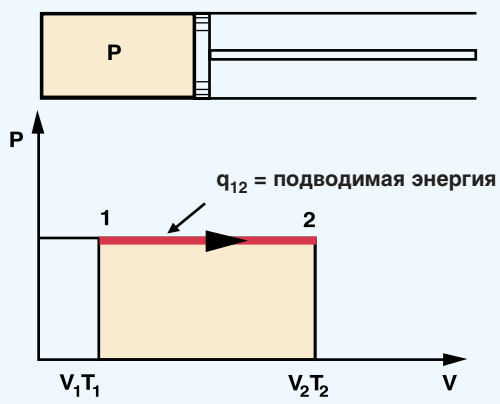
Изохорное изменение состояния представляет собой изменение давления при постоянном объеме.

Нагрев газа в закрытом резервуаре является примером изохорного процесса. Для определения количества подводимой теплоты используется следующее соотношение:

$q = m \times c_v \times (T_2 - T_1)$, где
q – количество теплоты, Дж
m – масса, кг
c_v – теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(кг x К)
T – абсолютная температура, К

1.3.4.2. Изобарный процесс

1:8



Изобарное изменение состояния представляет собой изменение объема при постоянном давлении.

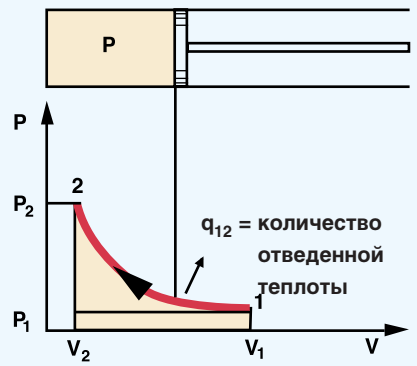
Примером изобарного процесса является нагрев газа в цилиндре, когда к поршню приложено постоянное усилие. Для определения количества подводимой теплоты используется следующее соотношение:

$q = m \times c_p \times (T_2 - T_1)$, где
q – количество теплоты, Дж
m – масса, кг
c_p – теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг x К)
T – абсолютная температура, К

1.3.4.3. Изотермический процесс

Если газ в цилиндре сжимается изотермически, нужно постепенно отводить количество теплоты, равное работе приложенной силы.

1:9



Изотермическое изменение состояния представляет собой процесс, в котором при постоянной температуре газовой смеси изменяются давление и объем.

Это практически невозможно, так как такой медленный процесс трудно реализовать.

Для определения количества отводимой теплоты используются следующие соотношения:

$$q = m \times R \times T \times \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

$$q = p_1 \times V_1 \times \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right), \text{ где}$$

q – количество теплоты, Дж
m – масса, кг
R – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг x К)
T – абсолютная температура, К
V – объем, м³
p – абсолютное давление, Па

1.3.4.4. Изоэнтропический процесс

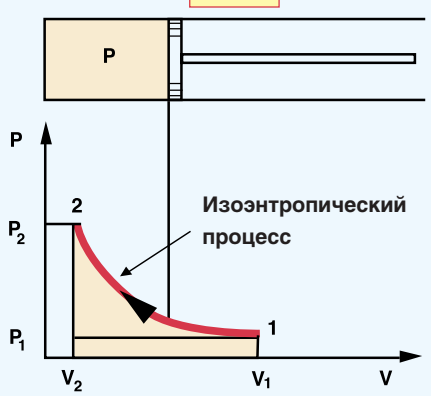
Примером изоэнтропического процесса является сжатие газа в полностью изолированном цилиндре без теплообмена с окружающей средой. Или если газ расширяется в сопле так быстро, что теплообмен с окружающей средой не успевает произойти. Этот процесс описывается следующим выражением:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{æ} \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{æ}{æ-1}}, \text{ где}$$

p – абсолютное давление, Па
V – объем, м³
T – абсолютная температура, К

$$æ = \frac{c_p}{c_v}$$

1:10



Когда энтропия сжимаемого или расширяющегося газа постоянна, теплообмена с окружающей средой не происходит. Такое изменение состояния происходит в соответствии с законом Пуассона.

1.3.4.5. Политропический процесс

Изотермический процесс идет при полном теплообмене с окружающей средой, а изоэнтропический процесс происходит совсем без теплообмена. В действительности любой процесс является чем-то промежуточным между этими предельными случаями, а такой общий процесс называется политропическим.

Этот процесс описывается следующим выражением:

$p \times V^n = const$, где
p – абсолютное давление, Па
V – объем, м³
n – 0 для изобарного процесса
n – 1 для изотермического процесса
n – æ для изоэнтропического процесса
n – ∞ для изохорного процесса

1.3.5. Поток газа через сопло

Поток газа через сопло зависит от отношения давлений на соответствующих сторонах сопла. Если давление после сопла снижается, расход увеличивается, однако только до тех пор, пока давление газа перед соплом не станет приблизительно в два раза выше. Дальнейшее уменьшение давления после отверстия не вызывает увеличения расхода.

Это — критическое отношение давлений, и оно зависит от изоэнтропической экспоненты газа (æ). Критическое отношение давлений имеет место, когда скорость потока равна скорости звука в самом узком сечении сопла.

Расход становится сверхкритическим, если давление становится еще ниже, ниже критического значения. Поток газа через сопло описывается следующим выражением:

$$G = \alpha \times \psi \times p_1 \times 10^5 \times A \times \sqrt{\left(\frac{2}{R \times T_1}\right)}, \text{ где}$$

G – массовый расход, кг/с
α – коэффициент сопла
ψ – коэффициент расхода
A – минимальная площадь потока, м²
R – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг x К)
T_1 – абсолютная температура перед соплом, К
p_1 – абсолютное давление перед соплом, бар

1.3.6. Поток, протекающий по трубе

Число Рейнольдса представляет собой безразмерный коэффициент, характеризующий соотношение инерционных сил и сил вязкости в текучей среде. Он определяется следующим образом:

$Re = D \times w \times \rho/\eta = D \times w/v$, где
D – характерный линейный размер (например, диаметр трубы), м
w – средняя скорость потока, м/с
ρ – плотность текучей среды, кг/м³
η – динамическая вязкость текучей среды, Па x с
v = η/ρ – кинематическая вязкость текучей среды, м²/с

В принципе существуют два типа потоков в трубе. При Re<2000 в среде преобладают силы вязкости, и поток становится ламинарным. Это значит, что различные слои среды движутся относительно друг друга в строгом порядке. Распределение скоростей в слоях ламинарного потока имеет параболическую форму. При Re⩾4000 в текучей среде преобладают инерционные силы, и поток становится турбулентным. В поперечном сечении потока частицы движутся случайным образом. Распределение скоростей в турбулентном потоке становится размытым.

В критической области между 2000⩽Re⩽4000 состояние потока неопределенное — либо ламинарное, либо турбулентное, либо смешанное. Состояние потока определяется различными факторами, например шероховатостью стенок трубы, скоростью потока и т.д.

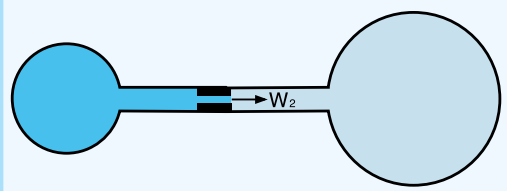
Для того чтобы по трубе начал протекать поток, требуется определенная разность давлений или перепад давлений, необходимый для преодоления трения в трубе и соединениях. Величина перепада давлений зависит от диаметра трубы, ее длины и формы, а также от шероховатости поверхности и числа Рейнольдса.

1.3.7. Дросселирование

Когда идеальный газ протекает через дроссель, то при неизменности давлений перед дросселем и после него температура остается постоянной. Однако на дросселе возникает перепад давлений из-за преобразования внутренней энергии в кинетическую энергию, и поэтому температура падает. В реальных газах такое изменение температуры становится продолжительным, даже если запас энергии газа остается постоянным. Это явление называется эффектом Джоуля – Томсона. Изменение температуры равняется изменению давления на дросселе, умноженному на коэффициент Джоуля – Томсона.

Если текучая среда имеет достаточно низкую температуру (для воздуха ⩽+329°C), на дросселе наблюдается падение температуры, но если текучая среда нагрета больше, то происходит рост температуры. Это явление используется в технике, например в холодильных установках и при разделении газов.

1:11



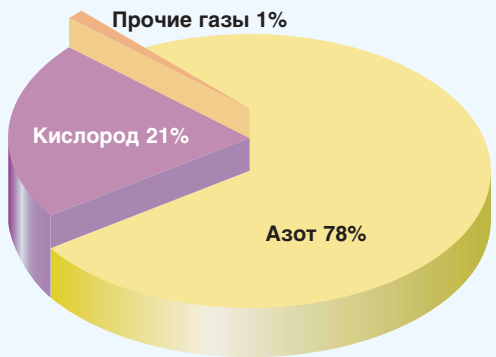
Когда идеальный газ протекает через малое отверстие между двумя большими резервуарами, энергия становится постоянной и теплообмен не происходит. Однако давление газа при прохождении через отверстие падает.

1.4 Воздух

1.4.1. Общие сведения

Воздух – газовая смесь, не имеющая цвета, запаха и вкуса, состоящая, помимо кислорода и азота, из многих газов, но большую часть составляют кислород и азот. В большинстве случаев при проведении расчетов воздух можно рассматривать как идеальную газовую смесь, причем начиная от уровня моря и до высоты 25 км его состав остается практически неизменным.

1:12



Воздух – смесь газов, состоящая в основном из кислорода и азота. На все прочие газы приходится не больше 1%.

Воздух всегда в той или иной степени загрязнен твердыми частицами, пылью, песком, копотью, кристаллами соли. Степень загрязнения в густонаселенных областях выше, а на окраинах и на больших высотах – ниже.

Воздух это не химическое вещество, а механическая смесь веществ. Поэтому его несложно разделить на составляющие элементы, к примеру охлаждением.

1.4.2. Влажный воздух

Воздух можно рассматривать как смесь сухого воздуха и водяного пара. Воздух, содержащий водяной пар, называется влажным воздухом, при этом процент влажности изменяется в широком диапазоне. Предельными случаями являются сухой воздух и воздух, насыщенный влагой. Давление водяного пара, который может содержать воздух, будет расти с ростом температуры.

Обычно воздух не содержит столько водяного пара, чтобы можно было достигнуть его максимального давления. Относительное давление пара (известное также как относительная влажность) – отношение фактического парциального давления пара к давлению насыщения при той же температуре.

Точкой росы называется температура, при которой воздух насыщается водяным паром. Затем, с понижением температуры, происходит конденсация воды. Атмосферной точкой росы называется температура, при которой водяной пар, находящийся под атмосферным давлением, начинает конденсироваться. Точкой росы под давлением называется аналогичная температура при повышенном давлении. В расчетах применяются следующие формулы:

$(p - \varphi \times p_s) \times 10^5 \times V = R_a \times m_a \times T$

$\varphi \times p_s \times 10^5 \times V = R_v \times m_v \times T$, где

- p – общее абсолютное давление, бар
- p_s – давление насыщения при фактической температуре, бар
- φ – относительное давление пара
- V – общий объем влажного воздуха, $м^3$
- R_a – газовая постоянная сухого воздуха = 287,1 Дж/(кг x К)
- R_v – газовая постоянная водяного пара = 461,3 Дж/(кг x К)
- m_a – масса сухого воздуха, кг
- m_v – масса водяного пара, кг
- T – абсолютная температура влажного воздуха, К

1.5 Типы компрессоров

1.5.1. Два основных принципа

Существуют два основных принципа сжатия воздуха (или газа): объемный принцип и динамическое сжатие. Объемными компрессорами являются, например, поршневые компрессоры и ротационные компрессоры различных типов. Эти компрессоры нашли самое широкое применение в большинстве стран.

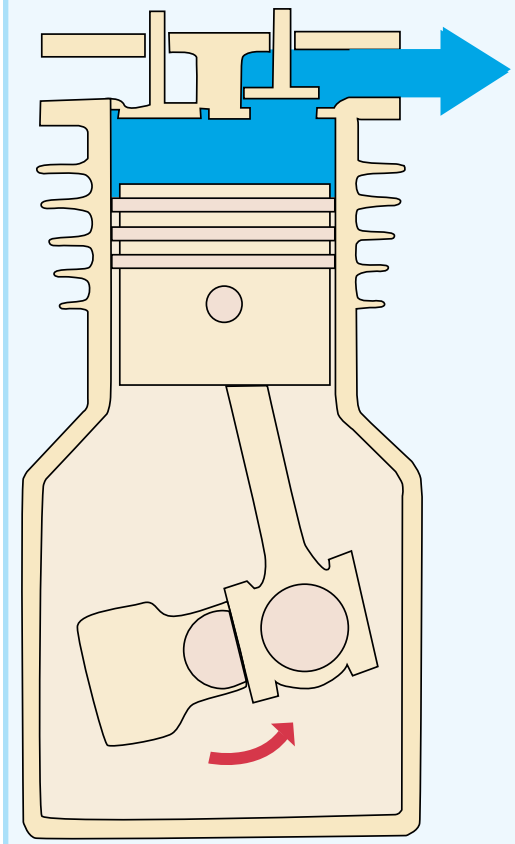
Например, в поршневых компрессорах воздух всасывается в камеру сжатия, впускное отверстие которой закрывается. Затем объем камеры уменьшается и воздух сжимается. После того как давление достигает того же уровня, что и давление в выпускном коллекторе, открывается клапан и воздух выпускается при постоянном давлении и продолжающемся уменьшении объема камеры.

При динамическом сжатии воздух всасывается в быстро вращающееся рабочее колесо компрессора и разгоняется до большой скорости. Затем он выпускается через диффузор, где его кинетическая энергия преобразуется в статическое давление. Существуют динамические компрессоры с осевым и радиальным потоком, которые отличаются исключительно высокой производительностью.

1.5.2. Объемные компрессоры

Велосипедный насос – простейший вид объемного компрессора. Воздух всасывается в цилиндр и сжимается за счет перемещения поршня. Принцип работы поршневого компрессора тот же самый. Перемещение поршня вперед и назад осуществляется под воздействием шатуна и вращающегося коленчатого вала. Если для сжатия используется только одна сторона поршня, то компрессор называется компрессором одинарного действия. Если используются как верхняя, так и нижняя стороны поршня, компрессор называется компрессором двойного действия. Разность между давлением на впускной стороне и давлением на выпускной стороне служит показателем работы компрессора.

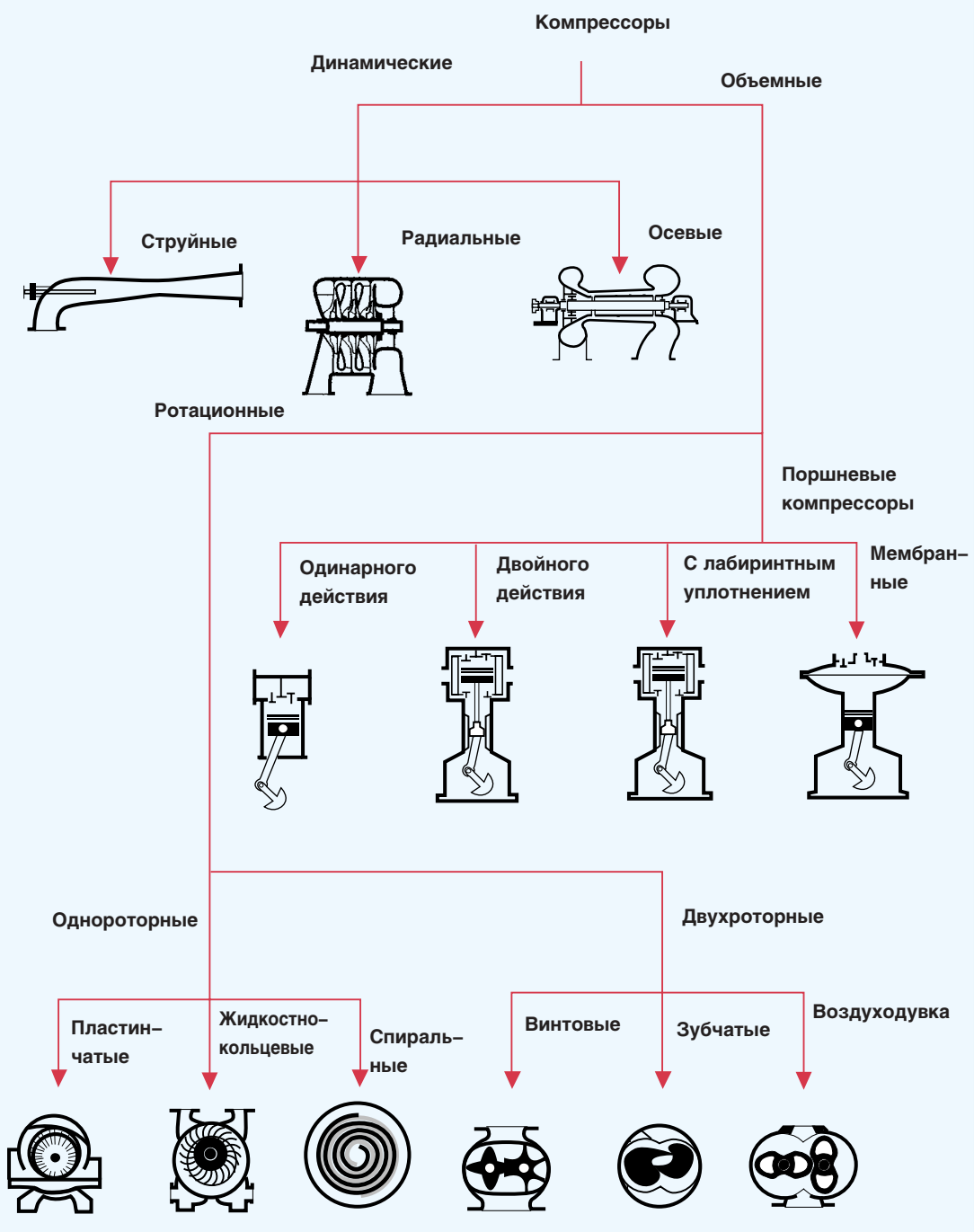
1:13



Одноступенчатый поршневой компрессор одинарного действия.

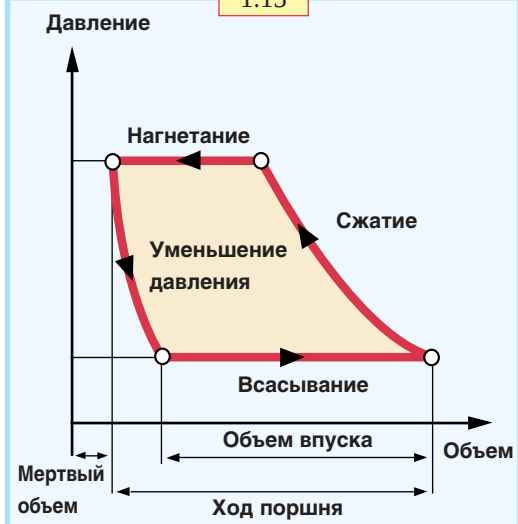
Степень повышения давления – это соотношение между абсолютными значениями давления на впускной и выпускной стороне. Соответственно для машины, которая всасывает воздух при атмосферном давлении и сжимает его до избыточного давления 7 бар, эта величина составляет: (7 + 1)/1 = 8.

1:14



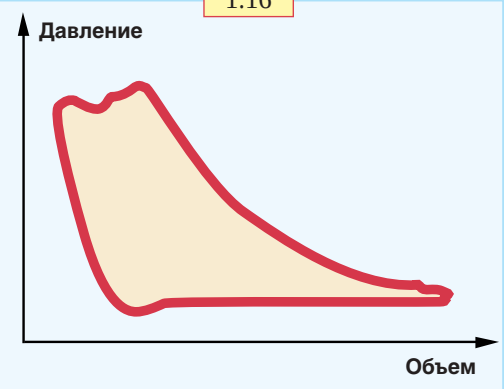
На чертеже показаны наиболее распространенные типы компрессоров, классифицированные в соответствии с их принципом действия. Их можно классифицировать по другим признакам, например, компрессоры с водяным или воздушным охлаждением, стационарные или передвижные и т.д.

1:15



На рисунке схематично показан принцип работы поршневого компрессора с самодействующими клапанами. На графике p/V схематично показан процесс без учета потерь, с полным заполнением и опустошением цилиндра.

1:16



На этом графике показаны реальные характеристики работы (p/V) поршневого компрессора. Падение давления на впускной стороне и избыточное давление на выпускной стороне минимизируются в основном благодаря достаточному пространству для клапанов компрессора.

1.5.3. Диаграмма сжатия для объемных компрессоров

На рис. 1:15 показана теоретическая диаграмма, а на рис. 1:16 – реальная диаграмма для поршневого компрессора. Рабочий объем – объем цилиндра, который поршень проходит на стадии всасывания. Объем мертвого пространства – пространство, которое по законам механики должно оставаться в цилиндре, пока поршень находится в верхней мертвой точке, а также пространство, необходимое для клапанов и т.д.

Разность между рабочим объемом и объемом всасывания возникает из-за расширения остающегося в объеме мертвого пространства воздуха, что происходит перед всасыванием. Разница между схематичным графиком и графиком с нанесенными реальными значениями параметра p/V объясняется особенностями конструкции компрессора, например поршневого. Клапаны никогда герметично не закрываются: обязательно происходит небольшая утечка между поршнем и стенкой цилиндра. Кроме того, клапаны не могут открываться и закрываться без задержки, что приводит к падению давления при протекании газа по каналам. По конструктивным причинам при поступлении в цилиндр газ нагревается.

Работа сжатия при изотермическом процессе рассчитывается по формуле:

$W = p_1 \times V_1 \times \ln(p_2/p_1)$

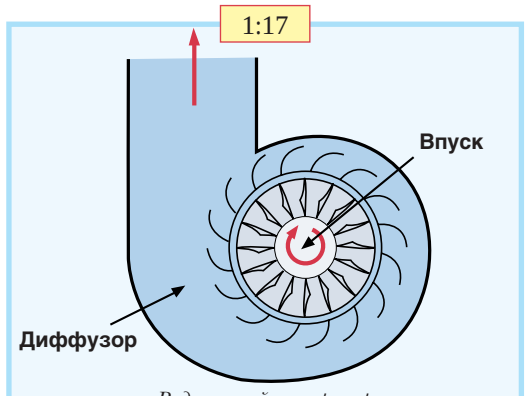
Работа сжатия при изоэнтропическом процессе рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{æ}{æ - 1} \times (p_1 \times V_1 - p_2 \times V_2), \text{ где}$$

W – работа сжатия, Дж
p_1 – начальное давление, Па
V_1 – начальный объем, м³
p_2 – конечное давление, Па
V_2 – конечный объем, м³
æ – изоэнтропическая экспонента, в большинстве случаев применяется к ≈ 1,3–1,4

Эти формулы показывают, что для изоэнтропического сжатия требуется затратить больше работы, чем для изотермического сжатия. В действительности значение требуемой работы находится между этими предельными случаями (к ≈ 1,3–1,4).

1.5.4. Динамические компрессоры



Радиальный компрессор.

Динамический компрессор — машина с непрерывным потоком, в которой при протекании газа происходит рост давления газа. Вращающиеся лопатки приводят к ускорению газа до высокой скорости, после чего скорость газа при расширении преобразуется в давление и соответственно уменьшается. В зависимости от основного направления потока компрессоры могут быть радиальными или осевыми.

В отличие от объемных компрессоров в динамических компрессорах даже небольшое изменение рабочего давления приводит к большому изменению производительности. (см. рис. 1:19).

Каждая скорость характеризуется верхним и нижним пределами производительности. При верхнем пределе скорость потока газа достигает скорости звука. При достижении нижнего предела противодавление превышает создаваемое компрессором давление, что означает обратный поток газа в компрессоре. Это в свою очередь вызывает пульсацию, шум и риск механической поломки компрессора.

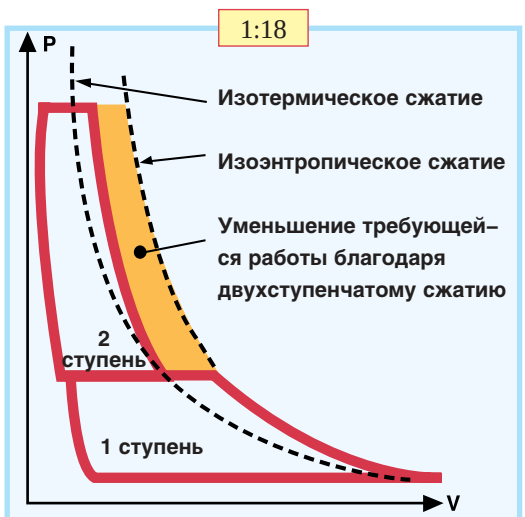
1.5.5. Несколько ступеней сжатия

Теоретически газ может сжиматься в ходе изоэнтропического и изотермического процессов. Такое сжатие можно рассматривать в качестве части обратимого процесса. Если бы сжатый газ нужно было использовать немедленно при его конечной температуре, изоэнтропический процесс имел бы определенные преимущества. На самом деле газ редко используется непосредственно после сжатия и без охлаждения перед использованием. Поэтому чаще используется изотермический процесс — ведь он требует меньше работы.

Попытки реализовать этот процесс предпринимались на практике: воздух охлаждался в процессе сжатия. Результаты можно показать на примере компрессора с эффективным рабочим давлением 7 бар, что теоретически при изоэнтропическом сжатии по сравнению с изотермическим сжатием требует мощности больше на 37%.

Практическим способом, позволяющим уменьшить нагревание газа, является разделение сжатия на несколько ступеней. После каждой ступени газ сначала охлаждается, а затем снова сжимается. Это позволяет увеличить кпд, так как давление на первой ступени уменьшается. Потребляемая мощность уменьшается до минимума, если все ступени характеризуются одной и той же степенью повышения давления.

Чем больше ступеней, на которые разделяется сжатие, тем больше весь процесс в целом приближается к изотермическому сжатию. Однако в реальности по экономическим причинам существует предельное количество ступеней, которые можно использовать в установке.

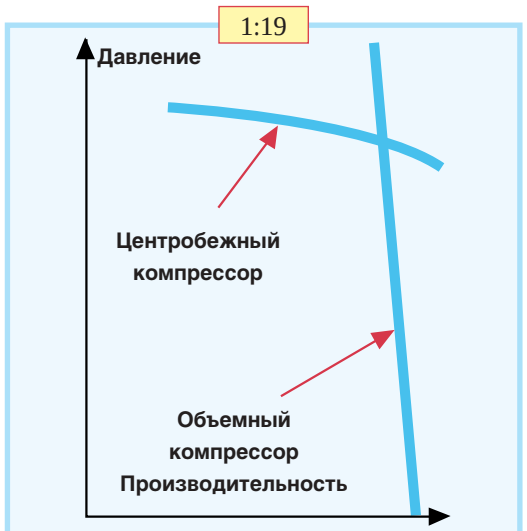


Заштрихованная зона представляет собой работу, сэкономленную благодаря разделению сжатия на две ступени.

1.5.6. Объемный компрессор или центробежный?

Если построить кривую производительности центробежного компрессора и аналогичную кривую для объемного компрессора, то мы увидим, что они значительно отличаются друг от друга. Центробежный компрессор — машина с изменяющейся производительностью и постоянным давлением. Объемный компрессор — машина с постоянной производительностью и изменяющимся давлением.

С другой стороны, для объемного компрессора, в отличие от значительно более высокоскоростных центробежных компрессоров, характерны более высокие показатели давления даже при низкой скорости. Центробежные компрессоры желательно использовать тогда, когда требуется более высокая производительность.



Вот так выглядят нагрузочные характеристики центробежного и объемного компрессоров при изменяющейся нагрузке и постоянной скорости.

1.6 Электричество

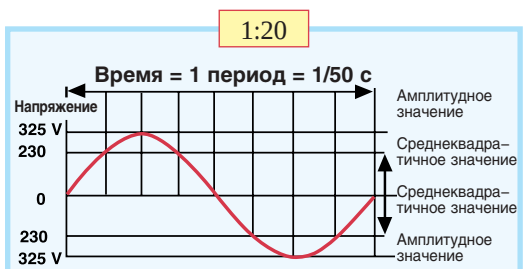
1.6.1. Терминология и основные определения

Переменный ток, используемый в том числе для питания осветительных приборов и электродвигателей, в процессе синусоидальных колебаний периодически изменяет свою силу и направление. Сила тока возрастает от нуля до максимального значения, затем падает до нуля, изменяет направление, возрастает до максимального значения в противоположном направлении и снова становится равной нулю. Так ток совершает периодические колебания. Период T — время в секундах, за которое ток проходит все значения. Частота показывает количество полных циклов, совершенных за секунду.

$f = 1/T$
f = частота (Гц)
T = длительность периода (с)

Говоря о токе или напряжении, обычно имеют в виду среднеквадратичное значение. Для синусоидального тока величина среднеквадратичного значения тока и соответственно напряжения будет равна:

$$\text{среднеквадратичное значение} = \frac{\text{макс. значение}}{\sqrt{2}}$$



На графике показано синусоидальное напряжение (50 Гц).

Напряжение ниже 50 В называется сверхнизким. Напряжение ниже 1000 В называется низким. Напряжение свыше 1000 В называется высоким. Стандартными напряжениями переменного тока с частотой 50 Гц являются напряжения 230/300 В и 400/690 В.

1.6.2. Закон Ома для переменного тока

Протекающий по обмотке переменный ток создает магнитный поток. Этот магнитный поток точно так же, как и ток, изменяет свою силу и направление. При изменении магнитного потока по закону индукции в обмотке создается ЭДС (электродвижущая сила). Направление ЭДС противоположно полярности подаваемого напряжения. Это явление называется самоиндукцией.

Самоиндукция в цепи переменного тока частично проявляется в сдвиге по фазе между током и напряжением и частично – в падении индуктивного напряжения. Сопротивление цепи переменного тока становится значительно выше рассчитанного или измеренного сопротивления этой же цепи постоянному току.

Сдвиг по фазе между током и напряжением обозначается углом φ. Индуктивное сопротивление (реактивное) обозначается X, активное сопротивление – R, кажущееся сопротивление цепи или проводника – Z.

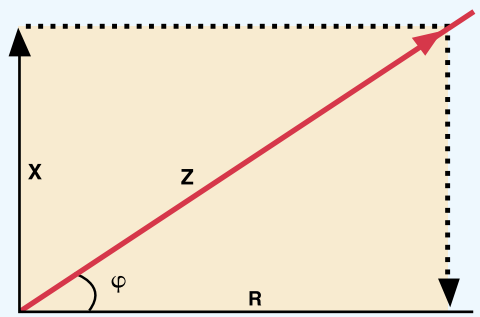
Полное сопротивление (импеданс) вычисляется по формуле:

$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, где
Z – полное сопротивление, Ом
R – активное сопротивление, Ом
X – реактивное сопротивление, Ом

Закон Ома для цепи переменного тока:

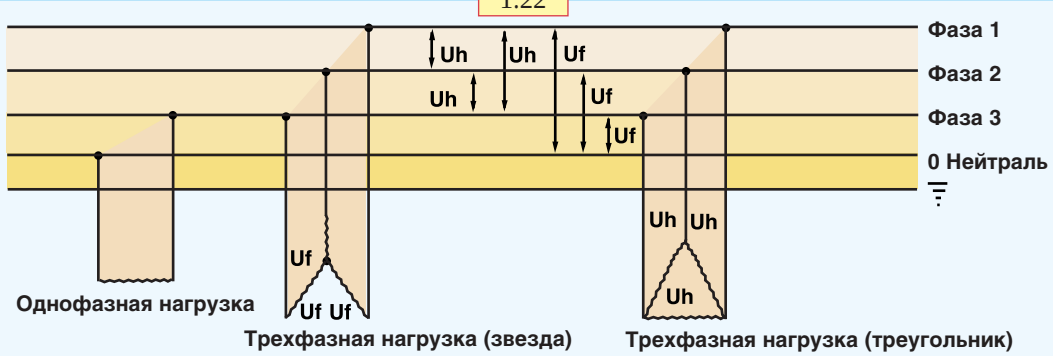
U = I x Z, где
U – напряжение, В
I – ток, А
Z – полное сопротивление, Ом

1:21



Взаимосвязь между реактивным сопротивлением (X), активным сопротивлением (R), полным сопротивлением (Z) и сдвигом по фазе (φ).

1:22



На рисунке показаны различные варианты подключения трехфазных систем. Напряжение между двумя фазами называется линейным напряжением (Uh). Напряжение между фазой и нейтралью называется фазовым напряжением (Uf). Фазовое напряжение = линейное напряжение/$\sqrt{3}$.

1.6.3. Трехфазная система

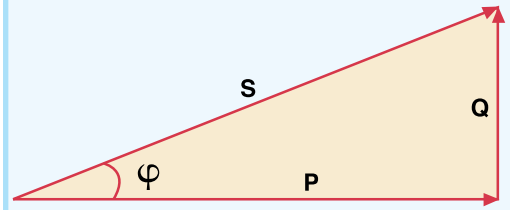
Трехфазный переменный ток вырабатывается генератором с тремя отдельными обмотками. Все значения синусоидального напряжения сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120°.

Трехфазная сеть обеспечивает подключение различных устройств. Однофазное устройство можно подключить между фазой и нулем. Трехфазные устройства можно подключать двумя способами: звездой (Y) и треугольником (Δ). При подключении звездой на выводы устройства подается фазовое напряжение. При подключении треугольником на выводы устройства подается линейное напряжение.

1.6.4. Мощность

Активная мощность P представляет собой полезную мощность, которую можно использовать для выполнения работы. Реактивная мощность Q – «бесполезная» мощность, которую нельзя использовать для выполнения работы. Кажущаяся мощность S – мощность, которую нужно потреблять из сети для получения необходимой активной мощности. Соотношение между активной, реактивной и кажущейся мощностью обычно наглядно изображают как треугольник мощностей.

1:23



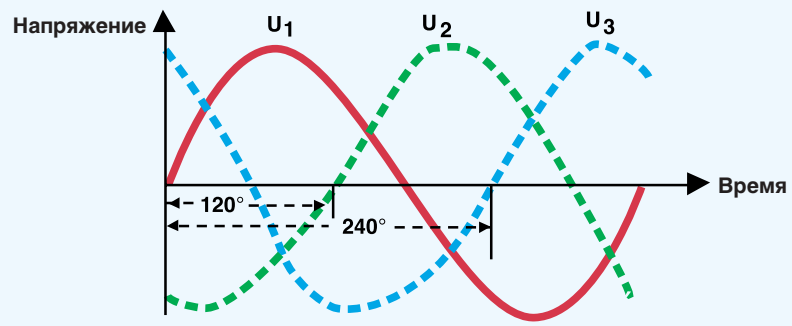
На рисунке показано соотношение между кажущейся мощностью (S), реактивной мощностью (Q) и активной мощностью (P). Угол между S и P представляет собой коэффициент мощности cosφ.

Однофазная система:
P = U x I x cosφ
Q = U x I x sinφ
S = U x I
cosφ = P/S

Трехфазная система:
$P = \sqrt{3} \times U_h \times I \times \cos\varphi$
$Q = \sqrt{3} \times U_h \times I \times \sin\varphi$
$S = \sqrt{3} \times U_h \times I$
cosφ = P/S

U – напряжение, В
U_h – линейное напряжение, В
U_f – фазовое напряжение, В
I – ток, А
I_h – линейный ток, А
I_f – фазовый ток, А
P – активная мощность, Вт
Q – реактивная мощность, вар
S – кажущаяся мощность, ва
φ – угол сдвига фаз
cosφ – коэффициент мощности

1:24



В результате сдвига по фазе между обмотками генератора формируются кривые синусоидального напряжения системы. Максимальное значение сдвига по фазе равно интервалу между обмотками генератора.

1.6.5. Электродвигатель

Наиболее распространенными двигателями являются трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Двигатели этого типа используются во всех отраслях промышленности. Бесшумные и надежные электродвигатели — часть большинства систем, в том числе компрессоров. Любой электродвигатель состоит из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося ротора. Статор формирует вращающееся магнитное поле, а ротор преобразует энергию этого поля в механическое движение.

Статор подключается к питающей трехфазной сети. Ток в обмотках статора создает вращающееся магнитное поле, которое индуцирует ток в роторе, создавая тем самым в роторе магнитное поле. При взаимодействии магнитных полей статора и ротора возникает вращающий момент, который заставляет ротор вращаться.

1.6.5.1. Скорость вращения

Если бы вал двигателя вращался с той же скоростью, что и магнитное поле, индуцируемый в роторе ток равнялся бы нулю. Однако это невозможно, например из-за потерь в подшипниках, кроме того, скорость вращения ротора на 1–5 % ниже синхронной скорости магнитного поля (это явление называется проскальзыванием). Синхронная скорость вычисляется по формуле:

$n = 2 \times f \times 60/p$, где
n – синхронная скорость, об/мин
f – частота сети, Гц
p – количество полюсов

1.6.5.2. Коэффициент полезного действия

Преобразование энергии в электродвигателе не обходится без потерь. Кроме всего прочего к этим потерям относятся потери на активное сопротивление, на вентиляцию, намагничивание и трение. Формула, применяемая для расчета кпд:

$\eta = P_2/P_1$, где
η – кпд
P_2 – заданная мощность на валу, Вт
P_1 – подаваемая мощность, Вт

Мощность P_2 указывается на паспортной табличке двигателя.

1.6.5.3. Класс изоляции

В соответствии со стандартом IEC 85 (Международной электротехнической комиссии) все изоляционные материалы для обмоток электродвигателя подразделяются на классы изоляции. Каждый класс обозначается буквой, характеризующей верхний предел температуры в зоне использования изоляции. При превышении этого предела на 10°C, продолжительность срока службы изоляции становится вдвое короче.

	Класс изоляции		
Температура окружающей среды, °C	B=130°C	F=155°C	H=180°C
Рост температуры, °C	40	40	40
Запас по температуре, °C	80	105	125
Максимальная конечная температура, °C	10	10	15
	130	155	180

1.6.5.4. Классы защиты

В соответствии со стандартом IEC 34-45 классы защиты указывают степень защиты электродвигателя от прикосновения и попадания воды. Класс защиты обозначается буквами IP и двумя цифрами. Первая — показывает степень защиты при прикосновении и от попадания твердых предметов. Вторая цифра показывает степень защиты от воды. Например, IP23 означает что: (2) — устройство защищено от попадания твердых предметов размером более 12 мм; (3) — устройство защищено от брызг воды, направленных под углом до 60° к вертикали. IP54 означает: (5) — защита от пыли; (4) — защита от воды, разбрызгиваемой в любом направлении. IP55 означает: (5) — защита от пыли;(5) — защита от струи воды, направляемой под низким давлением в любом направлении.

1.6.5.5. Способы охлаждения

Согласно стандарту IEC 34-45, указывается способ охлаждения двигателя. Он обозначается буквами IC и двумя цифрами. Например, IC 01 означает: свободная циркуляция, собственная вентиляция; IC 41 означает: система охлаждения с водяной рубашкой, собственная вентиляция.

1.6.5.6. Способ монтажа

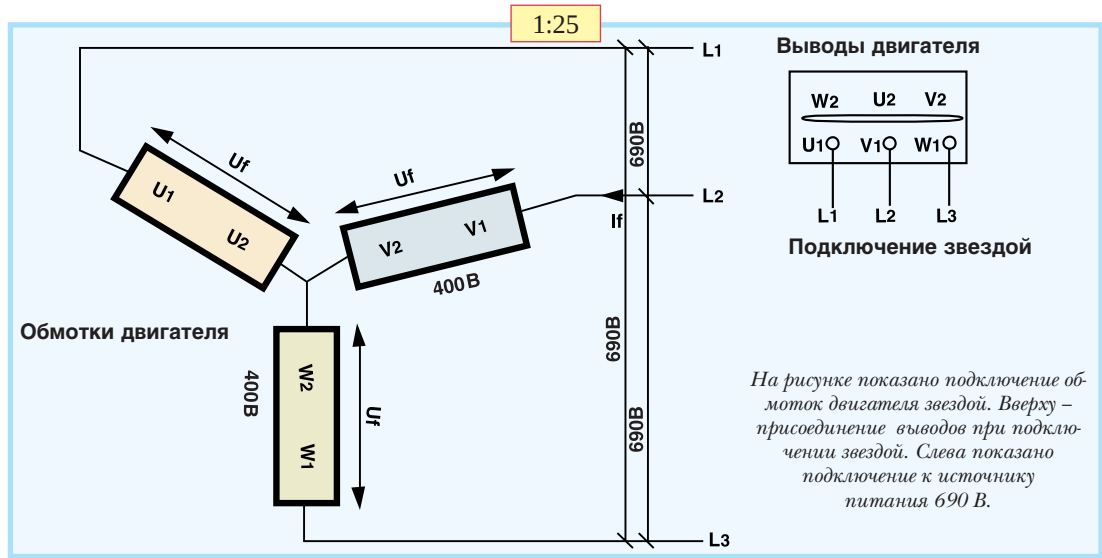
Способ монтажа указывает, согласно стандарту IEC 34-7, способ установки двигателя. Для этого используются буквы IM и четыре цифры. Например, IM 1001 означает: два подшипника, вал со свободным концом, корпус статора без опор, большой фланец с гладкими отверстиями для крепления.

1.6.5.7. Подключение звездой (Y) и треугольником (Δ)

Трехфазный электродвигатель можно подключать двумя способами: звездой (Y) или треугольником (Δ). Фазные обмотки в трехфазном двигателе обозначаются буквами U, V и W (U1-U2, V1-V2, W1-W2). При подключении звездой (Y) концы фазных обмоток соединены вместе и образуют нулевую точку. Схема подключения обмоток выглядит как звезда (Y).

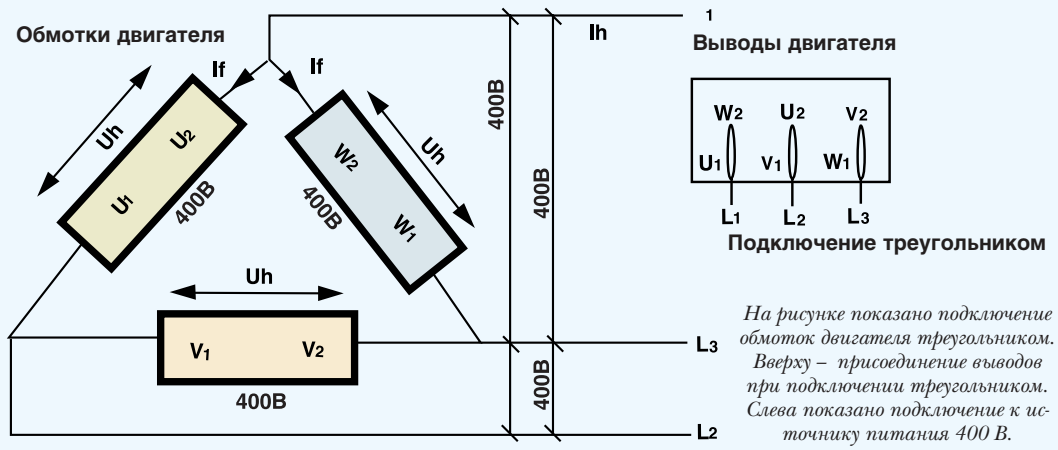
На обмотки подается фазовое напряжение (фазовое напряжение = линейное напряжение/$\sqrt{3}$, например, 400 В = 690/$\sqrt{3}$). Ток I_h, текущий к нулевой точке, равен фазовому току, и соответственно по обмоткам течет фазовый ток $I_f = I_h$.

При подключении треугольником (Δ) начало каждой обмотки соединяется с концом другой обмотки. Соединенные таким образом обмотки образуют треугольник. На обмотки подается линейное напряжение. Протекающий через двигатель ток I_h представляет собой линейный ток, который разветвляется по обмоткам; по обмоткам течет фазовый ток $I_h/\sqrt{3} = I_f$. Один и тот же электродвигатель можно подключать звездой к сети напряжением 690 В или треугольником к



На рисунке показано подключение обмоток двигателя звездой. Вверху – присоединение выводов при подключении звездой. Слева показано подключение к источнику питания 690 В.

1:26

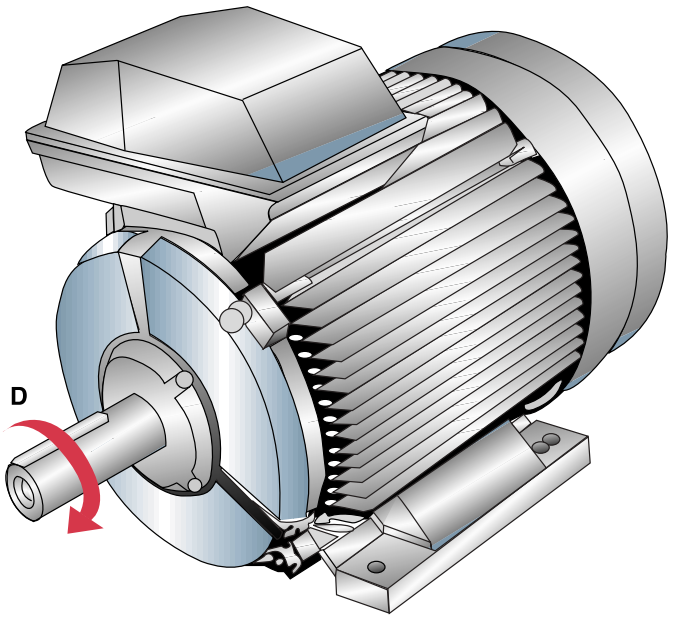


На рисунке показано подключение обмоток двигателя треугольником. Вверху – присоединение выводов при подключении треугольником. Слева показано подключение к источнику питания 400 В.

сети напряжением 400 В. В обоих случаях на обмотки будет подаваться напряжение 400 В. Ток, протекающий через двигатель, при подключении звездой на 690 В будет меньше, чем при подключении треугольником на 400 В. Отношение токов будет равняться $\sqrt{3}$.

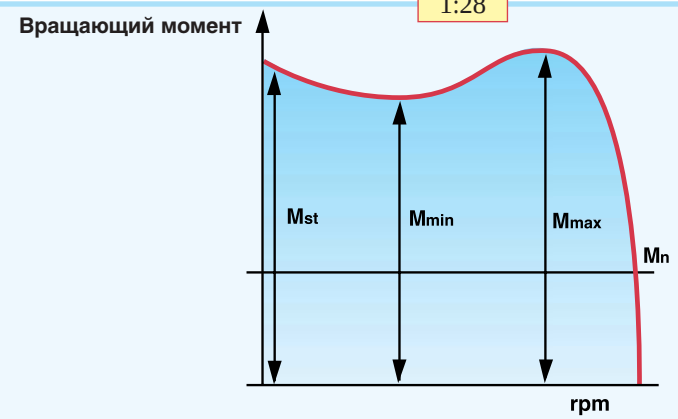
На табличке двигателя указано, например, 690/400 В. Это означает, что подключение звездой предназначено для большего напряжения, а подключение треугольником – для меньшего. На плате может также указываться ток. Меньшее значение соответствует подключению обмоток двигателя звездой, а большее – подключению треугольником.

1:27



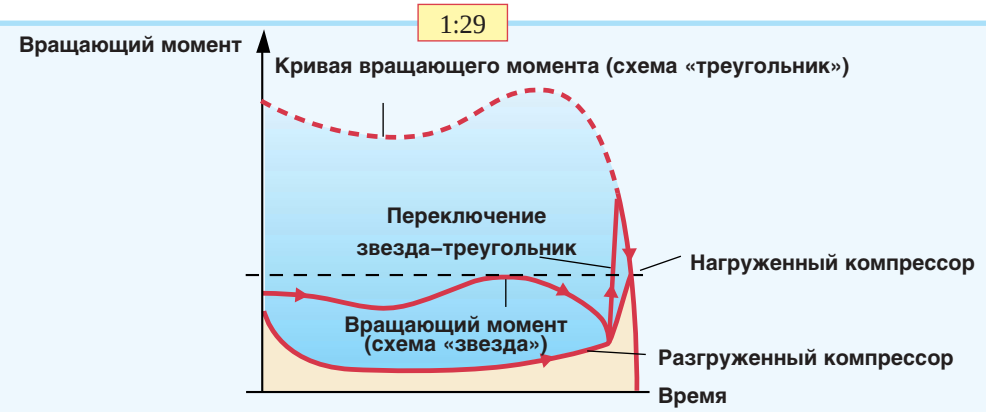
Сетевое напряжение подключается к выводам трехфазного двигателя, обозначаемым буквами U, V и W. Последовательность чередования фаз – L_1, L_2 и L_3. Это значит, что, если смотреть со стороны присоединения привода D, двигатель будет вращаться по часовой стрелке. Чтобы заставить двигатель вращаться против часовой стрелки, нужно поменять местами два или три провода, подключенные к статору. При вращении двигателя против часовой стрелки проверьте работу вентилятора охлаждения двигателя.

1:28



Кривая вращающего момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. В момент пуска момент выше, во время разгона он вначале уменьшается, а затем, перед падением до нуля, достигает своего максимального значения. M – вращающий момент, Mst – пусковой момент, Mmax – максимальный вращающий момент (предельный момент), Mmin – минимальный момент (момент, соответствующий прогибу кривой), Mn – номинальный вращающий момент.

1:29



Кривая вращающего момента асинхронного двигателя с пусковым переключателем звезда – треугольник располагается внутри кривой момента винтового компрессора. Во время работы двигателя, подключенного звездой, компрессор не нагружен (режим холостого хода). Когда частота вращения двигателя достигает примерно 90–95% номинальной частоты, двигатель переключается треугольником, вращающий момент возрастает, компрессор нагружается и выходит на рабочий режим.

1.6.5.8. Вращающий момент

Вращающий момент электродвигателя является выражением способности ротора вращаться. У каждого двигателя есть свой максимальный вращающий момент. Если нагрузка превышает этот вращающий момент, у ротора не хватит мощности для вращения. С нормальной нагрузкой двигатель работает с моментом, который значительно меньше максимального. Однако в период пуска нагрузка значительно выше. Обычно характеристика двигателя представляется в виде кривой вращающего момента.

Глава 2 Компрессоры и вспомогательное оборудование

2.1 Объемные компрессоры

2.1.1. Общие сведения

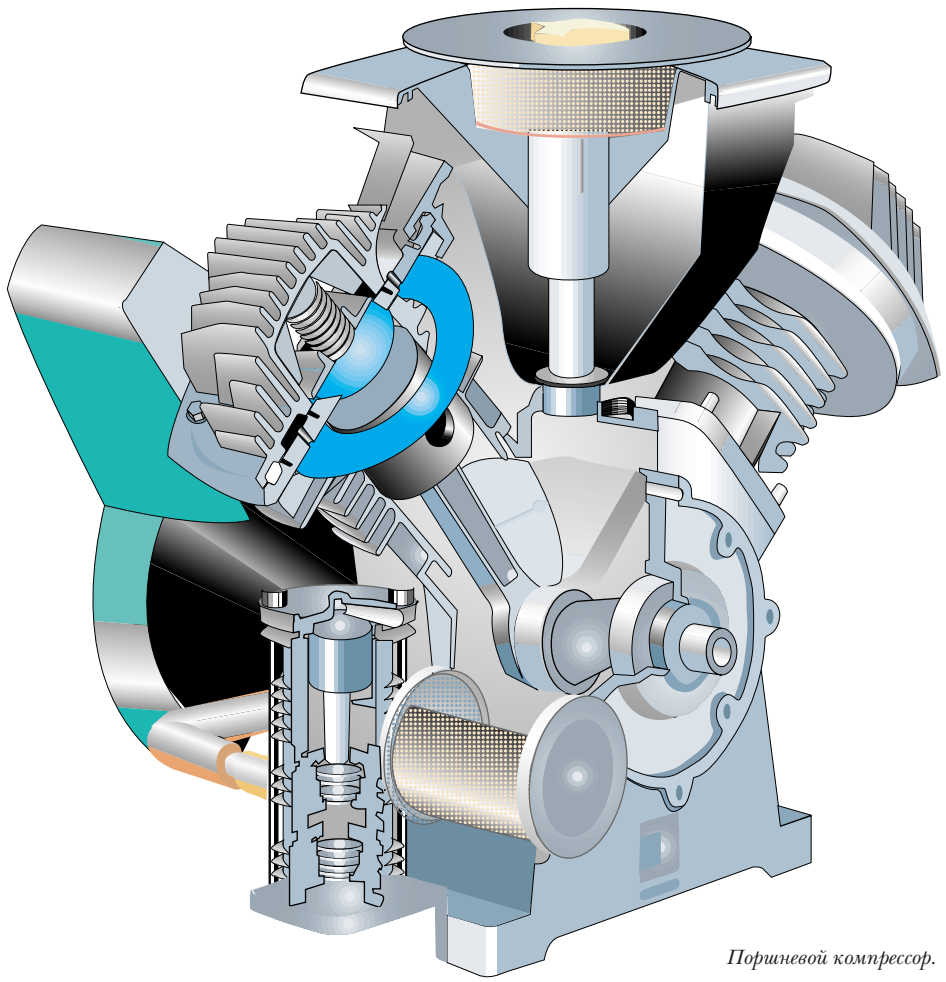
Для объемных компрессоров характерно создание определенного замкнутого объема газа или воздуха и последующее повышение давления, которое достигается за счет уменьшения этого замкнутого объема.

2.1.2. Поршневые компрессоры

Поршневые компрессоры были изобретены первыми и являются самыми распространенными из всех компрессоров. Поршневые компрессоры очень разнообразны: одинарного или двойного действия, со смазкой или бессмазочные, с разным числом цилиндров и самых различных конфигураций. За исключением самых малых компрессоров с вертикальными цилиндрами, для небольших компрессоров наиболее часто применяется V-образное расположение цилиндров.

В крупных компрессорах двойного действия наибольшими преимуществами обладает L-образная конфигурация с вертикальным цилиндром низкого давления и горизонтальным цилиндром высокого давления. Поэтому такая конструкция наиболее распространена.

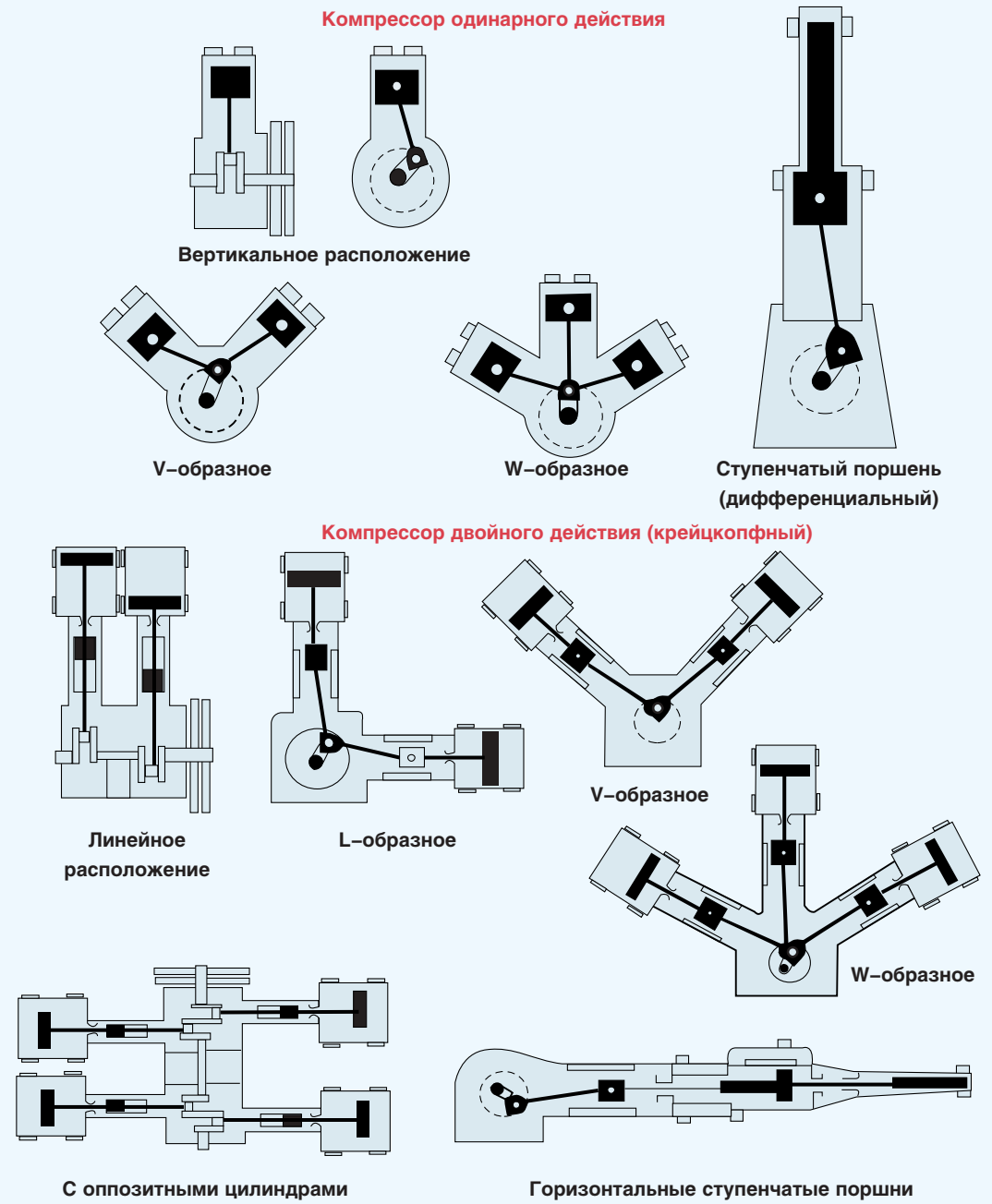
2:1



Поршневой компрессор.

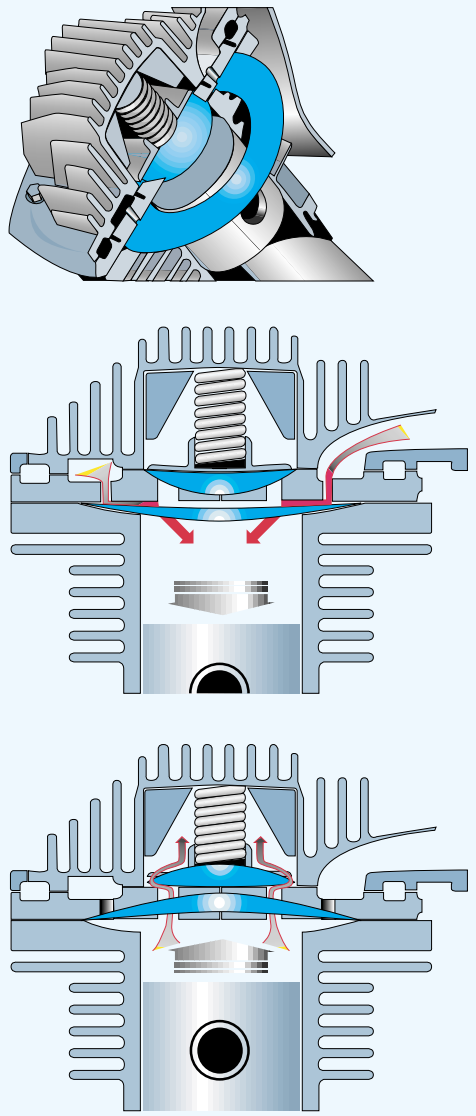
В маслосмазываемых компрессорах обычно применяют систему естественной подачи масла или систему подачи масла под давлением. В большинстве компрессоров используются самодействующие клапаны, которые открываются и закрываются в результате разности давлений по обе стороны пластины клапана.

2:2



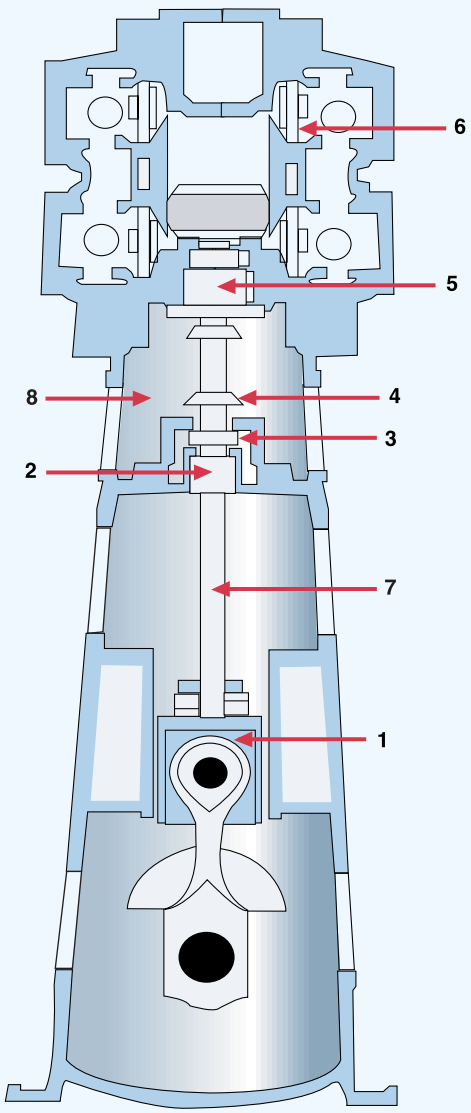
Примеры расположения поршней в поршневых компрессорах.

2:3



Поршневой компрессор с клапанной системой, состоящей из двух дисков, изготовленных из нержавеющей стали.
Когда поршень движется вниз и всасывает воздух, больший диск, который достаточно гибок, прогибается вниз и пропускает в цилиндр воздух.
Когда поршень движется вверх, большой диск прогибается вверх и плотно прилегает к седлу. Затем гибкость малого диска позволяет сжатому воздуху проходить через отверстие в седле клапана.

2:4



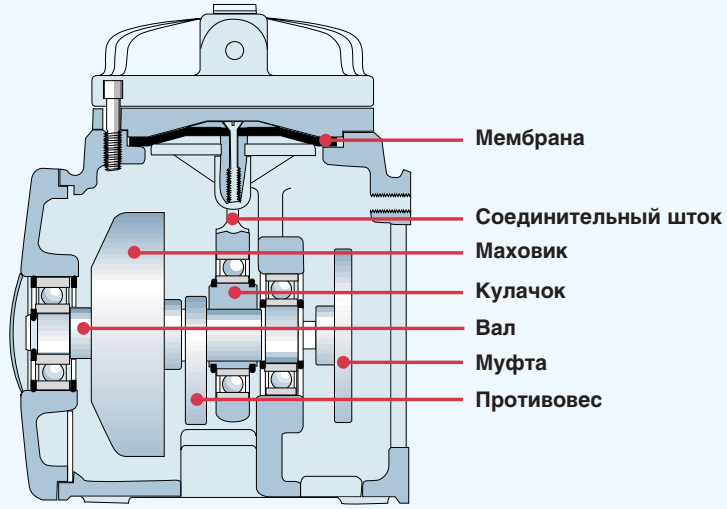
1. Крейцкопф
2. Направляющий подшипник
3. Сальник
4. Маслоотражательное кольцо
5. Сальниковая камера
6. Диск клапана
7. Шток поршня
8. «Фонарь»

Безмасляный поршневой компрессор двойного действия с лабиринтным уплотнением и крейцкопфом.

2.1.3. Безмасляные поршневые компрессоры

Безмасляные поршневые компрессоры могут оснащаться поршневыми кольцами, изготовленными из политетрафторэтелена (ПТФЭ) или графита. В другом варианте исполнения в поршне и стенке цилиндра могут быть пазы, как в лабиринтных компрессорах. Более крупные

2:5



Мембранный компрессор, в котором привод на мембрану передается от обычного коленчатого вала через соединительный шток, присоединенный к мембране.

машины оснащаются крейцкопфом и уплотнениями на штоке поршня, а также вентилируемым «фонарем» (промежуточным отсеком), предотвращающей перенос масла из картера коленчатого вала в камеру сжатия. Небольшие компрессоры зачастую оснащаются картером коленчатого вала с подшипниками, смазка которых рассчитана на весь срок службы.

2.1.4. Мембранные компрессоры

Мембранные компрессоры образуют другую группу компрессоров. Мембрана приводится в движение механическим или гидравлическим способом. Механические мембранные компрессоры используются при малых производительностях и низких давлениях или в качестве вакуумных насосов. Гидравлические мембранные компрессоры используются для получения высоких давлений.

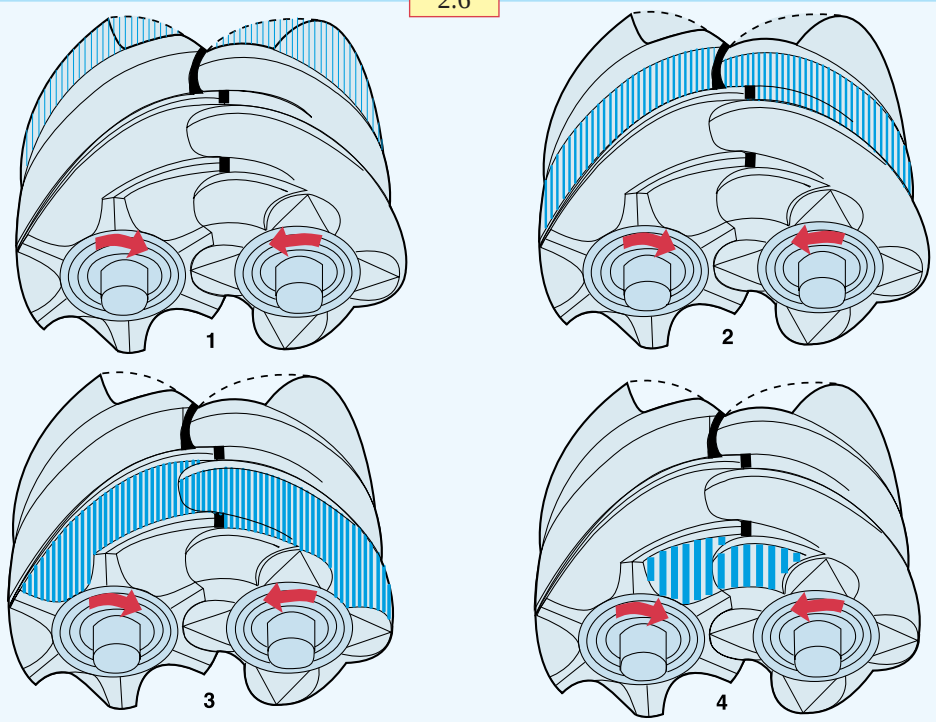
2.1.5. Винтовые компрессоры

Принцип действия ротационных компрессоров объемного действия с поршнем в форме винта был разработан в 30-е годы, когда потребовались высокопроизводительные компрессоры, способные стабильно работать в различных условиях.

Основными частями винтового компрессора являются ведущий и ведомый роторы, которые вращаются навстречу друг другу, в то время как пространство между ними и корпусом уменьшается. Каждый из винтовых элементов имеет постоянную, присущую ему степень повышения давления, которая зависит от их длины, шага винта и формы выпускного отверстия. Для получения наибольшего кпд степень повышения давления должна соответствовать требуемому рабочему давлению.

Винтовой компрессор не оснащен клапанами, и в нем отсутствуют механические силы, вызывающие разбалансировку. Это значит, что он может работать при высокой скорости вращения вала, и его конструкция позволяет получить высокую величину потока при малых габаритных размерах. Осевое усилие, зависящее от разности давлений между входом и выходом компрессора, должно приниматься подшипниками. Винт, который первоначально был симметричным, в дальнейшем видоизменился и приобрел различные асимметричные геликоидальные (спиральные) профили.

2:6

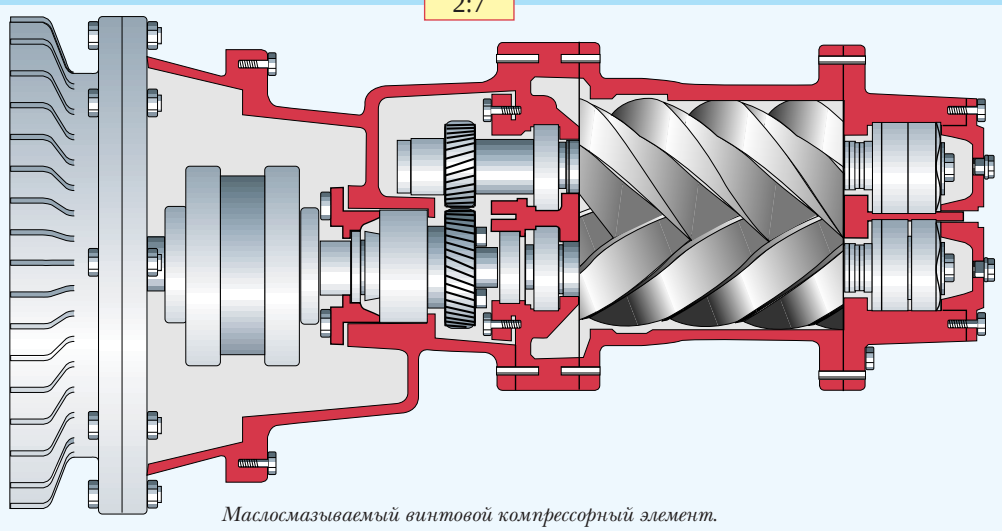


На этих рисунках показано, как воздух сжимается в винтовом компрессоре: 1 – воздух заполняет пространство между роторами, и, по мере их вращения (2,3,4) это пространство становится все меньше и меньше.

2.1.5.1. Безмасляные компрессоры

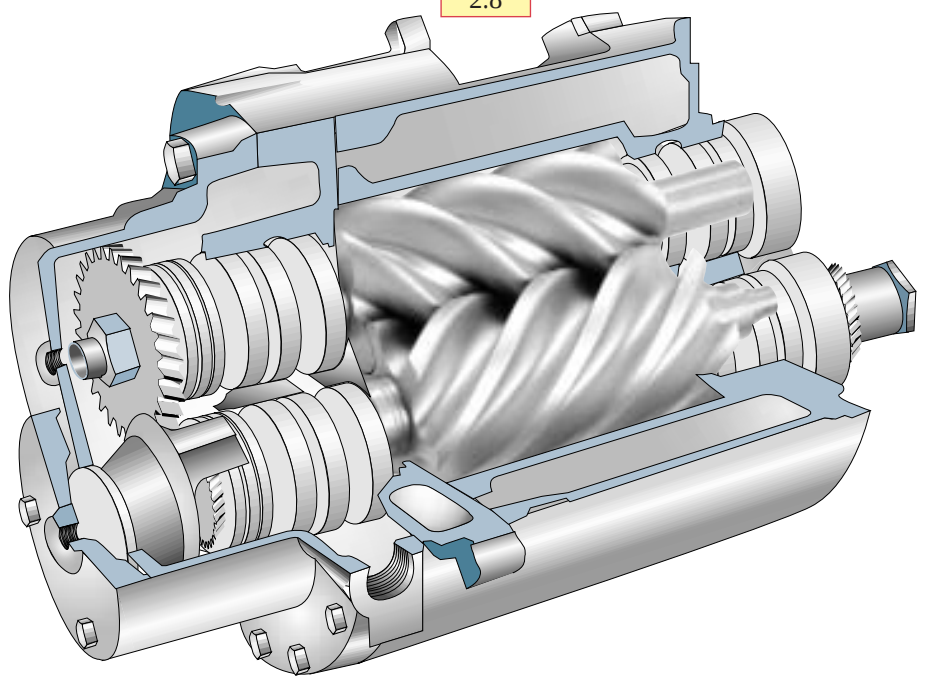
В первых винтовых компрессорах, так называемых безмасляных компрессорах, или компрессорах с сухим сжатием, винт имел симметричный профиль и в камере сжатия не использовалась жидкость. В конце 1960-х годов были внедрены высокоскоростные безмасляные винтовые компрессоры с асимметричным профилем винта. Новый профиль винта, благодаря уменьшению внутренних утечек, позволил значительно повысить кпд.

2:7



Маслосмазываемый винтовой компрессорный элемент.

2:8



Ступень безмасляного винтового компрессора. Шейки ведущего и ведомого роторов закреплены в корпусе, который оснащен рубашкой с водяным охлаждением. Передний ротор с четырьмя выступами является ведущим и присоединен к редуктору. Дальний ротор с шестью выступами является ведомым. Он удерживается на месте синхронизирующим устройством (см. слева).

В компрессорах с сухим сжатием для синхронизации вращающихся навстречу друг другу роторов используется внешняя зубчатая передача. Так как роторы не соприкасаются ни друг с другом, ни с корпусом компрессора, в камере сжатия отдельной смазки не требуется. Поэтому в сжатом воздухе совершенно отсутствует масло. Роторы и корпус изготавливаются с высокой точностью, чтобы уменьшить утечку воздуха со стороны нагнетания в сторону всасывания. Полная степень повышения давления ограничивается разностью температур на впуске и выпуске. Поэтому безмасляные винтовые компрессоры зачастую изготавливаются с несколькими ступенями.

2.1.5.2. Компрессоры с нагнетанием жидкости

Винтовые компрессоры с нагнетанием жидкости охлаждаются и смазываются жидкостью, которая нагнетается в камеру сжатия, а также зачастую и в подшипники компрессора. Жидкость предназначена для охлаждения и смазки компрессорного элемента, а также для уменьшения обратной утечки воздуха в сторону воздухозабора.

В настоящее время для этих целей чаще всего используется масло из-за его хороших смазочных свойств, но могут применяться и другие жидкости, например вода. Винтовые компрессорные элементы с нагнетанием жидкости могут изготавливаться с большой степенью повышения давления, и поэтому для давлений до 13 бар обычно достаточно одной ступени сжатия. Малые обратные утечки в элементе означает также, что эффективно работают даже относительно небольшие компрессоры.

2.1.6. Зубчатый компрессор

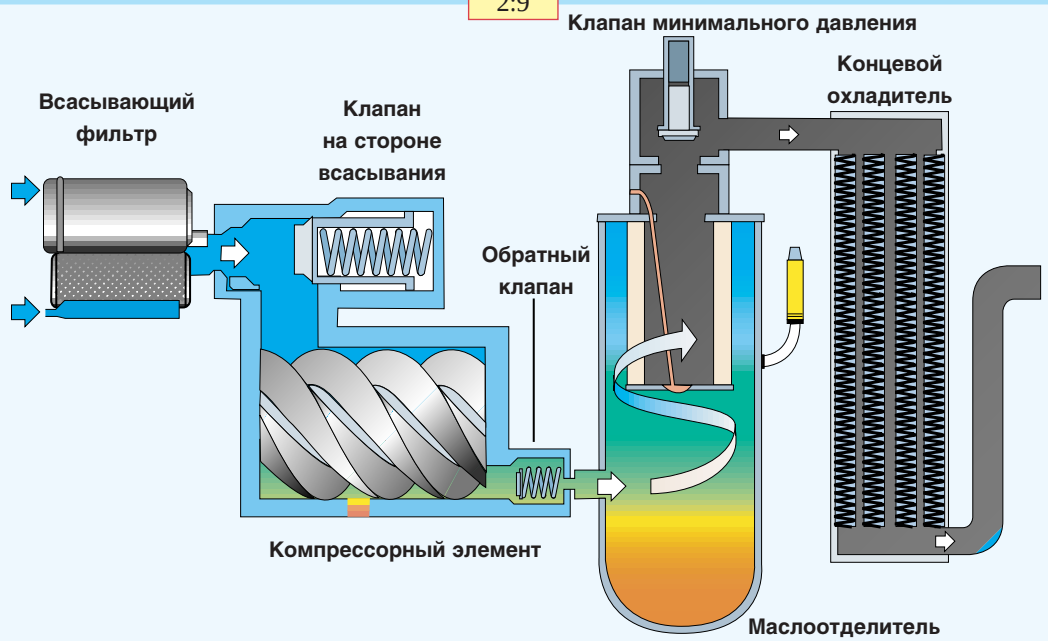
Компрессорный элемент зубчатого компрессора состоит из двух роторов, которые вращаются в камере сжатия навстречу друг другу.

Процесс сжатия состоит из этапов впуска, сжатия и выпуска. На этапе впуска воздух всасывается в камеру сжатия до тех пор, пока роторы не перекроют впускной канал. На этапе сжатия поступивший воздух находится в камере сжатия, объем которой по мере вращения роторов постепенно уменьшается.

Во время сжатия выпускной канал закрыт одним из роторов, в то время как впускной канал открывается для впуска новой порции воздуха в противоположную секцию камеры сжатия.

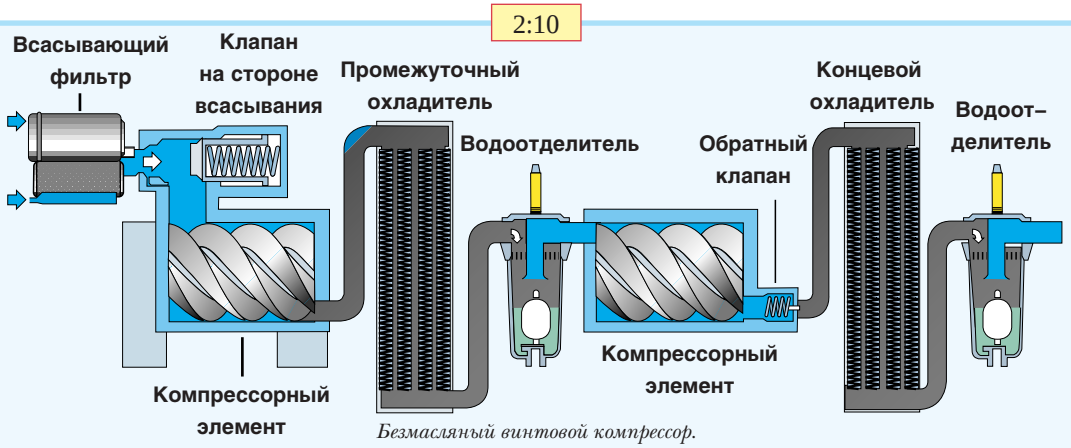
Выпуск происходит, когда один из роторов открывает выпускной канал и сжатый воздух вытесняется из камеры сжатия. Впуск и выпуск происходят в радиальном направлении через камеру сжатия,

2:9



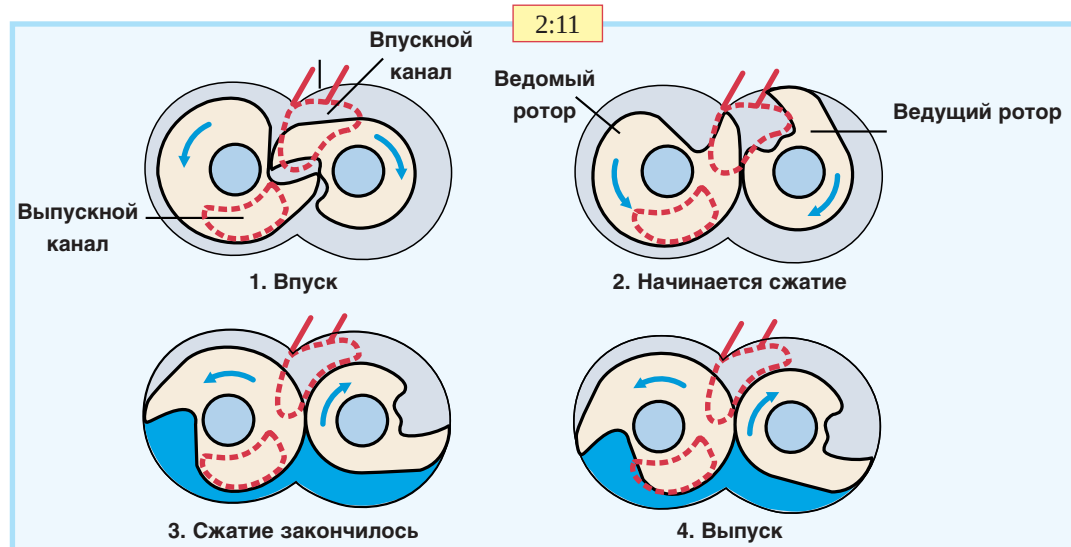
Винтовой компрессор с нагнетанием масла.

2:10

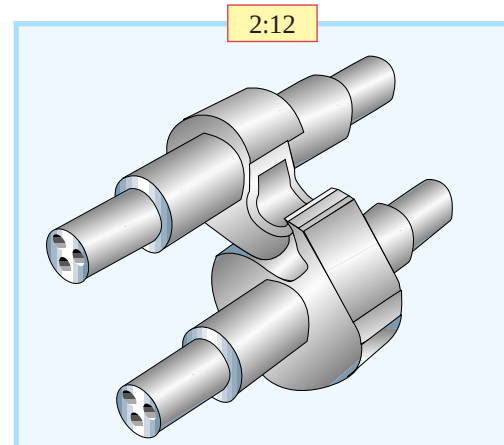


Безмасляный винтовой компрессор.

2:11



2:12



Роторы зубчатого компрессора.

что позволяет упростить конструкцию подшипников и улучшить заполнение.

Вращение обоих роторов синхронизируется зубчатым колесом. Максимальная степень повышения давления, которое можно получить в безмасляном зубчатом компрессоре, составляет 4,5. Следовательно, для более высоких давлений потребуется несколько ступеней.

2.1.7. Спиральный компрессор

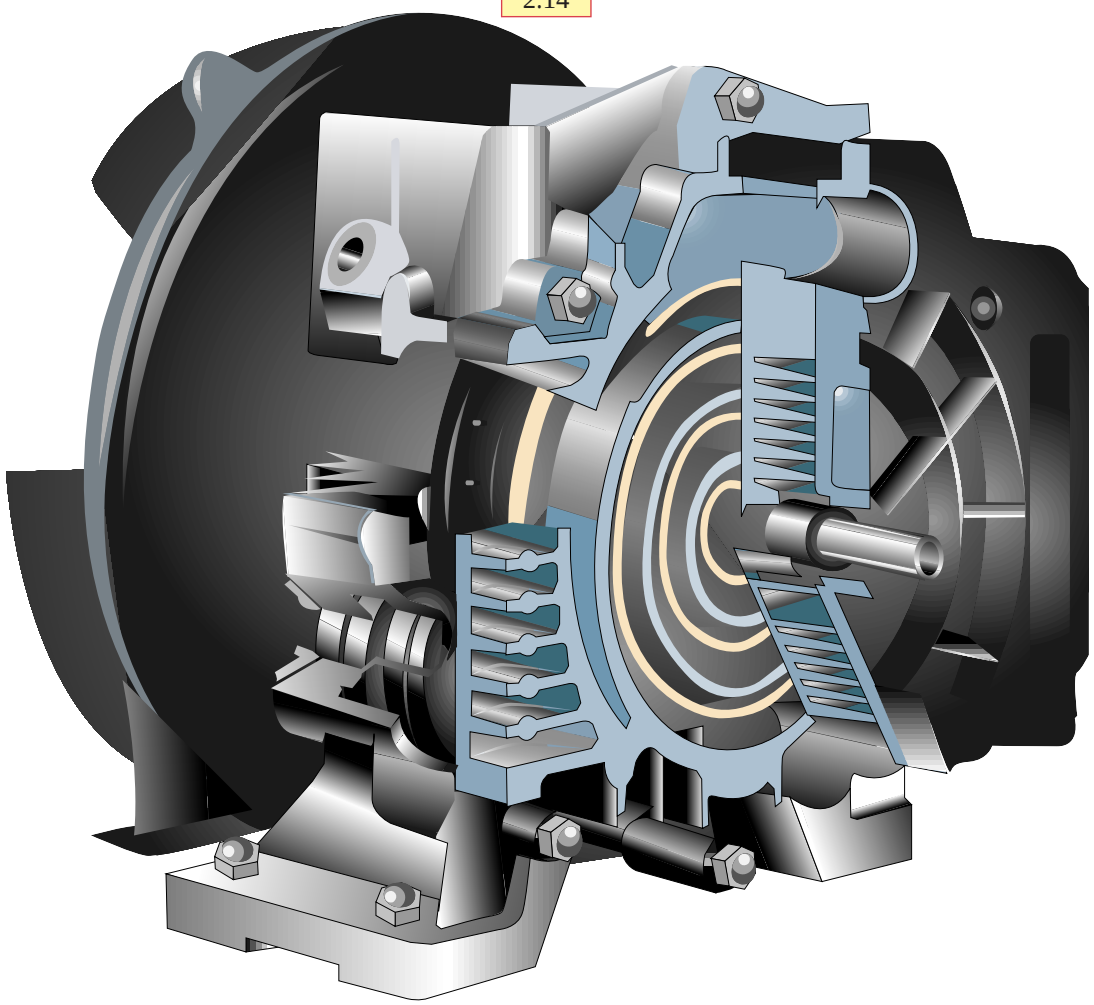
Спиральный компрессор является разновидностью безмасляного ротационного объемного компрессора, т.е. он сжимает определенное количество воздуха в постепенно уменьшающемся объеме. Компрессорный элемент состоит из неподвижной спирали в корпусе элемента и подвижной эксцентрической спирали с приводом от двигателя. Спирали установлены со сдвигом по фазе на 180° так, чтобы они образовывали воздушные полости с изменяющимся объемом.

Такая конструкция обеспечивает спиральным элементам радиальную стабильность. Утечки в спиральном элементе

2:13

Принцип работы спирального компрессора.

2:14



Спиральный компрессор (вид в разрезе).

минимальны, так как разность давлений между воздушными полостями меньше разности давлений во впускных и выпускных каналах.

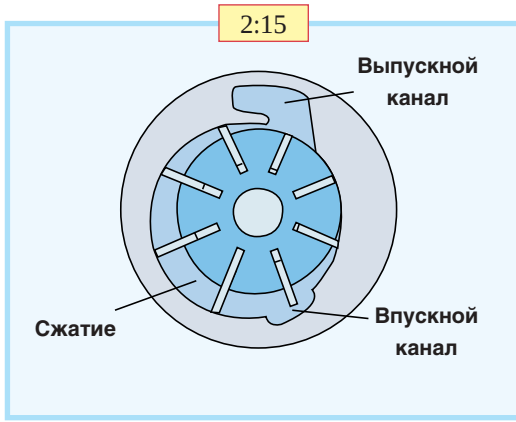
Подвижная спираль приводится в движение короткоходным коленчатым валом и эксцентрически перемещается вокруг центра неподвижной спирали. Впускной канал находится в верхней части корпуса элемента.

Когда подвижная спираль движется против часовой стрелки, воздух всасывается, захватывается одной из воздушных полостей и сжимается, по мере продвижения к центру, где расположены выпускной канал и обратный клапан. Цикл сжатия продолжается в течение 2,5 оборота, что фактически обеспечивает постоянный воздушный поток без пульсаций. Этот процесс относительно бесшумный и почти без вибрации, так как не возникает переменного вращающего момента, как, например в поршневом компрессоре.

2.1.8. Роторно–пластинчатый компрессор

Принцип действия роторно-пластинчатого компрессора тот же, что и у большинства пневмодвигателей. Пластины обычно изготавливаются из специальных

2:15



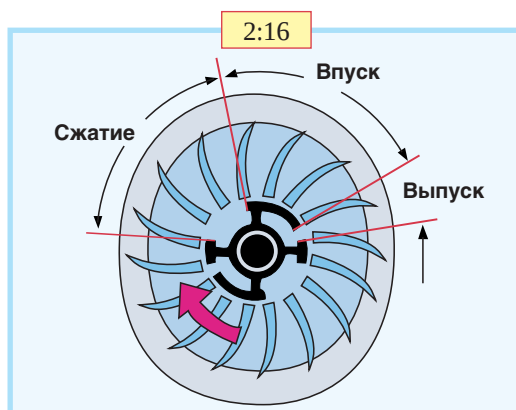
литейных сплавов. В большинстве компрессоров используется масляная смазка.

Ротор с пластинами, которые могут перемещаться в радиальном направлении, эксцентрично установлен в корпусе статора. При вращении ротора центробежная сила прижимает пластины к стенкам статора. При увеличении расстояния между ротором и статором воздух всасывается. Он захватывается различными полостями компрессора, которые при вращении уменьшаются в объеме. Когда пластины проходят мимо выпускного канала, происходит выпуск воздуха.

2.1.9. Жидкостно–кольцевой компрессор

Жидкостно-кольцевой компрессор представляет собой объемный компрессор с заданной степенью повышения давления. Ротор с фиксированными лопатками эксцентрично установлен в корпусе, который частично заполнен жидкостью. Рабочее колесо с лопатками перемещает жидкость относительно корпуса компрессора, и за счет центробежной силы у стенок корпуса образуется кольцо жидкости. Благодаря овальной форме корпуса компрессора кольцо жидкости располагается эксцентрично относительно ротора. Объемы между лопатками рабочего колеса циклично изменяются. Конструкция компрессора обычно предполагает установку двух камер сжатия на противоположных сторонах рабочего вала, позволяя тем самым устранить радиальную нагрузку на подшипники.

2:16

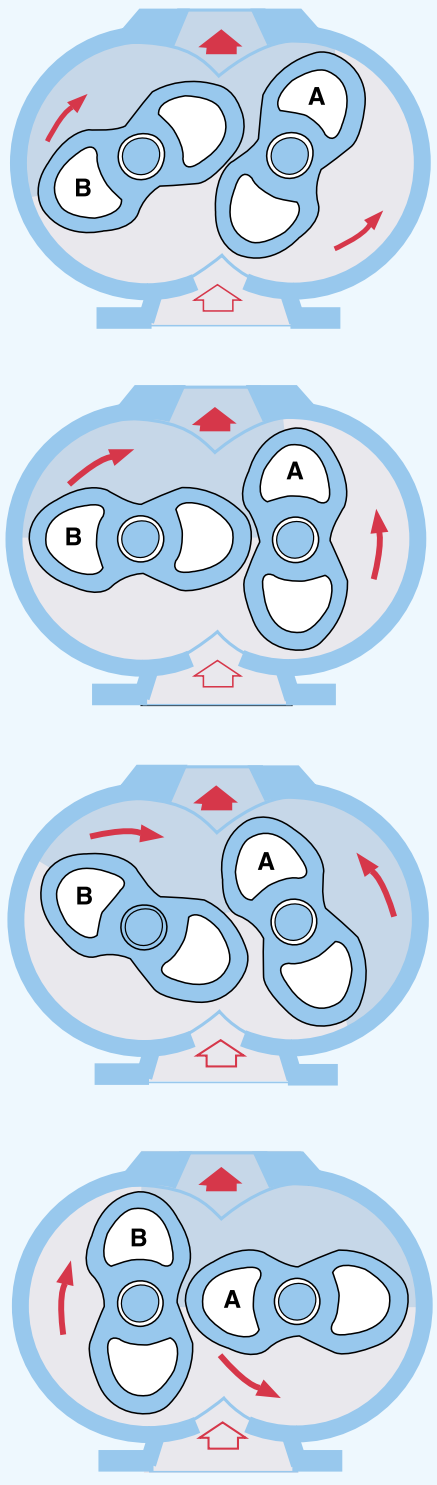


Благодаря контакту воздуха с жидкостью охлаждение в жидкостно-кольцевом компрессоре является непосредственным. Это означает, что повышение температуры сжатого воздуха окажется незначительным. Однако потери на вязкое трение между корпусом и лопатками будут велики. Воздух насыщается парами компрессорной жидкости, в качестве которой обычно используется вода. Могут также использоваться и другие жидкости, например, для поглощения определенной составной части сжимаемого газа или для защиты компрессора от коррозии, которая происходит при сжатии агрессивных газов.

2.1.10. Воздуходувки

Воздуходувки не являются объемными компрессорами, так как работают без внутреннего сжатия. Там, где камера сжатия входит в контакт с выпускным каналом, сжатый воздух течет со стороны более высокого давления. Именно там происходит сжатие: объем камеры сжатия уменьшается по мере вращения. Соответственно, компрессия происходит в условиях полного противодавления, что приводит к низкой эффективности и высокому уровню шума.

2:17



Принцип работы воздуходувки

Два одинаковых, обычно симметричных ротора, вращающихся в противоположных направлениях, работают в цилиндрическом корпусе с плоскими торцами. Роторы синхронизированы посредством зубчатой передачи. Воздуходувки бывают чаще всего безмасляные и с воздушным охлаждением. Низкая эффективность ограничивает применение воздуходувок теми случаями, где используется низкое давление при сжатии в одну ступень, хотя возможны версии и в две-три ступени. Воздуходувки чаще всего используются как вакуумные насосы и для пневматической подачи материалов.

2.2 Динамические компрессоры

2.2.1. Общие сведения

Динамические компрессоры (называемые также «турбокомпрессоры») бывают осевой и радиальной конструкций. Компрессоры радиальной конструкции называют центробежными. Динамический компрессор работает с постоянным давлением в противоположность объемным компрессорам, работающим с постоянной производительностью. Производительность динамического компрессора подвержена внешним условиям, например, небольшое изменение давления на входе приводит к большому изменению производительности.

2.2.2. Центробежные компрессоры

Центробежные компрессоры характеризуюся радиальным выходным потоком. Воздух подводится в центр вращающегося рабочего колеса-импеллера с радиальными лопатками и выбрасывается к периферии центробежными силами. Перед поступлением в центр следующего импеллера воздух проходит диффузор и спиральную камеру, где кинетическая энергия превращается в давление.

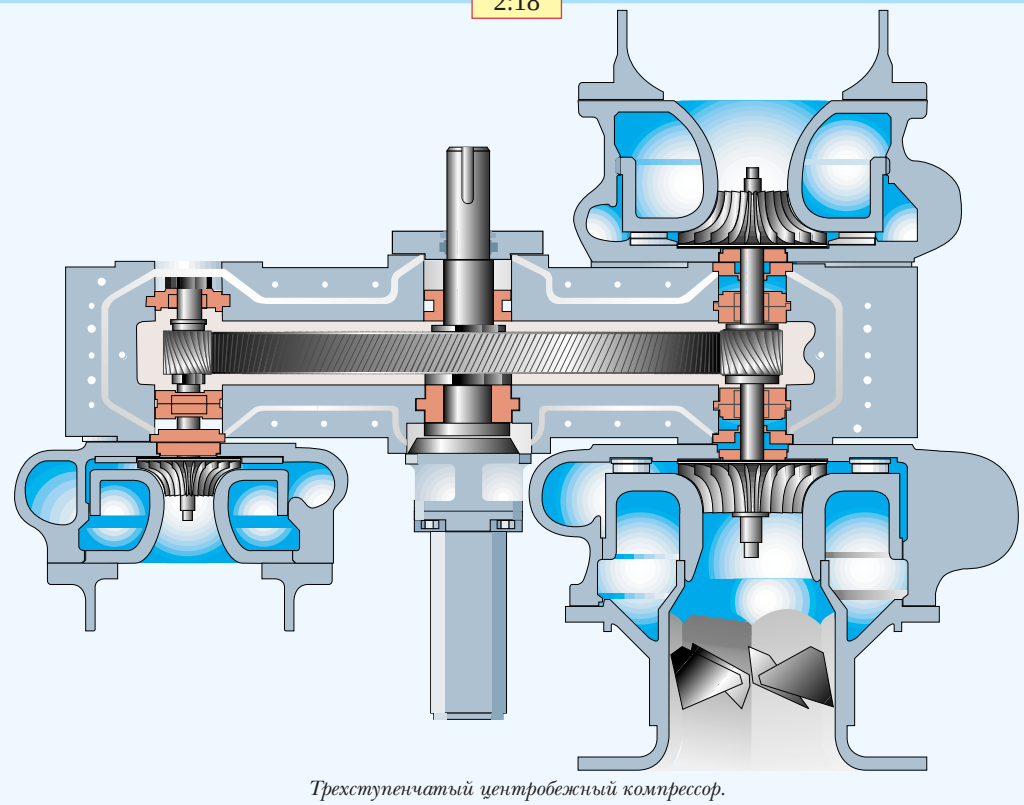
Степень повышения давления на каждой ступени зависит от увеличения скорости воздуха после импеллера. Промежуточное охлаждение воздуха необходимо вследствии того, что его температура на выходе из каждой ступени накладывает ограничение на эффекивность сжатия.

Центробежный компрессор с числом ступеней вплоть до шести и давлением до 25 бар – не редкость. Импеллер может иметь либо открытую, либо закрытую конструкцию. Открытая конструкция характерна для воздушных компрессоров. Импеллер обычно изготовляется из специальной нержавеющей стали или из алюминия. Скорость вращения значительно выше, чем у других типов компрессоров, и обычно составляет 15 000 – 100 000 об/мин.

Это значит, что вал компрессора вращается на подшипниках скольжения, а не качения. Подшипники качения используются в одноступенчатых компрессорах с низкой степенью повышения давления.

Зачастую в многоступенчатых компрессорах для уравновешивания осевых нагрузок, вызванных разностями давлений, на каждый конец одного и того же вала устанавливается по импеллеру. В основном минимальная объемная производительность центробежного компрессора определяется потоком, протекающим через последнюю ступень. Практический предел в 160 л/с на выходе разделенной по горизонтали машины определен эмпирическим способом.

2:18



Трехступенчатый центробежный компрессор.

Каждый центробежный компрессор должен иметь выполненное подходящим способом уплотнение для уменьшения утечки вдоль вала в тех местах, где он проходит через корпус компрессора. В наши дни используются многие виды уплотнений, самые совершенные из которых можно обнаружить в компрессорах с высокой скоростью вращения, предназначенных для высоких давлений. Наиболее распространены уплотнения четырех типов: лабиринтные, кольцевые (обычно графитные, которые работают без смазки, но используются также уплотняющие жидкости), механические и гидростатические.

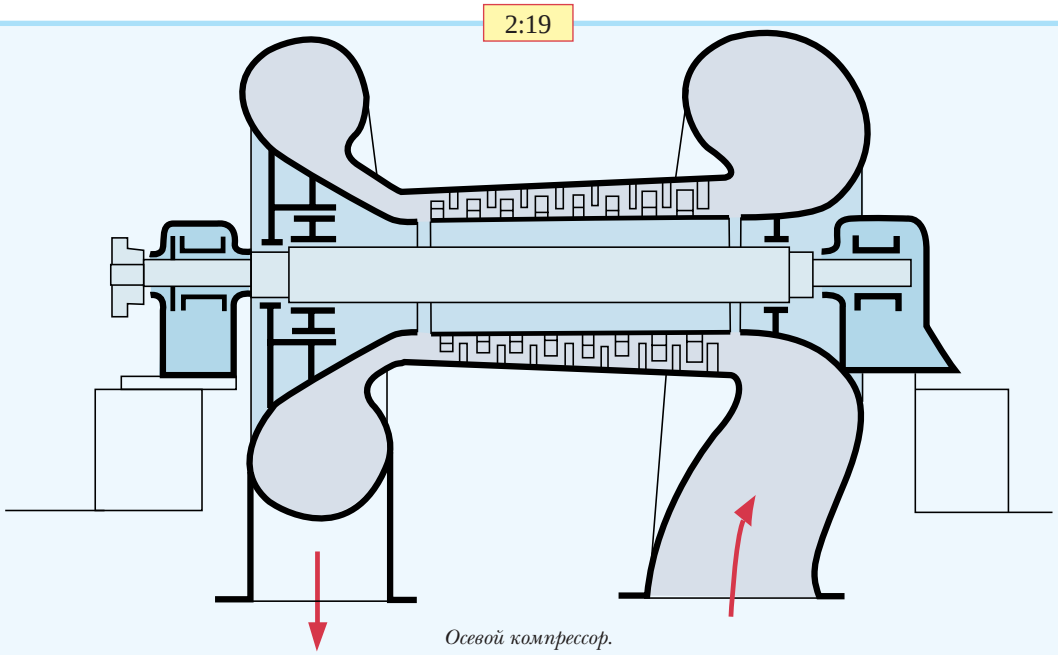
2.2.3. Осевые компрессоры

В осевых компрессорах осевой поток воздуха или газа проходит вдоль вала компрессора через ряд вращающихся рабочих и неподвижных импеллеров. При этом скорость движения воздуха постепенно возрастает, в то время как неподвижные направляющие лопатки преобразуют кинетическую энергию в давление.

Минимальная объемная производительность такого компрессора составляет примерно 15 м³/с. В компрессоре обычно устанавливается балансирный барабан для уравновешивания осевой нагрузки.

Осевые компрессоры вообще меньше, чем эквивалентные центробежные компрессоры, и обычно работают со скоростью большей на 25%. Они используются для получения большой объемной производительности при относительно небольшом давлении. За исключением газотурбинных установок, степень повышения давления редко превышает 6. Обычная производительность таких компрессоров составляет 65 м³/с, а эффективное давление может достигать 14 бар (изб).

2:19



Осевой компрессор.

2.3. Прочие компрессоры

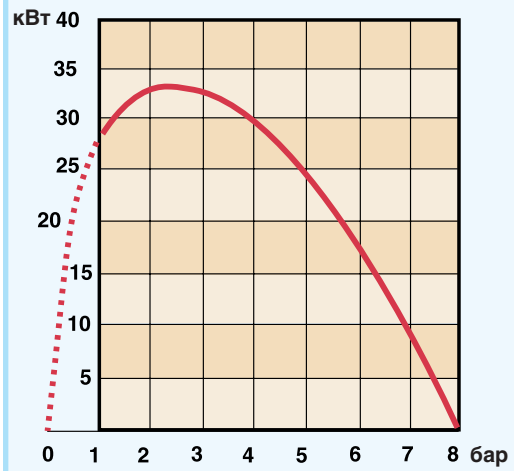
2.3.1. Вакуумные насосы

Вакуум — это среда, где давление меньше атмосферного. Вакуумный насос — компрессор, который работает в этом интервале давлений. Типичной особенностью вакуумных насосов является то, что они работают с очень большим относительным повышением давления и обычно используются многоступенчатые машины. Для получения разрежения в интервале абсолютных давлений от 1 до 0,1 бар, могут также использоваться многоступенчатые компрессоры, предназначенные для получения сжатого воздуха.

2.3.2. Бустер–компрессоры

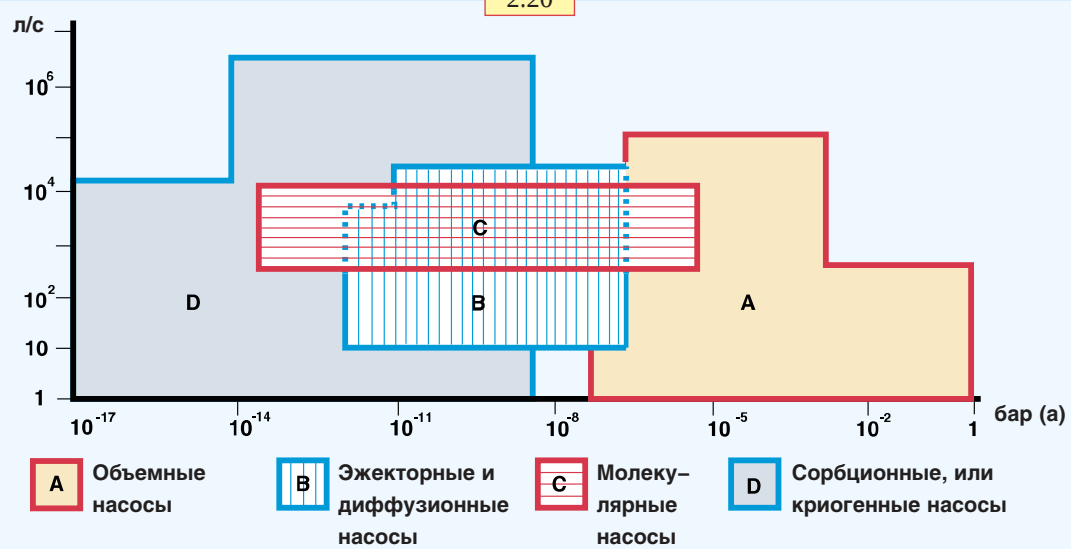
Бустер-компрессор представляет собой компрессор, работающий с уже сжатым воздухом, сжимая его до более высокого давления. Он используется для того, чтобы компенсировать падение давления на длинных трубопроводах или в установках, где для вспомогательных процессов требуется более высокое давление. Сжатие может происходить в одну или несколько ступеней, и компрессор может быть динамическим или объемным, но самыми распространенными являются

2:21



Потребляемая мощность бустер-компрессора при адиабатическом процессе и конечном абсолютном давлении 8 бар.

2:20



Рабочие диапазоны для некоторых типов вакуумных насосов.

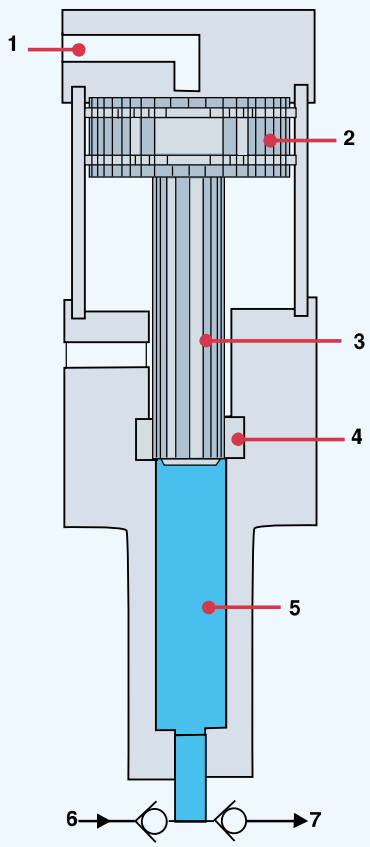
поршневые компрессоры. Потребляемая мощность бустер-компрессора растет с увеличением отношения давлений, в то время как массовый поток падает. Кривая зависимости потребляемой мощности от давления на входе по форме аналогична кривой вакуумного насоса.

2.3.3. Напорные усилители

Напорные усилители повышают давление в среде, например для лабораторных испытаний клапанов, трубопроводов и шлангов. Давление 7 бар может быть усилено до 200 бар в одноступенчатой или до 1700 бар в многоступенчатой установке. Напорный усилитель предназначен только для очень малых потоков.

При заполнении камеры высокого давления поршень низкого давления поднят. При поступлении газа-вытеснителя поршень отжимается вниз и под высоким давлением вытесняет газ из камеры сжатия. Усилитель может работать в циклических процессах до достижения заданного уровня давления. Этим способом можно сжимать все инертные газы. В усилителе можно также сжимать воздух, но во избежание самовоспламенения он должен быть полностью очищен от масла.

2:22



1. Газ–вытеснитель
2. Поршень низкого давления
3. Поршень высокого давления
4. Уплотнение
5. Камера сжатия
6. Вход
7. Выход

Поперечное сечение одноступенчатого напорного гидроусилителя.

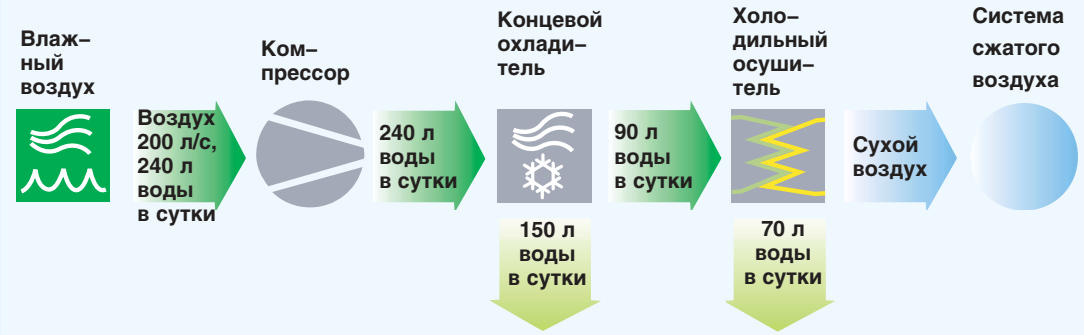
2.4 Подготовка сжатого воздуха

2.4.1. Осушение сжатого воздуха

В атмосферном воздухе всегда есть некоторое количество водяного пара, большее – при высоких температурах и меньшее – при низких температурах. При сжатии воздуха концентрация воды растет. Например, компрессор с рабочим давлением 7 бар и производительностью 200 л/с, который всасывает воздух с температурой 20°C и относительной влажностью 80%, выдаст за восьмичасовой рабочий день в линию сжатого воздуха 80 л воды.

Для того чтобы охарактеризовать содержание воды в сжатом воздухе, используется термин «точка росы под давлением» (ТРД). Это температура, при которой водяной пар преобразуется в воду при текущем рабочем давлении. Низкое значение ТРД указывает на малое количество водяного пара в сжатом воздухе.

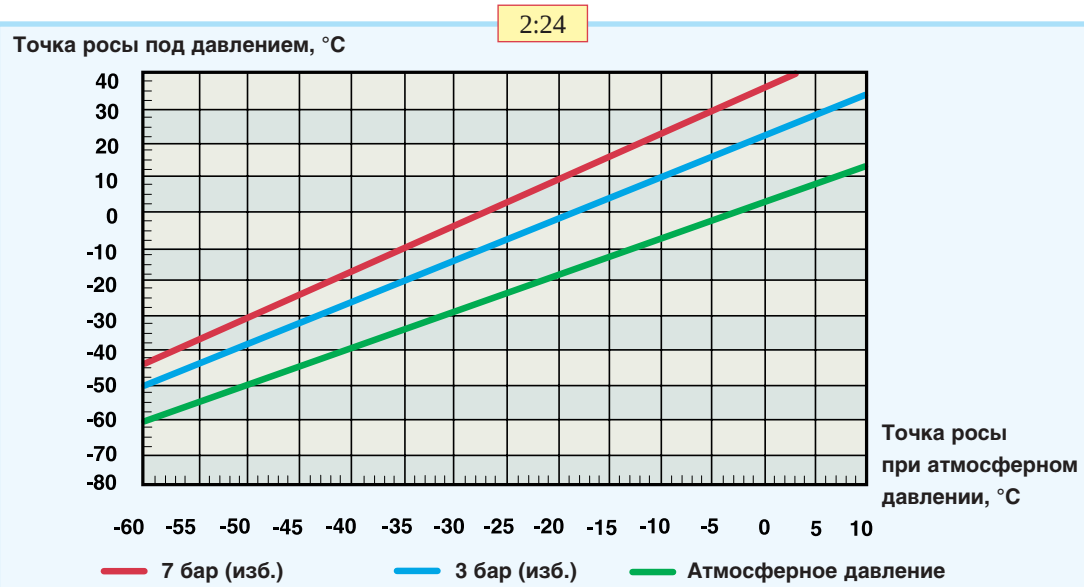
2:23



Компрессор, производящий 200 литров воздуха в секунду, в сутки выдает также примерно 240 литров воды, если компрессор работает при температуре воздуха 20°C. Чтобы избежать проблем и нарушений работы, вызванных осаждением воды в трубопроводах и подключенном к системе сжатого воздуха оборудовании, сжатый воздух нужно осушать. Осушение производится в концевом охладителе и в осушительном оборудовании (см. рисунок).

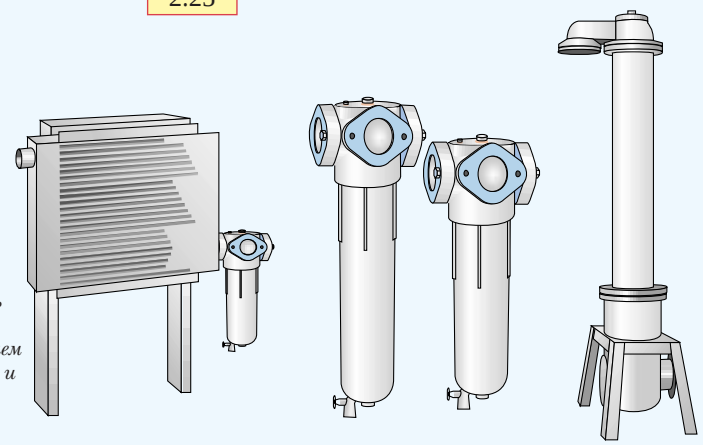
Важно помнить, что точку росы атмосферного воздуха нельзя путать с ТРД при сравнении различных осушителей. Например, ТРД, равная +2°C при 7 бар, эквивалентна –23°C при атмосферном давлении. Использование фильтра для удаления влаги (ниже точки росы) ничего не даст, так как дальнейшее охлаждение означает продолжение осаждения конденсационной воды. Основной тип осушительного оборудования можно выбирать, ориентируясь на температуру точки росы под давлением. С точки зрения затрат более низкая точка росы потребует более высоких капитальных и эксплуатационных расходов на осушение воздуха. В принципе существует четыре способа удаления влаги из сжатого воздуха: охлаждение, чрезмерное сжатие, абсорбция и адсорбция. На основе этих способов и выпускается оборудование для различных типов систем сжатого воздуха.

2:24



Так выглядит соотношение между точкой росы и давлением сжатого воздуха.

2:25



Различные концевые охладители и влагоотделители. Влагоотделитель может отделять воду, например, циклонным отделением или отделением посредством изменения направления и скорости.

2.4.1.1. Концевой охладитель

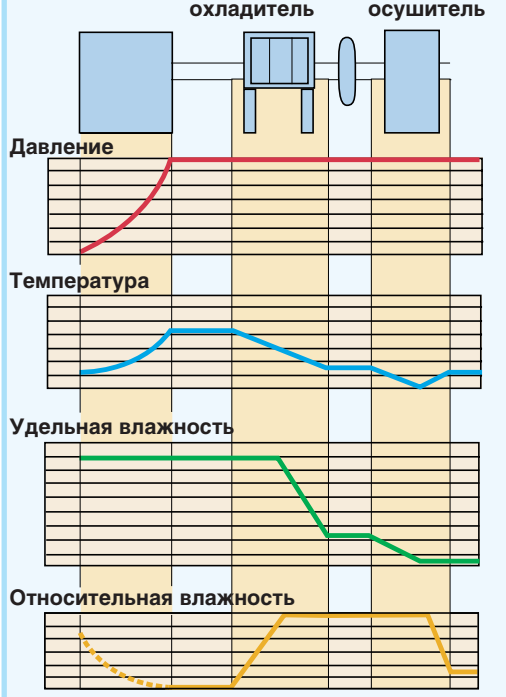
Концевой охладитель представляет собой теплообменник, который охлаждает горячий сжатый воздух, чтобы выделить из него воду, в противном случае она конденсировалась бы в трубопроводной системе. Концевые охладители бывают водяного или воздушного охлаждения, обычно оснащаются влагосепаратором с автоматическим сливом конденсата и размещаются непосредственно за компрессором.

Около 80–90% конденсирующейся влаги собирается во влагоотделителе концевого охладителя. Температура сжатого воздуха после концевого охладителя обычно на 10°C выше температуры теплоносителя, но в зависимости от типа теплоносителя может изменяться. Концевые охладители используются практически во всех стационарных установках. В большинстве случаев концевые охладители встраиваются в современные компрессоры.

2.4.1.2. Холодильный осушитель

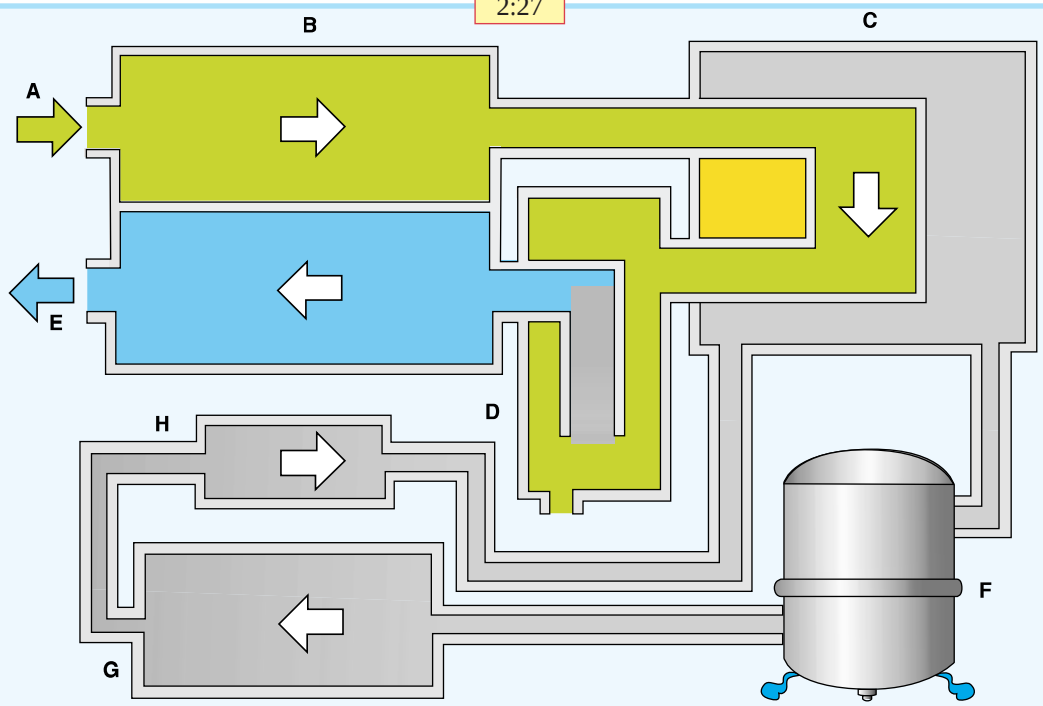
Применение холодильного осушения означает, что сжатый воздух охлаждается; это позволяет сконденсировать и отделить большое количество воды. После охлаждения и конденсации сжатый воздух вновь подогревается до температуры, близкой к комнатной; поэтому на внешних поверхностях системы трубопроводов не образуется конденсата. Охлаждение сжатого воздуха происходит с помощью замкнутой системы с хладагентом. За счет охлаждения в теплообменнике поступающего сжатого воздуха охлажденным воздухом,

2:26



Примеры изменения различных параметров при сжатии, окончательном охлаждении и холодильном осушении.

2:27



A Поступающий сжатый воздух
B Теплообменник типа «воздух–воздух»
C Теплообменник типа «воздух–хладагент»
D Влагоотделитель
E Сухой сжатый воздух
F Компрессор
G Конденсатор
H Расширительный клапан

Принцип холодильного осушения.

энергопотребление холодильного осушителя уменьшается. Осушители холодильного типа используются с точкой росы от +2°C до +10°C и ограничены снизу точкой замерзания сконденсировавшейся воды.

2.4.1.3. Чрезмерное сжатие

Чрезмерное сжатие, вероятно, является самым легким способом осушения сжатого воздуха.

Сначала воздух сжимается до давления более высокого, чем предполагаемое рабочее, а это означает, что концентрация водяного пара увеличивается. Затем воздух охлаждается, в процессе чего отделяется вода. На завершающем этапе воздух расширяется до рабочего давления, и тем самым достигается более низкая точка росы под давлением.

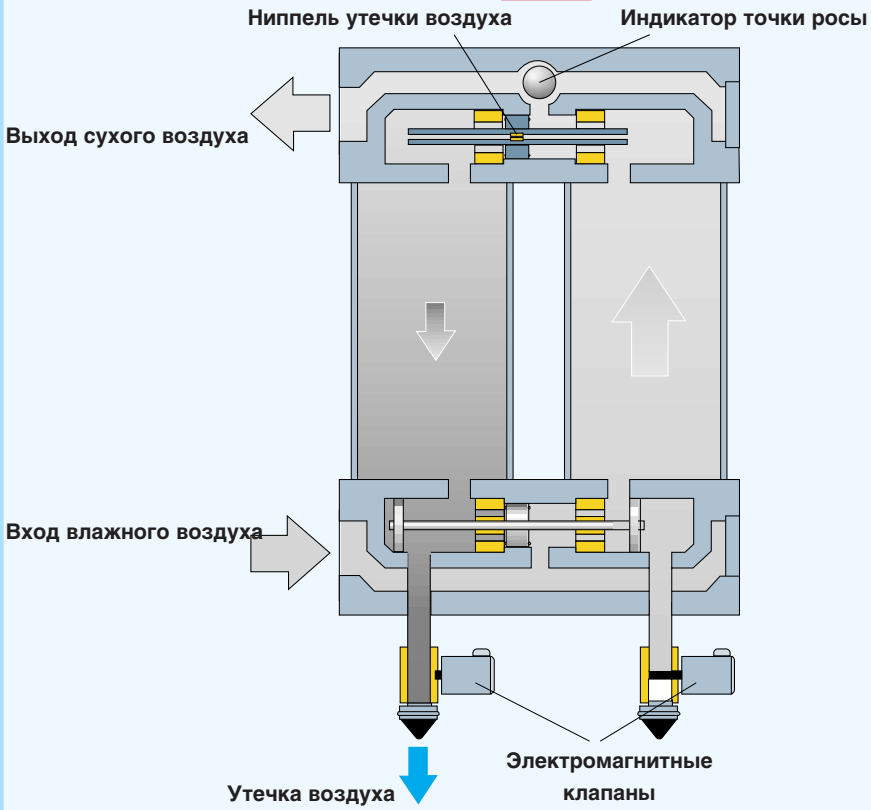
Однако из-за больших энергозатрат этот метод применим только при малых расходах воздуха.

2.4.1.4. Абсорбционное осушение

Абсорбционное осушение представляет собой химический процесс, в котором водяной пар связывается поглощающим материалом. Поглощающий материал может быть либо твердым, либо жидким. Часто используются поваренная соль и серная кислота, а это значит, что нужно учитывать возможность коррозии.

Этот способ редко используется и связан с большим расходом абсорбционного материала. Точка росы понижается только в ограниченной степени.

2:28



Холодное регенеративное адсорбционное осушение.

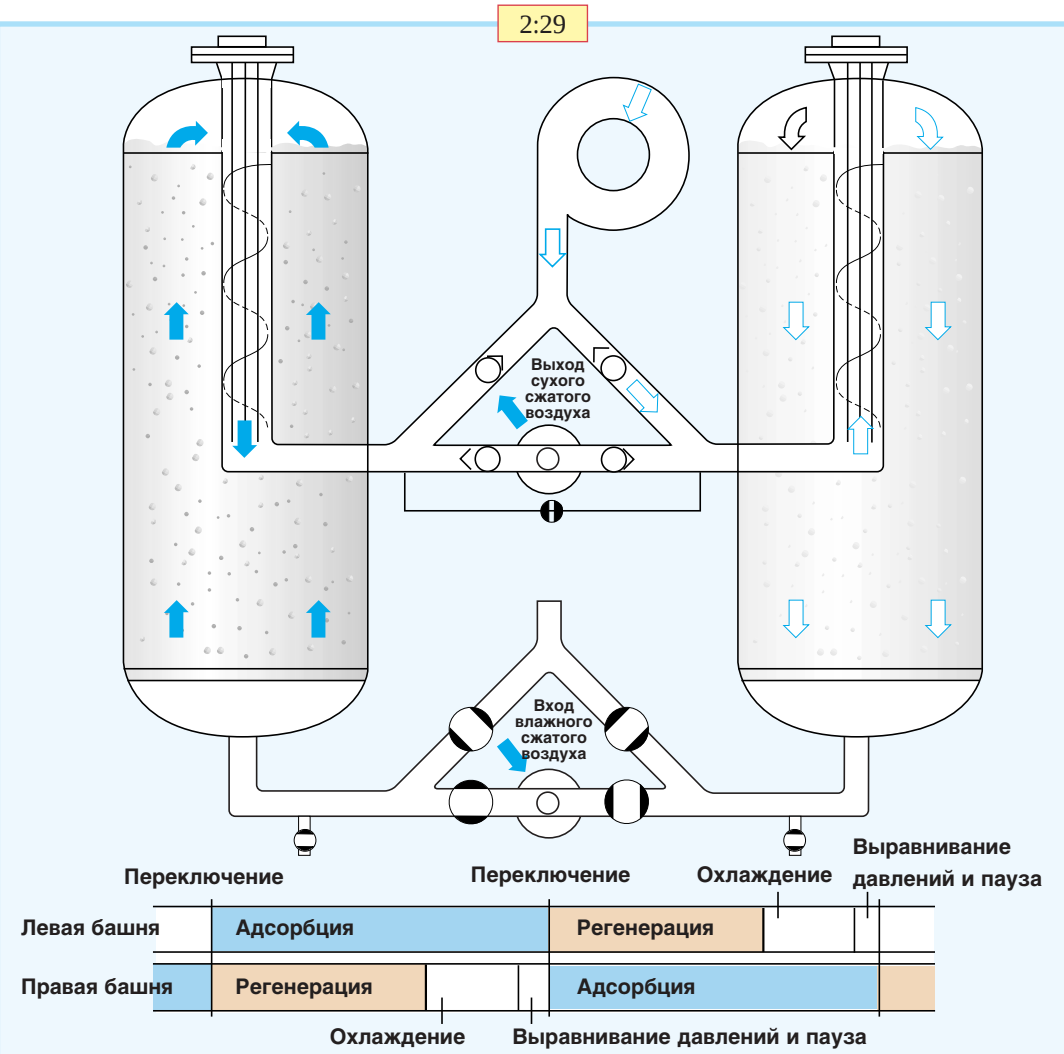
2.4.1.5. Адсорбционное осушение

Адсорбционные осушители бывают двух типов: холодной и горячей регенерации. Осушители холодной регенерации наилучшим образом подходят для компрессоров с небольшой производительностью. Процесс регенерации происходит с помощью сжатого воздуха и требует примерно 15–20% номинальной производительности осушителя при рабочем давлении 7 бар (изб.) и ТРД –20°C. Более низкая ТРД потребует большей утечки воздушного потока. При горячем регенеративном адсорбционном осушении влагопоглотитель регенерируется посредством электрического нагрева или нагрева от компрессора, что делает процесс более экономичным, чем холодная регенерация. Могут быть получены очень низкие точки росы (–30°C и ниже).

Перед адсорбционным осушением нужно обязательно обеспечить отделение и отвод конденсационной воды. Если сжатый воздух производится маслосмазываемым компрессором, перед осушителем нужно также устанавливать маслоотделительный фильтр. В большинстве случаев после адсорбционного осушителя требуется установка пылеулавливающего фильтра.

Существуют адсорбционные осушители для безмасляных винтовых компрессоров, в которых тепло, выделяемое компрессором, используется для регенерации влагопоглотителя. Осушители этого типа обычно оснащаются вращающимся барабаном с влагопоглотителем, в котором один сектор (одна четверть) регенерируется частью потока горячего сжатого воздуха (130–200°C), поступающего из компрессорной ступени. Затем регенерирующий воздух охлаждается, отводится

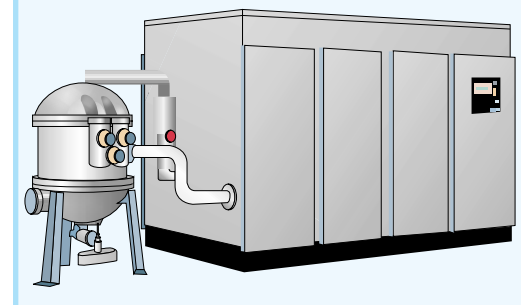
2:29



На схеме показано, что левая башня осушает сжатый воздух, в то время как правая башня регенерируется. Режимы окончательного охлаждения и выравнивания давлений башен переключаются автоматически.

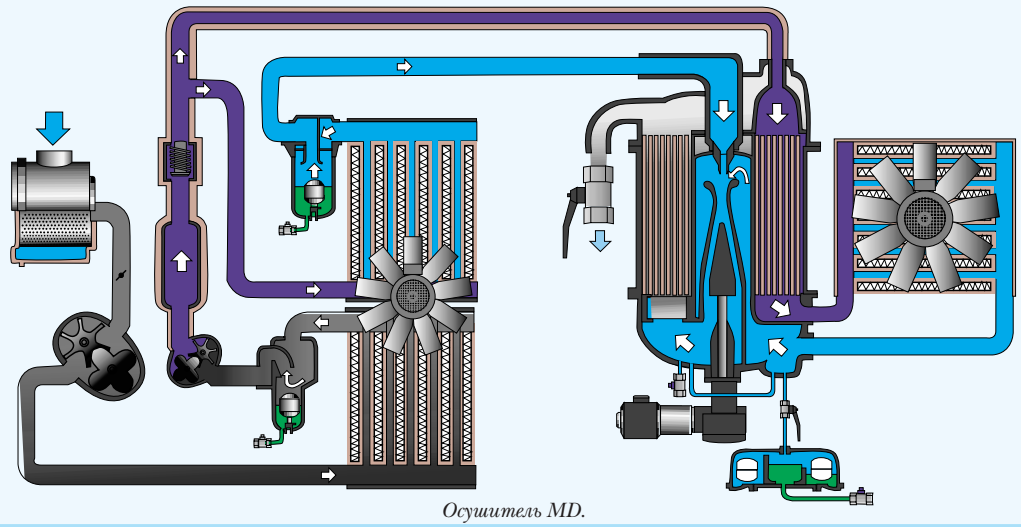
конденсат, и воздух возвращается через эжектор в основной поток воздуха. Оставшаяся поверхность сушильного барабана (три четверти) используется для осушения сжатого воздуха, поступающего из окончательного охладителя компрессора. Эта система работает без потерь сжатого воздуха. Потребление энергии таким осушителем ограничивается энергией, расходуемой на вращение барабана. Например, осушителю производительностью 1000 л/с требуется только 120 Вт. Кроме того, не теряется сжатый воздух, и не требуется ни масляного фильтра, ни пылеулавливающего фильтра.

2:30



Безмасляный винтовой компрессор с адсорбционным осушителем типа MD.

2:31



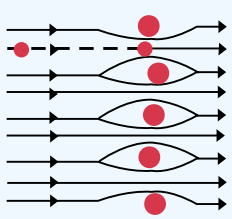
Осушитель MD.

2.4.2. Фильтры

Частицы, содержащиеся в проходящем через фильтр воздушном потоке, могут быть удалены несколькими способами. Если эти частицы больше отверстий в фильтрующем материале, то они отделяются механическим путем.

Обычно это относится к частицам с размерами, превышающими 1 мкм. С этой точки зрения эффективность фильтра тем выше, чем плотнее фильтрующий материал, состоящий из более тонких волокон. Частицы размером 0,1 – 1 мкм могут быть отделены, так как воздух огибает волокна фильтра, в то время как частицы по инерции движутся прямо к волокну. Ударившиеся о волокна фильтра частицы прилипают.

2:32

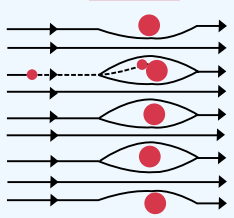


Работа фильтрующего материала с механическим отделением частиц. Так отделяются частицы размером более 1 мкм.

С этой точки зрения эффективность фильтра тем выше, чем выше скорость потока и чем плотнее фильтрующий материал, состоящий из более тонких волокон.

Очень мелкие частицы (<0,1 мкм) под воздействием столкновений с молекулами воздуха движутся в воздушном потоке случайным образом. Они «болтаются» в воздушном потоке, постоянно изменяя направление, и поэтому легко могут столкнуться с волокнами фильтра и прилипнуть. С этой точки зрения эффективность фильтра тем выше, чем ниже скорость потока и чем плотнее фильтрующий материал, состоящий из более тонких волокон.

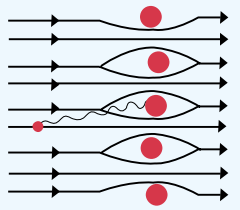
2:33



Частицы размером от 0,1 мкм до 1 мкм движутся в воздушном потоке случайным образом и отделяются при столкновении с волокнами фильтрующего материала.

Разделительная способность фильтра – результат улавливания частиц в каждом из перечисленных механизмов. В действительности каждый фильтр представляет собой своеобразный компромисс, так как ни один из фильтров не может эффективно работать во всем диапазоне размеров частиц. Даже скорость потока не является решающим фактором для способности фильтра отделять частицы различных размеров. Поэтому труднее всего отделять частицы размерами от 0,2 мкм до 0,4 мкм.

2:34



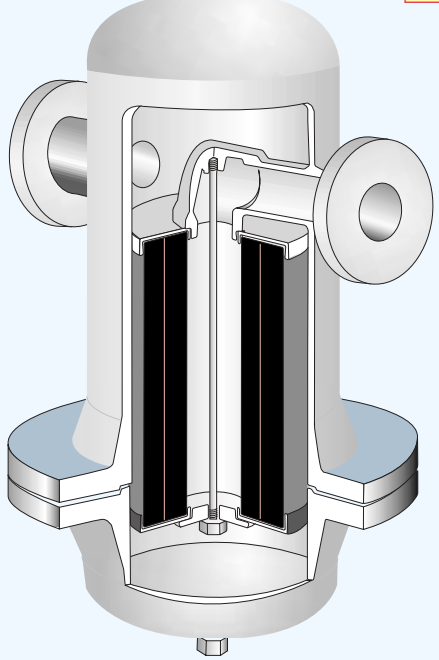
Частицы (<0,1 мкм), сталкивающиеся с волокнами в фильтре, отделяются, прилипая к поверхности волокон.

Эффективность разделения фильтра – величина специфическая для определенного размера частиц. Часто указываемая эффективность разделения в 90–95% означает, что 5–10% всех частиц, содержащихся в воздухе, проходит через фильтр. Более того, фильтр с заявленной эффективностью в 95% для частиц размером 10 мкм может пропускать частицы размером 30–100 мкм. Масло и вода в виде аэрозоля ведут себя как и другие частицы и тоже могут отделяться фильтром.

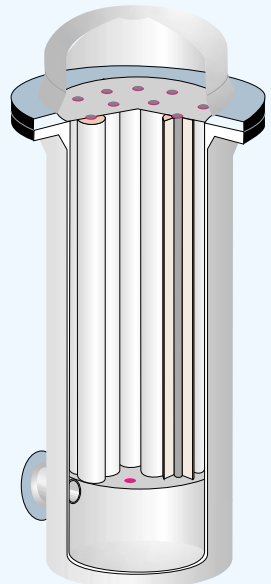
Капли, образующиеся на волокнах фильтрующего материала, стекают на дно фильтра под действием силы тяжести. Фильтр может отделять масло только в виде аэрозоля. Если нужно отделять масло в виде паров, фильтр должен содержать подходящий адсорбент, обычно активированный уголь.

Любая фильтрация приводит к падению давления, иными словами, к потере

2:35



Так выглядит пылеулавливающий фильтр. Большой корпус фильтра и большая площадь означают низкую скорость воздуха, меньшее падение давления и более продолжительный срок службы.



Фильтр для удаления масла, воды и частиц пыли. Фильтрующий элемент имеет малый диаметр и состоит из скрученных стекловолокон.

энергии в системе сжатого воздуха. Более тонкие фильтры с более плотной структурой вызывают большее падение давления и быстрее засоряются; поэтому требуют более частой замены, что приводит к увеличению расходов.

Соответственно, фильтры должны быть подобраны так, чтобы они не только справлялись с номинальным потоком, но и имели большой запас производительности; тогда падение давления из-за определенной степени засорения будет находиться в допустимых пределах.

2.5 Системы управления и регулирования

2.5.1. Общие сведения о регулировании

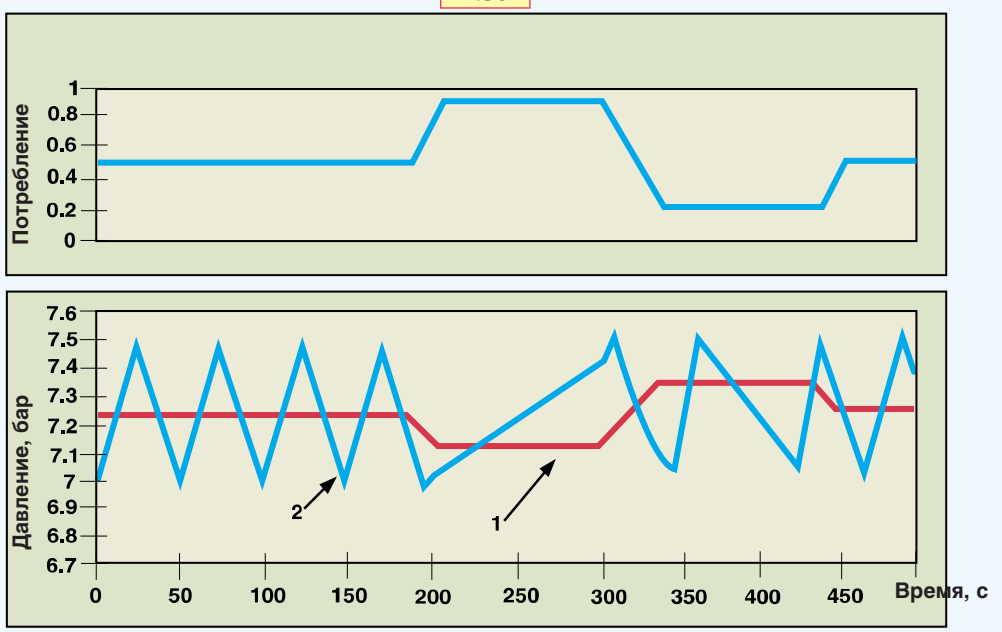
Во многих случаях в системе сжатого воздуха требуется поддерживать постоянное давление, в связи с чем возникает потребность управлять потоком сжатого воздуха из компрессорного центра. Существует много способов управления, и их применение зависит, например, от типа компрессора, допустимых отклонений давления, колебаний расхода сжатого воздуха и уровня допустимых потерь.

Потребление энергии составляет примерно 80% всех затрат на производство сжатого воздуха, а это значит, что систему регулирования нужно выбирать очень тщательно. По существу, различие в том, как компрессор работает, значительно важнее различий между типами компрессоров и их производителями. Идеальный вариант — если полная производительность компрессора может быть в точности подогнана под требуемый расход, например, тщательным подбором передаточного отношения редуктора, что часто встречается в случае компрессоров для химии и нефтехимии. Некоторые потребители являются саморегулирующимися, т.е. увеличение давления приводит к увеличению производительности, и поэтому они образуют стабильные системы. Примерами могут служить пневмотранспортеры, антиобледенительные и охладительные установки и т.д. Однако обычно производительность нужно регулировать, что зачастую делается с помощью встроенного в компрессор оборудования. Имеются две основные группы таких регулирующих систем:

1. Непрерывное регулирование производительности предполагает непрерывное управление приводным двигателем или клапаном в соответствии с изменениями давления. В результате обычно получаются небольшие изменения давления (от 0,1 до 0,5 бар), зависящие от усиления системы регулирования и скорости ее реакции.

2. Регулирование путем нагрузки и разгрузки является наиболее распространенной системой регулирования и предполагает колебания давления между двумя значениями. Регулирование производится путем полной остановки потока по достижении большего из этих значений (разгрузка) и возобновления потока (нагрузка), когда давление падает до нижнего предела. Величина изменения давления зависит от допустимого количества циклов нагрузки/разгрузки за единицу времени, но обычно находится в пределах диапазона от 0,3 до 1 бар.

2:36



1. Непрерывное регулирование производительности 2. Регулирование путем нагрузки и разгрузки

2.5.2. Принципы регулирования объемных компрессоров

2.5.2.1. Сброс давления

Первоначально для регулирования компрессора использовался разгрузочный клапан, который стравливал превышающее норму давление в атмосферу. Такой клапан простейшей конструкции может быть подпружинен; напряжение пружины в нем определяет конечное давление.

Часто вместо этого клапана используется сервоклапан, управляемый регулятором. С этим клапаном можно легко управлять давлением, и этот клапан действует в качестве разгрузочного клапана, когда компрессор запускается под давлением. Сброс давления требует больших затрат энергии, так как компрессор должен непрерывно работать, преодолевая полное противодавление.

Вариант, используемый в небольших компрессорах, заключается в том, что для разгрузки компрессора полностью открывается клапан, и компрессор работает против атмосферного давления. При использовании этого способа потребление энергии значительно уменьшается.

2:37

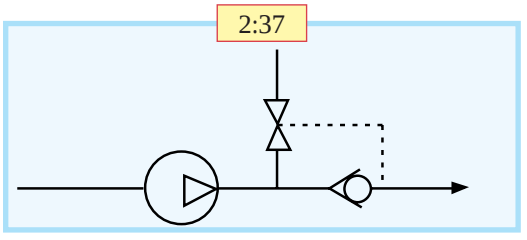


Схема регулирования производительности компрессора посредством сброса давления

2.5.2.2. Байпас

Байпасное регулирование в принципе выполняет ту же функцию, что и сброс давления. Разница заключается лишь в том, что воздух, выпускаемый для сброса давления, охлаждается и возвращается на вход компрессора. Этот способ часто используется в технологических компрессорах, когда газ непригоден или слишком дорог, чтобы стравливать его в атмосферу.

2:38

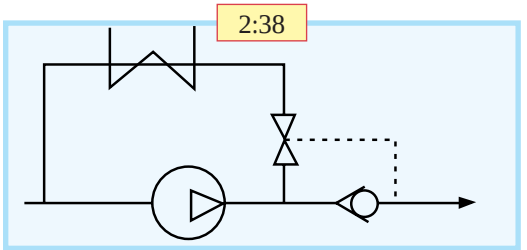


Схема байпасного регулирования производительности компрессора

2.5.2.3. Дросселирование входа

Дросселирование — легкий способ уменьшения потока. Он позволяет увеличивать степень повышения давления в компрессоре, которая зависит от созданного на входе разрежения. Однако вследствие малого диапазона регулирования его применение ограниче-

но. Компрессоры с нагнетанием жидкости, у которых большой допустимый диапазон отношений давлений, могут регулироваться этим способом вплоть до 10% от максимальной производительности. Этот способ требует относительно больших затрат энергии из-за большой степени повышения давления.

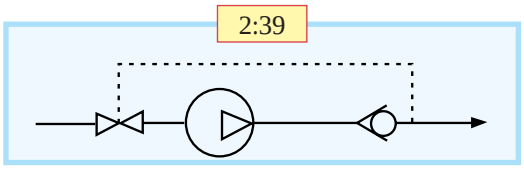


Схема регулирования производительности компрессора посредством дросселирования входа

2.5.2.4. Сброс давления с дросселированием входа

В настоящее время чаще всего используется способ регулирования, который сочетает максимальный диапазон регулирования (0–100%) с низким потреблением энергии – только 15–20% мощности полной нагрузки при разгруженном компрессоре (нулевой поток). Впускной клапан закрывается, но в нем остается маленькое отверстие. В это время выпускной клапан открывается и стравливает выходящий из компрессора воздух.

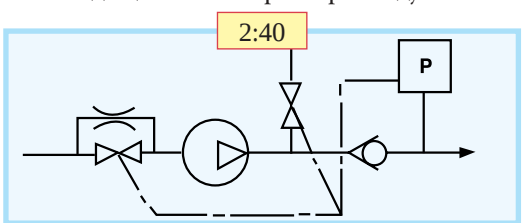


Схема регулирования производительности компрессора посредством дросселирования входа и сброса давления

Затем компрессорный элемент работает с разрежением на входе и при низком противодавлении. Важно, чтобы сброс давления производился быстро и стравливаемый объем был небольшой. Это позволяет избежать излишних потерь при переходе от работы под нагрузкой к разгрузке. В системе требуется дополнительная емкость – воздушный ресивер, объем которого определяется приемлемой разностью между давлениями нагрузки и разгрузки и допустимым количеством циклов разгрузки в час.

2.5.2.5. Пуск/останов

Давление компрессоров мощностью менее 5–10 кВт часто регулируется следующим образом. Когда давление достигает верхнего предела, электродвигатель останавливается, а когда давление переходит нижний предел, электродвигатель запускается вновь. Этот способ требует наличия в системе воздушного ресивера большого объема или большой разницы между давлениями пуска и останова, что позволяет уменьшить нагрузку на электродвигатель. Это эффективный способ регулирования, однако следует иметь в виду, что количество пусков в единицу времени должно быть невелико.

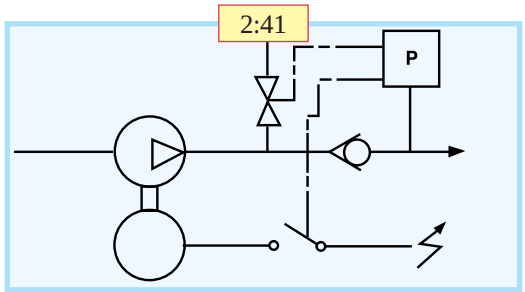


Схема регулирования производительности компрессора посредством пуска/останова

2.5.2.6. Регулирование скорости вращения

Двигатель внутреннего сгорания, турбина или электродвигатель с регулируемой частотой могут управлять числом оборотов компрессора, а следовательно, и потоком. Это эффективный способ получения постоянного давления на выходе при низком потреблении энергии.

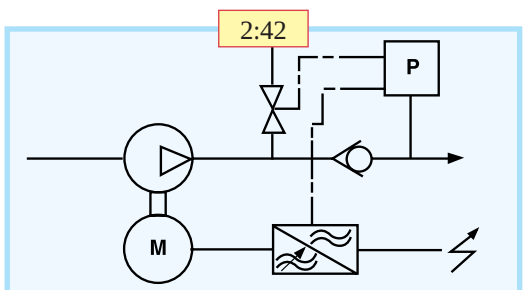


Схема регулирования производительности компрессора посредством регулирования частоты вращения

Диапазон регулирования изменяется в зависимости от типа компрессора, но наибольший диапазон получается в компрессорах с нагнетанием жидкости. Зачастую регулирование числа оборотов комбинируется со сбросом давления с дросселированием или без дросселирования входа при малой нагрузке.

2.5.2.7. Регулируемый выпускной канал

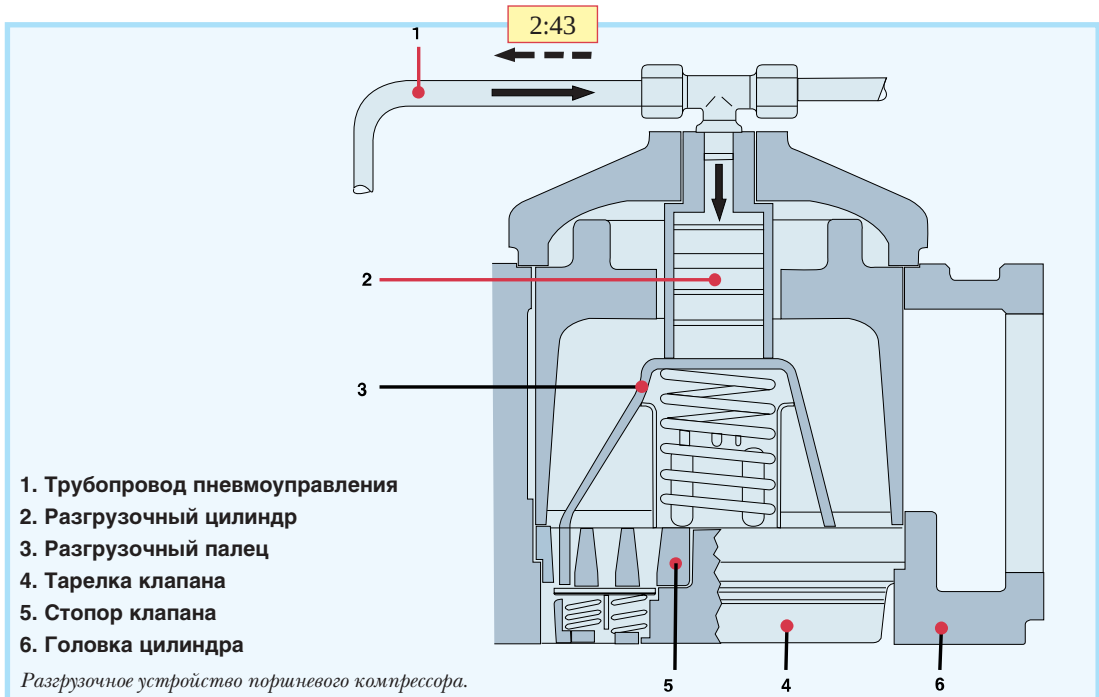
Производительность винтовых компрессоров можно регулировать, перемещая положение выпускного канала вдоль оси винта по направлению к впускному каналу. Однако этот способ требует большого расхода энергии на дополнительные устройства и сравнительно редко используется.

2.5.2.8. Разгрузка впускным клапаном

Эффективная разгрузка поршневых компрессоров возможна при использовании механического способа, благодаря которому впускные клапаны остаются в открытом положении. Воздух всасывается и выталкивается в соответствии с движением поршня. Потери энергии в этом случае минимальны и зачастую не превышают 10% мощности на валу под нагрузкой. В компрессорах двойного действия обычно используется многоступенчатая разгрузка, когда один из цилиндров на протяжении такта разгружается и тем самым достигается оптимальное согласование производительности с потреблением. Еще один способ, используемый для газовых компрессоров, позволяет держать клапаны открытыми во время части рабочего хода поршня и тем самым осуществлять непрерывное регулирование потока.

2.5.2.9. Объем мертвого пространства цилиндра

Регулирование объема мертвого пространства цилиндра поршневого компрессора позволяет уменьшать степень его заполнения и, следовательно, регулировать производительность. Объем мертвого пространства цилиндра изменяется с помощью присоединенных снаружи емкостей.



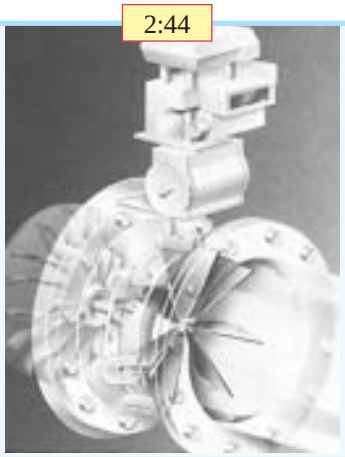
Разгрузочное устройство поршневого компрессора.

2.5.2.10. Нагрузка — разгрузка — останов

Это наиболее распространенный способ регулирования, используемый в компрессорах мощностью свыше 5 кВт. В этом способе сочетаются широкий диапазон регулирования с низким уровнем потерь. На практике используются комбинация пуска/останова и различные разгрузочные системы. См. ниже пункт 2.5.4.2.

2.5.3. Принципы регулирования динамических компрессоров

2:44



Внешний вид входного направляющего аппарата

2.5.3.1. Дросселирование входа

Динамические компрессоры допускают возможность непрерывного управления производительностью посредством дросселирования входа. Минимальный поток определяется достижением такой степени повышения давления, которая является границей помпажа: работа машины становится неустойчивой.

Диапазон регулирования определяется конструкцией машины, например количеством ступеней и конструкцией рабочего колеса, а также в значительной степени такими внешними факторами, как противодавление, температура всасываемого воздуха и температура охлаждающей жидкости. Обычно минимальный поток находится в пределах от 60% до 85% максимального потока.

2.5.3.2. Лопатки входного направляющего аппарата

Лопатки устроены в виде радиальных пластин на входе, заставляющих входящий газ закручиваться, поток газа при этом дросселируется. Этот способ действует так же, как и дросселирование, но с более широким диапазоном регулирования и улучшенным использованием энергии. Типичное значение нижнего предела регулирования – до 50–60% расчетного потока. Имеется также возможность в некоторой степени увеличить производительность и давление компрессора поворотом лопаток в противоположном направлении, однако это немного ухудшает эксплуатационные качества.

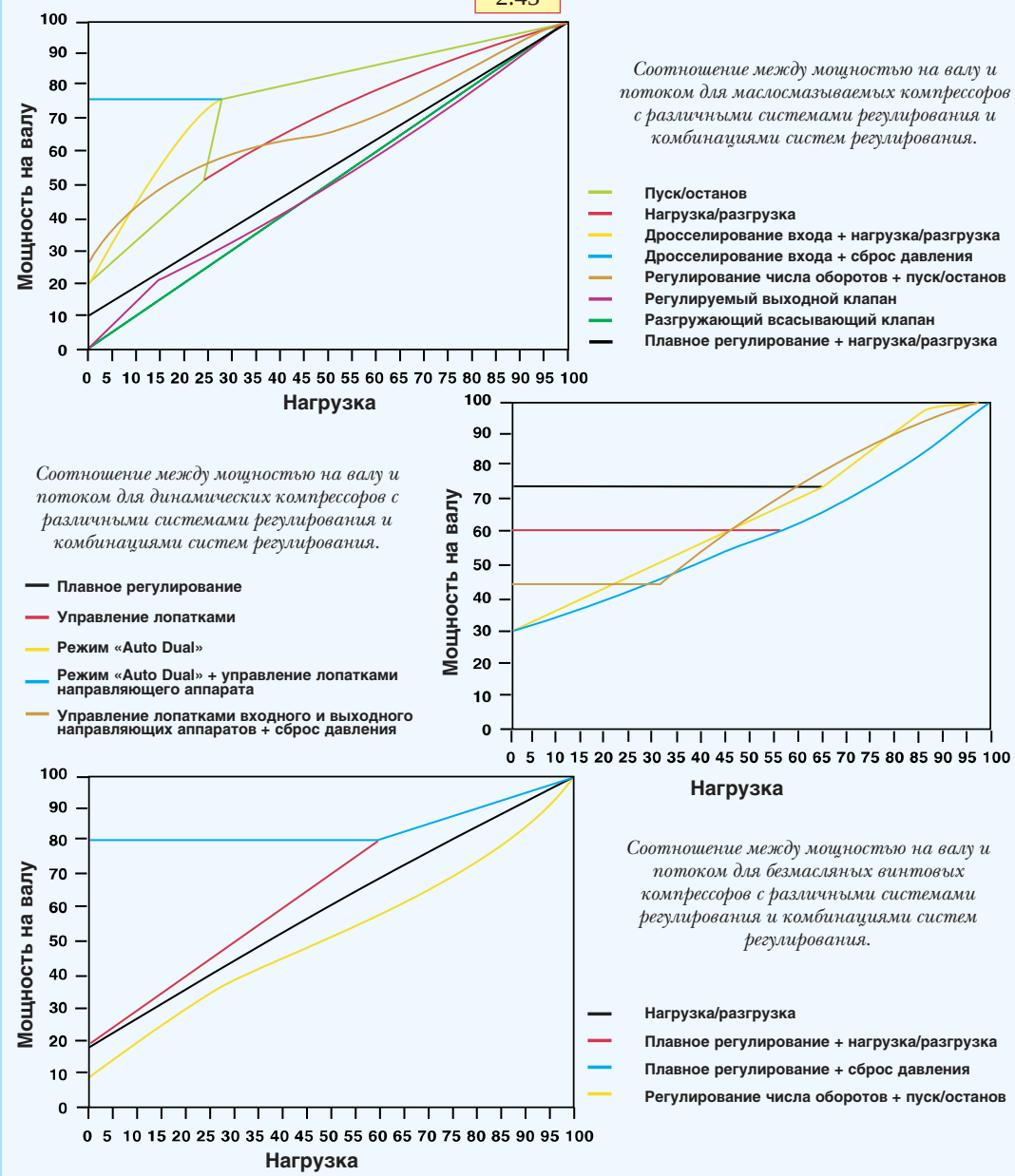
2.5.3.3. Лопатки выходного направляющего аппарата (диффузор)

Для того чтобы еще больше расширить диапазон регулирования, можно также управлять потоком в диффузоре компрессорной ступени. Обычно можно снизить производительность вплоть до 30% при поддержании нужного давления. Как правило, использование этого способа ограничивается одноступенчатыми компрессорами (из-за сложности и роста затрат).

2.5.3.4. Сброс давления

Для регулирования динамических компрессоров первоначально также использовался разгрузочный клапан, который стравливал излишки сжатого воздуха в атмосферу. Этот способ, в принципе, не отличается от сброса давления в поршневых компрессорах.

2:45



Соотношение между мощностью на валу и потоком для маслосмазываемых компрессоров с различными системами регулирования и комбинациями систем регулирования.

Соотношение между мощностью на валу и потоком для динамических компрессоров с различными системами регулирования и комбинациями систем регулирования.

Соотношение между мощностью на валу и потоком для безмасляных винтовых компрессоров с различными системами регулирования и комбинациями систем регулирования.

2.5.3.5. Нагрузка — разгрузка — останов

В то время как дросселирование входа компрессора ограничивается пределом помпажа, данный способ регулирования может быть реализован двумя путями:

1. Дросселирование. Избыточный поток выпускается в атмосферу (или на вход), однако при неизменном потреблении энергии.

2. Режим «Auto Dual». Система регулирования практически полностью закрывает впускной клапан, а выпускной клапан в это время открывается в атмосферу (сравните с поршневым компрессором). Однако мощность, потребляемая в режиме разгрузки, относительно велика – свыше 20% мощности полной нагрузки и зависит от конструкции рабочего колеса и т.д.

2.5.3.6. Регулирование числа оборотов

Регулирование числа оборотов чаще всего используется в компрессорах, в которых нужно регулировать поток и допускаются колебания давления. Когда регулирование осуществляется с постоянным давлением, оно не дает каких-либо преимуществ по сравнению с другими способами регулирования.

2.5.4. Управление и контроль

2.5.4.1. Общие сведения

Основные принципы регулирования различных компрессоров приводятся в разделах 2.5.2 и 2.5.3. Для управления компрессорами, в соответствии с этими принципами, требуется система регулирования, которая может предназначаться либо для собственно компрессора, либо для компрессорной установки в целом.

Развитие систем регулирования происходит быстро, и они становятся все более совершенными. Релейные системы были заменены программируемыми логическими контроллерами (ПЛК), которые, в свою очередь, были заменены микрокомпьютерными системами, ориентированными на управляемый объект. Конструкция системы зачастую представляет собой попытку оптимизации ее работы и затрат на систему.

Ниже описываются несколько систем управления и контроля для наиболее распространенных типов компрессоров.

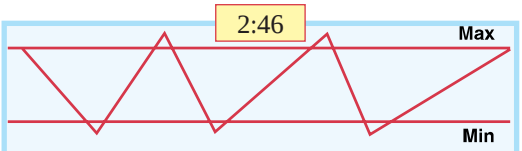
2.5.4.2. Нагрузка — разгрузка — останов

Самым распространенным методом регулирования является регулирование объемных компрессоров по принципу «вырабатывает сжатый воздух» / «не вырабатывает сжатый воздух» (нагружен / разгружен), см. подразделы 2.5.2.4 и 2.5.2.5.

Когда требуется сжатый воздух, сигнал подается на электромагнитный клапан, который, в свою очередь, устанавливает входную заслонку в полностью открытое положение. Заслонка может устанавливаться либо в полностью открытое положение (компрессор нагружен), либо в полностью закрытое положение (компрессор разгружен) — без промежуточного положения.

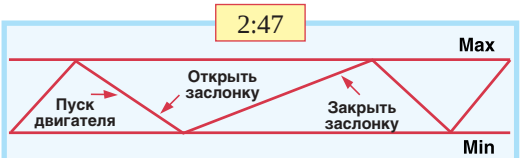
В традиционном устройстве управления, в настоящее время обычно используем в малых компрессорах, имеется реле давления, устанавливаемое в системе сжатого воздуха. Реле давления имеет два установленных значения: одно для минимального давления (= нагрузке), а другое для максимального давления (= разгрузке). Компрессор будет работать в пределах этих заданных значений, например 0,5 бар. Если потребность в сжатом воздухе мала или отсутствует, компрессор работает разгруженным (на холостом ходу). Продолжительность периода холостого хода ограничивается таймером (установленным, например, на 20 мин). По истечении этого времени компрессор останавливается и не запускается, пока давление не упадет до минимального значения. Это традиционный, хорошо зарекомендовавший себя на практике метод управления. Его недостатком этого способа является замедленное регулирование.

2:46



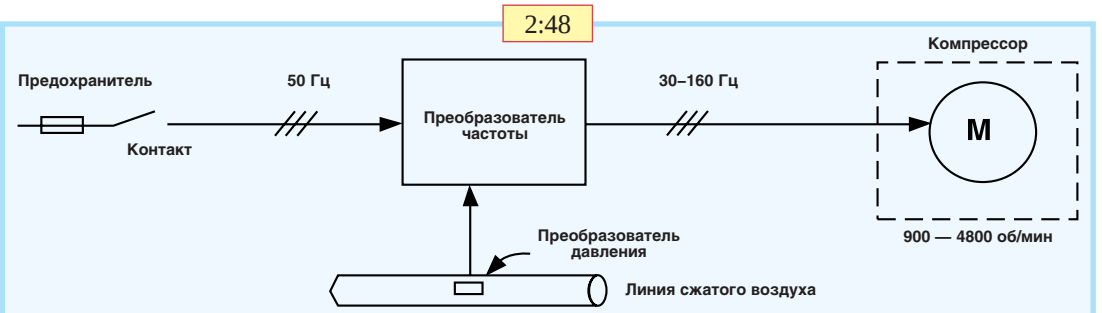
Диапазон значений давления от минимального до максимального давления, в пределах которого работает компрессор. «Min.» = нагрузка, «Max.» = разгрузка.

2:47



Усовершенствованная система регулирования может подавать сигнал на двигатель, пускатель и регулятор «в нужное время».

2:48



Система с регулированием скорости компрессора.

Дальнейшим развитием такой традиционной системы является замена реле давления на аналоговый преобразователь давления и быстродействующую электронную систему регулирования. Аналоговый преобразователь может совместно с системой регулирования воспринимать, насколько быстро изменяется давление в системе. Система своевременно запускает двигатель и управляет открытием и закрытием заслонки. Это дает быстрое и надежное регулирование в пределах ±0,2 бар.

Если воздух не потребляется, давление остается неизменным и компрессор работает без нагрузки (на холостом ходу). Продолжительность периода холостого хода определяется тем, сколько циклов пуска и останова может выдержать двигатель без перегрева, и соображениями экономии эксплуатационных расходов. Последнее возможно, так как система может анализировать тренды потребления сжатого воздуха и на основе этого принимать решение, остановить ли двигатель или продолжить работу на холостом ходу.

2.5.4.3. Регулирование числа оборотов

Компрессоры с приводом, число оборотов которого управляется электроникой, предоставляют великолепную возможность поддерживать давление сжатого воздуха постоянным в пределах очень узкого диапазона давлений.

Примером такого решения может послужить преобразователь частоты, который регулирует частоту вращения обычного асинхронного двигателя.

Производительность компрессора можно точно подогнать к потреблению сжатого воздуха. Для этого выполняется непрерывное и точное измерение давления в системе. Затем сигналы давления подаются на преобразователь частоты, питающий электродвигатель, и управляют его работой и тем самым скоростью вращения двигателя. Давление в системе может поддерживаться с точностью до ±0,1 бар.

2.5.5. Системы контроля

Все компрессоры оборудованы определенного рода аппаратурой контроля с целью защиты компрессора и предотвращения непроизводительного простоя. Для определения текущего состояния компрессорной установки используются датчики. Информация, поступающая от датчиков, обрабатывается системой контроля, которая подает сигнал например на исполнительный механизм.

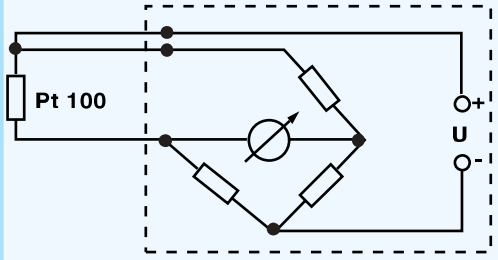
Датчики температуры или давления часто состоят из воспринимающего элемента и преобразователя сигнала. Воспринимающий элемент (сенсор) определяет измеряемую величину. Преобразователь конвертирует выходной сигнал сенсора в электрический сигнал, пригодный для дальнейшей обработки системой управления.

2.5.5.1. Измерение температуры

Для измерения температуры обычно используется резистивный терморезистор.

В качестве преобразователя используется металлический резистор, сопротивление которого изменяется с ростом температуры. Изменение сопротивления измеряет-

2:49



Пример 3-проводного подключения резистивного термометра в 100 Ом. Резистивный термометр и соединительные провода подключены к измерительному мосту.

ся и преобразуется в сигнал величиной 4–20 мА. Наиболее распространенным резистивным термометром является Pt100. Номинальное сопротивление при 0° С равно 100 Ом.

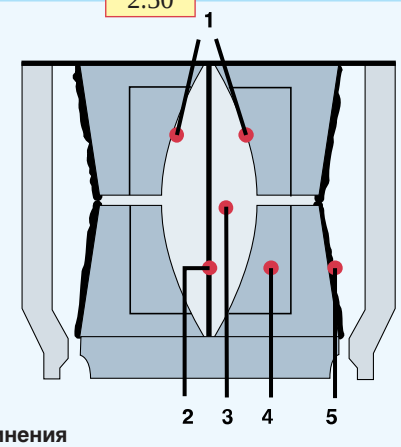
Термистор представляет собой полупроводник, сопротивление которого меняется с изменением температуры. Его можно использовать в качестве устройства управления по температуре, например, в электродвигателе. Чаще всего используются терморезисторы с положительным температурным коэффициентом (ПТК). Сопротивление терморезистора с ПТК незначительно изменяется с повышением температуры вплоть до особой точки, в которой сопротивление растет скачком. Термистор подключается к контроллеру, который воспринимает этот «скачок сопротивления» и выдает сигнал, например на остановку двигателя.

2.5.5.2. Измерение давления

Для измерения давления используется воспринимающий давление объект, например мембрана. Затем механический сигнал от мембраны преобразуется в электрический сигнал величиной 4–20 мА или 0–5 В.

Преобразование механического сигнала в электрический может происходить в

2:50



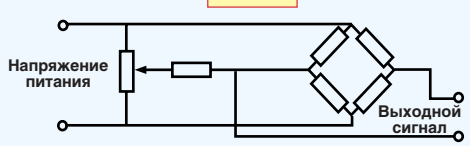
1. Соединения
2. Измерительная мембрана
3. Силиконовое масло
4. Неподвижный изолятор
5. Защитная мембрана

Пример емкостной системы измерения давления.

различных измерительных системах. В емкостной системе давление передается на мембрану. Положение измерительной мембраны воспринимается обкладкой конденсатора и конвертируется преобразователем в пропорциональные давлению постоянное напряжение или постоянный ток.

Резистивная измерительная система представляет собой тензодатчик, подключенный к мостовой системе и прикрепленный к мембране. Когда мембрана подвергается воздействию давления, датчик выдает низковольтный сигнал (мВ). Затем он усиливается до необходимого уровня. В пьезоэлектрической системе используются специальные кристаллы (например, кварц),

2:51



Мостовая схема с тензодатчиком.

генерирующие на своих поверхностях электрические заряды. Величина заряда пропорциональна силе, приложенной к поверхности кристалла (т.е. давлению).

2.5.5.3. Контроль

Контрольные приборы адаптируются к определенному типу компрессора, что влечет за собой использование приборов широкого диапазона приборов. Малые поршневые компрессоры оснащаются только обычным защитным выключателем, отключающим двигатель при перегрузке, в то время как в больших винтовых компрессорах имеется целый ряд защитных выключателей – преобразователей, реагирующих на перегрузку, температуру, давление и т.д.

В малых, наиболее простых машинах, когда защита выдает аварийный сигнал, управляющее устройство выключает компрессор, и машина блокируется от повторного запуска. В некоторых случаях лампочка аварийной сигнализации может показывать причину аварийного сигнала.

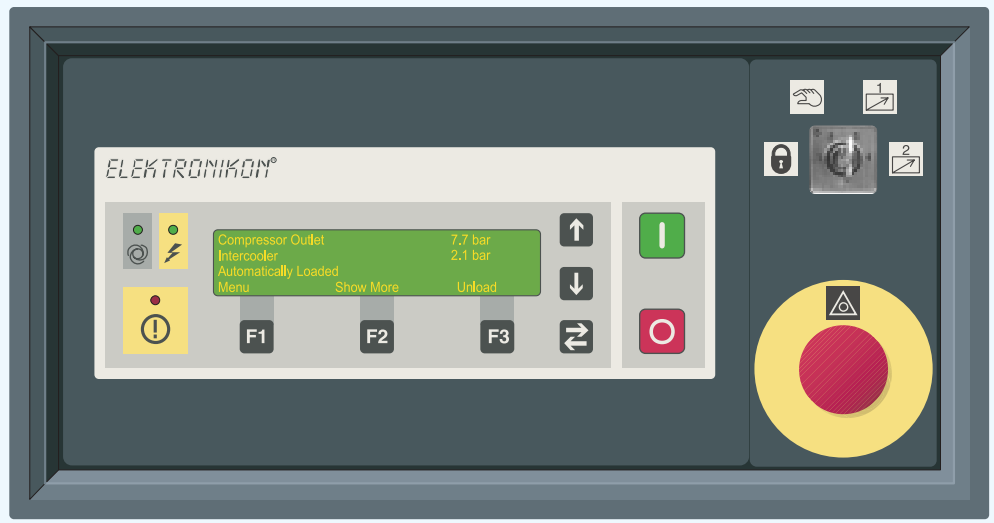
В современных компрессорах их работу компрессора можно отслеживать с панели управления, например, непосредственно считывая показания давления, температуры, состояния компрессора и т.д. Когда значение выходного сигнала измерительного преобразователя приближается к аварийному пределу, контрольная аппаратура выдает предупреждающий сигнал. Это сделано для того, чтобы можно было принять меры до выключения компрессора. Если компрессор останавливается аварийным сигналом, его перезапуск блокируется до тех пор, пока не будет устранена неисправность или не будет произведен ручной сброс защиты.

Поиск неисправности значительно облегчен в компрессорах, оснащенных памятью, в которой регистрируются значения параметров, например температуры, давления и режима работы. Объем памяти позволяет запоминать данные, например за последние 24 часа. Используя эти данные, можно определить тенденцию за последние сутки, а затем, пользуясь логикой поиска неисправностей, быстро отследить причину остановки компрессора.

2.5.6. Комплексная система управления

При использовании системы, состоящей из нескольких компрессоров, требуется координация работы отдельных компрессоров. Существует много факторов в пользу комплексной системы. Распределение рабочего времени между машинами

2:52



Удобная для пользователя панель управления показывает все эксплуатационные параметры компрессора, например давления и температуры; данные логически группируются для непосредственного считывания.

2:53

Разница диапазонов давления для пяти компрессоров, управляемых традиционными реле давления (на рисунке слева), и для тех же компрессоров, управляемых системой регулирования с аналоговым преобразователем (на рисунке справа).

уменьшает риск непредусмотренной остановки. Облегчается также планирование технического обслуживания компрессоров. Если во время работы что-то произойдет, подключатся резервные машины.

2.5.6.1. Селектор пусковой последовательности

Простейшим и наиболее распространенным видом основной системы управления является хорошо зарекомендовавший себя селектор пусковой последовательности. Его задачей является равномерное распределение времени работы и количества пусков между компрессорами, объединенными в систему. Последовательность пусков компрессоров может переключаться вручную или автоматически, в соответствии с графиком работы. В таком простейшем селекторе используется преобразователь для включения/выключения по давлению, по одному преобразователю на компрессор, что представляет собой простое и практичное решение.

Недостатком этого метода являются сравнительно большие промежутки между уровнями нагрузки и разгрузки разных компрессоров, что, в свою очередь, приводит к относительно широкому диапазону давления (интервал между уровнями максимального и минимального давления) всей установки. Поэтому селектор такого типа не следует использовать для управления более чем 2–3 компрессорами.

В более совершенных селекторах пусковой последовательности применяется то же самое управление пусковой последовательностью, но с единственным централизованным аналоговым преобразователем давления. Он управляет компрессорами так, чтобы поддерживать ширину диапазона колебаний давления всей установки в пределах нескольких десятых бар, и может управлять 2–7 машинами. Селектор пусковой последовательности этого типа, который выбирает машины в жестко заданной последовательности, не учитывает производительность компрессоров. Поэтому он подходит в тех случаях, когда подключаются компрессоры приблизительно одного и того же типоразмера.

2:54

Компрессорная установка с центральным управлением.

2.5.7. Центральное управление

Центральное управление компрессорами обычно предполагает использование интеллектуальных систем управления. Основные требования, предъявляемые к системе,– способность поддерживать заданное давление в узких границах и максимально экономичная работа всей установки. Для выполнения этих задач система должна быть способна прогнозировать события в системе компрессоров и в то же время отслеживать нагрузку на компрессор.

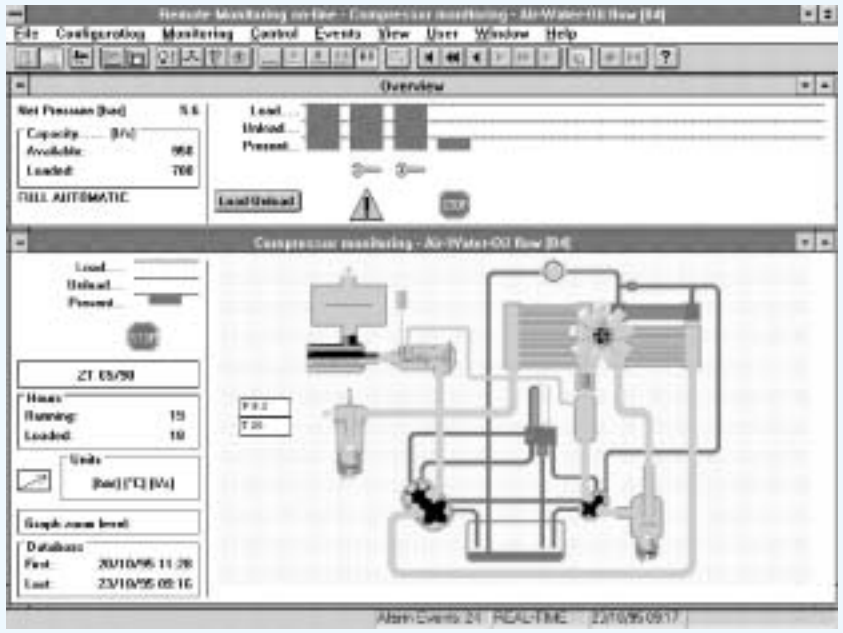
Система управления воспринимает скорость изменения давления в сторону увеличения или уменьшения (т.е. производную давления по времени). Используя эти значения, система может выполнять вычисления, что дает возможность прогнозировать потребление сжатого воздуха и, например, разгружать и нагружать или запускать и останавливать машины. В правильно рассчитанных установках давление поддерживается с точностью до ±0,2 бар.

Для обеспечения экономичности эксплуатации чрезвычайно важно, чтобы центральная система управления могла выбирать компрессор или комбинацию компрессоров, если в систему объединены компрессоры с разной производительностью.

Компрессоры должны фактически непрерывно работать под нагрузкой, чтобы минимизировать время холостого хода и, следовательно, достичь наибольшей экономичности.

Еще одно преимущество комплексной системы контроля заключается в том, что к этой системе можно подключать старые машины и тем самым сравнительно легким способом модернизировать всю установку. Эксплуатация становится более экономичной, надежность возрастает.

2:55



Обзорный экран дистанционного контроля. В верхней части рисунка показано состояние установки. Три машины работают, одна остановлена. В нижней части рисунка приведены подробные данные о компрессоре 4. Среди них блок-схема системы сжатого воздуха, охлаждающей воды и масла, а также важнейшие параметры компрессора.

2.5.8. Дистанционный контроль

В некоторых компрессорных установках может возникнуть необходимость в дистанционном контроле компрессора и управлении его работой. В небольших установках очень легко подключить к компрессору аварийную сигнализацию, индикацию эксплуатационных параметров и т.д. Как правило, можно также устроить дистанционный пуск и останов.

Что касается крупных установок, где речь идет о больших затратах, то для них установка централизованного контроля потребует обоснования. Система контроля должна состоять из аппаратуры, которая обеспечивает непрерывный обзор системы, а также предоставляет возможность доступа к отдельным машинам для контроля параметров, например давления в промежуточном охладителе, температуры масла и т.д.

Система контроля должна также содержать память, которая позволит регистрировать события, произошедшие за прошедшие 24 часа. Регистрация создает основу для создания измерительных кривых и дает возможность выяснить, имеется ли тенденция отклонения параметров от заданных. Эти кривые служат основой для непрерывной работы или запланированного останова.

Система часто предоставляет отчеты о состоянии компрессорной установки: это может быть и общий обзор, и подробное описание состояния отдельных машин.

Глава 3 Расчет компрессорных установок

3.1 Определение параметров компрессорных установок

3.1.1. Общие сведения

В процессе расчета компрессорной установки необходимо принять ряд решений для того, чтобы система отвечала требованиям потребителя, была экономичной в эксплуатации и пригодной к дальнейшему расширению.

Определяющим фактором при расчетах является оборудование или процесс, потребляющие сжатый воздух. Поэтому чтобы получить надежную основу для продолжения расчетов параметров, следует начинать с их описания.

При расчетах нужно вычислить или оценить потребление воздуха, резерв производительности, предусмотреть возможность расширения установки в будущем. Рабочее давление – решающий фактор, так как оно оказывает значительное влияние на потребление энергии. Иногда оказывается экономически более выгодным использовать для различных диапазонов давлений разные компрессоры.

Качество сжатого воздуха – уже не только вопрос содержания водяного пара, но во все большей степени связано с охраной окружающей среды. Запах и содержание микроорганизмов также являются важными факторами, негативно влияющими на качество продукции, процент брака, производственные условия и внешнюю среду. При решении вопроса, будет ли управление компрессорной установкой централизованнным или децентрализованным, учитываются требования к свободному пространству и возможному в будущем расширению установки. С экономической и экологической точек зрения исследование возможности рекуперации энергии на начальном этапе становится все более важным, поскольку предполагает очень быструю отдачу капиталовложений.

При проектировании компрессорных установок очень важно проанализировать все эти аспекты не только для текущих потребностей, но и будущих. Только в этом случае становится возможным спроектировать установку, обладающую значительной гибкостью.

3.1.1.1. Расчет рабочего давления

Необходимое рабочее давление определяется производящим сжатый воздух оборудованием, являющимся частью установки. Рабочее давление зависит не только от давления компрессора, но также и от конструкции системы сжатого воздуха с ее трубопроводами, клапанами, осушителями сжатого воздуха, фильтрами и т.д.

3:1

Подключенное оборудование	Номинальное потребление сжатого воздуха	Коэффициент использования (макс./мин.)	Полное потребление сжатого воздуха (мин./макс.)
Инструменты, всего			
Производственные линии, всего			
Технологические линии, всего			

Параметры потребления сжатого воздуха подключенным оборудованием можно получить, например, из каталогов инструментов и описаний производственного оборудования. Коэффициент использования позволяет легко вычислить верхний и нижний пределы общего потребления сжатого воздуха.

Для оборудования различных типов в системе может потребоваться разное давление. Обычно давление установки определяется самым высоким требуемым давлением, а остальное оборудование оснащается редукционными клапанами на месте потребления сжатого воздуха. В экстремальных случаях этот способ оказывается неэкономичным, и тогда для специальных задач можно устанавливать отдельные компрессоры.

Нужно также учитывать, что с увеличением потока быстро падает давление. Если ожидаются изменения расхода сжатого воздуха, то по экономическим соображениям следует приспособить установку к этим условиям.

Падение давления на фильтрах и специальных пылезащитных фильтрах вначале невелико, но со временем фильтры засоряются и требуют замены при определенном падении давления, и это тоже нужно учитывать при проведении расчетов. Регулирование производительности компрессора также приводит к колебаниям давления, что также должно учитываться в расчетах. Расчеты лучше систематизировать, как показано в следующем примере:

Наименование	Падение давления, бар (изб.)
Конечный пользователь	6
Фильтр тонкой очистки	0,1–0,5
Трубопроводная система	0,2
Пылезащитный фильтр	0,1–0,5
Осушитель	0,1
Диапазон регулирования компрессора	0,5
Максимальное рабочее давление компрессора	7,0–7,8

Давление, которое должен производить компрессор, определяется главным образом конечным пользователем и падением давления между компрессором и потребителем. Рабочее давление компрессора, таким образом, можно получить, добавив к требующемуся давлению значение падения давления в системе (см. пример).

3.1.1.2. Расчет потребления сжатого воздуха

Номинальное потребление сжатого воздуха определяется его потребителями. Оно вычисляется суммированием потребления воздуха всеми пневматическими инструментами и подключенным технологическим оборудованием, учитывая коэффициент использования, который определяется опытным путем. Нужно также учесть утечки, износ и возможные изменения потребления сжатого воздуха в будущем.

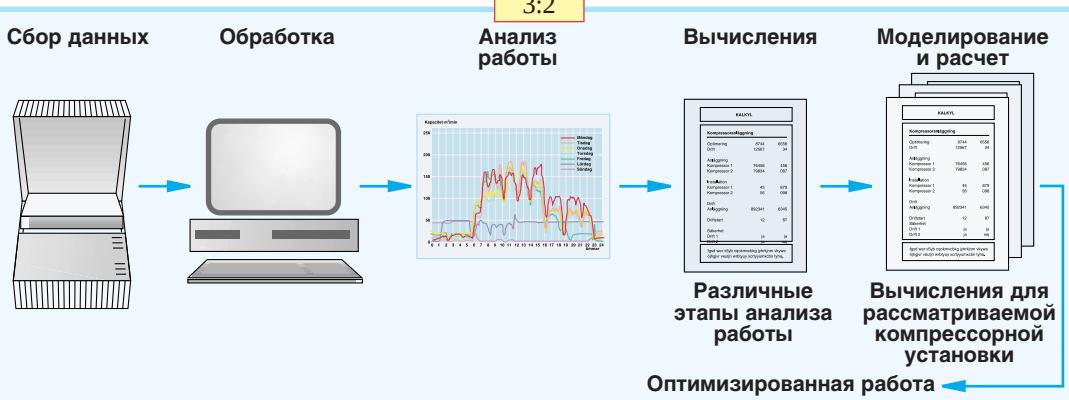
Простым способом определения текущего и будущего потребления сжатого воздуха является сложение расходов сжатого воздуха всего присоединенного оборудования с учетом коэффициента использования.

Для проведения такого расчета необходим перечень оборудования, потребляющего сжатый воздух, дополненный предполагаемыми коэффициентами использования и параметрами потребления (сжатого воздуха). Если данных о потреблении сжатого воздуха или коэффициентах использования не имеется, можно использовать стандартные значения. Определение коэффициента использования для различных инструментов не всегда простое дело. В этом случае расчетные значения лучше сравнивать с измеренным потреблением аналогичного оборудования.

Например, такие большие потребители энергии, как шлифовальные станки или пескоструйные машины, зачастую непрерывно работают достаточно продолжительное время (3–10 мин), несмотря на низкий общий коэффициент использования. Это не соответствует повторно-кратковременному режиму, и поэтому для расчета суммарного максимального потребления сжатого воздуха нужно определить, сколько машин будут работать одновременно.

На деле производительность компрессора можно определить как суммарное номинальное потребление сжатого воздуха. Собственная производительность ком-

3:2

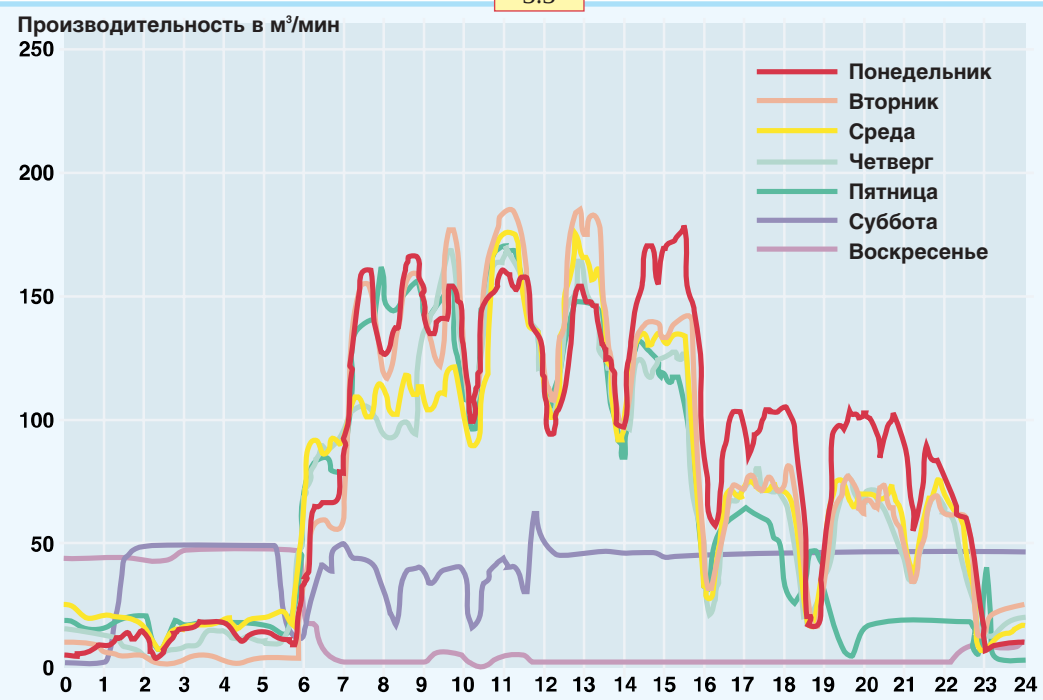


Устаревший компрессор, используемый в качестве резервного источника сжатого воздуха, может использоваться также в качестве недорогого резервного источника энергии.

прессора должна покрывать потребление сжатого воздуха. Расчетная резервная мощность определяется в первую очередь потерей продукции, которая может произойти при нарушении подачи сжатого воздуха.

Количество компрессоров и их размеры определяются главным образом заданными параметрами гибкости системы, применяемой системой управления и эффективностью использования энергии. В установках, в которых по экономическим причинам только один компрессор обеспечивает все питание сжатым воздухом, система должна быть готова к быстрому подключению передвижного компрессора в связи с техническим обслуживанием. В этом случае старый компрессор, находящийся в резерве, может использоваться в качестве недорогого источника воздуха.

3:3



Анализ работы предусматривает непрерывное измерение параметров производства сжатого воздуха, например в течение недели. В результате получается график работы компрессора с производительностью 260 м³/мин, на котором различные кривые представляют собой разные дни недели.

3.1.1.3. Измерение потребления сжатого воздуха

Анализ производственного процесса выявляет ключевые параметры потребления сжатого воздуха и создает основу для оценки количества сжатого воздуха, которое лучше произвести. Большинство промышленных компаний непрерывно развиваются, а это означает, что потребление сжатого воздуха тоже изменяется. Поэтому важно иметь снабжение воздухом, основанное на текущих условиях потребления, изначально предусмотреть возможность расширения компрессорной установки.

Анализ производственного процесса включает в себя измерение эксплуатационных параметров, по возможности дополненное наблюдением за работой имеющейся компрессорной установки на протяжении соответствующего периода времени. Этот анализ должен проводиться по меньшей мере рабочую неделю, в период, выбранный с осторожностью, чтобы получить надежную картину типичного профиля потребления. Накопленные данные также дают возможность моделировать различные принимаемые меры, изменения в работе компрессора, проанализировать их вклад в общую экономичность установки.

Такие факторы, как время работы под нагрузкой и время разгрузки, тоже имеют отношение к общей оценке работы компрессора. Они служат основой для вычисления коэффициента загрузки компрессора, который нельзя непосредственно считать со счетчика наработки часов, и расчета потребления сжатого воздуха на протяжении дня или рабочей недели.

Анализ производственного процесса также позволяет также оценить возможную рекуперацию энергии. Зачастую можно рекуперировать более 90% поставляемой энергии. Кроме того, анализ может дать ответ на вопрос о параметрах установки, а также о режиме ее работы. Например, рабочее давление часто можно уменьшать в определенное время, систему управления можно модифицировать, чтобы улучшить использование компрессора при изменениях количества производимой продукции. Другим важным фактором является проверка на отсутствие утечек.

3:4

Диаметр отверстия, мм	1	3	5	10
Утечка при 6 бар, л/с	1	10	27	105
Потери мощности в компрессоре, кВт	0,3	3,1	8,3	33

Даже незначительная утечка может стать причиной больших затрат и простоя.

Для производства сжатого воздуха в малых количествах в ночные часы и в выходные дни следует рассмотреть целесообразность установки небольшого компрессора, который будет покрывать эту потребность.

3.1.2. Централизация или децентрализация?

3.1.2.1. Общие сведения

Существует несколько факторов, которые влияют на выбор между одним большим или несколькими меньшими компрессорами, обеспечивающими одно и то же потребление сжатого воздуха. Например, размер убытков, вызванных остановкой производственного процесса, колебания в сети электропитания, изменения нагрузки, стоимость системы сжатого воздуха и имеющаяся в распоряжении площадь.

3.1.2.2. Централизованные компрессорные установки

В большинстве случаев выбирается централизованная компрессорная установка, так как она дешевле, чем несколько компрессоров, размещенных на местах потребления сжатого воздуха. Компрессоры в составе компрессорной станции могут быть эффективно взаимосвязаны, что уменьшает потребление энергии. Центральная установка требует меньше расходов на текущий контроль и техническое обслуживание, а также предоставляет лучшие условия для рекуперации энергии. Общая необходимая площадь для размещения такой установки меньше. Фильтры, охладители, другое вспомогательное оборудование и воздухозаборник могут быть оптимально подобраны и установлены. Легче обеспечить шумоизоляцию.

Для увеличения эффективности централизованной системы, состоящей из нескольких разных по мощности компрессоров, можно установить заданную последовательность включения компрессоров. Одному большому копмрессору сложнее отвечать на большие изменения потребления сжатого воздуха без падения эффективности.

Например, системы с одним большим компрессором часто дополняются малым компрессором, используемым в ночную смену или в выходные дни. Другим заслуживающим внимания фактором является воздействие, оказываемое запуском крупного электродвигателя, на сеть электропитания.

3.1.2.3. Децентрализованные компрессорные установки

Система с несколькими децентрализованными компрессорами позволяет создать более простую и небольшую систему сжатого воздуха. К недостаткам децентрализованных компрессоров относятся сложности внутрисистемного согласования подачи сжатого воздуха, высокая стоимость, больший объем работ по техническому обслуживанию, а также то, что сложнее обеспечить резервную производительность. Децентрализованные компрессоры могут использоваться для поддержания давления в системе с большим падением давления в период, когда для промежуточных технологических процессов требуется большое количество сжатого воздуха. Альтернативой в случае чрезвычайно коротких пиков потребления является размещение в стратегически важных местах буферных емкостей (воздушных ресиверов).

Установка или здание, которые снабжаются сжатым воздухом из централи и в определенные периоды времени являются единственными потребителями сжатого воздуха, могут быть отделены от централи и запитаны от собственного компрессора. Преимущество такого способа заключается в том, что можно избежать «подпитки» утечек в оставшейся части системы, а также в том, что местный компрессор можно приспособить к меньшему потреблению сжатого воздуха.

3.1.3. Расчет компрессорной установки, работающей на большой высоте

3.1.3.1. Общие сведения

По мере увеличения высоты над уровнем моря давление и температура окружающего воздуха снижаются. Это оказывает воздействие на степень повышения давления в компрессоре и присоединенном оборудовании, что на практике означает влияние на мощность и потребление сжатого воздуха. В то же время эти изменения влияют на номинальную мощность электродвигателей и двигателей внутреннего сгорания.

Следует также определить влияние условий окружающей среды на конечного потребителя. Что вам требуется: определенный удельный массовый расход, например, для технологического процесса или объемный расход? Какие параметры используются для расчета компрессорной установки: абсолютное давление или избыточное давление? Важна ли температура сжатого воздуха?

Все это создает различные условия (и сложности) для расчета компрессорной установки, предназначенной для работы на большой высоте. Если у вас возникают сомнения, лучше обратиться за консультацией к производителям оборудования.

3:5

Атмосферное давление

Высота над уровнем моря	Давление, бар	Темпе–ратура, °C
-1000	1,138	21,5
-800	1,109	20,2
-600	1,080	18,9
-400	1,062	17,6
-200	1,038	16,3
0	1,013	15,0
200	0,989	13,7
400	0,966	12,4
600	0,943	11,1
800	0,921	9,8
1000	0,899	8,5
1200	0,877	7,2
1400	0,856	5,9
1600	0,835	4,6
1800	0,815	3,3
2000	0,795	2,0
2200	0,775	0,7
2400	0,756	-0,6
2600	0,737	-1,9
2800	0,719	-3,2
3000	0,701	-4,5
3200	0,683	-5,8
3400	0,666	-7,1
3600	0,649	-8,4
3800	0,633	-9,7
4000	0,616	-11,0
5000	0,540	-17,5
6000	0,472	-24,0
7000	0,411	-30,5
8000	0,356	-37,0

В таблице приведены Стандартные значения изменения давления и температуры в зависимости от высоты над уровнем моря. Давление зависит от погоды, диапазон его колебаний может составлять ±5%. Местные сезонные колебания температуры могут быть значительны.

3.1.3.2. Воздействие окружающей среды на компрессор

Для того чтобы правильно выбрать компрессор, когда условия окружающей среды отличаются от указанных в спецификации, следует учитывать следующие факторы:

- **высоту над уровнем моря или давление воздуха на этой высоте;**
- **температуру окружающей среды;**
- **влажность;**
- **температуру охлаждающей среды;**
- **тип компрессора;**
- **источник питания.**

Эти факторы прежде всего воздействуют на следующие параметры:

- **максимальное рабочее давление;**
- **производительность;**
- **потребление энергии;**
- **требования к охлаждению.**

Наиболее важным фактором является изменение давления на входе на большой высоте. Это означает, например, что для компрессора со степенью повышения давления 8,0 на уровне моря, степень повышения давления на высоте 3000 м составит 11,1 (если рабочее давление остается постоянным). Это влияет на кпд, а следовательно, и на потребление энергии. Степень этого влияния

3:6

Тип компрессора безмасляный/маслосмазываемый %	Уменьшение на каждые 1000 м над уровнем моря	
	собственной производительности, %	массового или нормального расхода,
Одноступенчатый винтовой безмасляный	0,3	11
Двухступенчатый винтовой безмасляный	0,2	11
Одноступенчатый винтовой маслосмазываемый	0,5	12
Одноступенчатый поршневой	5	17
Двухступенчатый поршневой	2	13
Многоступенчатый центробежный	0,4	12

Эмпирически определенное воздействие высоты на компрессор с рабочим давлением 7 бар (изб.) при постоянной температуре окружающего воздуха. Нужно помнить, что у каждого компрессора имеется верхний предел степени повышения давления, который не может быть превышен.

3:7

Высота над уровнем моря, м	Температура окружающей среды, °C					
	<30	30-40	45	50	55	60
1000	107	100	96	92	87	82
1500	104	97	93	89	84	79
2000	100	94	90	86	82	77
2500	96	90	86	83	78	74
3000	92	86	82	79	75	70
3500	88	82	79	75	71	67
4000	82	77	74	71	67	63

Значения допустимой нагрузки в % от номинальной мощности электродвигателя.

зависит от типа компрессора и его конструкции, как показано в таблице 3:6.

Температура окружающей среды, влажность и температура охлаждающей среды взаимодействуют и в разной степени сказываются на производительности, в зависимости от того, одна ступень сжатия или много, динамический это компрессор или объемный.

3.1.3.3. Источники питания

3.1.3.3.1. Электродвигатели

Разреженность воздуха на большой высоте ухудшает охлаждение электродвигателя. Стандартные двигатели могут работать без ухудшения номинальных параметров на высоте до 1000 м при температуре воздуха 40°C. Приведенная выше таблица 3:7 может использоваться в качестве руководства при установке стандартных двигателей на больших высотах. Обратите внимание, что для некоторых типов компрессоров на большой высоте мощность двигателя уменьшается быстрее требуемой мощности на валу компрессора.

3.1.3.3.2. Двигатели внутреннего сгорания

Снижение давления воздуха, повышение температуры и снижение влажности уменьшают содержание кислорода во всасываемом воздухе и тем самым уменьшают мощность двигателя. Степень уменьшения мощности на валу зависит от типа двигателя, как показано в таблице 3:8. Влажность играет меньшую роль (<1% на 1000 м), когда температура падает ниже 30 °C.

Обратите внимание на то, что мощность двигателя падает быстрее требуемой мощности на валу компрессора. Это означает, что для каждой из комбинаций компрессор/двигатель существует максимальная высота, на которой возможна эксплуатация. В общем, следует доверить расчет и определение специфических параметров компрессора, двигателя, пневматического оборудования соответствующим поставщикам.

3:8

Тип двигателя	Уменьшение мощности в % на 1000 м	Уменьшение мощности в % на каждые 10° C роста температуры
Атмосферный	12	3.6
Двигатель с наддувом	8	5.4

Влияние высоты и температуры на мощность двигателя внутреннего сгорания.

3.2 Подготовка воздуха

3.2.1. Общие сведения

Для потребителя является жизненно важным, чтобы сжатый воздух был должного качества. Если сжатый воздух содержит загрязнения, вступающие в контакт с конечным продуктом, стоимость бракованной продукции может быстро стать неприемлемо высокой, а самое дешевое решение – самым дорогим. Поэтому важно выбирать качество сжатого воздуха в соответствии с политикой вашей компании в области качества и даже пытаться оценить требования к качеству в будущем.

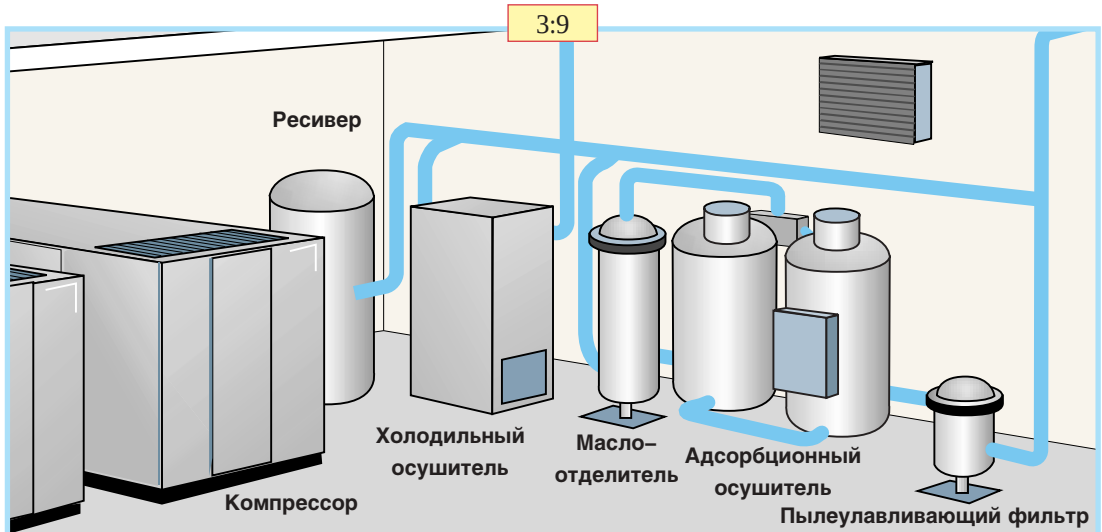
Сжатый воздух может содержать нежелательные вещества, например, воду в виде капель или пара, масло в виде капель или аэрозоля, а также пыль. В зависимости от области применения сжатого воздуха эти вещества могут привести к ухудшению качества продукции и даже к росту расходов. Целью обработки воздуха является получение воздуха такого качества, которое задано потребителем.

После четкого определения значения сжатого воздуха в технологическом процессе можно решить, какая система будет более выгодной и эффективной. Среди прочего необходимо установить, будет ли сжатый воздух вступать в непосредственный контакт с продукцией или, например, допустимо ли наличие масляного тумана в рабочей среде. Чтобы правильно выбрать оборудование, необходимо применять системный метод.

3.2.2. Водяной пар в сжатом воздухе

Атмосферный воздух всегда содержит влагу в виде водяного пара. Некоторое количество этого пара поступает со сжатым воздухом и может вызвать проблемы. Перечислим некоторые: высокая стоимость технического обслуживания, сокращение срока службы и ухудшение рабочих характеристик оборудования, высокий процент брака при окрашивании распылением и при изготовлении изделий из пластмасс, увеличение утечки, нарушения работы системы управления и измерительных приборов, сокращение срока службы системы трубопроводов из-за коррозии, удорожание мон-

3:9



Установленные и смонтированные основные компоненты системы для производства сжатого воздуха. Оборудование для обработки сжатого воздуха определяет его качество, от которого в свою очередь сильно зависит экономичность установки.

3:10

Классы воздуха (согласно стандарта ISO 8573–1)	Загрязнения		Вода	Масло
	Размер частиц (мкм)	Макс. концентрация (мг/ м³)	Наивысшая точка росы под давлением (°C)	Макс. концентрация (мг/м³)
1	0.1	0.1	-70	0.01
2	1	1	-40	0.1
3	5	5	-20	1.0
4	15	8	+3	5.0
5	40	10	+7	25
6	-	-	+10	-
Пример: сжатый воздух класса качества 2.2.2. (загрязнение: частицы размером 1 мкм, концентрация 1 мг/м³, вода: точка росы под давлением –40°C, масло: 0,1 мг/м³).				

В стандарте ISO сжатый воздух классифицируется по степени его загрязнения.

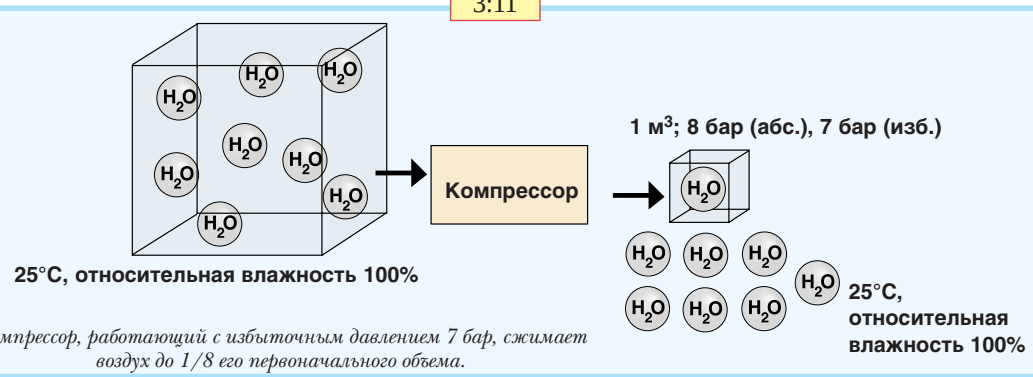
тажных работ. Отделение воды возможно при помощи вспомогательного оборудования, например концевых охладителей, отделителей конденсата, холодильных и адсорбционных осушителей.

Компрессор, работающий с избыточным давлением 7 бар, сжимает воздух до 1/8 его первоначального объема. Это также на 7/8 уменьшает способность воздуха удерживать водяной пар. Количество воды, которое конденсируется, значительно. Например, компрессор мощностью 100 кВт, который всасывает воздух с температурой 20°C при относительной влажности 60%, выдает за 8-часовую смену примерно 85 л воды. Количество воды, которое нужно отделить, зависит от области применения сжатого воздуха. Это, в свою очередь, определяет решение о том, какую комбинацию охладителей и осушителей нужно применить.

3.2.3. Масло в сжатом воздухе

Количество масла, содержащегося в сжатом воздухе, определяется несколькими факторами, например типом машины, ее конструкцией, степенью износа, состоянием и т.д. С этой точки зрения существует два основных типа компрессоров: работающие со смазкой в камере сжатия и работающие без смазки. В компрессорах со смазкой масло участвует в процессе сжатия и полностью или частично движется вместе со сжатым воздухом. Однако в сжатом воздухе, вырабатываемом современными поршневыми и винтовыми компрессорами, количество масла исключительно невелико. Например, в винтовом маслосмазываемом компрессоре в сжатом воздухе содержится менее 3 мг/м³ масла при 20°C. Содержание масла может быть снижено многоступенчатой системой фильтров. При таком техническом решении нужно внимательно рассмотреть связанные с ним ограничения по качеству сжатого воздуха, риски и затраты на энергоснабжение.

3:11



Компрессор, работающий с избыточным давлением 7 бар, сжимает воздух до 1/8 его первоначального объема.

3.2.4. Микроорганизмы в сжатом воздухе

Более 80% частиц, загрязняющих сжатый воздух, имеют размер менее 2 мкм и поэтому могут легко проникнуть через входной фильтр компрессора. Затем эти частицы распространяются по системе труб, где смешиваются, среди прочего, с остатками воды, масла и частицами отложений со стенок труб. Это может привести к росту микроорганизмов. Установка фильтра непосредственно после компрессора может устранить этот риск. Тем не менее, чтобы получить чистый или стерильный сжатый воздух, необходимо иметь полный контроль над ростом бактерий после фильтра.

Картина становится еще более сложной, поскольку газы и аэрозоли могут концентрироваться в капли (из-за концентрации или электрической заряженности) даже после прохождения через несколько фильтров. Микроорганизмы проникают через стенки фильтра и поэтому присутствуют в одинаковой концентрации как на входной, так и на выходной стороне фильтра.

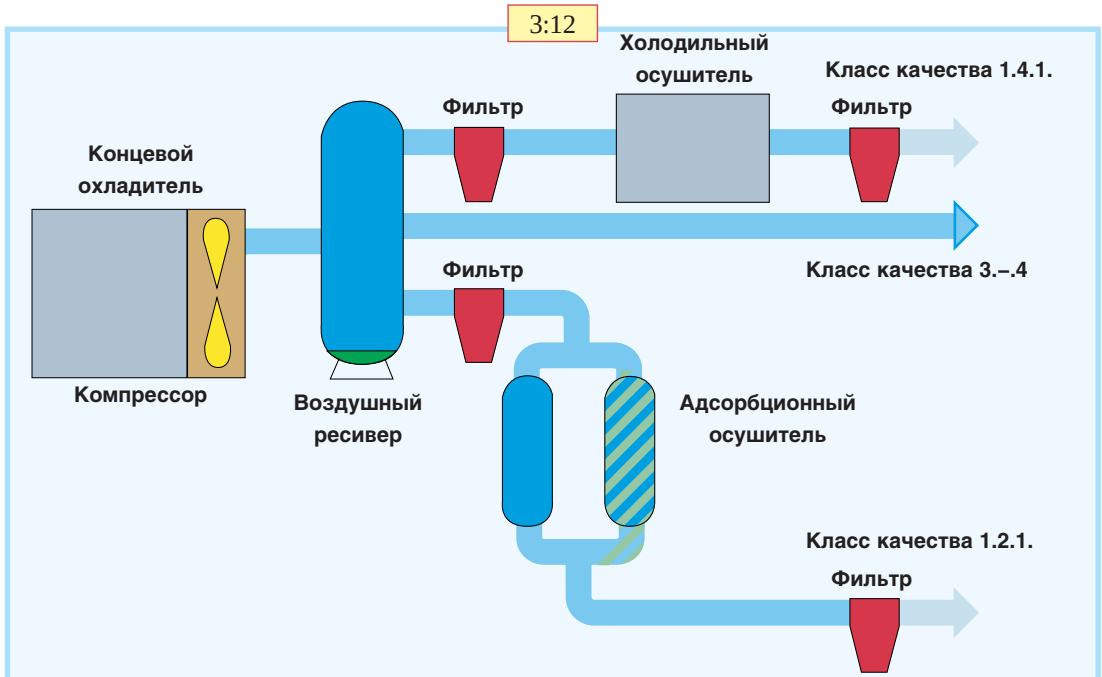
В ходе исследований было установлено, что микроорганизмы бурно разрастаются в системе сжатого воздуха, когда воздух не осушается и его влажность достигает 100%. Частицы размером менее 1 мкм, следовательно и микроорганизмы, могут беспрепятственно проникать через входной фильтр компрессора.

Масло и прочие загрязнения служат питательной средой для роста бактерий. Решающим фактором в борьбе с микроорганизмами является осушение воздуха до влажности менее 40%, что достигается с помощью адсорбционного осушителя, а при комнатной температуре также и с помощью холодильного осушителя.

3.2.5. Фильтры

Современные волоконные фильтры очень эффективно удаляют масло из сжатого воз-

3:12



Установка, производящая сжатый воздух различных классов качества согласно стандарту ISO 8573–1.

духа. Однако контролировать количество масла, остающегося в сжатом воздухе после фильтрации, трудно, так как кроме других факторов на процесс отделения масла оказывает большое влияние температура. На эффективность также влияют концентрация масла и количество свободной воды в сжатом воздухе.

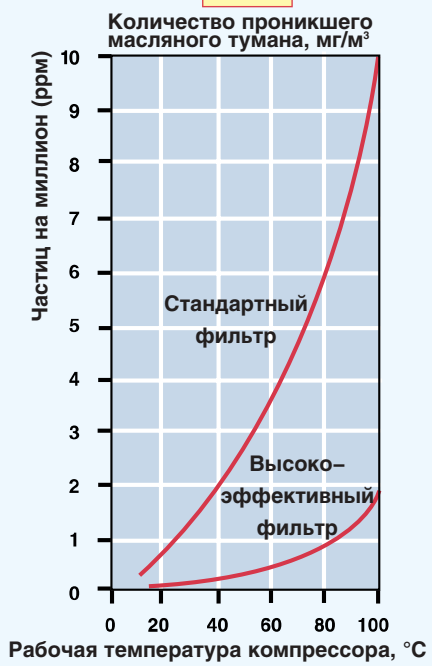
Для получения наилучших результатов воздух должен быть осушен настолько, насколько это возможно. Если в сжатом воздухе присутствует свободная вода, то масляный, угольный и стерильный фильтры дают плохой результат (заявленные технические характеристики при таких условиях не выдерживаются). Волоконные фильтры улавливают только мелкие капли масла или аэрозоль. Для удаления паров масла нужно использовать фильтры с активированным углем. Правильно установленный волоконный фильтр вместе с подходящим предварительным фильтром позволит уменьшить содержание масла в сжатом воздухе примерно до 0,01 мг/м^3 при 21°C. Фильтр, содержащий активированный уголь, уменьшает содержание масла до 0,003 мг/м^3 при 21°C.

Качество угля и размеры угольных фильтров должны обеспечивать минимально возможное падение давления. Для достижения наилучшего эффекта фильтры должны быть установлены как можно ближе к точке потребления. Кроме того, фильтры надо внимательно проверять и относительно часто менять. Фильтры с активированным углем удаляют загрязнения, присутствующие только в форме пара, например масла.

Стерильные фильтры должны подвергаться стерилизации прямо на месте их размещения, в трубопроводной системе, с помощью, например, пара, или их надо извлекать для обработки. Способность фильтра отделять масло из сжатого воздуха изменяется при изменении рабочей температуры.

Данные, указанные в спецификации фильтра, всегда приводятся для определенной температуры воздуха, обычно 21°C.

3:13



• Рабочее давление компрессора: 7 бар
• 1 ppm = 1,2 мг/м³

Изменение температуры воздуха приводит к изменению качества фильтрации. Обратите внимание, что стандартные высокоэффективные фильтры не улавливают масла в форме пара.

Эта температура приблизительно соответствует температуре на выходе компрессора с воздушным охлаждением, работающего при температуре окружающей среды 10°C. Однако климатические и сезонные изменения температуры влияют на способность фильтра отделять загрязнения.

В безмасляном компрессоре масляный фильтр не требуется. Это означает, что компрессор может работать при более низком давлении, следствием чего является снижение энергопотребления. Как показала практика, безмасляные компрессоры являются во многих случаях наилучшим техническим решением как с точки зрения качества, так и с точки зрения экономии.

3.2.6. Концевой охладитель

Температура сжатого воздуха, выходящего из компрессора, чаще всего бывает в пределах 70 – 200°C. Для понижения этой температуры используется концевой охладитель, который также способствует уменьшению содержания воды и часто включается в компрессорную установку в качестве стандартного оборудования. Концевой охладитель обязательно устанавливается непосредственно после компрессора. Он является теплообменником, охлаждающим горячий воздух и отделяющим, насколько возможно быстро, конденсационную воду, которая в противном случае попала бы в систему. Концевой охладитель может иметь либо воздушное, либо водяное охлаждение и обычно оснащается влагоотделителем с автоматическим сливом конденсата.

3.2.7. Влагоотделитель

Большинство компрессорных установок оснащается концевым охладителем, а также влагоотделителем, которые позволяют извлекать из сжатого воздуха максимально возможное количество конденсата. При правильном подборе влагоотделителя эффективность его работы составляет 80–90%. Остаток поступает в воздушный ресивер в виде водяного тумана.

3.2.8. Масло в виде мелких капель

Масло в виде капель частично отделяется в концевом охладителе, влагоотделителе или конденсационном вентиле и уходит вместе с конденсатом. Эта эмульсия, состоящая из воды и масла, с точки зрения требований охраны окружающей среды классифицируется как отходы, и ее попадание в сточные воды или непосредственно в окружающую среду недопустимо.

Непрерывно вводятся новые и все более строгие законы в отношении обращения с экологически опасными отходами. Процессы сбора и утилизации конденсата сложны и дорогостоящи.

Простое и экономически эффективное решение этой проблемы заключается в установке влагомаслоотделителя, например с мембранным фильтром, который дает чистую дренажную воду и масло, собранное в специальную емкость.

3.3 Система охлаждения

3.3.1. Компрессоры с водяным охлаждением

3.3.1.1. Общие сведения

Установка с водяным охлаждением требует меньшей вентиляции компрессорной, так как большая часть производимого тепла отводится охлаждающей водой. Охлаждаю-

3:14

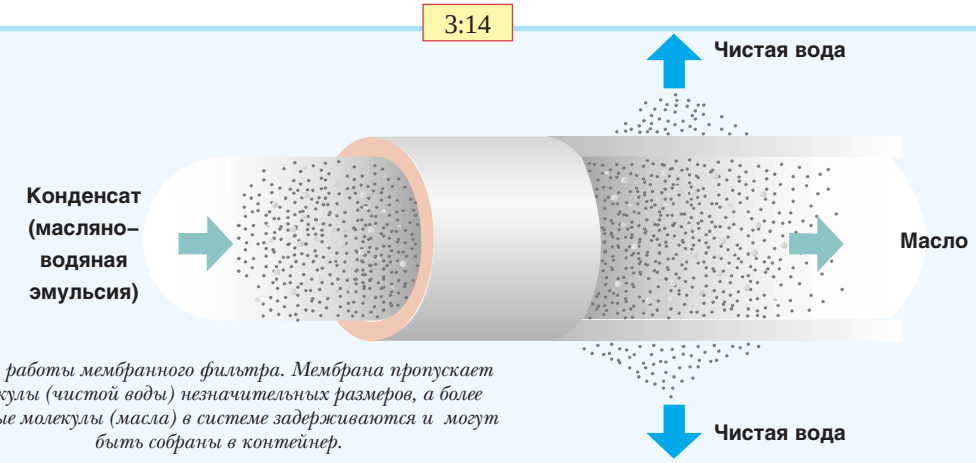


Схема работы мембранного фильтра. Мембрана пропускает молекулы (чистой воды) незначительных размеров, а более крупные молекулы (масла) в системе задерживаются и могут быть собраны в контейнер.

щая вода компрессора с водяным охлаждением отводит примерно 90% энергии, подводимой к электродвигателю.

Система водяного охладителя компрессора может быть сконструирована тремя различными способами: как открытая система без циркуляции воды, как открытая система с циркуляцией воды и как закрытая система с циркуляцией воды.

3.3.1.2. Открытая система без циркуляции воды

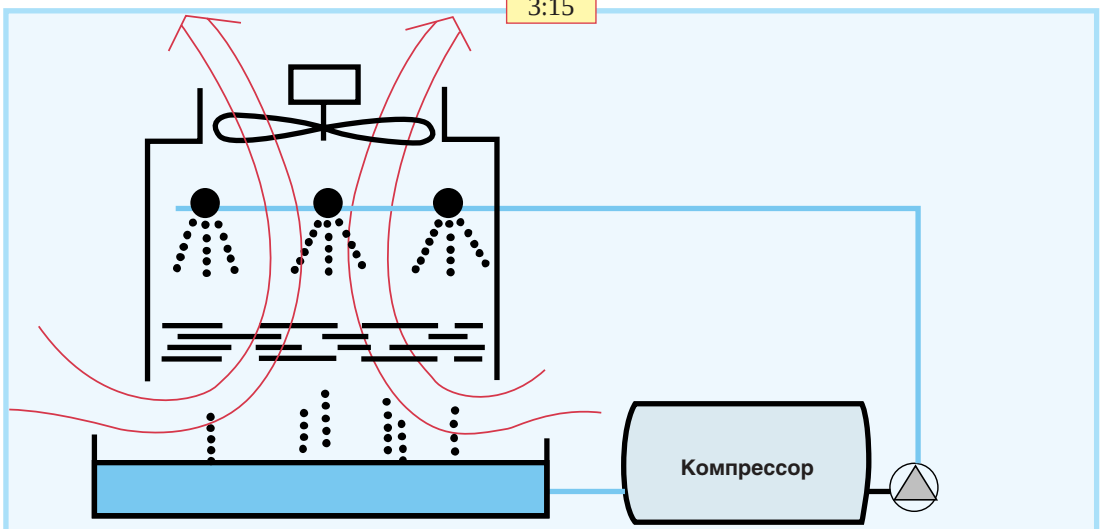
Вода, пригодная для использования в данной системе, может поступать из городской водопроводной сети, из озера, реки или скважины. Вода используется для охлаждения компрессора, а затем выпускается в виде сточной воды. Для регулирования системы нужно установить термостат, который будет поддерживать желаемую температуру, а также управлять потреблением воды. Давление охлаждающей воды должно быть ниже расчетного давления компонентов системы.

Вообще говоря, открытая система достаточно проста и ее монтаж стоит дешево. Однако ее эксплуатация обходится дорого, особенно, когда охлаждающая вода берется из городской водопроводной сети. За отбор воды из озера или реки, как правило, платить не нужно, но ее использование без опасности засорения системы охлаждения потребует обязательной фильтрации и очистки. Кроме того, использование воды с высоким содержанием извести приводит к отложению накипи в охладителях, что ухудшает охлаждение. В некоторых системах используется соленая вода, однако это возможно только в том случае, когда система сконструирована и рассчитана соответствующим образом.

3.3.1.3. Открытая система с циркуляцией воды

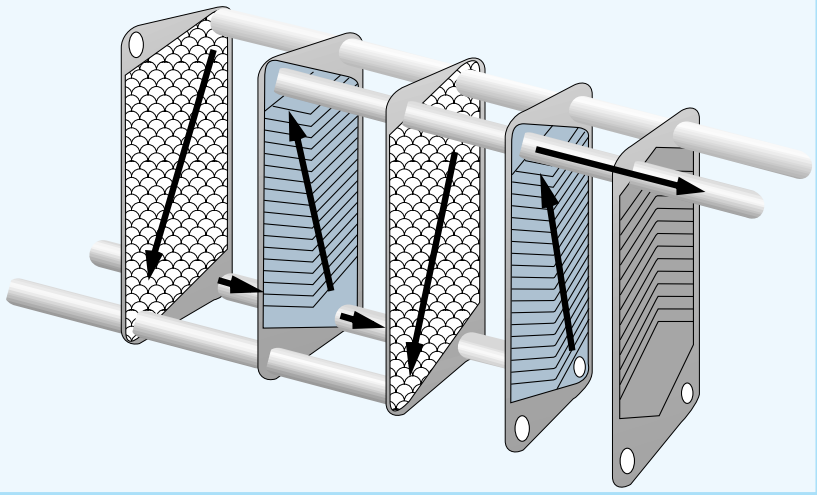
В открытой системе с циркуляцией воды нагретая вода из компрессора охлаждается в башенном охладителе (градирне). В этой градирне вода разбрызгивается вверху в камере, через которую в это же время продувается окружающий воздух. Часть воды испаряется, а оставшаяся вода охлаждается до температуры, которая на 2°C ниже температуры окружающей среды (температура воды может изменяться в зависимости от температуры и относительной влажности воздуха). Открытые системы с циркуляцией воды используются в первую очередь в местах с ограниченными возможностями

3:15



Открытая система с циркуляцией охлаждающей воды.

3:16



Работа плоского теплообменника. Преимущество плоского теплообменника состоит в легкости очистки, что позволяет охлаждать компрессор косвенным способом, используя озерную или речную воду.

подачи свежей воды. К недостаткам такой системы относится загрязнение воды окружающим воздухом. Для компенсации испарения в систему постоянно подается свежая вода.

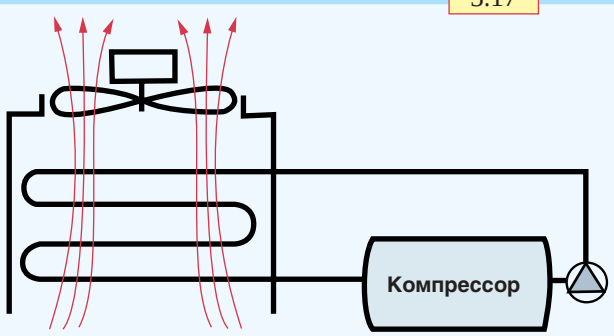
Растворенные соли отлагаются на горячих металлических поверхностях, уменьшая тем самым способность градирни рассеивать тепло. Чтобы не допустить размножения водорослей в воде, требуется проведение регулярных анализов и химической обработки .В зимний период, если компрессор не работает, воду нужно либо слить из охлаждающей башни, либо нагревать для предотвращения замерзания.

3.3.1.4. Замкнутая система

В компрессоре с замкнутой системой охлаждения одна и та же вода постоянно циркулирует между компрессором и каким-либо охладителем. Этот охладитель, в свою очередь, охлаждается либо водяным контуром, либо окружающим воздухом. При охлаждении воды другим водяным контуром обычно используется плоский теплообменник.

При охлаждении воды окружающим воздухом используется охлаждающая батарея, состоящая из труб и пластин. Принудительная вентиляция, включающая в себя один или несколько вентиляторов, заставляет окружающий воздух циркулировать вокруг батареи. Чтобы охладители не засорялись, воздух перед подачей в охладительную систему обычно фильтруется. Этот метод используется, когда подача воды ограничена. Охлаждающая способность открытого и замкнутого контуров примерно одинакова, так как охлаждающая вода компрессора охлаждается до температуры, на 5°C

3:17



В замкнутой системе можно увидеть простой воздухонагреватель (охлаждаемый воздухом теплообменник), который охлаждает такие теплоносители как воду с гликолем, масло и проч. В агрессивной среде или для агрессивных жидкостей используются нержавеющая сталь или титан.

превышающей температуру охлаждающей среды.

При охлаждении воды окружающим воздухом требуется добавление антифриза, т.е. гликоля. Замкнутая система охлаждения заполняется очищенной смягченной водой.

При добавлении гликоля требуется пересчитать поток водяной системы компрессора, так как тип и концентрация гликоля воздействуют на теплоемкость и вязкость охлаждающей жидкости. Добавление химических средств также оказывает влияние на способность воды протекать в местах соединений.

Очень важно тщательно очистить всю систему перед ее первым заполнением. Правильно сделанная замкнутая система почти не требует надзора, и расходы на ее техническое обслуживание невелики. В установках с агрессивной охлаждающей водой применяется охладитель, рассчитанный на использование такого, например, ингибитора коррозии, как инколой.

3:18

Температура замерзания, °C	Содержание гликоля, %	Теплоемкость, кДж/°C кг
-10	23	3,850
-15	30	3,650
-20	37	3,450
-25	43	3,350
± 0	0	4,190

При низких температурах не допускайте замерзания воды. Так как смесь воды с гликолем имеет теплоемкость меньшую, чем у чистой воды, потребуется увеличение размера охладителя.

3.4 Рекуперация тепловой энергии

3.4.1. Общие сведения

Сжатие воздуха в компрессоре сопровождается выделением тепла. Тепловая энергия концентрируется во все уменьшающемся объеме, а излишек тепла выводится из компрессора прежде, чем воздух попадет в трубопроводную систему. В каждой установке по производству сжатого воздуха нужно обеспечивать охлаждение, надежно отводящее нужное количество избыточного тепла. Охлаждение производится либо наружным воздухом, либо водой из городской водопроводной сети или из реки, или технической водой, движущейся по открытой или замкнутой системе.

Во многих производящих сжатый воздух установках возможность сбережения энергии путем ее рекуперации значительна, но зачастую не используется. В большинстве отраслей промышленности в цене сжатого воздуха расходы на энергию составляют практически 80%. В крупногабаритных безмасляных винтовых компрессорах можно рекуперировать до 94% поставляемой компрессором энергии в виде горячей воды с температурой 90°C. Это означает, что все мероприятия по сбережению энергии характеризуются быстрой экономической отдачей.

Предположим, что компрессорная централь на большом предприятии потребляет 500 кВт в течение 8000 часов в год. Это соответствует не менее чем 4 миллионам кВт х ч/год. Отсюда следует, что вполне возможно рекуперировать это тепло в виде горячей воды или горячего воздуха.

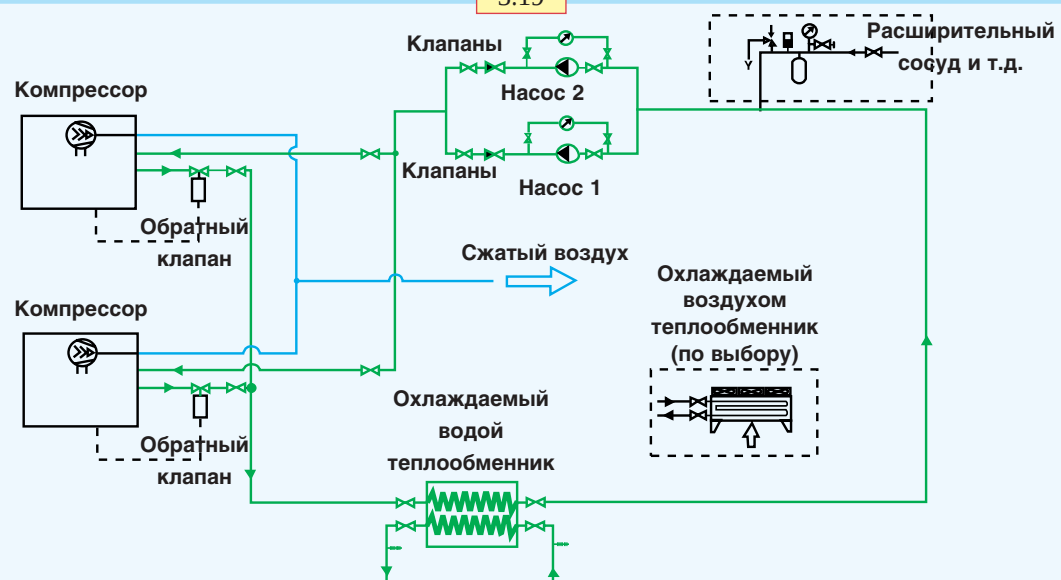
Срок оправдания затрат на рекуперацию энергии обычно составляет не более 1–3 лет. Кроме того, рекуперация энергии с помощью замкнутой системы охлаждения означает улучшение условий эксплуатации компрессора, повышение надежности его работы и увеличение сроков службы благодаря поддержанию в компрессоре постоянной температуры и использованию большого количества охлаждающей воды. В странах Северной Европы, самых передовых странах в области рекуперации энергии, уже давно используется горячая вода, поступающая от компрессоров.

В настоящее время большинство компрессоров основных производителей позволяют подключать стандартное оборудование для рекуперации энергии.

3.4.2. Расчет потенциала рекуперации

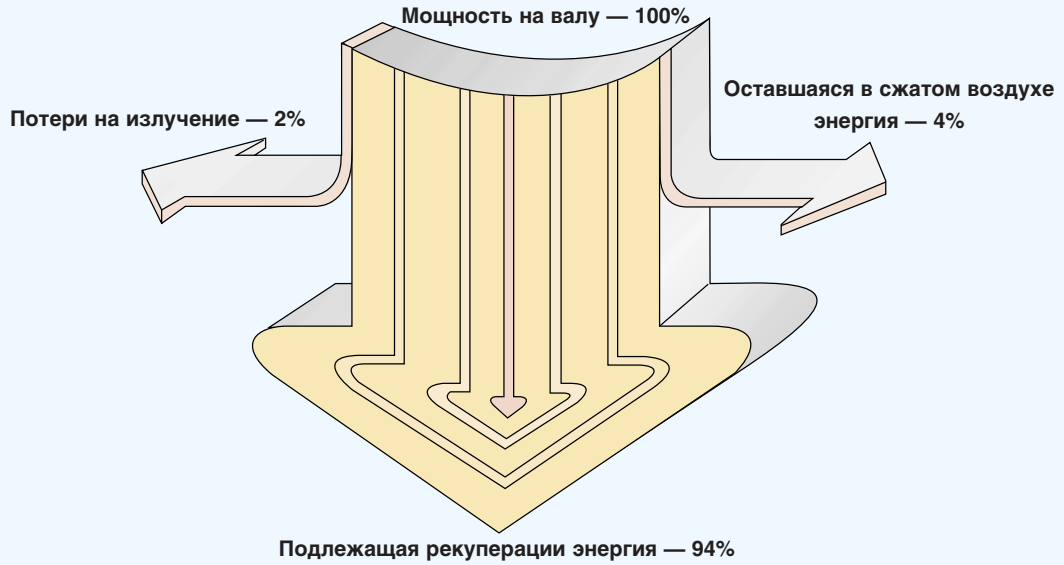
Практически вся энергия, поставляемая в компрессорную установку, преобразуется

3:19



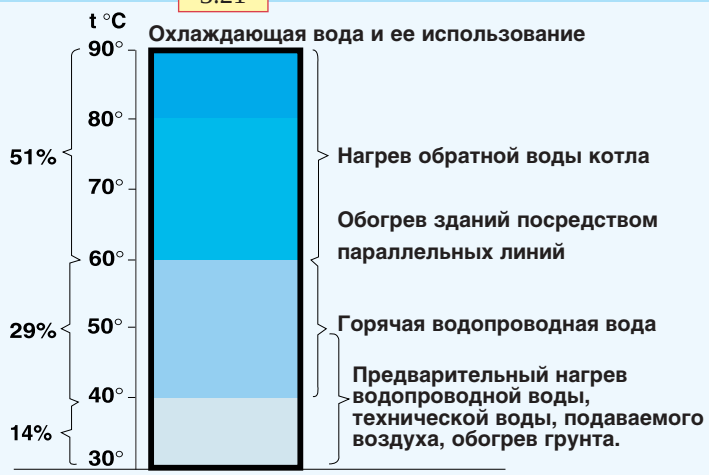
Принципиальная схема устройства замкнутой системы охлаждения. Теплообменник может быть с водяным или воздушным охлаждением

3:20



Так как тепло – производный продукт процесса сжатия воздуха, энергия может рекуперироваться в виде тепла горячей воды, поступающей из системы охлаждения компрессора.

3:21

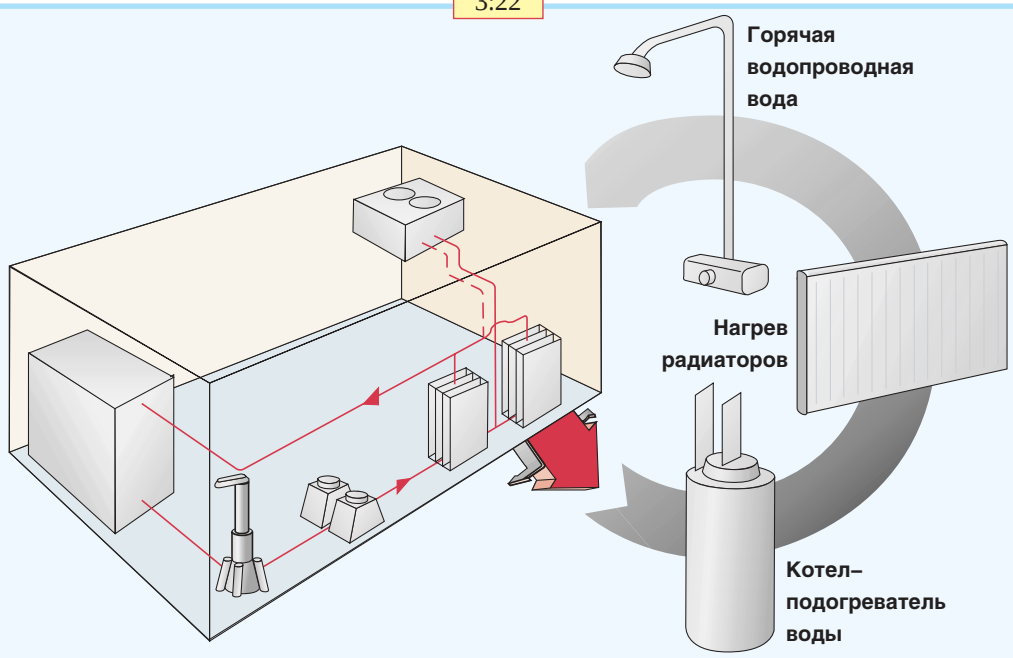


Некоторые типичные примеры применения рекуперации энергии охлаждающей воды различной температуры, поступающей из компрессора. Чем выше температура воды, тем больше степень рекуперации.

в тепло. Чем больше энергии можно рекуперировать и использовать в других процессах, тем выше эффективность системы. Количество энергии, которое возможно рекуперировать, вычисляется из приведенного ниже соотношения:

Рекуперируемая энергия, кВт x ч/год:
$W = [(K_1 \times Q_1) + (K_2 \times Q_2)] \times T_R$
Сохраняется в год:
$W \times e_P/\eta$
Сбереженное масло, м³/год:
$W/68000 \times \eta$, где
W – сбереженная энергия, кВт x ч/год

3:22



Каждая компрессорная установка предлагает большие возможности для рекуперации энергии. В больших безмасляных винтовых компрессорах можно рекуперировать до 95% энергии, поставляемой компрессором.

T_R – время, в течение которого нужно рекуперировать энергию, часов в год
K_1 – часть T_R, когда компрессор нагружен
K_2 – часть T_R, когда компрессор не нагружен
Q_1 – мощность, отводимая хладагентом, когда компрессор нагружен, кВт
Q_2 – мощность, отводимая хладагентом, когда компрессор не нагружен, кВт
e_P – цена энергии
η – обычный кпд источника тепла

Во многих случаях можно рекуперировать более 90% энергии при условии, что охлаждение компрессорной установки выполнено тщательно. Решающими факторами в этом случае являются работа системы

3:23

Рекуперируемая тепловая энергия			
Производительность, м³/мин	Тепловой поток, кВт	Сбережение энергии при 2000 раб. часов/год, кВт x ч/год	Нефтяной эквивалент, м³/год
6,4	34	68 000	10,0
7,4	40	80 000	11,8
11,4	51	102 000	15,0
14,0	61	122 000	17,9
18,7	92	184 000	27,1
21,6	109	218 000	32,1
23,2	118	236 000	34,7
27,9	137	274 000	40,3
34,8	176	352 000	51,8
43,1	215	430 000	63,2
46,9	235	470 000	68,1
46,5	229	458 000	67.4
51,3	253	506 000	74,7
56,9	284	568 000	83,5
62,9	319	638 000	93,8
69,7	366	732 000	108
75,4	359	718 000	106
83,2	392	784 000	115
103,6	490	980 000	144
124,5	602	1 200 000	177

Пример потенциала рекуперации тепловой энергии компрессора.

охлаждения, расстояние до места потребления тепла, степень и продолжительность потребности в тепловой энергии.

При выделении значительных объемов тепловой энергии может возникнуть вопрос о продаже рекуперированной тепловой энергии. Потребителями этой энергии могут стать поставщики энергии, и вы сможете подписать договор об инвестициях, субподряде и поставках. Существует также возможность координированной рекуперации энергии, поступающей из нескольких технологических процессов.

3.4.3. Способы рекуперации

3.4.3.1. Общие сведения

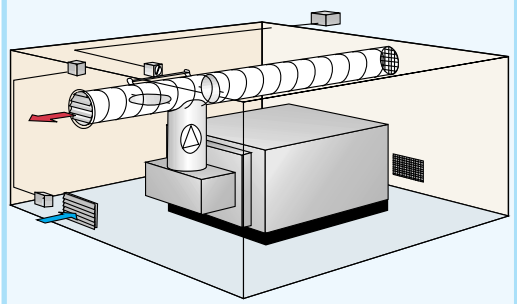
Рекуперация энергии, полученной при эксплуатации установки по производству сжатого воздуха, не всегда дает тепло тогда, когда оно требуется, и, возможно, в недостаточных количествах. Количество производимой рекуперируемой энергии изменяется, если компрессор находится под переменной нагрузкой. Для того чтобы рекуперация была возможна, необходим соответствующий уровень потребления энергии, обеспечиваемый обычной энергосистемой. Рекуперируемую энергию лучше использовать как дополнительную к обычной системе и добавлять ее всегда, когда компрессор работает.

3.4.3.2. Системы с воздушным охлаждением

Возможными вариантами использования компрессоров с воздушным охлаждением, производящих большой поток горячего воздуха с относительно низкой температурой, являются непосредственный обогрев зданий или теплообмен с батареями предварительного нагрева. В этих случаях нагретый охлаждающий воздух распределяется с помощью вентиляторов.

Когда зданию не нужно дополнительное тепло, горячий воздух выводится в атмосферу автоматически, с использованием термостата, или вручную – путем изменения положения воздушной заслонки. Фактором, ограничивающим использование рекуперируемой энергии, выступает расстояние от компрессора до обогреваемого здания. Оно должно быть коротким, желательно, чтобы обогревалось соседнее с компрессорной здание. Кроме того, такая возможность рекуперации энергии ограничивается холодным временем года. Рекуперация энергии при переносе тепла воздухом чаще всего используется в компрессорах малой или средней мощности. Рекуперация приводит к уменьшению потерь энергии и не требует значительных капиталовложений.

3:24



Рекуперация тепловой энергии компрессора с воздушным охлаждением.

3.4.3.3. Система с водяным охлаждением

Воду из компрессора с водяным охлаждением, температура которой достигает 90°C, можно добавлять в систему снабжения предприятия горячей водой. Если горячая вода используется для мойки, умывания и душа, обычный бойлер все равно необходим. Энергия, которая рекуперируется из системы сжатого воздуха, обеспечивает лишь добавку, снижающую нагрузку на бойлер, сберегающую топливо и, возможно, позволяющую использовать бойлер меньших размеров.

3:25

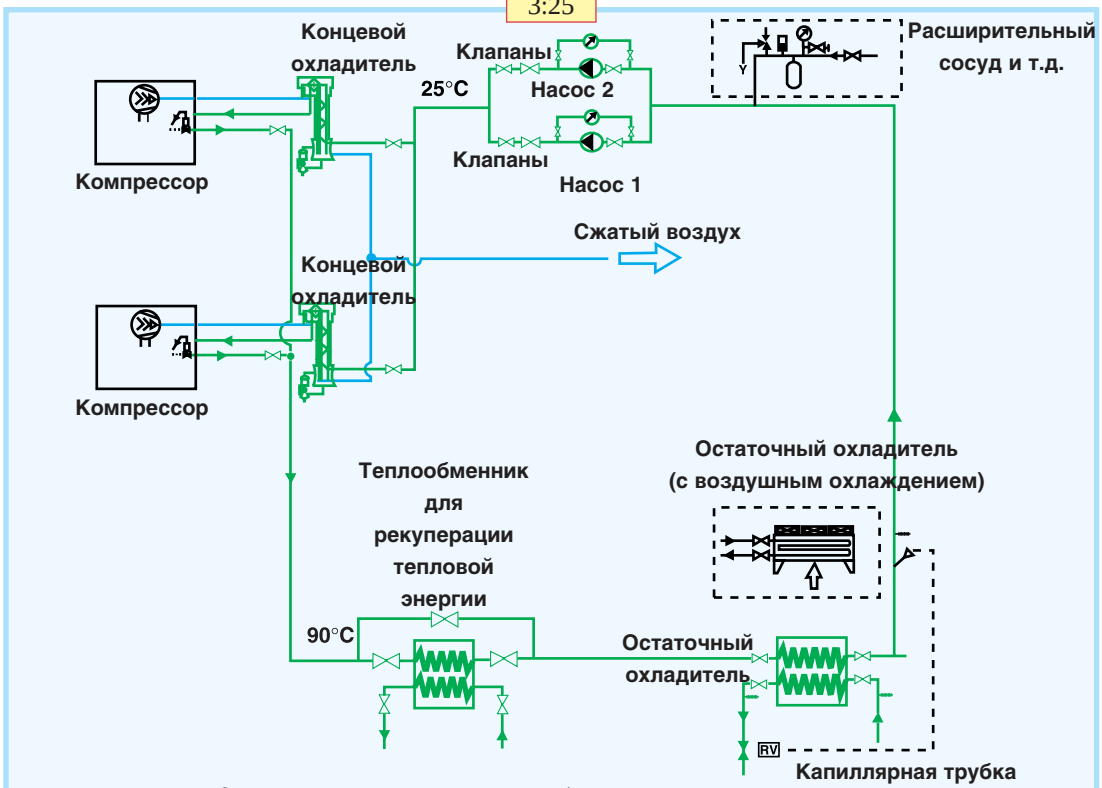


Схема рекуперации тепловой энергии безмасляного винтового компрессора.

3:26

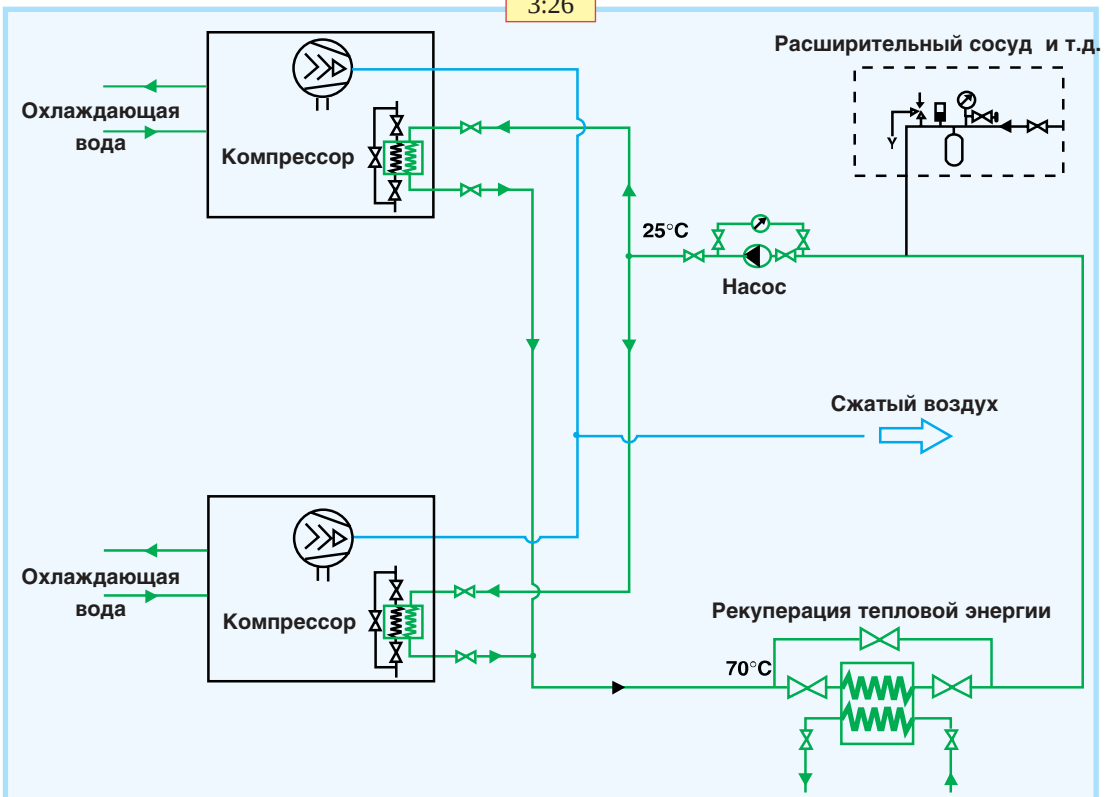


Схема рекуперации тепловой энергии винтового маслосмазываемого компрессора с водяным охлаждением. Остаточный охладитель с системой регулирования встроен в компрессор.

Предпосылки для рекуперации энергии сжатого воздуха в некоторой степени зависят от типа компрессора. Безмасляные компрессоры даже в стандартном исполнении легко модифицировать для рекуперации энергии. Компрессор такого типа с водяным охлаждением обеспечивает температуру воды 90°C, требуемую для эффективной рекуперации.

В маслосмазываемых компрессорах масло, участвующее в процессе сжатия, является лимитирующим фактором в достижении более высоких температур охлаждающей воды.

В центробежных компрессорах температурные уровни ниже и потому меньше степень рекуперации. К тому же повышенная температура охлаждающей воды отрицательно сказывается на работе таких компрессоров.

Рекуперация энергии компрессоров с водяным охлаждением наилучшим образом подходит для компрессоров с мощностью двигателя более 10 кВт. Рекуперация энергии с использованием воды означает использование установки более сложной, чем при использовании воздуха. В этом случае основное оборудование состоит из насосов, теплообменника и регулирующих клапанов.

Используя водяную рекуперацию энергии, можно также подводить тепло к удаленным зданиям с помощью труб относительно малых диаметров (40–80 мм) без существенных потерь тепла. Высокая первоначальная температура дает возможность использовать энергию для по-

вышения температуры обратной воды водогрейного котла. Поэтому обычный нагревательный источник можно периодически отключать и заменять отходящим теплом компрессора. В производственных процессах тепло, отводимое от компрессора можно также использовать для повышения температуры технологического процесса. Возможно осуществить водяную рекуперацию даже при использовании винтовых маслосмазываемых компрессоров с воздушным охлаждением. Для этого потребуется установка теплообменника в масляном контуре, но такая система выдает более низкую температуру, чем безмасляный компрессор.

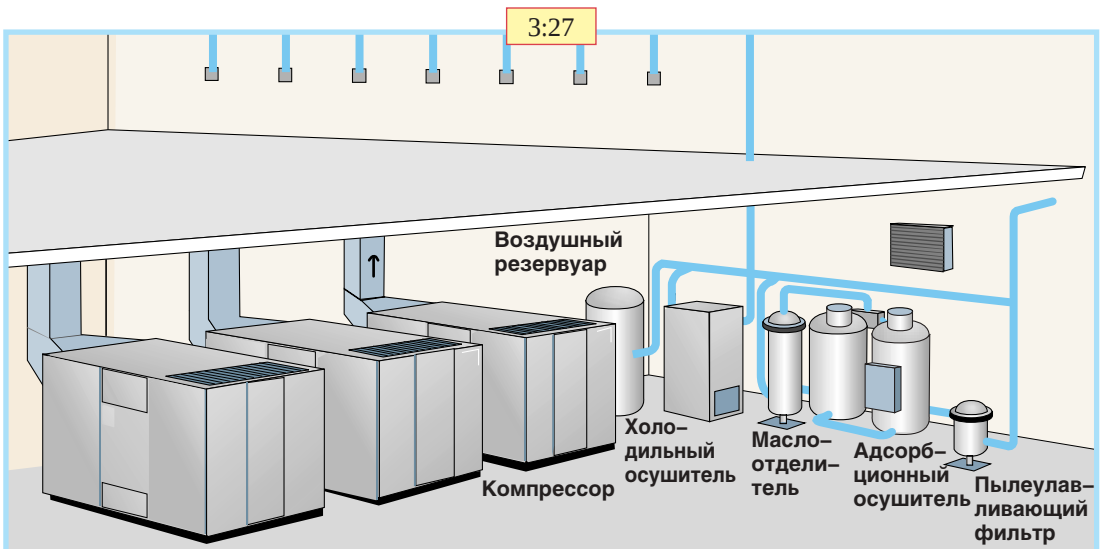
3.5 Компрессорная

3.5.1. Общие сведения

Еще совсем недавно приобретение компрессора означало необходимость покупки электродвигателя, пусковой аппаратуры, концевого охладителя, всасывающих фильтров и т.д. Затем нужно было согласовать требования к производительности и качеству с каждым из поставщиков различных компонентов. Это необходимо для обеспечения их слаженной работы в составе компрессорной установки. В настоящее время компрессор и принадлежности приобретаются в виде готового технического решения «под ключ». Компрессорный модуль включает в себя раму корпуса, на которой установлены компрессор и вспомогательное оборудование. Все внутренние соединения между различными узлами уже выполнены. Комплектный компрессорный модуль закрывается звукоизолирующим кожухом, предназначенным для снижения уровня шума.

Это значительно упрощает монтаж и гарантирует нормальную работу установки с самого начала. Тем не менее следует помнить, что способ и технология монтажа в значительной степени определяют характеристики и надежность работы компрессорной системы.

Основное внимание при монтаже компрессорных установок следует уделять, в первую очередь, обустройству центральной компрессорной. Опыт показывает, что независимо от отрасли промышленности централизация предпочтительна. Помимо других преимуществ ее результатом являются экономия эксплуатационных расходов, улучшение конструкции системы сжатого воздуха, удобство технического обслуживания и пользования, защита от несанкционированного доступа, она упрощает снижение уровня шума и устройство управляемой вентиляции.



Сегодня процедура монтажа в компрессорном зале значительно облегчена. Компрессорная установка теперь поставляется «под ключ», т.е. готовая к монтажу и подключению к требуемому вспомогательному оборудованию.

Во-вторых, для установки компрессора может быть использована даже отдельная площадь в здании, которое используется для других целей. Здесь следует рассмотреть риск возникновения таких проблем, как превышение допустимого уровня шума, выполнение требований к вентиляции компрессора, физические опасности и риск перегрева, дренаж конденсата. Нужно учитывать состояние окружающей среды, например, содержание в воздухе пыли, воспламеняющихся и агрессивных веществ, требования к площади с учетом будущего расширения и доступа к компрессору при проведении технического обслуживания. Однако при установке компрессора, например, в цехе или на складе облегчается монтаж оборудования, предназначенного для рекуперации энергии. При отсутствии помещений для установки компрессора внутри здания его можно устанавливать снаружи под крышей. Однако в этом случае следует помнить о возможности замерзания конденсата в полостях и сливных трубах. Нужно также предусмотреть защиту воздухозабора, всасывающего патрубка и вентиляции от дождя и снега. Для компрессора требуется твердое и ровное основание, которым может быть, к примеру, асфальтовое покрытие, бетонная плита или разровненный гравий. Следует учитывать и такие факторы, как запыленность воздуха в помещении, наличие воспламеняющихся или агрессивных веществ, а также предусмотреть защиту от несанкционированного доступа.

3.5.2. Расположение и конструкция

Расположение центральной компрессорной должно быть таким, чтобы обеспечить облегченный вариант прокладки трасс распределительной системы в больших установках с длинными трубопроводами. С точки зрения эксплуатации и технического обслуживания может быть выгодным размещение компрессорной вблизи такого вспомогательного оборудования, как насосы и вентиляторы. Даже расположение вблизи бойлерной может быть полезным.

Здание должно обеспечивать свободное применение грузоподъемного оборудования, предназначенного для подъема тяжелых компонентов компрессорной установки (обычно это электродвигатель), и/или же в нем должна быть предусмотрена возможность использования вилочного погрузчика. Следует также предусмотреть свободные площади для установки дополнительного компрессора с учетом будущего расширения.

Кроме того, габаритная высота помещения должна быть достаточной для подъема электродвигателя или другого узла, если возникнет такая необходимость. В полу центральной компрессорной должен быть сток или другое средство отвода конденсата от компрессора, концевого охладителя, воздушного ресивера, осушителей и т.д. Сток в полу выполняется в соответствии с директивами муниципальных властей.

3.5.3. Основание

Обычно для монтажа компрессорной установки требуется только ровный пол с достаточной несущей способностью. В большинстве случае поглотители вибрации уже встроены в установку. При монтаже новых установок обычно отливается

основание для каждого компрессорного модуля, что позволяет очищать пол.

Установка больших поршневых и центробежных компрессоров может потребовать основания из бетонных плит, которое крепится к общему основанию или укладывается на твердый грунт. Воздействия внешних вибраций в компрессорных установках современной комплектации должны быть уменьшены до минимума. В системах с центробежными компрессорами может потребоваться устройство поглощающего вибрацию фундамента компрессорного зала.

3.5.4. Всасываемый воздух

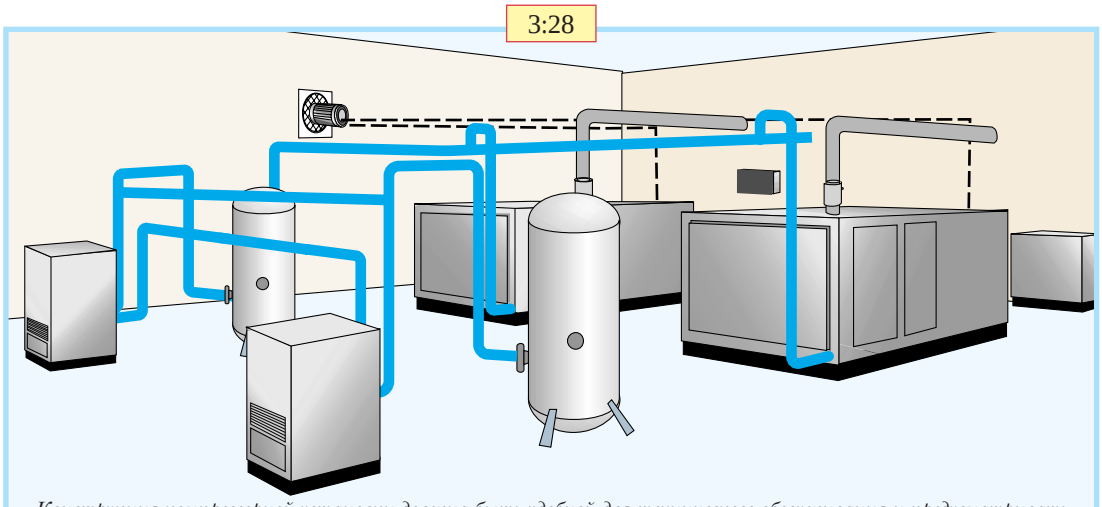
Всасываемый компрессором воздух должен быть чистым и не загрязненным твердыми и газообразными примесями. Особенно вредными могут быть вызывающие износ частицы грязи и коррозионно-активные газы.

Воздухозаборное отверстие, как правило, располагается на звукопоглощающем кожухе, но оно должно быть там, где воздух чист, насколько это возможно. Загрязнение газами, например выхлопными газами автомобилей, может представлять смертельную опасность в случаях, когда воздух предназначен для дыхания. Например, при использовании воздуха в больницах обычно предъявляются специальные требования к размещению воздухозабора. В установках, используемых в помещениях с большой степенью запыленности, следует устанавливать усиленный воздушный фильтр на входе т(циклонного, листового или барабанного ленточного фильтра). В таких случаях нужно учитывать падение давления на предварительном фильтре: оно не должно превышать максимальных пределов, предписываемых производителем.

Если всасываемый воздух холодный, это приносит свои выгоды. Поэтому подвод воздуха к компрессору снаружи здания по отдельному трубопроводу может оказаться более подходящим.

Для этой цели нужно использовать устойчивые к коррозии трубы, оснащенные сеткой, закрывающей впускное отверстие, и устроенные таким образом, чтобы исключить возможность всасывания снега и капель дождя в компрессор. Также важно использовать трубы достаточно большого диаметра, что позволяет предельно минимизировать падение давления.

3:28



Конструкция компрессорной установки должна быть удобной для технического обслуживания и предусматривать будущее возможное расширение. Ширина прохода в точках технического обслуживания перед электрическими шкафами должна быть не менее 1200 мм.

Особенно важна конструкция всасывающего трубопровода для поршневых компрессоров. Резонанс трубы, вызванный частотой периодических пульсаций, может повредить компрессор, вызывает вибрацию и воздействует на окружающую среду низкочастотным шумом.

3.5.5. Вентиляция компрессорного зала

Все компрессоры в компрессорном зале выделяют тепло. Посредством вентиляции это тепло отводится из компрессорного зала. Количество необходимого для вентиляции воздуха определяется размером компрессора, а также тем, охлаждается он воздухом или водой.

Воздух для вентиляции компрессора с воздушным охлаждением содержит в виде тепла почти 100% энергии, потребляемой электродвигателем. Воздух для вентиляции компрессора с водяным охлаждением содержит менее 10% потребляемой электродвигателем энергии. Для поддержания температуры в компрессорной на приемлемом уровне тепло следует отводить. Производитель компрессора должен предоставить подробную информацию, касающуюся требующейся вентиляции, но ее можно также рассчитать по формуле:

3:29

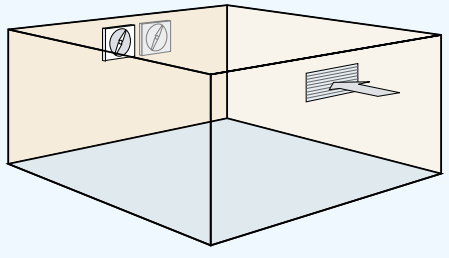
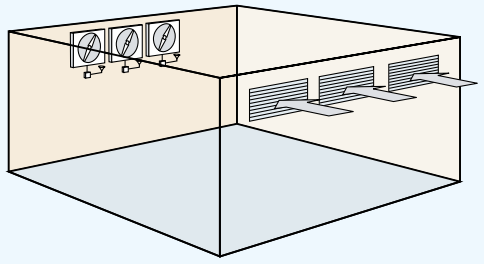


Схема основного технического решения конструкции вентиляции. Недостатком является то, что вентиляция, независимо от наружной температуры, остается постоянной. При установке двух компрессоров могут возникнуть дополнительные трудности. Производительность вентиляторов будет чрезмерной, когда работает только один компрессор. Эту проблему можно решить, оснастив вентиляторы двигателями с регулируемой скоростью, которые будут включаться через многоступенчатый термостат.

3:30



Здесь показано, как можно спроектировать систему с несколькими управляемыми от термостата вентиляторами, которые совместно могут удовлетворять всю потребность в вентиляции. Термостаты отдельных вентиляторов устанавливаются для разных диапазонов, а это значит, что количество воздуха, подаваемого для вентиляции, может изменяться в зависимости от наружной температуры и/или количества работающих компрессоров (так как термостаты будут включать вентиляторы один за другим в зависимости от температуры в компрессорном зале). В альтернативном варианте вентиляторы могут включаться через многоступенчатый термостат.

$$Q_V = \frac{P_V}{1{,}25 \times \Delta T}, \text{ где}$$

P_V – количество воздуха, требуемое для вентиляции, $м^3/с$

Q_V – тепловой поток, кВт

ΔT – допустимое повышение температуры, °C

Лучший способ решения проблемы – рекуперировать тепловую энергию и использовать ее на предприятии.

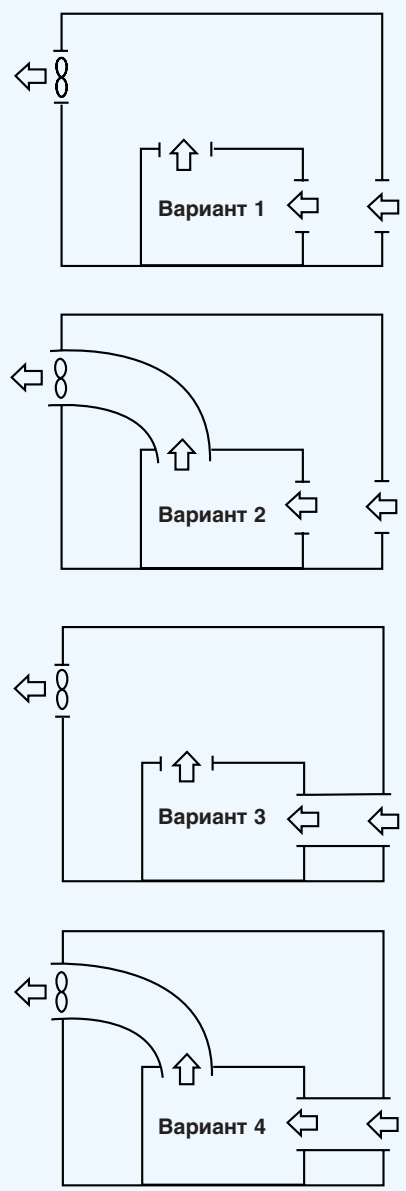
Воздух для вентиляции следует забирать снаружи, лучше всего обойтись без длинного воздуховода. Отверстие для забора воздуха для вентиляции следует, по возможности, располагать на северном фасаде или в другом затененном месте так, чтобы летом всасываемый воздух имел достаточно низкую температуру. Снаружи воздухозаборное отверстие нужно закрывать решеткой, а внутри устанавливать заслонку для управления воздушным потоком, что даст возможность предотвратить попадание посторонних предметов и холодные сквозняки.

Кроме того, следует впускное отверстие размещать как можно ниже и в то же время не допускать попадания в него зимой снега. Также следует предусмотреть защиту от возможного проникновения в компрессорный зал пыли, взрывоопасных веществ и веществ, вызывающих коррозию.

Вентилятор (или вентиляторы) размещают в верхней части одной из стен компрессорного зала, а воздухозаборное отверстие – на противоположной стене. Скорость движения воздуха не должна превышать 4 м/с.

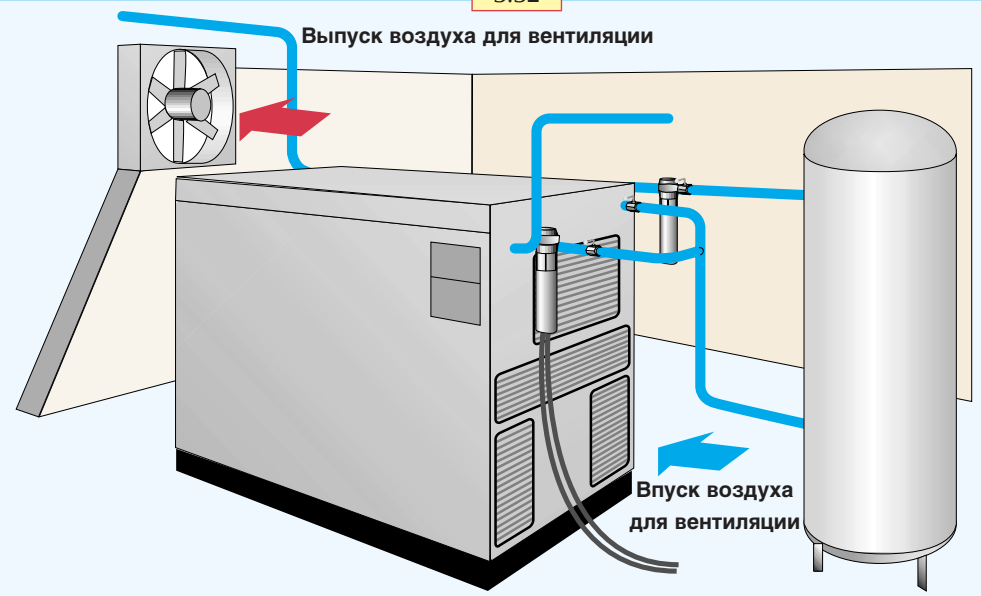
Лучше всего с данной задачей справляются вентиляторы, управляемые термостатом. Их производительность выбирается такой, чтобы преодолевалось падение давления в воздуховоде, внешней настенной решетке, заслонке для управления воздушным потоком и т.д. Количество подаваемого для вентиляции воздуха должно быть достаточным для ограничения роста температуры в помещении в пределах 7–10°С. При возникновении проблем с устройством достаточной вентиляции в компрессорном зале следует рассмотреть возможность использования компрессоров с водяным охлаждением.

3:31



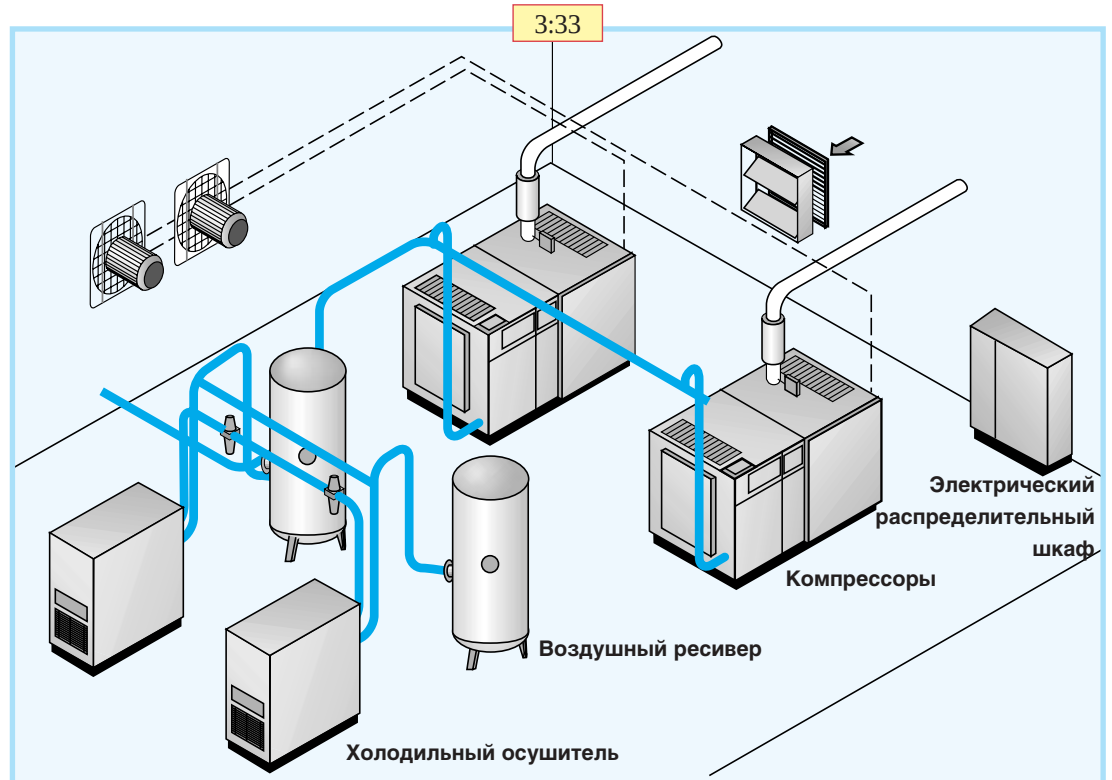
Примеры различных технических решений вентиляции.

3:32



Практический вариант малой компрессорной установки. Труба для слива конденсата не должна заканчиваться под поверхностью воды в отверстии в полу для стока. При риске содержания в воде масла установите маслоотделитель.

3:33



Компрессорная установка (смонтированная в больнице) с изолированной подачей воздуха на всасывание и 100%-ным резервированием (две независимые системы).

3.6 Устройство сети сжатого воздуха

3.6.1. Общие сведения

К системам распределения сжатого воздуха предъявляются три требования, выполнение которых обеспечивает их надежную работу и хорошие экономические показатели. К ним относятся: низкое падение давления между компрессором и местом потребления, минимальные утечки и максимально возможное отделение конденсата в системе, если не установлен осушитель сжатого воздуха.

Это в первую очередь относится к магистральным трубопроводам. Стоимость установки труб большего диаметра, а также требующейся арматуры низка по сравнению с реконструкцией системы, которая потребуется позже. Трассировка сети воздуховодов, конструкция и диаметры труб важны для эффективной работы установки, надежности и расходов на ее эксплуатацию. Иногда значительное падение давления в трубопроводе компенсируется повышением рабочего давления компрессора, например с 7 бар (изб.) до 8 бар (изб.). Это дает незначительную экономию сжатого воздуха. Когда потребление сжатого воздуха снижается, падение давления также снижается и давление в точке потребления возрастает выше допустимого уровня.

Стационарные установки сжатого воздуха должны быть рассчитаны так, чтобы падение давления в трубопроводах от компрессора до самого удаленного потребителя не превышало 0,1 бар. К этому нужно добавить падение давления в шлангах, соединениях шлангов и арматуре. Особенно важно определить размеры этих компонентов, так как наибольшее падение давления очень часто происходит именно в соединениях.

Наибольшую допустимую протяженность трубопроводной сети для указанного падения давления можно вычислить по следующей эмпирической формуле:

$$l = \frac{\Delta p \times d^5 \times p}{450 \times Q_c^{1,85}}, \text{ где}$$

l – общая длина трубопровода, м

Δp – наибольшее допустимое падение давления в сети, бар

p – абсолютное давление на входе, бар

Q_c – производительность компрессора – FAD, л/с

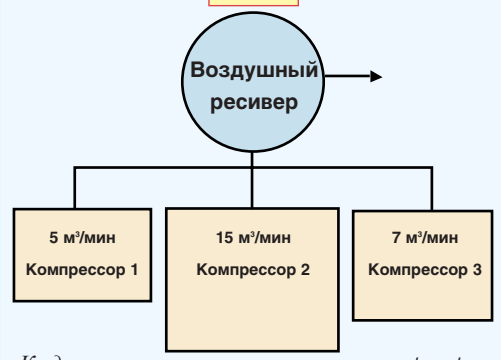
d – внутренний диаметр трубопровода, м

Самым приемлемым решением является проектирование трубопроводной системы в виде кольцевой линии вокруг зоны, где имеются потребители сжатого воздуха. От магистральной трубы отводятся ответвления до потребителей. Это обеспечивает равномерную подачу сжатого воздуха, несмотря на сильные пульсации потребления, так как воздух к действующим точкам потребления подается с двух направлений.

Такую систему следует использовать для всех установок, даже если некоторые потребители находятся на большом расстоянии от компрессорной установки. К этим зонам прокладывается отдельная магистраль.

3.6.1.1. Воздушный ресивер

В каждую компрессорную установку включается один или несколько воздушных резервуаров. Их размер определяется, например, производительностью компрессора, системой регулирования и требованиями потребителей к сжатому воздуху потребителей. Воздушный ресивер представляет собой хранилище сжатого воздуха, которое сглаживает поступающие от компрессора пульсации, охлаждает воздух и собирает конденсат. Соответственно, воз-



Когда система состоит из нескольких компрессоров, размер воздушного ресивера всегда рассчитывается исходя из производительности наибольшего компрессора.

душный ресивер должен оснащаться дренажными устройством.

При определении объема ресивера применяется приведенная ниже формула. Обратите внимание, что формула применима только к компрессорам с регулированием путем разгрузки/нагрузки.

$$V = \frac{0,25 \times Q_c \times p_1 \times T_0}{f_{max} \times (p_U - p_L) \times T_1}, \text{ где}$$

V – объем воздушного ресивера, л

Q_c – производительность компрессора – FAD, л/с

p_1 – давление на входе компрессора, бар (абс.)

T_1 – максимальная температура на входе компрессора, К

T_0 – температура сжатого воздуха в ресивере, К

$(p_U - p_L)$ – заданная разность давлений нагрузки и разгрузки компрессора

f_{max} – максимальная частота = = 1 цикл/30 секунд (применяется для компрессоров компании Atlas Copco)

Ниже приведена упрощенная формула, которая применяется в следующих условиях: давление окружающего воздуха 1 бар (абс.), температура – примерно 20°C, время цикла – 30 секунд.

$$V = \frac{Q}{8 \times \Delta p}, \text{ где}$$

V – объем воздушного ресивера, м³

Q – производительность наибольшего компрессора, м³/мин

Δp – желательная разность давлений, бар

Когда в короткие промежутки времени потребляются большие объемы сжатого воздуха, неэкономично рассчитывать параметры компрессора или трубопроводной сети в соответствии с таким потреблением. В этом случае вблизи потребителя размещается отдельный воздушный ресивер, а его объем выбирается в соответствии с максимальным расходом.

В экстремальных ситуациях используется меньший компрессор высокого давления вместе с большим воздушным ресивером, способным покрывать большое краткосрочное потребление сжатого воздуха в промежутках между длительными интервалами отсутствия потребления. Затем компрессор рассчитывается на среднее потребление. Для расчета такого резервуара применяется следующая формула:

$$V = \frac{Q \times t}{p_1 - p_2} = \frac{L}{p_1 - p_2}, \text{ где}$$

V – объем воздушного ресивера, л

Q – расход воздуха в течение фазы разгрузки ресивера, л/с

t – продолжительность фазы разгрузки ресивера, с

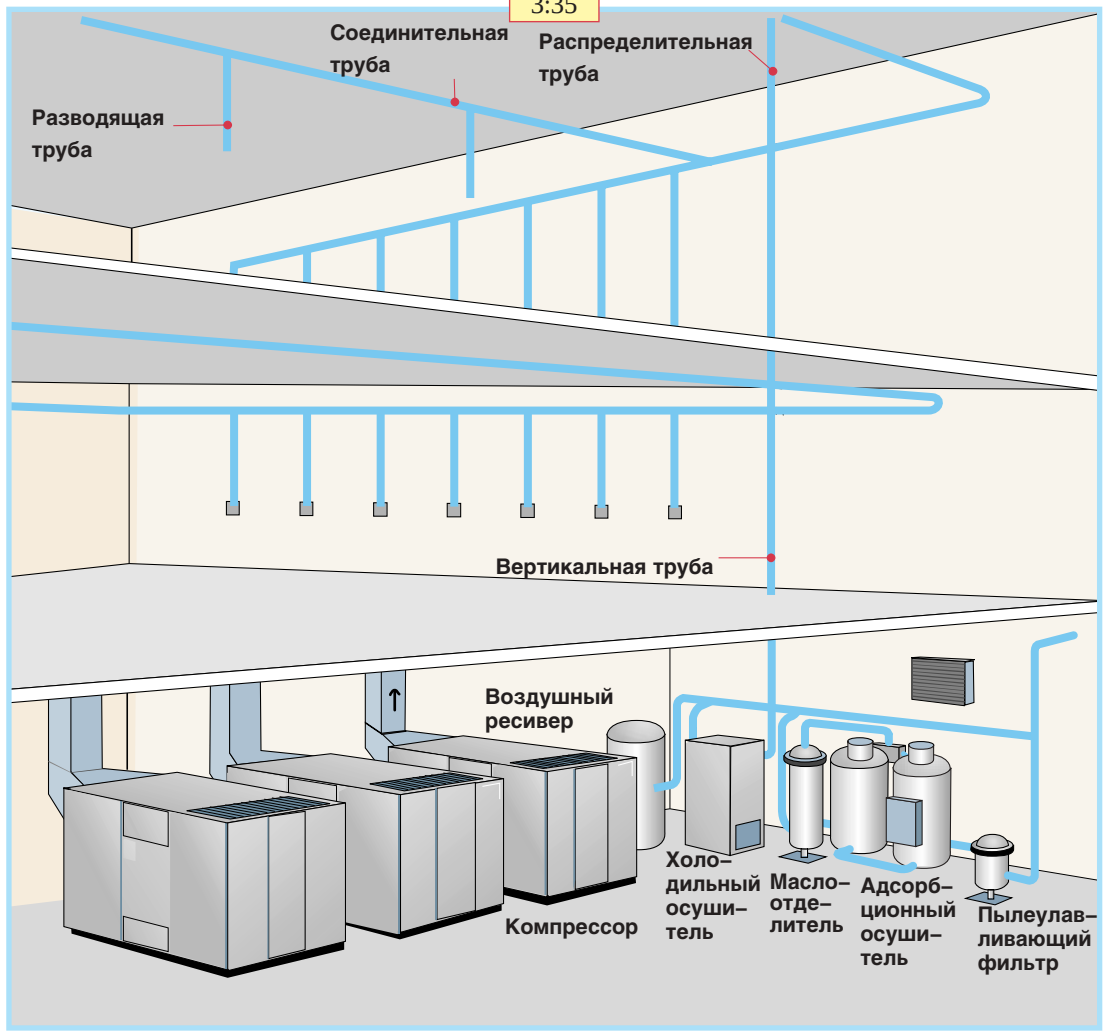
p_1 – нормальное рабочее давление в сети, бар

p_2 – минимальное давление, необходимое для работы потребителя, бар

L – потребление воздуха в фазе заполнения ресивера, л/рабочий цикл

В приведенной формуле не учитывается тот факт, что компрессор может поставлять сжатый воздух во время фазы разгрузки ресивера. Обычно такая система применяется для пуска больших судовых двигателей, где давление в ресивере равняется 30 бар.

3:35



3.6.2. Конструкция сети сжатого воздуха

В небольших установках одна и та же труба может служить в качестве вертикальной и распределительной. При проектировании и определении параметров сети сжатого воздуха отправным пунктом является список оборудования, где перечислены все потребители сжатого воздуха, и дан чертеж, показывающий их расположение. Потребители группируются в логические блоки и питаются от одной и той же распределительной трубы. Распределительная труба в свою очередь питается через вертикальную трубу от компрессорной централи. Более крупную сеть сжатого воздуха можно разделить на четыре основные части: вертикальные трубы, распределительные трубы, разводящие трубы и арматура для сжатого воздуха. Вертикальные трубы транспортируют сжатый воздух от компрессорной централи до зоны потребления.

Распределительные трубы распределяют сжатый воздух по зонам его потребления. Разводящие трубы подают сжатый воздух из распределительных трубопроводов к рабочим местам. Арматура для сжатого воздуха представляет собой соединения между разводящими трубами и потребителями сжатого воздуха.

3.6.3. Определение параметров сети сжатого воздуха

Давление, получаемое непосредственно на выходе компрессора, вообще говоря, никогда не может использоваться полностью. Поэтому нужно рассчитать потери, связанные с распределением сжатого воздуха, в первую очередь потери на трение в трубопроводах. Кроме того, в вентилях и в изгибах труб происходят дросселирование и изменения направления потока. Потери, которые преобразуются в тепло, приводят к падению давления, и его для прямой трубы можно вычислить по формуле:

$$\Delta p = 450 \times \frac{q_v^{1,185} \times l}{d^5 \times p}, \text{ где}$$

Δp – падение давления, бар
q_v – производительность – FAD, л/с
d – внутренний диаметр трубы, мм
l – длина трубы, м
p – начальное абсолютное давление, бар

3:36

Элемент	Эквивалентная длина в метрах. Внутренний диаметр трубы в мм (d)										
	25	40	50	80	100	125	200	250	250	300	400
Шаровой вентиль (полный поток)	0.3 5	0.5 8	0.6 10	1.0 16	1.3 20	1.6 25	1.9 30	2.6 40	3.2 50	3.9 60	5.2 80
Диафрагменный вентиль, полностью открыт	1.5	2.5	3.0	4.5	6	8	10	-	-	-	-
Угловой запорный вентиль, полностью открыт	4	6	7	12	15	18	22	30	36	-	-
Тарельчатый вентиль	7.5	12	15	24	30	38	45	60	-	-	-
Откидной обратный клапан	2.0	3.2	4.0	6.4	8.0	10	12	16	20	24	32
Колено R = 2d	0.3	0.5	0.6	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.6	4.8
Колено R = d	0.4	0.6	0.8	1.3	1.6	2.0	2.4	3.2	4.0	4.8	6.4
Угол 90°	1.5	2.4	3.0	4.5	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Продольный поток тройника	0.3	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	3	4	5	6	8
Боковой поток тройника	1.5	2.4	3.0	4.8	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Переходный ниппель	0.5	0.7	1.0	2.0	2.5	3.1	3.6	4.8	6.0	7.2	9.6

В таблице показаны некоторые типы арматуры и их влияние на потери в трубах разного диаметра. Потери пересчитываются в соответствующее увеличение длины трубопроводной сети (м).

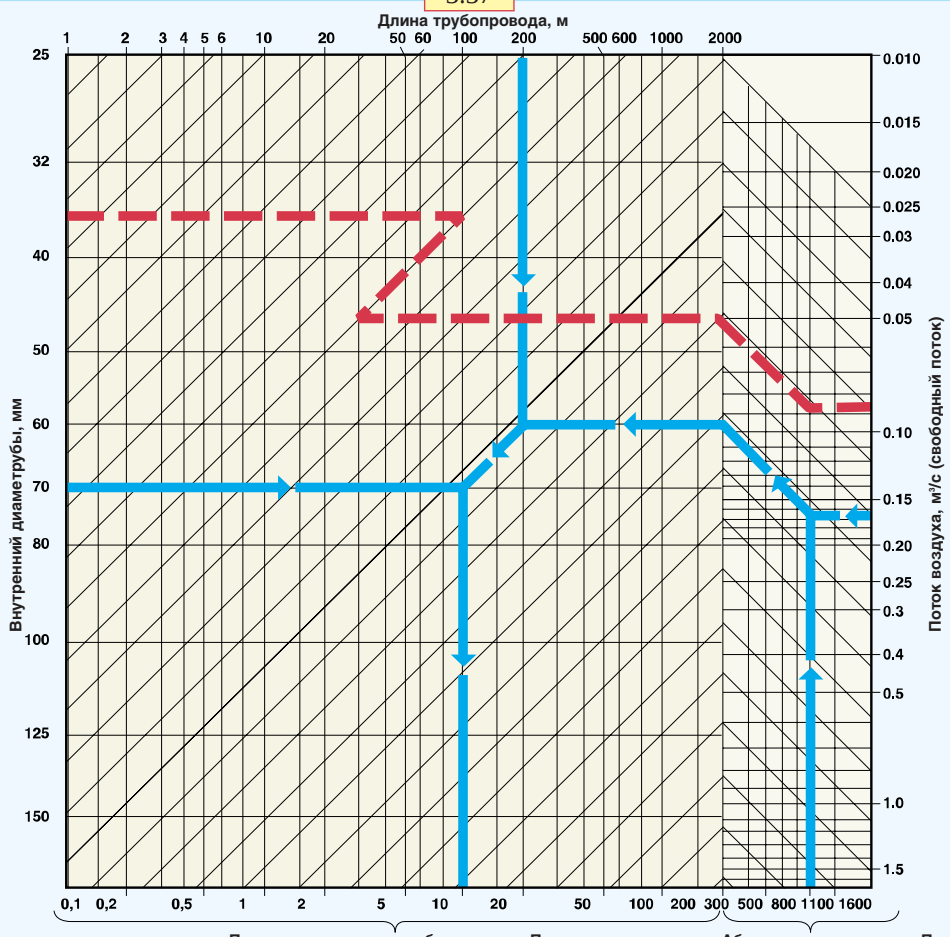
При расчете различных частей сети сжатого воздуха могут использоваться следующие значения допустимого падения давления:

Падение давления в разводящих трубах	**0,03 бар**
Падение давления в распределительных трубах	**0,05 бар**
Падение давления в вертикальных трубах	**0,02 бар**
Общее падение давления в стационарной трубопроводной сети	**0,10 бар**

Требуемая длина труб для различных частей сети (в вертикальных, распределительных и разводящих трубопроводах) рассчитывается приближенно. Подходящей основой для оценки длины является чертеж в масштабе с планом вероятной сети. Длина трубопровода корректируется добавлением эквивалентной длины трубопровода для вентилей, клапанов, изгибов труб, соединений и т.д., как показано на рис. 3:36. При расчете диаметра трубопровода в качестве альтернативы формуле, приведенной на стр. 99, можно для получения наиболее подходящего диаметра трубопровода воспользоваться номограммой, приведенной на рис. 3:37. Для проведения расчетов нужно знать расход, давление, допустимое падение давления и длину трубопровода. Затем для установки выбирается стандартная труба ближайшего большего диаметра.

Эквивалентные длины труб для всех частей установки рассчитываются с использованием списка арматуры и компонентов труб, а также с учетом сопротивления потоку, выраженного в виде длины трубы. Эти «дополнительные» длины труб добавляются к начальной длине трубопровода. Выбранные размеры сети затем пересчитываются, чтобы быть уверенными, что падение давления не будет слишком велико. Отдельные участки (разводящие, распределительные и вертикальные трубы) в большой установке следует рассчитывать по отдельности.

3:37



3.6.4. Измерение расхода

Размещенные в стратегических пунктах расходомеры позволяют вести внутренний учет и определять ассигнования на использование сжатого воздуха внутри компании. Сжатый воздух является средством производства и подлежит учету в качестве производственных расходов отдельных подразделений компании. Поэтому все, кого это касается, заинтересованы в уменьшении расходования сжатого воздуха в пределах различных подразделений компании.

Имеющиеся на рынке современные расходомеры предоставляют все возможности – от считывания числовых значений до ввода данных измерений непосредственно в компьютер или в модуль учета.

Расходомеры, как правило, монтируются вблизи запорных вентилей. Измерения в кольцевых трубопроводах предъявляют дополнительные требования, так как расходомер должен быть способен измерять поток, протекающий как вперед, так и назад.

3.7 Передвижные компрессоры

3.7.1. Общие сведения

В настоящее время фактически все передвижные компрессоры содержат винтовой компрессорный элемент с нагнетанием масла, приводимый в движение от дизельного двигателя. Безмасляные компрессоры применяются только, например, для сервисных работ в обрабатывающей промышленности.

3.7.2. Шум и выхлопные газы

Компрессоры с дизельным двигателем современной конструкции имеют очень низкий уровень шума, соответствующий применяемым в ЕС стандартам (ISO 84/536/EC), и поэтому могут использоваться в жилых районах, вблизи больниц и т.д.

За последние годы положение дел с экономией топлива за счет эффективных винтовых компрессорных элементов и дизельных двигателей с более высоким кпд значительно улучшилось. Это особенно важно, например, при бурении скважин, где компрессор интенсивно работает продолжительное время. В настоящее время существуют двигатели, в которых выпуск выхлопных газов соответствует жестким требованиям, установленным стандартом EURO-1. Подрядчики, выполняющие работы в

3:38

Диапазон давлений	Давление (бар)	Область применения
Низкое	≥7	Подрядные работы
Среднее	10 – 12	Струйная очистка, землеройные работы
Высокое	≈20	Бурение водяных, газовых и нефтяных скважин, геотехническая разведка

Передвижные компрессоры работают в основном в трех различных диапазонах давлений.

больших городах, в настоящее время должны использовать оборудование, соответствующее этому стандарту.

3.7.3. Диапазон давлений

Современные передвижные компрессоры имеют хорошие экономические показатели благодаря высокой эксплуатационной надежности, эксплуатационным характеристикам, компактным размерам и малому общему весу. Конструкция их шасси обычно предназначена для транспортировки со скоростью 30 км/ч или 80 км/ч. Что касается стационарных компрессоров, для них имеется разнообразное дополнительное оборудование, например, концевые охладители, различные комплекты фильтров (пылеулавливающие фильтры, угольные фильтры и т.д.), нагреватели и системы смазки. Они могут также оснащаться оборудованием для запуска в холодном состоянии и генератором 230/400 В. Существуют передвижные генераторы с дизельным приводом, встраиваемые аналогичным образом в передвижные компрессоры с более высокой потребляемой мощностью. Классы мощности начинаются от 10 кВт и выше.

3.8 Электрическая часть

3.8.1. Общие сведения

Для определения размера и монтажа компрессорной установки необходимо знать, как ее части взаимодействуют друг с другом и какие применяются правила и нормативные положения.

3:39

Передвижной компрессор.

Здесь приводится обзор параметров, дающих возможность получить компрессорную установку, в которой электрическое оборудование будет работать удовлетворительно.

3.8.2. Двигатели

В компрессорах используются трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Низковольтные двигатели обычно бывают мощностью до 450 кВт, а для питания двигателей большей мощности наилучшим вариантом будет высокое напряжение.

Двигатели класса IP54 – пыле- и брызгозащищенное исполнение – предпочтительнее, нежели открытые двигатели – IP23, требующие регулярной разборки и очистки.

В противном случае отложения пыли в двигателе, в конце концов, вызовут перегрев, что приведет к сокращению срока службы.

Двигатель, как правило, охлаждаемый вентилятором, предназначен для работы при температуре окружающего воздуха не выше 40°C. При высоких температурах мощность двигателя должна быть снижена. Двигатель обычно крепится фланцем и присоединяется непосредственно к компрессору. Скорость двигателя приспосабливается к скорости компрессорного элемента, но на практике используются исключительно 2-полюсные и 4-полюсные двигатели с числом оборотов, соответственно, 3000 об/мин и 1500 об/мин.

Номинальная мощность двигателя также определяется, исходя из производительности компрессора, и должна быть как можно ближе к потребляемой компрессором мощности.

Слишком большие двигатели стоят дороже, потребляют чрезмерно большой пусковой ток, требуют более крупных предохранителей, имеют низкий коэффициент мощности и низкий кпд. Слишком малые двигатели перегружаются, следовательно, здесь существует риск поломки.

При выборе того или иного двигателя нужно также учитывать такой параметр, как способ пуска. При пуске с переключением со звезды на треугольник двигатель запускается с моментом вращения, равным четверти номинального момента. Поэтому нужно сопоставить и согласовать кривые моментов вращения двигателя и компрессора, чтобы обеспечить правильный пуск компрессора (см. 3.8.3.).

3.8.3. Способы пуска

Чаще всего применяются следующие способы пуска: прямой пуск, пуск с переключением со звезды на треугольник и плавный пуск. Прямой пуск прост, для него требуются только контактор и реле защиты от перегрузки. Недостатками являются сильный пусковой ток, превышающий номинальный ток в 6–10 раз, и иногда слишком большой пусковой момент вращения, при котором могут, например, повредиться валы и муфты.

Пуск с переключением со звезды на треугольник используется для ограничения пускового тока. Пускатель состоит из трех контакторов, реле защиты от перегрузки и реле времени. Двигатель пускается подключенным звездой, и через заданное время (когда его скорость вращения достигнет 90% номинальной) таймер переключает контакторы так, чтобы двигатель был подключен треугольником, что является эксплуатационным режимом двигателя (см. 1.6.5.7.).

3:40

Зависимость тока от времени при различных способах пуска.

Пуск с переключением со звезды на треугольник уменьшает пусковой ток примерно до 1/3 тока, наблюдаемого при прямом пуске, однако в то же время пусковой момент падает до четверти номинального. Относительно малый пусковой момент требует, чтобы нагрузка на двигатель была низкой в пусковой период, когда двигатель фактически достигает своей номинальной скорости перед переключением на треугольник. Если скорость слишком мала, пиковое значение тока/момента во время переключения на треугольник может быть так же велико, как при прямом пуске.

Альтернативой пуску с переключением со звезды на треугольник может выступать плавный пуск. В этом случае в пускателе вместо механических контакторов используются полупроводниковые приборы (тиристоры). Тиристоры управляются линейным изменением напряжения так, что в двигатель подается равномерно возрастающий ток. Пуск происходит плавно, и пусковой ток не превышает примерно трехкратного значения номинального тока.

Пускатели для прямого пуска и пуска с переключением со звезды на треугольник в большинстве случаев встраиваются в компрессор. Для больших компрессорных установок они могут размещаться отдельно в распределительном устройстве, что может быть мотивировано требованиями к пространству, тепловыделением и необходимостью доступа для технического обслуживания.

Пускатели для плавного пуска обычно устанавливаются отдельно вблизи компрессора. Пусковая аппаратура компрессоров с высоковольтным питанием всегда размещается в распределительном блоке.

3.8.4. Управляющее напряжение

Обычно на компрессор отдельное управляющее напряжение не подается, так как большинство компрессоров оснащены встроенным трансформатором для питания цепей управления. Первичная обмотка трансформатора подключается к линиям питания компрессора. Такое устройство работает более надежно . В случае нарушения питания компрессор немедленно остановится, и перезапуск будет заблокирован.

Такую функцию с питающим напряжением, подаваемым изнутри, следует воспроизводить и в тех случаях, когда пускатель размещается вне компрессора.

3.8.5. Защита от короткого замыкания

Защита от короткого замыкания выполняется с помощью предохранителей или автоматического выключателя, размещаемых в точках подключения кабелей. Независимо от выбранного решения, при правильном подборе параметров это обеспечит хорошую защиту.

Оба способа имеют как преимущества, так и недостатки. Предохранители, как известно, работают лучше автоматических выключателей при больших токах короткого замыкания, но они размыкают не все фазы и имеют продолжительное время отключения при малых токах короткого замыкания. Автоматический выключатель полностью размыкает все три фазы и быстро срабатывает даже при малых токах короткого замыкания, но требует большего объема работ на стадии проектирования по сравнению с предохранителями. Выбор параметров защиты от короткого замыкания основывается на ожидаемой нагрузке, а также на ограничениях, накладываемых пусковым блоком.

Что касается защиты от короткого замыкания пускателя, см. стандарт IEC (Международной электротехнической комиссии) 947-4-1, тип 1 и тип 2. Воздействие короткого замыкания на пускатель будет определяться тем, какой из вариантов выбран, тип 1 или тип 2.

Тип 1: «Может произойти повреждение контакторов и реле перегрузки. Может понадобиться замена компонентов».
Тип 2: «Происходит повреждение реле перегрузки. Допускается легкое оплавление контактов контактора. Будет возможен перезапуск пускателя в рабочем режиме с помощью основных мероприятий».

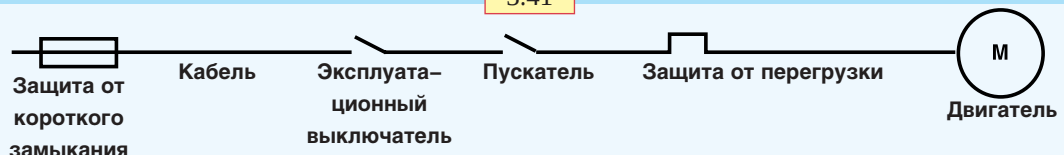
3.8.6. Кабели

В соответствии с правилами кабели должны «иметь такое сечение, чтобы при нормальной работе они не нагревались до опасных температур, и они не должны иметь тепловых или механических повреждений при коротком замыкании». Выбор сечений и выбор кабелей основывается на нагрузке, допустимом падении напряжения, способах прокладки (на полках, по стене и т.д.) и температуре окружающего воздуха. Для защиты кабелей могут использоваться, например, предохранители и могут быть выполнены как защита от короткого замыкания, так и защита от перегрузки. Для двигателя используется защита от короткого замыкания (например, предохранители) и отдельная защита от перегрузки (обычно защита двигателя содержится в пускателе).

Защита от перегрузки защищает двигатель и питающие кабели двигателя, выключая и размыкая пускатель, когда ток нагрузки превышает заданное значение. Защита от короткого замыкания защищает пускатель, защиту от перегрузки и кабели. Как выбирать сечения кабелей с учетом нагрузки, указано в стандарте IEC 364 5 523 (SS 4241424).

При выборе сечений кабелей и защиты от короткого замыкания нужно учитывать еще один параметр, называемый «условие размыкания». Это условие означает, что установка должна быть сконструирована так,

3:41



Базовая схема подключения электродвигателя к электрической сети.

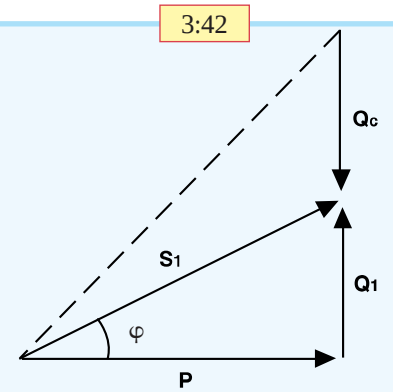
чтобы короткое замыкание в любом месте установки вызывало быстрое и надежное размыкание защитной аппаратуры. Выполнение этого условия определяется, среди прочего, защитой от короткого замыкания, длиной и сечением кабеля.

3.8.7. Компенсация сдвига фаз

Электродвигатель потребляет не только активную мощность, которая преобразуется в механическую работу, но также и реактивную мощность, которая необходима для намагничивания двигателя. Реактивная мощность нагружает кабели и трансформатор. Соотношение между активной и реактивной мощностями определяется коэффициентом мощности или cosφ. Его значение обычно колеблется от 0,7 до 0,9, причем меньшее значение относится к маленьким двигателям.

Генерируя реактивную мощность непосредственно в двигателе с помощью конденсатора, коэффициент мощности можно увеличить практически до 1. Это позволяет уменьшить реактивную мощность, извлекаемую из сети. Стимулом для компенсации сдвига фаз может служить то, что поставщик электричества может начислить дополнительную плату за получаемую из сети реактивную мощность, превышающую установленный уровень, и то, что нужно разгрузить тяжело нагруженные трансформаторы и кабели.

3:42



Реактивная мощность Qc подается для увеличения коэффициента мощности (cosφ) двигателя до значения, близкого к 1.

3.9 Шум

3.9.1. Общие сведения

Шум – форма энергии, которая в виде продольных волн распространяется в помещении по воздуху, являющемуся упругой средой. Движение волны вызывает изменения давления, которые регистрируются чувствительными к давлению приборами, например микрофоном. Поэтому микрофон является одной из основных частей всех приборов для измерения шума. Измерять звуковую мощность в единицах системы СИ, ваттах, достаточно трудно из-за диапазона, охватываемого окружающими нас шумами. Вместо этого акустики говорят об уровнях и измеряют шум относительно опорного уровня. Измерения становятся осуществимыми при использовании логарифмирования отношения. Формула выглядит так:

$L_W = 10 \times \log_{10} \times W/W_0$, где
L_W – уровень звуковой мощности, дБ
W – фактическая звуковая мощность, Вт
W_0 – опорная звуковая мощность, обычно 10–12, Вт

3.9.2. Звуковое давление

Звуковое давление является мерой интенсивности звука. Оно вычисляется по формуле:

$L_P = 20 \times \log_{10} \times p/p_0$, где
L_P – уровень звукового давления, дБ
p – фактическое звуковое давление, Вт
p_0 – опорное звуковое давление, обычно $0{,}0002 \times 10^{-6}$, бар

Уровень звукового давления всегда указывают для определенного расстояния от источника звука, например машины. Для стационарных компрессоров это расстояние 1 м, а для передвижных компрессоров – 7 м (согласно стандарту CAGI Pneurop).

Информация о звуковом давлении обязательно должна дополняться константой помещения, в котором производилось измерение. В противном случае помещение будет считаться безграничным, т.е. открытым пространством. В безграничном помещении отсутствуют стены, от которых могут отражаться звуковые волны, также влияющие на результат измерения.

3.9.3. Поглощение звука

При вступлении звуковых волн в контакт с поверхностью часть этих волн отражается, а часть поглощается материалом, из которого состоит поверхность. Поэтому в каждый определенный момент звуковое давление состоит частично из звука, генерируемого источником звука, и частично из звука, отраженного от окружающих источник поверхностей (после одного или нескольких отражений).

Эффективность поглощения звука поверхностью зависит от материала, из которого она изготовлена, и обычно выражается коэффициентом поглощения (от 0 до 1).

3.9.4. Константа помещения

Константа помещения вычисляется для помещения с несколькими стенами и прочими поверхностями и зависит от абсорбционных характеристик различных поверхностей. Она вычисляется по формуле:

$$K = \frac{A \times \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\text{суммарное поглощение}}{\text{суммарная площадь}} = \frac{A_1 x \alpha_1 + A_2 x \alpha_2 + A_i x \alpha_i}{A_1 + A_2 + A_i}$$

K – константа помещения, м²
$\bar{\alpha}$ – средний коэффициент поглощения для данного помещения
A – общая площадь помещения, м²; A_1, A_2 и т.д. представляют собой части поверхности помещения с коэффициентами поглощения соответственно α_1, α_2 и т.д.

3.9.5. Реверберация

Время реверберации определяется как время, за которое среднее звуковое давление уменьшится на 60 дБ после того, как источник звука прекращает звучать. Средний, или эквивалентный, коэффициент поглощения для помещения вычисляется следующим образом:

$$\bar{\alpha} = \frac{0{,}163 \times V}{T}, \text{ где}$$

V – объем помещения, м³
T – время реверберации, с

Константу помещения можно получить, если это выражение подставить в уравнение:

$$K = \frac{A \times \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}, \text{ где}$$

A – общая площадь помещения, м²

3.9.6. Соотношение между звуковой мощностью и звуковым давлением

Звук, излучаемый точечным источником в помещении без отражающих поверхностей, равномерно распространяется во всех направлениях, и потому измеренная интенсивность будет одинаковой во всех точках, находящихся на одинаковом расстоянии от источника звука. Это означает, что интенсивность звука во всех точках, находящихся на сферической поверхности, центром которой является источник звука, является постоянной.

Отсюда можно сделать вывод, что уровень звука падает на 6 дБ при каждом удвоении расстояния от источника звука. Однако это положение неприменимо к тем случаям, когда помещение имеет твердые, отражающие звук стены. В этом случае нужно учитывать отраженный от стен звук. Если ввести коэффициент направления, получается следующее выражение:

$$L_p = L_w + 10 \lg \frac{Q}{4\pi r^2}, \text{ где}$$

L_p – уровень звукового давления, дБ
L_w – уровень звуковой мощности, дБ
Q – коэффициент направления
r – расстояние до источника звука

Для Q используется эмпирическое значение (для остальных положений источника звука нужно взять оценочное значение Q):

Q = 1	Если источник звука подвешен в середине обширного помещения.
Q = 2	Если источник звука размещен на твердом, отражающем звук полу вблизи центра стены или потолка.
Q = 4	Если источник звука размещен вблизи пересечения стены и пола или стены и потолка.
Q = 8	Если источник звука размещен в углу вблизи пересечения трех поверхностей.

Если источник звука находится в помещении, в котором ограничивающие его поверхности не поглощают весь звук, уровень звукового давления будет возрастать вследствие эффекта реверберации. Это прибавление обратно пропорционально константе помещения:

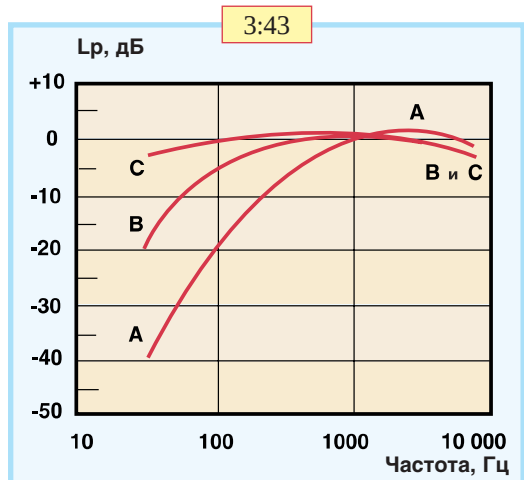
$$L_p = L_w + 10 \lg \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{K} \right]$$

Если это уравнение изобразить в виде серии кривых, то видно, что вблизи источника звука при каждом удвоении расстояния от источника звука уровень звукового давления падает на 6 дБ. Однако на значительном удалении от источника звука преобладает звуковая мощность отраженного звука, и поэтому с увеличением расстояния уменьшения звукового давления не происходит.

Если слушатель находится от центра машины, корпус или рама которой проводит звук, на расстоянии, более чем в 2–3 раза превышающем ее максимальный размер, такую машину можно рассматривать как точечный источник звука.

3.9.7. Звукометрия

Наше ухо различает звуки различных час-



Частотные кривые различных фильтров, используемых для определения уровней звука при звукометрии.

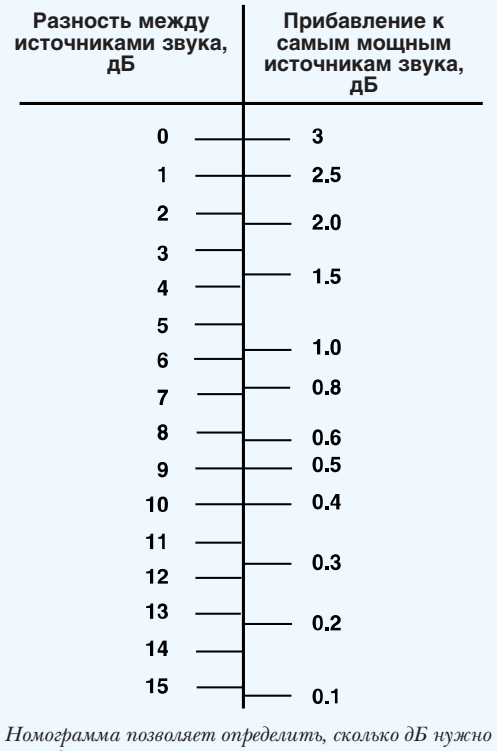
тот с разной отчетливостью. Звуки низкой и очень высокой частоты должны быть сильнее, чем звуки в полосе 1000–2000 Гц, чтобы они воспринимались как одинаковые по громкости.

Для моделирования способности человеческого уха слышать звуки разных частот используются различные фильтры, регулирующие измеряемые уровни звука на низких и высоких частотах. При измерении шума обычно используется фильтр А, а звук измеряется в дБА.

3.9.8. Взаимодействие нескольких источников звука

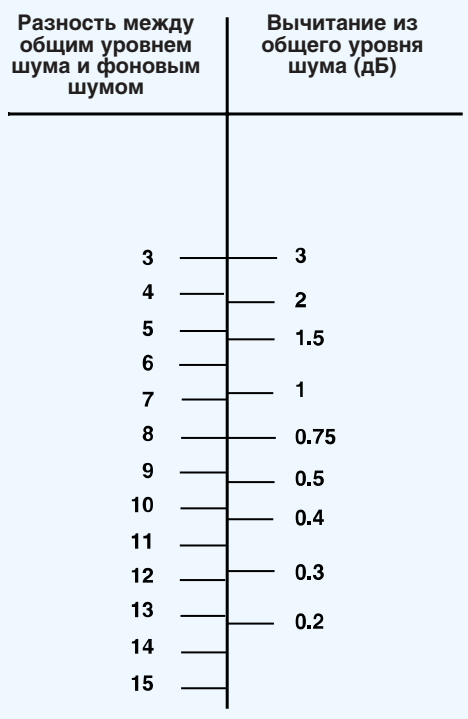
Когда в помещении имеется несколько источников звука, звуковое давление возрастает. Так как уровень звукового давления определяется по логарифмической шкале, уровни звукового давления нельзя складывать алгебраически. Когда одновременно действуют более двух источников звука, нужно начинать со сложения двух, а затем следующий источник прибавляется к сумме первых двух и т.д. Существует мнемоническое правило: сложение двух источников звука с одинаковыми уровнями приводит к росту на 3 дБ. Сложение десяти источников звука с одинаковыми уровнями приводит к росту на 10 дБ.

3:44



Номограмма позволяет определить, сколько дБ нужно прибавить к самому мощному источнику звука при сложении звуковой мощности двух источников звука.

3:45



Номограмма позволяет определить, сколько дБ нужно вычесть из общего уровня шума при различных уровнях фонового шума, чтобы оценить общий уровень шума.

Фоновый шум представляет собой особый случай. Он рассматривается в качестве отдельного источника шума, и его величина вычитается из общей величины остальных источников звука, чтобы произвести их специальную обработку.

3.9.9. Уменьшение шума

Существует пять способов уменьшения шума: звукоизоляция, звукопоглощение, виброизоляция, ослабление вибрации и ослабление источника шума.

Звукоизоляция представляет собой барьер, помещенный между источником шума и приемником. Это означает, что можно изолировать только часть звука, зависящую от площади барьера и характеристик изоляции. Тяжелый барьер более эффективен, чем легкий.

Что такое звукопоглощение? Источник звука окружается легким пористым звукопоглощающим материалом, прикрепленным к барьеру. Более толстые поглощающие материалы эффективней тех, что тоньше. Стандартная плотность составляет примерно 30 кг/м^3 для пенополиуретана и примерно 150 кг/м^3 для минеральной ваты.

Виброизоляция используется для предотвращения передачи вибрации от одной части конструкции к другой. Распространенной проблемой является передача вибрации от встроенной машины к барьеру и вниз в пол. Стальные пружины, пробка, пластик и резина являются образцами материалов, используемых для виброизоляции. Выбор материала и его размеров определяется частотой колебаний и требованиями к прочности опор машины.

Средство ослабления вибрации представляет собой конструкцию, оснащенную внешней ослабляющей звук поверхностью, изготовленной из упругого материала с большим коэффициентом гистерезиса. Когда ослабляющая звук поверхность имеет достаточную толщину, стена например, она эффективно защищена от вибрации и, таким образом, не начинает испускать шум.

Ослабление источника звука дает небольшой эффект, но зато требует небольших затрат. Таким способом можно добиться снижения общего уровня шума примерно на 5 дБ, в то время как интеграция может дать снижение примерно на 15–25 дБ.

3.9.10. Шум компрессорной установки

Уровень шума компрессора измеряется на машине в свободном пространстве. Когда она установлена внутри помещения, на уровень шума влияют свойства помещения. Имеют значение размер помещения, материал стен и потолка, а также наличие другого оборудования (и уровень его возможного шума).

Кроме того, место установки компрессора в помещении также влияет на уровень шума, как и расположение и подключение трубопроводов и т.п. Излучение шума трубопроводами сжатого воздуха зачастую является более серьезным источником шума, чем сам компрессор или его источник питания. Это может быть вибрация, передаваемая механическим путем на трубопровод, зачастую в сочетании с вибрацией, передаваемой через сжатый воздух. Поэтому важно устанавливать виброизоляцию и даже закрывать частично или полностью трубопроводную систему в сочетании с использованием ослабляющих шум материалов и уплотненных перегородок.

3.10 Стандарты, законы и постановления

3.10.1. Общие сведения

В сфере производства сжатого воздуха, как и во многих других отраслях, действуют определенные нормы. Это могут быть требования, определяемые законами и постановлениями, а также дополнительные правила, например национальные и международные стандарты. Иногда правила в стандартах обязательны для исполнения, например, когда они вступают в силу законодательным путем. Если стандарт цитируется в договоре, он тем самым также может стать обязательным.

Обязательные правила могут применяться, например, там, где речь идет о безопасности людей и собственности, в то время как дополнительные стандарты используются для того, чтобы облегчить деятельность, например, работу со спецификациями, выбор параметров качества, измерения, производственные чертежи и т.д.

3.10.2. Стандарты

Во многих случаях стандарты устанавливаются законодательно для создания желаемого уровня безопасности. Чтобы удовлетворять различным требованиям законодательства, необходимо выполнять подробные указания, приведенные в стандартах в отношении конструкции, оборудования и испытаний. Стандарты нужны всем: и производителю, и потребителю. Стандарты повышают взаимозаменяемость компонентов от разных производителей и возможность их сравнения в одинаковых условиях.

Стандарты разрабатываются и издаются на национальном, а также европейском и международном уровне. Международные стандарты, ISO и EN обычно вступают в силу в качестве национальных стандартов (в Швеции – SIS).

Органом стандартизации является ISO (Международная организация по стандартизации), женевское подразделение которой – CEN (Европейская комиссия по стандартизации) организует международные работы в этой области.

SIS (Шведская комиссия по стандартизации) ведет шведскую часть этой работы и, кроме того, руководит национальной стандартизацией в Швеции с помощью нескольких специализированных органов стандартизации. Обратившись в SIS, можно приобрести все стандарты, как национальные, так и международные.

Кроме официальных стандартов существуют также документы, выпускаемые отраслевыми организациями, например PNEUROP (Ассоциация европейских производителей оборудования для сжатого воздуха). Примером такого документа являются стандарты на измерения производительности компрессора, содержания масла в сжатом воздухе и т.д., которые устанавливаются на тот период, пока идет оформление стандарта.

Глава 4 Экономика

4.1 Экономика

4.1.1. Затраты на производство сжатого воздуха

4.1.1.1. Общие сведения

Электроэнергия — преобладающий вид энергии, используемый практически во всех промышленных установках по производству сжатого воздуха. Многие компрессорные установки предлагают значительные, зачастую неиспользуемые, возможности экономии энергии, например, путем рекуперации тепловой энергии, снижения давления, уменьшения утечек и оптимизации работы за счет правильного выбора системы управления и регулирования.

Планирование новых инвестиций основано на составлении долгосрочных прогнозов, учитывающих развитие новых ситуаций и требования, которые могут предъявляться к установке в будущем. Типичным примером служат требования к охране окружающей среды, энергосбережению, возрастающие требования к качеству сжатого воздуха, предъявляемые производством, и будущие инвестиции в производство.

Все большее значение приобретает оптимизация работы компрессоров, особенно это касается крупномасштабного производства, зависящего от сжатого воздуха. Промышленность не стоит на месте, а, находясь в постоянном движении, вызывает изменения в самом производстве, при этом меняются условия работы компрессоров. Поэтому важно, чтобы снабжение сжатым воздухом учитывало не только потребности текущего момента, но и перспективы будущего развития. Опыт показывает, что многофакторный и беспристрастный анализ эксплуатации почти в каждом случае приводит к улучшению экономических показателей.

Затраты на производство энергии, бесспорно, являются решающим фактором при расчете общей экономичности установки. Поэтому особое значение приобретает направленный поиск технических решений, соответствующих не только требованиям к производительности и качеству сжатого воздуха, но также и требованиям к эффективности использования энергии. Дополнительные расходы, связанные с приобретением компрессоров и другого оборудования, соответствующего таким требованиям, со временем будут рассматриваться как выгодное вложение капитала.

Так как расходы на энергию часто составляют почти 80% всех затрат, особое значение приобретает выбор системы регулирования. Различия между системами регулирования зачастую важнее различий между типами компрессоров. В идеальном случае полная производительность компрессора должна полностью соответствовать показателю потребления сжатого воздуха. Данный подход часто применяется в технологических процессах. Компрессоры большинства типов поставляются с собственными системами управления и регулирования, но дополнительное оборудование, которое позволяет одновременно управлять работой, в том числе и других компрессоров установки, будет способствовать улучшению экономических показателей эксплуатации всей установки.

4:1

Анализ состава затрат на производство сжатого воздуха выявляет структуру, подобную приведенной на этой диаграмме. Тем не менее конкретное распределение этих затрат определяется в том числе в зависимости от количества рабочих часов в год, учитываемого в расчетах оборудования, типов машин, выбранной системы охлаждения и т.д.

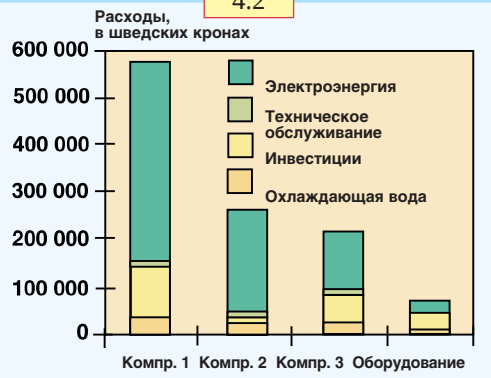
Регулирование частоты вращения применяется сегодня все чаще: ведь фактически потребление энергии пропорционально скорости вращения и производительности. Тщательный выбор регулирующей аппаратуры для соответствия производительности потреблению — залог хороших результатов.

Если в ночные часы и в выходные дни потребление сжатого воздуха незначительно, то лучше установить небольшой компрессор, который покроет эту потребность. Если же по каким-либо причинам возникла потребность в другом рабочем давлении, следует провести анализ возникшей потребности и определить, следует ли подавать сжатый воздух из одного компрессорного центра или разделить сеть сжатого воздуха на участки с различными давлениями. Вопросом для рассмотрения может также стать секционирование сети, что позволит останавливать работу определенных участков сети в ночные часы и в выходные дни и тем самым уменьшить расход сжатого воздуха, или когда потребуется определить затраты по участкам, основываясь на показателях расхода сжатого воздуха.

4.1.1.2. Структура затрат

Капитальные затраты представляют собой постоянные затраты, включающие в себя цену приобретенного оборудования, расходы на строительство, монтаж и страхование. Капитальные затраты, как часть общих расходов, отчасти связаны с выбором качества сжатого воздуха и отчасти с амортизационным периодом и расчетной процентной ставкой. Величина расходов на энергию связана с количеством часов работы в год, степенью использования и ценой энергии и т.д. Некоторые расходы, на приобретение, например, оборудования для рекуперации тепловой энергии, означают получение прямой прибыли в виде уменьшения эксплуатационных расходов и расходов на техническое обслуживание.

4:2



На диаграмме показано распределение расходов между тремя компрессорами и вспомогательным оборудованием. Значительные различия могут быть обусловлены различиями машин в цене, тем, что стоимость основного капитала для изношенной машины может быть больше, чем для вновь приобретенной, тем, что выбранный уровень безопасности может повлиять на эксплуатационные расходы и т.д.

4.2 Возможности энергосбережения

4.2.1. Потребление энергии

При проведении расчетов важно учитывать полное потребление энергии. Нужно учитывать все потребители энергии, которыми оснащена машина, например всасывающие фильтры, вентиляторы и насосы.

4:3

На схеме показана простая, но чрезвычайно полезная модель, которая создает реальную картину потребления компрессором электроэнергии.

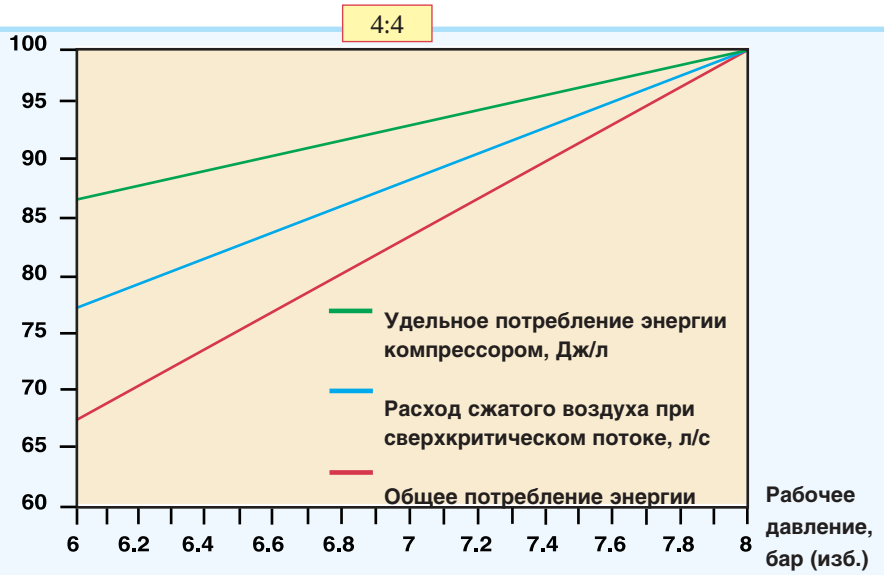
При анализе различных вариантов капитальных затрат особенно важно использовать сравнимые величины. Поэтому нужно убедиться в том, что все величины указываются в соответствии с международными правилами, например, установленными в ISO 1217. изд. 3, дополнение С-1996.

4.2.2. Рабочее давление

Рабочее давление напрямую определяет потребление энергии. Высокое давление означает большее потребление энергии. Увеличение рабочего давления для компенсации падения давления обязательно приводит к снижению экономичности эксплуатации.

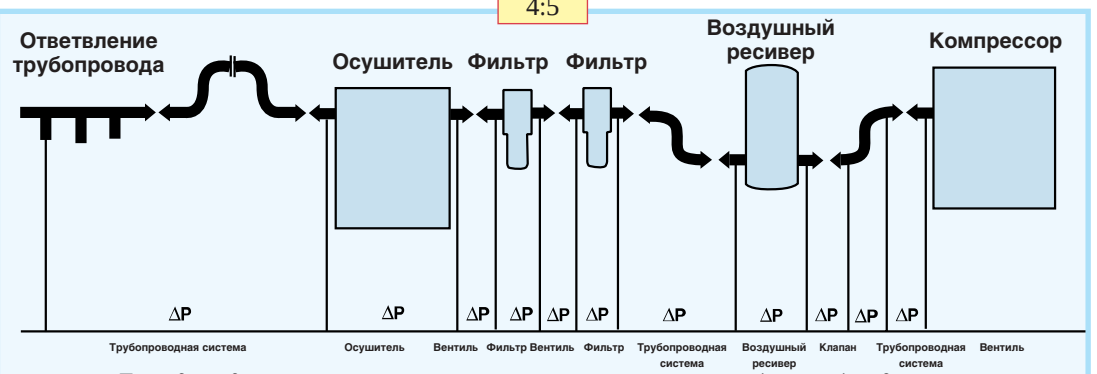
Несмотря на это, повышение давления является самым распространенным способом и применяется в таких случаях, когда, например, падение давления вызвано слишком малым диаметром трубопроводной системы или засорением фильтров. Так, повышение давления на 1 бар влечет за собой рост потребления энергии примерно на 6%. В установке с несколькими фильтрами, особенно, если они продолжительное время работали без замены, падение давления может быть значительным и потому очень дорогостоящим.

4:4



Зависимость между давлением и потреблением электроэнергии. Для компрессора производительностью 15 м³/мин падение рабочего давления с 7 до 6 бар означает уменьшение потребления энергии с 91 до 85 кВт. При наработке 4000 ч/год это составит 24000 кВт.ч/год.

4:5



Так падение давления на различных компонентах сети влияет на требуемое рабочее давление.

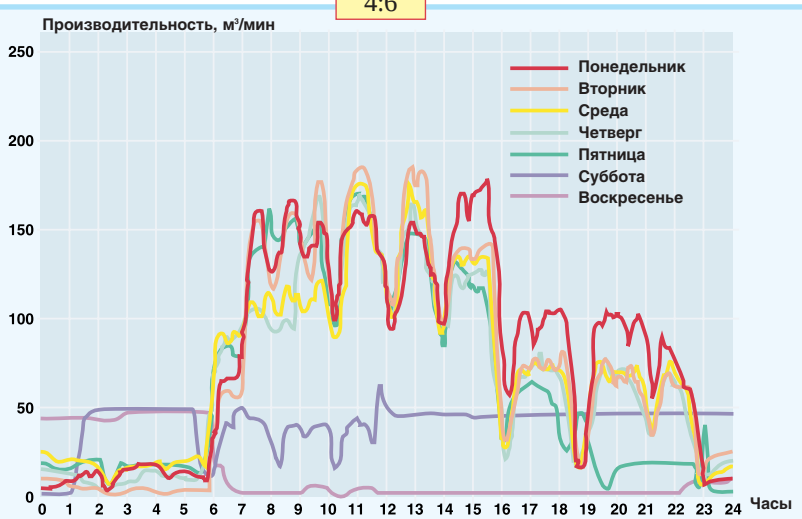
Многие установки не позволяют значительно снизить давление, но, используя современную регулирующую аппаратуру, вполне реально понизить давление на 0,5 бар. Это означает экономию, возможно, нескольких процентов; вроде бы небольшая экономия, но если учесть, что общий кпд установки увеличится в такой же степени, то преимущества понижения давления становятся очевидными.

4.2.3. Потребление воздуха

Анализ повседневной работы компрессора и использования сжатого воздуха, помогает найти решение, позволяющее загружать систему сжатого воздуха более равномерно и, следовательно, не допустить увеличения производства сжатого воздуха, а значит, и снизить эксплуатационные расходы.

Непроизводительный расход сжатого воздуха, обычно происходящий из-за утечки, износа оборудования, не приспособленного к использованию сжатого воздуха технологического процесса или

4:6



Динамика потребления сжатого воздуха в течение недели и в течение суток. В ночную смену потребление снижается, в дневную – увеличивается, во время перерывов падает, в выходные дни остается на постоянном уровне (утечка или производство).

неправильного использования сжатого воздуха, надежно устраняется путем повышения информированности. Для снижения расхода сжатого воздуха в ночные часы и в выходные дни можно использовать разделение вентилями системы сжатого воздуха на участки. Большинство установок предусматривают некоторую утечку сжатого воздуха, которая представляет собой чистый убыток и поэтому должна быть минимизирована. Часто утечка составляет 10–15% производимого сжатого воздуха, а иногда и больше. Утечка находится в зависимости от рабочего давления. Поэтому для уменьшения утечки применяются такие способы, как ремонт негерметичного оборудования и снижение рабочего давления, например в ночные часы.

4:7

Диаметр отверстия	Расход при рабочем давлении 7 бар	Потребление энергии компрессором
Мм	л/с	кВт
1	1.2	0.4
3	11.1	4.0
5	31	10.8
10	124	43

Зависимость между утечкой и потреблением энергии для различных (малых) отверстий при давлении в системе 7 бар.

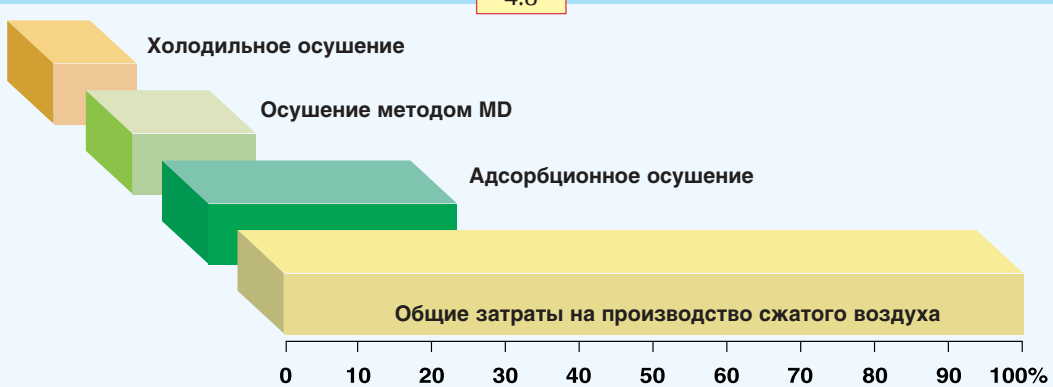
Снижение давления всего лишь на 0,3 бар уменьшает утечку на 4%. Если утечка в установке производительностью 100 м^3/мин составляет 12%, то снижение давления на 0,3 бар позволит экономить примерно 3 кВтхч, что равно потреблению электроэнергии обычным домом с электрическим обогревом. Потребление сжатого воздуха машинами и оборудованием с увеличением рабочего давления также растет.

4.2.4. Способ регулирования

При использовании современной системы управления центральная компрессорная установка может оптимально работать в различных эксплуатационных режимах при одновременном повышении ее безопасности и надежности.

Выбор оптимального способа регулирования позволяет подавать меньшее количество энергии благодаря снижению рабочего давления, и одновременно степень использования каждой машины в установке оптимизируется. В то же время надежность всей установки возрастает, уменьшается риск непланового простоя. Кроме того, управление с центральной компрессорной установки позволяет программировать автоматическое снижение давления во всей системе, например в ночные часы и в выходные дни.

4:8



Сравнение затрат в зависимости от способов осушения.

Поскольку потребление сжатого воздуха редко бывает постоянным, особое значение приобретает гибкость компрессорной установки, например, чтобы в ней использовались компрессоры с разной производительностью и электродвигатели с регулируемой скоростью. Компрессоры разумно выбранной конструкции могут работать с регулируемой скоростью вращения. Для этой цели особенно подходят винтовые компрессоры, так как их производительность и потребление энергии фактически пропорциональны скорости.

4.2.5. Качество сжатого воздуха

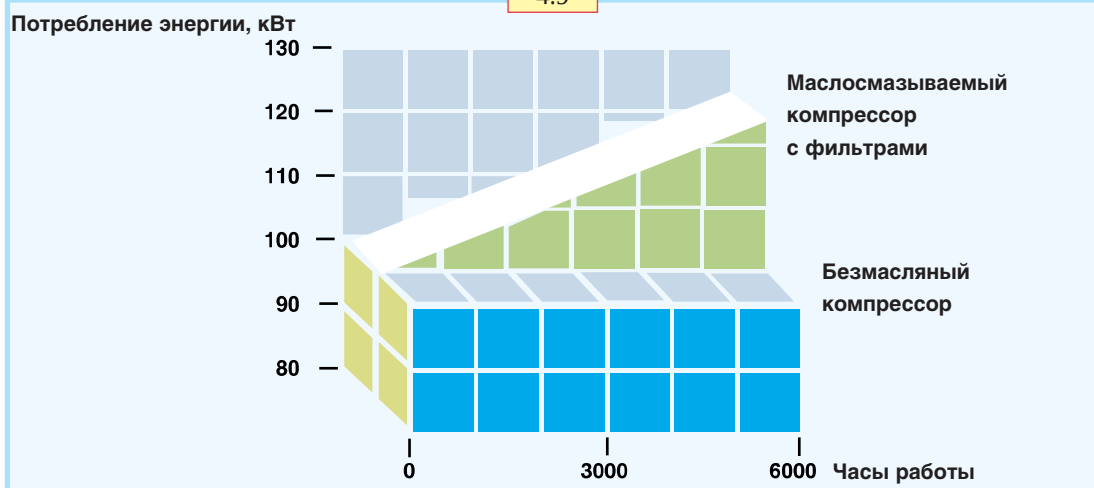
Высокое качество сжатого воздуха означает снижение необходимости в техническом обслуживании, повышение надежности работы пневматического оборудования, системы управления и контрольно-измерительных приборов и в то же время – уменьшение износа машин с пневматическим приводом.

Если в систему сжатого воздуха с самого начала подается сухой воздух, установка будет дешевле и проще, так как не требуется оснащение трубопроводной системы влагоотделителем и S-образными коленами. Когда производится сухой воздух, удаление конденсата не требуется, а следовательно, не требуется стравливать воздух в атмосферу. В трубопроводной системе не требуется также устраивать дренаж конденсата, что означает удешевление монтажа и технического обслуживания. Наилучшие экономические показатели можно получить при установке центрального осушителя сжатого воздуха. Децентрализованная обработка воздуха с размещением в системе нескольких более мелких блоков обходится дороже и усложняет техническое обслуживание.

Обычно считается, что снижение расходов на монтаж и техническое обслуживание покрывают затраты на оборудование для осушения сжатого воздуха. Рентабельность очень высока, даже когда приходится дополнять существующие установки сушильным оборудованием.

Установка маслоотделителя или оборудования для очистки конденсата для безмасляных компрессоров не требуется. В то же время не требуются фильтры, а следовательно, отпадают расходы на их замену. В таких компрессорах не нужно компен-

4:9



Безмасляный компрессор позволяет получать сжатый воздух постоянного качества при неизменных расходах на энергию.

сировать падение давления в фильтрах, и поэтому рабочее давление компрессора может быть уменьшено, что еще больше улучшает экономические показатели эксплуатации установки.

4.2.6. Рекуперация тепловой энергии

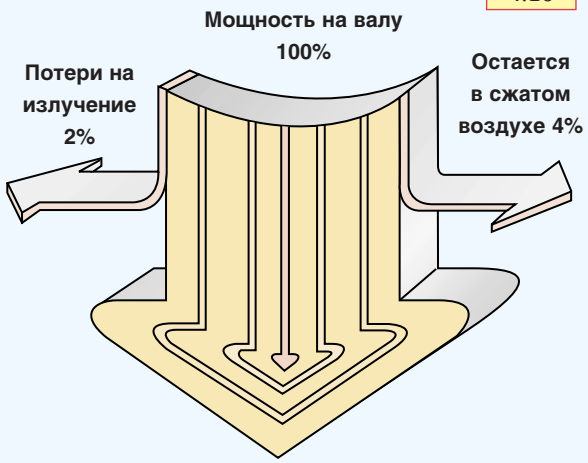
Если в производственных помещениях или в технологическом процессе для любого вида нагрева используются электроэнергия, газ или нефтепродукты, то следует рассмотреть возможность полной или частичной замены энергии дополнительной энергией, производимой компрессорной установкой. Решающими факторами являются величина затрат на производство добавочной энергии в 1 кВт×ч, степень ее использования и величина необходимых дополнительных капиталовложений. Срок окупаемости спланированных инвестиций в рекуперацию тепловой энергии зачастую составляет всего от 1 до 3 лет. Более 90% подаваемой в компрессор энергии может быть рекуперировано в виде дорогостоящего тепла. Температурный уровень рекуперированной энергии определяет возможные области ее применения и тем самым ее цену.

Максимальная эффективность обычно достигается в установках с водяным охлаждением, которые позволяют подавать охлаждающую воду от компрессорной установки к установке непрерывного нагрева, например к обратному контуру отопительного котла. Тогда добавочная энергия может эффективно использоваться круглый год. Компрессоры различной конструкции создают разные предпосылки. В ситуациях, когда большие тепловые потоки нужно транспортировать на большие расстояния до места использования, при небольшом потреблении тепла или потреблении, изменяющемся в течение года, можно рассмотреть возможность продажи рекуперированной тепловой энергии.

4.2.7. Техническое обслуживание

Как и любое оборудование, компрессорная установка требует технического обслуживания. Однако стоимость технического обслуживания мала по сравнению с другими

4:10



Рекуперированная тепловая энергия, (кВтхч)/год

$$W = [(K_1 \times Q_1) + (K_2 + Q_2)] \times T_R$$

Экономия/год: $W \times e_P/\eta$

Экономия масла, м³/год: $W/6800 \times \eta$

W – рекуперированная тепловая энергия, (кВтхч)/год

T_R – время в течение года, когда нужна рекуперация энергии, ч/год

K_1 – часть T_R с нагруженным компрессором

K_2 – часть T_R с ненагруженным компрессором

Q_1 – располагаемая мощность в охлаждающей жидкости при нагруженном компрессоре, кВт

Q_2 – располагаемая мощность в охлаждающей жидкости при ненагруженном компрессоре, кВт

e_P – цена энергии

η – обычный кпд источника тепла

В процессе производства сжатого воздуха компрессор также преобразует подаваемую энергию в тепло, которое переходит в охлаждающую среду, т.е. в воздух или воду. Только малая часть уносится со сжатым воздухом и излучается из машины или трубопровода. Компрессор с воздушным охлаждением позволяет создать простейшую систему рекуперации тепловой энергии, в то время как компрессор с водяным охлаждением дает возможность более эффективной и более гибкой рекуперации энергии.

затратами и благодаря проведению плановых мероприятий может быть еще уменьшена. Выбор уровня технического обслуживания определяется надежностью установки и тем, как она работает.

Техническое обслуживание составляет самую малую часть общих расходов на установку. В большой степени это связано с тем, как была спроектирована установка, и с выбором компрессора и вспомогательного оборудования.

Эти расходы можно снизить, объединяя контроль с другими функциями при использовании оборудования для полностью автоматизированной работы и контроля центральной компрессорной установки. На общий бюджет технического обслуживания воздействуют следующие факторы:

- **тип компрессора;**
- **вспомогательное оборудование (осушители, фильтры, контрольная и регулирующая аппаратура);**
- **оперативная ситуация;**
- **состояние установки;**
- **качество среды;**
- **планирование технического обслуживания;**
- **уровень безопасности;**
- **рекуперация энергии / система охлаждения;**
- **степень использования.**

Ежегодно расходы на техническое обслуживание составляют в среднем 5–10% всех капиталовложений в машину.

4.2.7.1. Планирование технического обслуживания

Правильно спланированное техническое обслуживание позволяет прогнозировать расходы и продлить срок службы машины и вспомогательного оборудования. Одновременно расходы на устранение мелких неполадок уменьшаются, сокращаются простои оборудования.

Машины все в большей степени оснащаются приборами для диагностической проверки, в которых используются последние достижения электроники. Это означает оптимальное использование компонентов, а замена производится только тогда, когда она действительно необходима. Необходимость в проведении ре-

4:11

Различные виды технического обслуживания

Максимально возможная степень утилизации уменьшает затраты на техническое обслуживание, выраженные в денежных единицах/рабочий час. Можно с уверенностью планировать 100% использование на протяжении 98% рабочего времени.

монта выявляется на ранней стадии, пока не требуется крупный ремонт. Это позволяет избежать последующей поломки и простоя оборудования.

Если работы будет выполнять сервисный персонал поставщика с использованием фирменных запчастей, то можно ожидать соответствия машины высочайшим техническим стандартам. В течение всего срока службы машины у вас будет возможность внедрять новшества, основанные на самых последних разработках. Помощь в техническом обслуживании оказывают специалисты, прошедшие специальное обучение и отвечающие за подготовку ремонтного персонала пользователя. Ежедневные осмотры следует проводить самостоятельно, силами собственного квалифицированного персонала, так как именно человек увидит и услышит то, что не смогут обнаружить контрольно-измерительные приборы.

4.2.7.2. Вспомогательное оборудование

Установку легко расширять с помощью многочисленного вспомогательного оборудования, например, если требуется повысить качество сжатого воздуха или контролировать работу системы. Однако вспомогательное оборудование тоже нуждается в обслуживании и требует расходов на техническое обслуживание, например, замена фильтров, замена сушильного агента, адаптация к другому оборудованию и обучение персонала.

Кроме того, существуют вторичные расходы на техническое обслуживание, такие, как расходы на распределительную сеть и производственное оборудование, на которые влияет качество сжатого воздуха, расходы на масло и кассеты фильтров. Все эти расходы должны учитываться в расчетах, на основании которых впоследствии принимаются решения об инвестициях.

4.3 Прочие экономические факторы

4.3.1. Общие сведения

Любому изделию, материалу или услуге можно дать систематическое описание и провести анализ (даже упрощенный), прибегнув к так называемому методу LCA – анализа жизненного цикла (Life Cycle Analysis). Метод LCA позволяет провести анализ всех этапов жизненного цикла изделия. При этом в расчет принимается все – от выбора сырья до конечного удаления отходов.

Анализ часто используется для сравнения различных вариантов, например изделий с равноценными функциями. Результат в основном служит в качестве руководства при решении вопросов, касающихся технологических процессов или конструкции изделия. LCA может также использоваться компаниями в переписке с субподрядчиками, клиентами или властями для описания характеристик продукции компаний.

Результаты, полученные из анализа жизненного цикла, в первую очередь служат основанием для принятия решений в работе по минимизации воздействия изделия на окружающую среду. Однако LCA не дает ответа на все вопросы, и поэтому следует особое внимание уделять таким аспектам, как качество и имеющаяся технология, что позволит обеспечить подготовку необходимых материалов.

4.3.2. Издержки за срок службы

Вычисление LCC – издержек за срок службы (Life Cycle Cost, англ.) все чаще используется как инструмент для оценки различных вариантов инвестиций. В вычислении LCC учитываются объединенные издержки, относящиеся к изделию, за определенный период, т.е. капитальные затраты, эксплуатационные расходы и расходы на техническое обслуживание.

Применение расчета издержек LCC основано на проекте установки или показателях, относящихся к работающей установке, что впоследствии позволяет определить уровень требований к новой установке. Однако нужно указать, что с точки зрения будущих издержек расчет LCC часто выступает в роли только предположения, в нем много ограничений, поскольку он основан на сегодняшнем уровне знаний о состоянии установки и изменениях цен на энергию.

Нельзя упускать из виду «нематериальные» величины, которые могут оказаться очень важными, например, безопасность производства и издержки будущих периодов.

Для выполнения расчета LCC требуются знания и, предпочтительно, опыт эксплуатации установок по производству сжатого воздуха. Покупатель может получить наилучшие результаты, только если он будет обращаться за консультациями к продавцу. Основными вопросами должны быть, например, факторы, влияющие на различные варианты инвестиций, такие, как качество продукции, безопасность производства, потребность в будущих инвестициях, техническое обслуживание производственного оборудования и распределительной сети, охрана окружающей среды, качество конечной продукции, оценка риска простоев и возникновения брака. В этом контексте нельзя забывать и о таком термине, как LCP – прибыль за срок службы (Life

4:12

Пример расчета компрессора

Исходные данные						
Цена электроэнергии	Шв. кр/кВт.ч	0.45				
Расчетный процент	%	12				
Амортизационный период	лет	10				
Время эксплуатации	час./год	6.000				
		Компр. 1	Компр. 2	Компр. 3	Осуши-тели	ИТОГО
Годовое потребление						
Электроэнергия	МВт.ч/год	1.200	555	406	133	2.094
Вода (система с циркуляцией)	$м^3$/год	–	–	–	–	–
Распределенные эксплуатационные расходы						
Электроэнергия	Тыс. шв. кр/год	540	250	183	60	1.033
Вода	Тыс. шв. кр/год	6	4	2	0	12
Годовые затраты без рекуперации энергии	Тыс. шв. кр/год	**760**	**383**	**197**	**114**	**1.454**
Эксплуатационные расходы	Тыс. шв. кр/год	547	254	185	60	1.046
Капитальные затраты	Тыс. шв. кр	167	99	2	44	312
Эксплуатация и техническое обслуживание	Тыс. шв. кр/год	45	30	11	11	97
Производство сжатого воздуха, всего	$Мм^3$/год	12.600	5.700	3.670	–	22.030
Рекуперация энергии						
Цена энергии (для альтернативного исп.)	Шв. кр/кВт.ч	0.4	0.4	0.4	–	–
Период рекуперации	Мес./год	10	10	8	–	–
Степень рекуперации	%	94	94	94	–	–
Количество рекуперированной энергии	(МВт × ч)/год	893	395	233	–	1.521
Годовые затраты с рекуперацией энергии	Тыс. шв. кр/год	413	234	109	114	870
Экономия за счет рекуперации энергии	Тыс. шв. кр/год	347	149	88		584
Удельные затраты на сжатый воздух без рекуперации энергии	0.01 шв. кр/$м^3$	6.0	6.6	5.4	0.5	6.6
Удельные затраты на сжатый воздух с рекуперацией энергии	0.01 шв. кр/$м^3$	3.3	4.1	3.0		3.9

Примечание: приведены округленные значения

Cycle Profit, англ.), т.е. прибыль, которую можно получить благодаря, например, рекуперации тепловой энергии и сокращению брака.

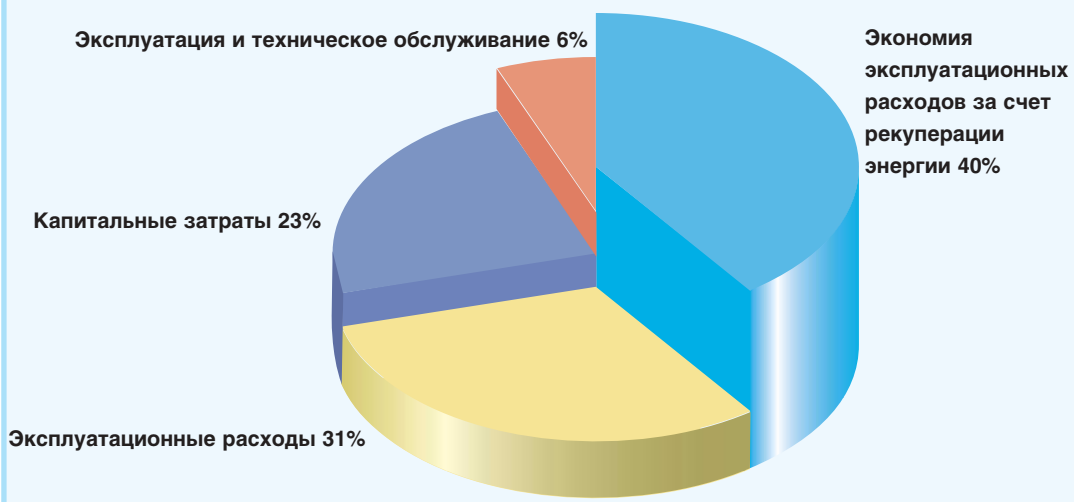
При определении затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание нужно также учитывать ожидаемое состояние оборудования по истечении расчетного периода: следует ли оборудование рассматривать как израсходованное или оно подлежит восстановлению до первоначального состояния.

Кроме того, расчетная модель должна быть адаптирована к типу компрессора. Приведенный ниже пример (см. рис. 4:13, рис. 4:14) может служить моделью экономического расчета компрессорной установки с рекуперацией тепловой энергии и без рекуперации.

4:13

Состав затрат для компрессорной установки без рекуперации энергии.

4:14



Состав затрат для компрессорной установки с рекуперацией энергии.

Глава 5 Расчеты

5.1. Пример определения параметров установок по производству сжатого воздуха

Ниже приводятся несколько стандартных расчетов, которые позволяют определить параметры установок по производству сжатого воздуха. Цель этой главы – показать практическое применение формул и данных из предыдущих глав. Пример основан на желаемом потреблении сжатого воздуха, результатом вычислений являются параметры компрессора, базирующиеся на выбранных компонентах установки по производству сжатого воздуха. После примера приведено несколько дополнений, в которых показано, как нужно проводить расчеты в особых случаях.

5.2. Исходные данные

Перед началом расчета следует определить потребление сжатого воздуха и условия окружающей среды. Кроме того, нужно решить, какой будет использоваться компрессор: маслосмазываемый или безмасляный. Нужно также решить, какое оборудование будет применено – с водяным или с воздушным охлаждением.

5.2.1. Потребление

Предположим, что имеются три потребителя сжатого воздуха.
Они имеют следующие параметры:

Потребитель	Расход	Давление	Точка росы
1	12 Нм^3/мин	6 бар (изб.)	+5°C
2	67 л/с (свободная подача воздуха)	7 бар (абс.)	+5°C
3	95 л/с (свободная подача воздуха)	4 бар (изб.)	+5°C

5.2.2. Условия окружающей среды

Температура окружающего воздуха для определения параметров: 20°C.
Максимальная температура окружающего воздуха: 30°C.
Давление окружающего воздуха: 1 бар (абс.).
Влажность: 60%.

5.2.3. Разное

Оборудование с воздушным охлаждением.
Качество сжатого воздуха из маслосмазываемого компрессора рассматривается как удовлетворительное.

5.3. Выбор компонентов

Прежде чем приступить к расчетам параметров, нужно пересчитать исходные данные из таблицы потребления сжатого воздуха (см. подраздел 5.2.1.) так, чтобы они приобрели однородный вид.

Расход: обычно для обозначения производительности компрессора используется единица измерения л/с; поэтому нужно пересчитать расход потребителя 1, приведенный в Нм³/мин.

12 Нм³/мин = 12 x 1000/60 = 200 Нл/с.

Подставив текущие исходные данные в формулу, получим:

$$Q_{FAD} = \frac{Q_N \times (273 + T_i) \times 1{,}013}{273 \times P_i} = \frac{200 \times (273 + 30) \times 1{,}013}{273 \times 1{,}00} \approx 225$$

Давление: обычно для определения давления сжатого воздуха в компонентах установки используется избыточное давление в бар (изб.).

Для потребителя 2 указано абсолютное давление 7 бар (абс.). Чтобы получить избыточное давление, нужно из этих 7 бар вычесть давление окружающего воздуха. Так как давление окружающего воздуха в этом случае равно 1 бар, давление для потребителя 2 можно записать как 7 – 1 бар (изб.) = 6 бар (изб.).

После показанного выше пересчета таблица потребления сжатого воздуха будет выглядеть так:

Потребитель	Расход	Давление	Точка росы
1	225 л/с (свободная подача воздуха)	6 бар (изб.)	+5°C
2 3	67 л/с (свободная подача воздуха) 95 л/с (свободная подача воздуха)	6 бар (изб.) 4 бар (изб.)	+5°C +5°C

5.3.1. Определение параметров компрессора

Общее потребление сжатого воздуха равно сумме расходов трех потребителей: 225 + 67 + 95 = 387 л/с. К этому следует добавить запас 10–20%, что дает величину расхода 387 x 1,15 = 445 л/с (с 15%-ным запасом).

Максимальное давление, требуемое потребителями, – 6 бар (изб.). Теперь нагрузку можно рассматривать как одного приведенного потребителя. Нужно еще добавить падение давления, а это потребует увеличения давления.
Для потребителя, которому требуется давление 4 бар (изб.), нужно установить редукционный клапан. Предположим, что общее падение давления на осушителе, фильтре и трубопроводе не превышает 1,5 бар. Тогда подходит компрессор с максимальным рабочим давлением 7,5 бар (изб.).

5.3.2. Допущения для дальнейших расчетов

Выбран компрессор со следующими параметрами:

Максимальное давление = 7,5 бар (изб.).
Производительность при 7 бар (изб.) = 450 л/с.
Общая затрачиваемая мощность при 7 бар (изб.) = 175 кВт.
Мощность на валу при 7 бар (изб.) = 162 кВт.
Температура сжатого воздуха на выходе компрессора = температуре окружающего воздуха + 10°C .

Регулирование выбранного компрессора осуществляется путем нагрузки/разгрузки, с минимальной продолжительностью цикла 30 секунд. При использовании регулирования путем нагрузки/разгрузки давление в системе изменяется в диапазоне от 7,0 до 7,5 бар (изб.).

5.3.3. Расчет объема воздушного ресивера

Q_c – производительность компрессора (л/с) = 450 л/с
P_1 – давление на входе компрессора (бар (абс.)) = 1 бар (абс.)
T_1 – максимальная температура на входе компрессора (К) = 273 + 30 = 303 К
f_{max} – максимальная частота циклов = 1 цикл/30 секунд
$(p_U - p_L)$ – заданная разность давлений нагруженного и ненагруженного компрессора (бар) – 0,5 бар
T_0 – температура сжатого воздуха на выходе выбранного компрессора на 10°C превышает температуру окружающего воздуха, и поэтому максимальная температура в воздушном резервуаре будет (К) = 273 + 40 = 313 К.

Формула для расчета объема воздушного ресивера компрессора с регулированием путем нагрузки/разгрузки:

$$V = \frac{0{,}25 \times Q_c \times T_0}{f_{max} \times (p_U - p_L) \times T_1} = \frac{0{,}25 \times 450 \times 313}{1/30 \times 0{,}5 \times 303} = \underline{6\,972}$$

Это минимальный объем рекомендуемого воздушного ресивера.
Выбирается следующий больший стандартный объем.

5.3.4. Определение параметров осушителя

Так как в данном примере требуемая температура точки росы равна +6°C, наиболее подходящим выбором будет холодильный осушитель. При выборе размера холодильного осушителя нужно учитывать множество факторов, корректируя производительность осушителя в зависимости от поправочных коэффициентов. Эти поправочные коэффициенты являются уникальными для каждой модели холодильного осушителя. Ниже приведены корректирующие коэффициенты, используемые для холодильных осушителей компании Atlas Copco и указанные в перечне технических данных. Всего используются три поправочных коэффициента:

1. **Температура на входе холодильного осушителя и точка росы под давлением**
   Так как температура сжатого воздуха на выходе выбранного компрессора на 10°C превышает температуру окружающего воздуха, температура на входе холодильного осушителя будет не более 30 + 10 = 40°C. Кроме того, желаемая точка росы — +5°C.
   Из листка технических данных получаем поправочный коэффициент 0,95.

2. **Рабочее давление**
   Фактическое рабочее давление в центральной магистрали компрессора равняется примерно 7,0 бар, что соответствует поправочному коэффициенту 1,0.

3. **Температура окружающего воздуха**
   При максимальной температуре окружающего воздуха 30°C значение поправочного коэффициента равно 0,95.

Соответственно, холодильный осушитель должен обрабатывать полный объем производимого компрессором сжатого воздуха, умноженный на вышеуказанный поправочный коэффициент:
450 : 0,95 x 1,0 : 0,95 = 406 л/с.

5.3.5. Допущения для дальнейших расчетов

Выбирается холодильный осушитель с воздушным охлаждением, имеющий следующие характеристики:

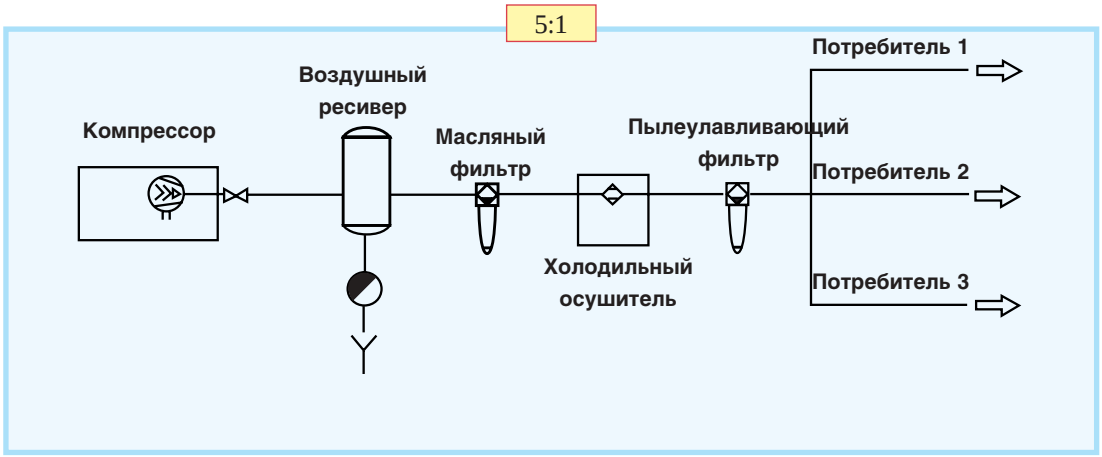
Производительность при 7 бар (изб.) = 450 л/с
Общая потребляемая мощность = 5,1 кВт
Излучаемое в окружающую среду тепло = 14,1 кВт
Падение давления на осушителе = 0,09 бар

5.3.6. Проверочный расчет

После того как будут выбраны компоненты компрессорной установки, нужно проверить, не будет ли слишком велико падение давления. Это можно сделать, суммируя все падения давления на компонентах и в трубопроводах.

Для этого может пригодиться схема установки по производству сжатого воздуха, показанная на рис. 5:1.

5:1



Данные о падении давления на компонентах системы можно получить, обратившись к поставщикам этих компонентов. Падение давления в трубопроводной системе не должно превышать 0,1 бар.

Теперь можно вычислить общее падение давления:

Компонент	Падение давления (бар)
Масляный фильтр (падение давления на новом фильтре)	0,14
Холодильный осушитель	0,09
Пылеулавливающий фильтр (падение давления на новом фильтре)	0,2
Магистральный трубопровод сжатого воздуха	0,05
Система трубопроводов от магистрали до потребителей	0,1
Общее падение давления	**0,58**

При максимальном давлении 7,5 бар (изб.) и давлении под нагрузкой 7,0 бар (изб.) выбранный компрессор выдает минимальное значение давления для потребителей 7,0 – 0,58 = 6,42 бар (изб.). К этому падению давления нужно прибавить падение давления на фильтре, которое со временем постоянно растет. Данные об этом падении давления можно получить, обратившись к производителю фильтров.

5.4. Прочие параметры

5.4.1. Вычисление количества конденсата

В том случае, если выбран маслозаполненный компрессор, конденсат, выделяемый компрессором и холодильным осушителем, будет содержать масло. Перед тем как вода будет слита в канализацию, от нее нужно отделить масло. Это производится в маслоотделителе. Для определения размеров маслоотделителя нужно знать, сколько воды конденсируется в компрессоре.

Общее количество воды в воздухе можно узнать из соотношения:

f_1 = относительная влажность x количество воды (г/л), содержащееся в воздухе при максимальной температуре окружающего воздуха 30°C x на производительность = 0,6 x 0,030078 x 445 ≈ 8 г/с.

Количество влаги, остающееся в сжатом воздухе после осушения, вычитается из этой величины (насыщение наступает при +6°C):

$$f_2 = \frac{1 \times 0{,}007246 \times 445}{8} \approx 0{,}4 \quad г/с$$

Тогда общий поток конденсата из установки f_3 составит

$f_1 - f_2 = 8{,}0 - 0{,}4 = 7{,}6$ г/с ≈ 27,4 кг/ч

Вычислив поток конденсата, можно выбрать маслоотделитель правильного размера.

5.4.2. Требования к вентиляции компрессорного зала

Для определения требования к вентиляции компрессорного зала используется правило, которое гласит: вся подаваемая в воздух компрессорной энергия должна отводиться посредством вентиляции.

При расчетах используется формула для энергии при определенном изменении температуры для материала с определенной удельной массой.

$$Q = m \times c_p \times \Delta T \text{, где}$$

Q – полный тепловой поток, кВт
m – массовый расход, кг/с
c_p – удельная теплоемкость, кДж/(кг x К)
ΔT – разность температур, К

Формулу можно записать следующим образом:

$$m = \frac{Q}{c_p \times \Delta T} \text{, где}$$

ΔT – повышение температуры вентиляционного воздуха. Предполагается, что допустимое повышение температуры равно 10 К ⇒ ΔT = 10 К
c_p – удельная теплоемкость воздуха = 1,006 кДж/(кг x К) (при атмосферном давлении 1 бар и 20°С)
Q – полный тепловой поток (в кВт) = (94% мощности на валу компрессора + разность между затрачиваемой мощностью и мощностью на валу компрессора + заявленный тепловой поток из холодильного осушителя) = 0,94 x 162 + (175 – 162) + 14,1 = 180 кВт.

Это дает количество воздуха для вентиляции:

$$m = \frac{Q}{c_p \times \Delta T} = \frac{180}{1{,}006 \times 10} \approx 17{,}9 \text{ кг/с}$$

что при плотности воздуха 1,2 кг/м^3 равно ≈ 17,9/1,2 = 15 м^3/с.

5.5. (Дополнение 1) Работа на большой высоте

Вопрос: предположим, что те же самые потребители сжатого воздуха, что описаны в предыдущем примере, расположены на высоте 2500 м над уровнем моря; максимальная температура окружающего воздуха 35°С. Чему равна производительность компрессора (выраженная в количестве подаваемого свободного воздуха)?

Ответ: на большой высоте воздух разрежен. Это нужно учитывать при расчете параметров оборудования для производства сжатого воздуха. Потребление сжатого воздуха указывается для компрессора, работающего в нормальных условиях (например, Нм^3/мин). В том случае, когда расход воздуха потребителем указан в виде количества свободного воздуха (FAD), перерасчет не требуется.

Если в вышеприведенном примере (5.3) применительно к потребителю 1 поток сжатого воздуха указывается в Нм^3/мин, то это значение нужно пересчитать. Состояние, при котором компрессор нормально работает, 1 бар при 20°С. Поэтому на высоте 2500 м над уровнем моря значения нужно пересчитать.

Из таблицы можно получить следующие данные: давление окружающего воздуха на высоте 2500 м над уровнем моря = 0,74 бар. Если расход пересчитать в Нл/с (12 Нм^3/мин = 12 000/60 Нл/с = 200 Нл/с) и подставить в приведенную ниже формулу, получается:

$$Q_{FAD} = \frac{Q_N \times (273 + T_i) \times 1{,}013}{273 \times P_i} = \frac{200 \times (273 + 35) \times 1{,}013}{273 \times 0{,}74} \approx 309 \text{ л/с (FAD)}$$

Тогда общая требуемая производительность компрессора равна 309 + 67 + 95 = 471 л/с (свободная подача воздуха).

5.6. (Дополнение 2) Пиковая производительность

Вопрос: предположим, что в вышеприведенном примере возникло дополнительное потребление сжатого воздуха 200 л/с в течение 40 секунд в течение часа. В этом примере принимается давление в системе, равное 5,5 бар (изб.). Какого объема должен быть воздушный резервуар, чтобы он соответствовал этим возросшим требованиям?

Ответ: в короткий период времени установка, за счет запасенного в воздушном резервуаре воздуха, может выдавать больше сжатого воздуха, чем производит компрессор. Однако это требует, чтобы компрессор имел определенную дополнительную производительность. В этом случае применяется следующая формула:

$$V = \frac{Q \times t}{P_1 - P_2}$$, где

Q – воздушный поток на этапе опорожнения резервуара = 200 л/с
t – продолжительность этапа опорожнения резервуара = 40 секунд
$P_1 - P_2$ – допустимое падение давления во время опорожнения резервуара = обычное давление в системе — минимальное допустимое давление во время опорожнения резервуара = 6,46 – 5,5 = 0,96 бар.

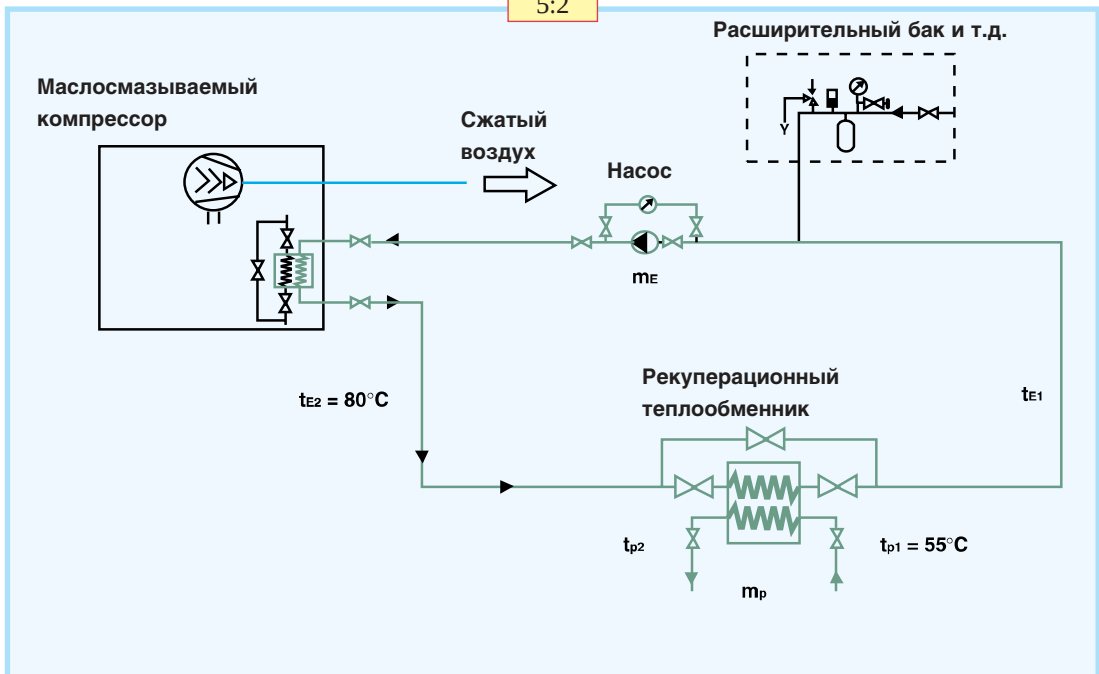
Подставив эти значения в формулу, получим требуемый объем:

$$V = \frac{Q \times t}{P_1 - P_2} = \frac{200 \times 40}{0{,}96} = 8340 \text{ л}$$

Компрессор должен иметь избыточную производительность, чтобы он мог наполнить воздушный резервуар после его опорожнения. Выбранный компрессор имеет избыточную производительность 5 л/с = 18 000 л/ч. Так как воздушный резервуар опустошается в течение часа, этой избыточной производительности больше, чем требуется.

5.7. (Дополнение 3) Рекуперация тепловой энергии с помощью воды

5:2



Вопрос: в приведенном примере для рекуперации энергии используется водяной контур. Предположим, что вода, подогреваемая в котле (оборотная вода котла), возвращается в систему с температурой 55°C. Нужно рассчитать требуемый расход энергии в контуре рекуперации и мощность, которую можно получить в результате рекуперации. Нужно также рассчитать расход и температуру воды на выходе котла.

Ответ: начните с чертежа контура рекуперации энергии и определения различных видов энергии, расходов воды и температур. Ниже приведен расчет:

Q_E – мощность, переданная из компрессора в контур рекуперации тепловой энергии, кВт
Q_P – мощность, переданная из контура рекуперации энергии в контур оборотной воды котла, кВт
m_E – расход воды в контуре рекуперации тепловой энергии, л/с
m_P – расход воды в контуре оборотной воды котла, л/с
t_{E1} – температура воды перед подачей в компрессор, °C
t_{E2} – температура воды после компрессора, °C
t_{P1} – температура оборотной воды на входе котла, °C
t_{P2} – температура оборотной воды на выходе котла, °C

5.7.1. Допущения

При расчетах нужно допустить следующие предположения:

Подходящая температура воды, выходящей из компрессора для рекуперации тепловой энергии, в данном примере может быть равна $t_{E2} = 80°C$.
Предположим, что теплообменник водяного контура рекуперации энергии имеет следующие параметры:

$t_{E1} = t_{P1} + 5°C$

$t_{P2} = t_{E2} - 5°C$

Кроме того, можно предположить, что трубопровод и теплообменник имеют теплообмен с окружающей средой.

5.7.2. Расчет расхода охлаждающей воды в контуре охлаждения

$$Q = m \times c_P \times \Delta T, \text{ где}$$

ΔT – рост температуры в компрессоре = $t_{E2} - t_{E1} = 80°C - 60°C = 20°C$
c_P – удельная теплоемкость воды = 4,18 кДж/кг x К
$Q = Q_E$ – энергия, которая может быть получена, = 70% энергии на валу = 0,70 x 162 = 113 кВт. Это энергия, которую можно получить из выбранного компрессора.

m – массовый расход в контуре рекуперации тепловой энергии = m_E

Эту формулу можно записать следующим образом:

$$m_E = \frac{Q_E}{c_P \times \Delta T} = \frac{113}{4{,}18 \times 20} = \underline{1{,}35} \text{ кг/с}$$

5.7.3. Энергетический баланс теплообменника рекуперации тепловой энергии

Для теплообменника контура рекуперации тепловой энергии применимы следующие формулы:

$Q_E = m_E \times c_P \times (t_{E2} - t_{E1})$

$Q_P = m_P \times c_P \times (t_{P2} - t_{P1})$

Однако, так как предполагается, что с окружающей средой будет происходить теплообмен, с окружающей средой, энергия, переданная из компрессора в контур рекуперации энергии, будет равна энергии, переданной в теплообменник рекуперации энергии, т.е. $Q_P = Q_E = 113$ кВт.

Формула может быть записана следующим образом:

$$m_P = \frac{Q_P}{(t_{P2} - t_{P1}) \times c_p} = \frac{113}{(75 - 55) \times 4{,}18} \approx \underline{1{,}35} \text{ л/с}$$

5.7.4. Ответ на задачу

Из вышеприведенных вычислений можно установить, что рекуперируемая мощность равна 113 кВт. Для переноса этой энергии требуется водяной поток в контуре рекуперации тепловой энергии 1,35 л/с. Соответствующий поток оборотной воды котла также составляет 1,35 л/с, что повышает температуру котла на 20°C.

5.8. (Дополнение 4)
Падение давления в трубопроводе

Вопрос: по трубопроводу, длина которого 23 м и внутренний диаметр 80 мм, протекает поток 140 л/с. Трубопровод имеет 8 колен с диаметрами закруглений, равными внутреннему диаметру. Чему равно падение давления в трубопроводе, если абсолютное давление равно 8 бар (абс.)?

Ответ: вначале нужно определить эквивалентную длину 8 колен. Из таблицы 3:36 следует, что эквивалентная длина каждого из колен составляет 1,3 м. Отсюда общая длина трубопровода равна: 8 x 1,3 + 23 = 33,4 м. Для определения падения давления используется следующая формула:

$$\Delta p = 450 \frac{Q_c^{1,85} \times l}{d^5 \times p}$$

Подставив эквивалентную длину трубопровода, получим:

$$\Delta p = 450 \frac{140^{1,85} \times 33,4}{80^5 \times 8} \approx 0,0054 \text{ бар}$$

Соответственно, общее падение давления на трубопроводе составляет 0,0054 бар.

Глава 6

Единицы измерения и символы

6.1. Международная система единиц СИ

С 1964 г. в Швеции для единиц измерения была введена система СИ. Основную информацию об этой системе можно найти в стандартах SIS 01 61 18 (Общие принципы и письменные правила), SIS 01 61 26 (Приставки и множители СИ для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований) и SIS 01 61 32 (Производные и дополнительные единицы СИ).

Единицы измерения подразделяются на четыре класса:

- основные единицы
- дополнительные единицы
- производные единицы
- добавочные единицы

Если перед единицей измерения стоит приставка (микро, милли, кило, мега и т.д.), образующаяся единица называется кратной единицей.

Основные, дополнительные и производные единицы называются единицами измерения СИ, а кратные системы, образованные из единиц СИ, называются единицами в СИ. Обратите внимание, что добавочные единицы не являются единицами в СИ.

Основные единицы являются независимыми единицами, через которые можно выразить все остальные единицы.

В системе СИ используются 7 основных единиц измерения:

длина	метр	м
масса	килограмм	кг
время	секунда	с
сила электрического тока	ампер	А
температура	кельвин	К
сила света	кандела	кд
количество вещества	моль	моль

Пятнадцать производных единиц имеют собственные наименования:

Величина	Наименование	Символ	Выраженная в других единицах СИ	Выраженная в основных и дополнительных единицах
Частота	герц	Гц	–	$с^{-1}$
Сила	ньютон	Н	–	м х кг х $с^{-2}$
Давление, механическое напряжение	паскаль	Па	Н/$м^2$	$м^{-1}$ х кг х $с^{-2}$
Энергия, работа	джоуль	Дж	Н х м	$м^2$ х кг х $с^{-2}$
Мощность	ватт	Вт	Дж/с	$м^2$ х кг х $с^{-3}$
Количество электричества	кулон	Кл	А х с	с х А
Электрическое напряжение	вольт	В	Вт/А	$м^2$ х кг х $с^{-3}$ х $А^{-1}$
Электрическая емкость	фарада	Ф	Кл/В	$м^{-2}$ х $кг^{-1}$ х $с^4$ х $А^2$
Электрическое сопротивление	ом	Ом	В/А	$м^2$ х кг х $с^{-3}$ х $А^{-2}$
Электрическая проводимость	сименс	См	А/В	$м^{-2}$ х $кг^{-1}$ х $с^3$ х $А^2$
Магнитная индукция	тесла	Тл	Вб/$м^2$	кг х $с^{-2}$ х $А^{-1}$
Магнитный поток	вебер	Вб	В х с	$м^2$ х кг х $с^{-2}$ х $А^{-1}$
Индуктивность	генри	Гн	Вб/А	$м^2$ х кг х $с^{-2}$ х $А^{-2}$
Световой поток	люмен	лм	кд х ср	кд х ср
Освещенность	люкс	лк	лм/$м^2$	кд х ср х $м^{-2}$

Дополнительные единицы являются единицами, которые по своей природе относятся к основным, но не классифицированы, как основные единицы.

В систему СИ включены три дополнительные единицы измерения:

длина	метр	м
плоские углы	радиан	рад
телесные углы	стерадиан	ср

Производные единицы измерения образуются как степень или произведения степеней одной или нескольких основных и/или дополнительных единиц в соответствии с физическими законами и служат для выражения соотношений между различными единицами измерения.

Добавочные единицы. Существуют еще несколько добавочных единиц, не входящих в систему СИ, но которые по различным причинам нельзя исключить, несмотря на то, что в принципе эти единицы можно выразить через единицы СИ. Некоторые из этих единиц были выбраны для применения наравне с единицами СИ и называются добавочными единицами.

Существуют также еще четыре добавочные единицы, применяемые в основном в астрономии и физике. Применение всех этих добавочных единиц наравне с единицами СИ одобрено Международным комитетом мер и весов (МКМВ) в 1969 г.

В технике используются следующие добавочные единицы:

Величина	Добавочная единица		Примечания
	Наименование	Символ	
Плоский угол	градус	...°	1° = π / 180 рад
Плоский угол	минута	...’	1’ = 1° / 60
Плоский угол	секунда	...”	1” = 1’ / 60
Объем	литр	л	1 л = 1 $дм^3$
Время	минута	мин	1 мин = 60 с
Время	час	ч	1 ч = 60 мин = 3 600 с
Время	сутки	сут	1 сут = 24 ч
Масса	тонна (метрическая)	т	1 т = 1 000 кг
Давление	бар	бар	1 бар = 10^5 Па = 10^5 Н/$м^2$

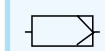
Кратные единицы. Они образуются из единиц СИ и добавочных единиц путем добавления приставки, которая означает умножение на степень десяти.

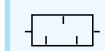
В международных рекомендациях (стандартах) указаны четырнадцать таких приставок, приведенных в таблице ниже.

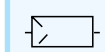
Множитель	Пример		Символ	
	Приставка	Обозначение		
10^{12}	тера	Т	1 тераджоуль	1 ТДж
10^{9}	гига	Г	1 гигаватт	1 ГВт
10^{6}	мега	М	1 мегавольт	1 МВ
10^{3}	кило	к	1 километр	1 км
10^{2}	гекто	г	1 гектограмм	1 гг
10^{1}	дека	да	1 декалюмен	1 далм
10^{-1}	деци	д	1 дециметр	1 дм
10^{-2}	санти	с	1 сантиметр	1 см
10^{-3}	милли	м	1 миллиграмм	1 мг
10^{-6}	микро	мк	1 микрометр	1 мкм
10^{-9}	нано	н	1 наногенри	1 нГн
10^{-12}	пико	п	1 пикофарада	1 пФ
10^{-15}	фемто	Ф	1 фемтометр	1фм
10^{-18}	атто	а	1 аттосекунда	1 ас

Давление					
Па = Н/м²	бар	кгс/см²	торр	м вод. столба	мм вод. столба
1	10^{-5}	$1{,}02 \times 10^{-5}$	$7{,}5 \times 10^{-3}$	$1{,}02 \times 10^{-4}$	0,102
10^{5}	1	1,02	750	10,2	$1{,}02 \times 10^{4}$
$9{,}81 \times 10^{4}$	0,981	1	735	10	10^{4}
133,3	$1{,}33 \times 10^{-3}$	$1{,}36 \times 10^{-3}$	1	$1{,}36 \times 10^{-2}$	13,6
$9{,}81 \times 10^{3}$	$9{,}81 \times 10^{-2}$	0,1	73,5	1	10^{3}
9,81	$9{,}81 \times 10^{-5}$	10^{-4}	$7{,}35 \times 10^{-2}$	10–3	1
Энергия					
Дж	кДж	кВт х ч	кгс х м	ккал	
1	10^{-3}	$2{,}78 \times 10^{-7}$	0,102	$2{,}39 \times 10^{-4}$	
1000	1	$2{,}78 \times 10^{-4}$	102	0,239	
$3{,}6 \times 10^{6}$	$3{,}6 \times 10^{3}$	1	$3{,}67 \times 10^{5}$	860	
9,81	$9{,}81 \times 10^{-3}$	$2{,}72 \times 10^{-6}$	1	$2{,}39 \times 10^{-3}$	
$4{,}19 \times 10^{3}$	4,19	$1{,}16 \times 10^{-3}$	427	1	
Мощность					
Вт	кгс х м/с	ккал/с	ккал/ч	л.с.	
1	0,102	$0{,}239 \times 10^{-3}$	0,860	$1{,}36 \times 10^{-3}$	
9,81	1	$2{,}34 \times 10^{-3}$	8,43	$1{,}33 \times 10^{-2}$	
$4{,}19 \times 10^{3}$	427	1	$3{,}6 \times 10^{3}$	5,69	
1,163	0,119	$0{,}278 \times 10^{-3}$	1	$1{,}58 \times 10^{-3}$	
735	75	0,176	632	1	

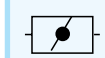
6.2. Условные обозначения на чертежах

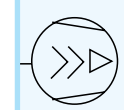

Воздушный фильтр


Глушитель


Диффузор

Компенсатор


Заслонка


Винтовой компрессор

Обратный клапан

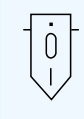
Запорный клапан

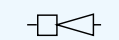
Предохранительный клапан

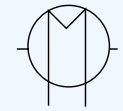
Ручной вентиль

Перекрывающий давление клапан

Открывающий давление клапан


Маслоотделитель

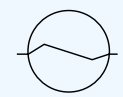

Эжектор


Охлаждаемый водой охладитель

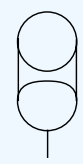
Влагоотделитель

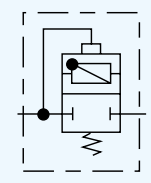
Ресивер конденсата

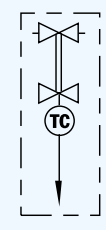
Направление потока


Охлаждаемый воздухом охладитель

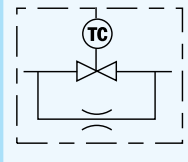
Вентилятор


Расширительный сосуд


Клапан минимального давления



Термостатический клапан



Термостатический клапан

Фильтр жидкости

Насос для перекачки жидкости

Масляный бак с ручным сливом

Дроссель

Байпас

Регулятор давления

Масляный запорный клапан

Воздух

Масло

Вода

Слив

Вентиляционный воздуховод

Механическое соединение

Воздух пневмоуправления

Электрический сигнал

Граница

Электроэнергия

Электродвигатель

Электрическая распределительная коробка

Муфта двигателя

Глухой фланец (заглушка)

Датчик давления, температуры и т.д.

Датчик давления, температуры и т.д.

Датчик давления, температуры и т.д.

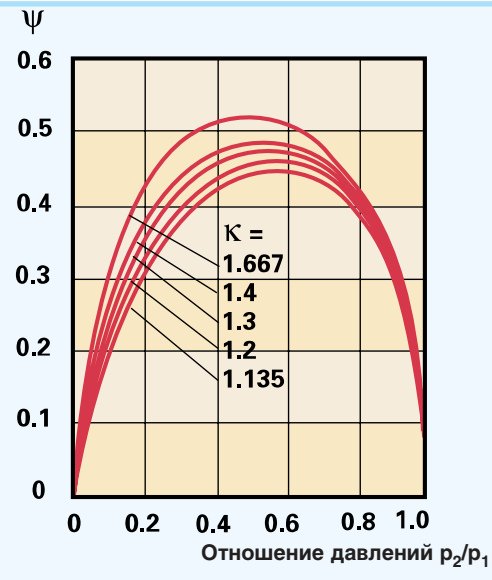
6.3. Графики и таблицы

Материал	Дж/(кг x K)
Воздух (при атмосферном давлении)	1004
Алюминий	920
Медь	390
масло	1670 – 2140
Сталь	460
Вода	4185
Цинк	385

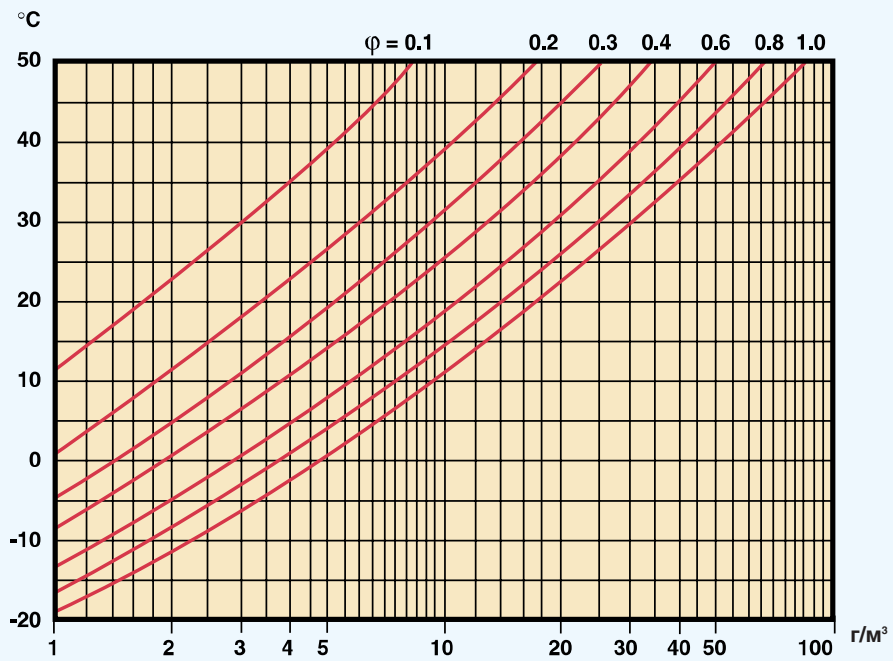
Теплоемкость некоторых материалов.

Температура кипения	78,8	K
Критическое давление (абс.)	37,66	бар
Критическая температура	132,52	K
Удельная масса	1,225	кг/м^3
Динамическая вязкость	17,89 x 10^{-6}	Па x с
Температура замерзания	57–61	K
Газовая постоянная	287,1	Дж/(кг x K)
Кинематическая вязкость	14,61 x 10^{-5}	м/с^2
Молярная масса	28,964	безразмерная величина
Теплоемкость при: постоянном давлении	1,004	Дж/(кг x K)
Коэффициент удельной теплоемкости	1,40	безразмерная величина
Скорость звука	340,29	м/с
Теплопроводность	0,025	Вт/(м x K)

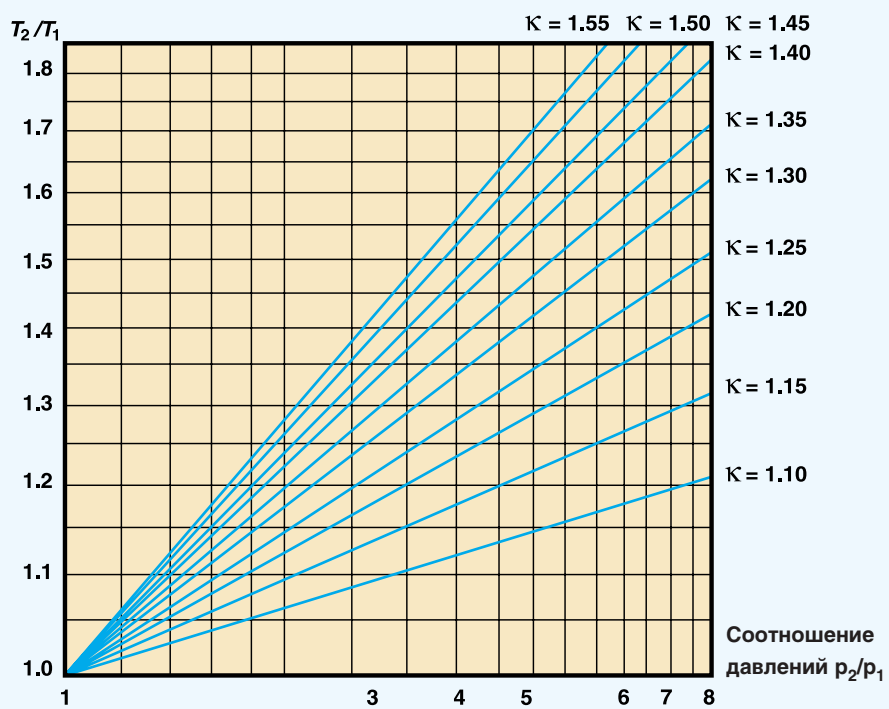
Некоторые физические константы для сухого воздуха на уровне моря (температура 15°C и давление 1,013 бар).



Коэффициенты расхода как функция от отношения давлений для различных значений κ.



Содержание воды в воздухе при различных относительных давлениях испарения (φ). Максимальное содержание воды удваивается при росте температуры на каждые 11⁰С.



На графике показано соотношение температур T_2/T_1 для различных газов с разными значениями К в ходе изоэнтропического сжатия.

t, °C	P_S, мбар	ρw, г/м³	t, °C	P_S, мбар	ρw, г/м³
–40	0,128	0,119	5	8,72	6,80
–38	0,161	0,146	6	9,35	7,26
–36	0,200	0,183	7	10,01	7,75
–34	0,249	0,225	8	10,72	8,27
–32	0,308	0,277	9	11,47	8,82
–30	0,380	0,339	10	12,27	9,40
–29	0,421	0,374	11	13,12	10,01
–28	0,467	0,413	12	14,02	10,66
–27	0,517	0,455	13	14,97	11,35
–26	0,572	0,502	14	15,98	12,7
–25	0,632	0,552	15	17,04	12,63
–24	0,689	0,608	16	18,17	13,63
–23	0,771	0,668	17	19,37	14,48
–22	0,850	0,734	18	20,63	15,37
–21	0,937	0,805	19	21,96	16,31
–20	1,03	0,884	20	23,37	17,30
–19	1,14	0,968	21	24,86	18,34
–18	1,25	1,06	22	26,43	19,43
–17	1,37	1,16	23	28,09	20,58
–16	1,51	1,27	24	29,83	21,78
–15	1,65	1,39	25	31,67	23,05
–14	1,81	1,52	26	33,61	24,38
–13	1,98	1,65	27	35,65	25,78
–12	2,17	1,80	28	37,80	27,24
–11	2,38	1,96	29	40,06	28,78
–10	2,60	2,14	30	42,43	30,38
–9	2,84	2,33	31	44,93	32,07
–8	3,10	2,53	32	47,55	33,83
–7	3,38	2,75	33	50,31	35,68
–6	3,69	2,99	34	53,20	37,61
–5	4,02	3,25	35	56,24	39,63
–4	4,37	3,52	36	59,42	41,75
–3	4,76	3,82	37	62,76	43,96
–2	5,17	4,14	38	66,28	46,26
–1	5,62	4,48	39	69,93	48,67
0	6,11	4,85	40	73,78	51,19
1	6,57	5,19	41	77,80	53,82
2	7,06	5,56	42	82,02	58,56
3	7,58	5,95	43	86,42	59,41
4	8,13	6,36	44	91,03	62,39

Давление насыщения (P_S) и плотность (ρw) насыщенного водяного пара.

Газ	Объемный %	Весовой %
Азот N_2	78,084	75,520
Кислород O_2	20,9476	23,142
Аргон Ar	0,934	1,288
Углекис–лый газ CO_2	0,0314	0,0477
Неон Ne	0,001818	0,001267
Гелий He	0,000524	0,0000724
Криптон Kr	0,000114	0,000330
Ксенон Xe	0,0000087	0,000039
Водород H_2	0,00005	0,000003
Метан CH_4	0,0002	0,0001
Закись азота N_2O	0,00005	0,00008
Озон O_3	летом: 0–0,000007	0–0,00001
	зимой: 0–0,000002	0–0,000003
Сернис–тый газ SO_2	0–0,0001	0–0,0002
Двуокись азота NO_2	0–0,000002	0–0,000003
Аммиак NH_3	около 0	около 0
Угарный газ CO	около 0	около 0

Состав чистого сухого воздуха на уровне моря. До высоты 25 км этот состав остается относительно постоянным.

Тип и размер машины	Потребление сжатого воздуха, не более, л/с
Сверлильные машины, ∅ = диаметр сверла (мм):	
малые ∅ < 6,5	6,0
средние 6,5 < ∅ =< 10	7,5
большие 10 < ∅ < 16	16,5
Станки для нарезания резьбы	6
Винтоверт, d = размер винта:	
малый d < M6	5,5
средний M6 < d < M8	7,5
Ударный гайковерт, d = размер болта:	
малый d < M10	5,0
средний M10 < d < M20	7,5
большой d ⩾ M20	22,0
Опиловочный станок	7,5
Шлифовальные станки, e = мощность (кВТ):	
малые e < 0,5	8,0
большие e > 0,5	16,5
Точильные станки, e = мощность (кВТ):	
малые 0,4 < e < 1,0	20,0
средние 1,0 < e < 2	40,0
большие e > 2	60,0
Отбойные молотки:	
легкие	6,0
тяжелые	13,5
Пневматические подъемники, t = грузоподъемность (т):	
t < 1 т	35
t > 1 т	45
Очиститель накипи	5,0
Очистительное сопло	6,0
Гайковерт, d = размер болта:	
d ⩽ M8	9
d ⩾ M10	19

Примерное потребление сжатого воздуха некоторыми распространенными инструментами и станками, основанное на опыте.
Эти значения можно брать за основу для расчета требуемой производительности компрессора.

Точка росы, °C	г/м³	Точка росы, °C	г/м³	Точка росы, °C	г/м³	Точка росы, °C	г/м³
+ 100	588,208	+ 58	118,199	+16	13,531	–25	0,55
99	569,071	57	113,130	15	12,739	26	0,51
98	550,375	56	108,200	14	11,987	27	0,46
97	532,125	55	103,453	13	11,276	28	0,41
96	514,401	54	98,883	12	10,600	29	0,37
95	497,209	53	94,483	11	9,961	30	0,33
94	480,394	52	90,247	10	9,356	31	0,301
93	464,119	51	86,173	9	8,784	32	0,271
92	448,308	50	82,257	8	8,243	33	0,244
91	432,885	49	78,491	7	7,732	34	0,220
90	417,935	48	74,871	6	7,246	35	0,198
89	403,380	47	71,395	5	6,790	36	0,178
88	389,225	46	68,056	4	6,359	37	0,160
87	375,471	45	64,848	3	5,953	38	0,144
86	362,124	44	61,772	2	5,570	39	0,130
85	340,186	43	58,820	1	5,209	40	0,117
84	336,660	42	55,989	0	4,868	41	0,104
83	324,469	41	53,274			42	0,093
82	311,616	40	50,672	–1	4,487	43	0,083
81	301,186	39	48,181	2	4,135	44	0,075
80	290,017	38	45,593	3	3,889	45	0,067
79	279,278	37	43,508	4	3,513	46	0,060
78	268,806	36	41,322	5	3,238	47	0,054
77	258,827	35	39,286	6	2,984	48	0,048
76	248,840	34	37,229	7	2,751	49	0,043
75	239,351	33	35,317	8	2,537	50	0,038
74	230,142	32	33,490	9	2,339	51	0,034
73	221,212	31	31,744	10	2,156	52	0,030
72	212,648	30	30,078	11	1,96	53	0,027
71	204,286	29	28,488	12	1,80	54	0,024
70	196,213	28	26,970	13	1,65	55	0,021
69	188,429	27	25,524	14	1,51	56	0,019
68	180,855	26	24,143	15	1,38	57	0,017
67	173,575	25	22,830	16	1,27	58	0,015
66	166,507	24	21,578	17	1,15	59	0,013
65	159,654	23	20,386	18	1,05	60	0,011
64	153,103	22	19,252	19	0,96	65	0,0064
63	146,771	21	18,191	20	0,88	70	0,0033
62	140,659	20	17,148	21	0,80	75	0,0013
61	134,684	19	16,172	22	0,73	80	0,0006
60	129,020	18	15,246	23	0,66	85	0,00025
59	123,495	17	14,367	24	0,60	90	0,0001

Содержание воды в воздухе при различных точках росы.

6.4. Перечень действующих стандартов и норм

Здесь приведен перечень действующих в настоящее время стандартов и норм, относящихся к сфере применения сжатого воздуха. Перечень основан на требованиях шведского законодательства, и в большинстве случаев приведенные нормы аналогичны нормам, действующим в других странах. Перечисленные стандарты, за небольшим исключением, являются также европейскими или международными стандартами. Документы Pneurop обычно выпускаются параллельно с выпуском CAGI, который предназначен для американского рынка.

Большое значение приобретает обращение в выпускающий орган для подтверждения того, что используется последнее из выпущенных издание, если только в требованиях не содержится ссылка на датированное издание.

6.4.1. Правила и стандарты по технике безопасности

6.4.1.1. Правила техники безопасности для машиностроения

Директива ЕС 89/392/ЕЕС, директива по машиностроению. В Швеции аналогичный закон был разработан Национальным комитетом Швеции по охране труда и здравоохранению под наименованием «Правила для машиностроения AFS 93:10» (в новой редакции под названием AFS 94:48).

EN 1012-1 Компрессоры и вакуумные насосы – требования к безопасности – разд. 1: Компрессоры.

EN 1012-2 Компрессоры и вакуумные насосы – требования к безопасности – разд. 2: Вакуумные насосы.

6.4.1.2. Безопасность установок под давлением

Директива 87/404/ EEG Простые резервуары под давлением. В Швеции аналогичный закон был разработан Национальным комитетом Швеции по охране труда и здравоохранению под названием «Правила для простых резервуаров под давлением AFS 93:41 I» (в новой редакции под названием AFS 94:53).

Директива 76/767 EEG содержит общие правила для простых резервуаров под давлением и методы их проверки. Директива 97/23/ EG для оборудования высокого давления (применяется с 29.11.1999).

В Швеции закон был разработан Национальным комитетом Швеции по охране труда и здравоохранению под названием «Правила для простых резервуаров под давлением и другого оборудования высокого давления AFS 86:9» (в новой редакции под названием AFS 94:39).

EN 764 Оборудование высокого давления – Терминология и обозначения – Давление, температура.

EN 286-1 Простые резервуары под давлением без огневого подвода теплоты, предназначенные для воздуха или азота – Часть 1: Конструкция, изготовление и испытания.

EN 286-2 Простые резервуары под давлением без огневого подвода теплоты, предназначенные для воздуха или азота – Часть 2: Резервуары под давлением для пневматических тормозов и вспомогательные системы для моторных транспортных средств и их прицепов.

EN 286-3 Простые резервуары под давлением без огневого подвода теплоты, предназначенные для воздуха или азота – Часть 3: Стальные резервуары под давлением для пневматических тормозов и вспомогательное пневматическое оборудование для железнодорожного подвижного состава.

EN 286-4 Простые резервуары под давлением без огневого подвода теплоты, предназначенные для воздуха или азота – Часть 4: Резервуары под давлением, изготовленные из алюминиевых сплавов, предназначенные для пневматических тормозов, и вспомогательное пневматическое оборудование для железнодорожного подвижного состава.

6.4.1.3. Охрана окружающей среды

Pneurop PN8NTCI, Закон об испытаниях компрессоров на шумность. ISO 84/536/EC. Требования к уровню шума для машиностроения. В ISO приведен специальный стандарт на измерения шума.

Относительно выпуска выхлопных газов из двигателей внутреннего сгорания ожидается решение, соответствующее «ЕС этап 1».

6.4.1.4. Электробезопасность

ELSAK-FS 1994:9 Постановления Национального комитета Швеции по охране труда и здравоохранению по электротехническим материалам.

ELSAK-FS 1994:7 Постановления Национального комитета Швеции по охране труда и здравоохранению по сильноточным установкам (эквивалентны IEC 364).

Директива ЕС 89/336/EEG об электромагнитной совместимости.

ELSAK-FS 1995:5 Постановления Национального комитета Швеции по охране труда и здравоохранению по электромагнитной совместимости.

Стандарт EN 60204-1 Машиностроение, указания по электробезопасности.

Стандарт EN 60439-1 Низковольтная коммутационная аппаратура и аппаратура управления.

6.4.2. Технические стандарты и нормы

6.4.2.1. Стандартизация

SS 1796 Технология производства сжатого воздуха – Терминология.

ISO 3857-1 Компрессоры, пневматические инструменты и машины – Терминология – Часть 1: Общая часть.

ISO 3857-2 Компрессоры, пневматические инструменты и машины – Терминология – Часть 2: Компрессоры.

ISO 5390 Компрессоры – Классификация.

ISO 5941 Компрессоры, инструменты и машины – Рекомендуемые давления.

6.4.2.2. Технические условия

SS-ISO 1217 Технология производства сжатого воздуха – Объемные компрессоры – Испытания перед отправкой.

ISO 5389 Турбокомпрессоры – нормы и правила испытаний производительности.

ISO 7183-1 Осушители сжатого воздуха – Часть 1: Технические условия и методы испытаний.

ISO 7183-1 Осушители сжатого воздуха – Часть 2: Характеристики производительности.

ISO 8010 Компрессоры для обрабатывающей промышленности – Винтовые компрессоры и подобные типы – Технические условия и перечни технических характеристик для их конструирования и производства.

ISO 8011 Компрессоры для обрабатывающей промышленности – Турбокомпрессоры – Технические условия и перечни технических характеристик для их конструирования и производства.

ISO 8012 Компрессоры для обрабатывающей промышленности – Поршневые компрессоры – Технические условия и перечни технических характеристик для их конструирования и производства.

SS-ISO 8573-1 Сжатый воздух для общего потребления – Часть 1: Примеси и классы качества.

Для усиления действующих шведских норм и правил приняты следующие нормы, выпущенные Комиссией по стандартизации сосудов под давлением:

нормы на сосуды под давлением 1987 г.

нормы на трубопроводы 1978 г.

нормы на воздушные резервуары 1991 г.

Директива EG 73/23/EEG Низковольтное электрооборудование.

6.4.2.3. Измерения

ISO 8573-2 Сжатый воздух для общего потребления – Часть 2: Методы испытаний на содержание масляного аэрозоля.

(Проект) ISO 8573-3 Сжатый воздух – Часть 3: Измерение влажности.

(Проект) ISO 8573-4 Сжатый воздух – Часть 4: Измерение количества твердых частиц.

Тематический указатель

А

абсолютное давление 1.2.1
абсолютный ноль 1.2.2
абсорбционные осушители 2.4.1.4
абсорбция 2.4.1
автоматический выключатель 3.8.5
адсорбционные осушители 2.4.1.5
адсорбционный осушитель MD 2.4.1.5
адсорбция 2.4.1
активная мощность 1.6.4
анализ жизненного цикла, LCA 4.3.2
анализ работы 3.1.1.3
асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 1.6.5
атмосферное давление 1.2.1
атомное число 1.1.1

Б

байпасное регулирование 2.5.2.2
безмасляные винтовые компрессоры 2.1.5.1
безмасляные компрессоры 2.1.3, 2.1.5.1
бустер-компрессоры 2.3.2

В

вакуумные насосы 2.3.1
вентилятор 3.5.5
винтовые компрессоры с нагнетанием жидкости 2.1.5.2
винтовые компрессоры 2.1.5
влагоотделитель 2.4.1.1
влажный воздух 1.4.2
водяной пар 3.2.2
воздух 1.4
воздушный ресивер 3.6.1.1
возможности рекуперации 3.4.2, 4.2.6
возможности экономии энергии 4.2
впуск воздуха 3.5.4
время работы без нагрузки 2.5.4.2
всасываемый воздух 3.5.4
высокое напряжение 1.6.1
выхлопные газы 3.7.2

Г

газовая постоянная 1.3.2
генераторы 3.7.3
гидроусилители 2.3.3
гликолевая смесь 3.3.1.4

Д

давление 1.2.1
движение молекул 1.1.2
децентрализованные установки 3.1.2.3
децибел 3.9.1
диапазон давлений 2.5.4.2
динамические компрессоры 2.2.1
дросселирование входа 2.5.2.3, 2.5.3.1
дросселирование 1.3.7

Е

емкостная измерительная система 2.5.5.2

З

закон Бойля – Мариотта 1.3.2
закон Ома 1.6.2
закон Шарля 1.3.2
замкнутая система охлаждения 3.3.1.4
защита от короткого замыкания 3.8.5
защита от перегрузки 3.8.6
звукометрия 3.9.7
звукопоглощение 3.9.9
зубчатый компрессор 2.1.6

И

издержки за срок службы, LCC 4.3.2
излучение 1.1.1
изменения состояния 1.3.4
измерение давления 1.2.1, 2.5.5.2
измерение температуры 2.5.5.1
измерение расхода 3.6.4
изобарический процесс 1.3.4.2
изотермический процесс 1.3.4.3
изохорный процесс 1.3.4.1
изоэнтропический процесс 1.3.4.4
индивидуальная газовая постоянная 1.3.2

К

кабели 3.8.6
кажущаяся мощность 1.6.4
качество сжатого воздуха 3.2.2
класс изоляции 1.6.5.3
класс качества согласно ISO 3.2.2
классы защиты 1.6.5.4
колебания давления на входе 3.1.3.2
количество воздуха для вентиляции 3.5.5
кольцевой трубопровод 3.6.2
компенсация сдвига фаз 3.8.7
комплексная система управления 2.5.6
компрессор высокого давления 3.6.1.1
компрессор одинарного действия 1.5.2, 2.1.2
компрессор с водяным охлаждением 3.3.1
компрессорная централь 3.1.2, 3.5
компрессорный модуль 3.5.1
компрессоры двойного действия 1.5.2, 2.1.2
компрессоры с гидравлическим поршнем 2.1.9
компрессоры с лабиринтным уплотнением 2.1.2
конвекция 1.3.3
константа помещения 3.9.4
контактор 3.8.3
контроль 2.5.5.3, 2.5.8
концевой охладитель 2.4.1.1
коэффициент теплопередачи 1.3.3
коэффициент теплопроводности 1.3.3
критический расход 1.3.5
критическое отношение давлений 1.3.5

Л

ламинарный поток 1.3.6
логарифмическая средняя разность температур 1.3.3

М

масляно-водная эмульсия 3.2.8
масляный фильтр 3.2.5
мембранные компрессоры 2.1.4
мембранный фильтр 3.2.8
металлический резистор 2.5.5.1
микроорганизмы 3.2.4
многоступенчатая разгрузка 2.5.2.8
молекулы 1.1.1
мощность 1.2.5

Н

нагрузка 2.5.1
напряжение сети 1.6.3
нейтроны 1.1.1
непрерывное регулирование производительности 2.5.1
низкое напряжение 1.6.1
новые капиталовложения 4.1.1.1
нормальный литр 1.2.6
нормы и стандарты 3.9, 6.4

О

общий газовый закон 1.3.2
объем мертвого пространства 1.5.3
объемные компрессоры 1.5.2
определение параметров 3.1, 5.1
оптимизированная работа компрессора 4.1.1.1
осевые компрессоры 2.2.3
открытая система охлаждения 3.3.1.2, 3.3.1.3

П

падение давления 1.3.6, 4.2.2
передвижные генераторы 3.7.3
передвижные компрессоры 3.7
переменный ток 1.6.1
плавное регулирование 2.5.3.4
плавный пуск 3.8.3
плазма 1.1.2
планирование технического обслуживания 4.2.7.1
подключение звездой 1.6.3
политропический процесс 1.3.4.5
полная экономия установки 4.1.1.1
полное сопротивление 1.6.2
полные затраты 4.3.2
поршневые компрессоры 1.5.1-1.5.2, 2.1.2
потребление воздуха 3.1.1.2, 4.2.3
предварительный фильтр 3.5.4
предохранители 3.7.5
преобразователь частоты 2.5.4.3
протоны 1.1.1
прямой пуск 3.8.3
пуск с переключением со звезды на треугольник 3.8.3
пускатель 3.8.3, 3.8.5

Р

работа 1.2.4
рабочее давление 3.1.1.1
рабочий объем цилиндр 1.5.3
радиальные компрессора 2.2.1, 2.2.2
разгрузка впускным клапаном 2.5.2.8
разгрузка/нагрузка 2.5.1
распределение сжатого воздуха 3.6.1
расход воздуха со свободным выпуском 1.2.6
расходы на техническое обслуживание 4.2.7
расчет компрессора 4.3.2
реактивная мощность 1.6.4
реактивное сопротивление 1.6.2
реверберация 3.9.5
регулирование лопаток 2.5.3.2, 2.5.3.3
регулирование пуском/остановом 2.5.2.5
регулирование числа оборотов 2.5.4.3
регулирование 2.5.1
регулируемый выпускной канал 2.5.2.7
резистивная измерительная система 2.5.5.2
резонанс трубы 3.5.4
рекуперация переносимой водой энергии компрессора 3.4.3.3
рекуперация переносимой воздухом энергии компрессора 3.4.3.2
рекуперация энергии 3.4
реле давления 2.5.4.2
роторно-пластинчатые компрессоры 2.1.8

С

сброс давления с дросселированием входа 2.5.2.4
сброс давления 2.5.2.1, 2.5.3.4
сверхнизкое напряжение 1.6.1
сдвиг по фазе 1.6.2
селектор пусковой последовательности 2.5.6.1
сжатие в несколько этапов 1.5.5
синхронная скорость 1.6.5.1
система регулирования 2.5.1
содержание воды в сжатом воздухе 2.4.1, 3.2.2
соединение треугольником 1.6.5.7
сопло 1.3.5
сопротивление 1.6.2
состав воздуха 1.4.1
состав затрат 4.1.1.1, 4.3.2
спиральные компрессоры 2.1.7
способ монтажа 1.6.5.6
способы охлаждения 3.3
степень использования 3.1.1.1
степень повышения давлений 1.5.2
степень рекуперации 3.4.2, 4.2.6
стерильные фильтры 3.2.5

Т

температура 1.2.2
теплоемкость 1.2.3
теплопередача 1.3.3
термодинамика 1.3
термометр резистивный 2.5.5.1
терморезистор 2.5.5.1
точка росы под давлением 2.4.1
точка росы 1.4.2
трансформатор для цепей управления 3.8.4
трехфазная сеть 1.6.3
трубопроводы 1.3.3
турбокомпрессоры 2.2.1
турбулентный поток 1.3.6

У

угольный фильтр 2.4.2, 3.2.5
уменьшение шума 3.9.9
управление последовательностью 2.5.6.1
уровень звукового давления 3.9.2
уровень звуковой мощности 3.9.1
уровень шума компрессора 3.7.2, 3.9.10
усилители напорные 2.3.3
утечка 3.1.1.3, 4.2.3

Ф

фазное напряжение 1.6.3
фильтр пылеулавливающий 2.4.2
фильтр 2.4.2, 3.2.5

Х

холодильный осушитель 2.4.1.2

Ц

централизованная установка 3.1.2.2
центральная компрессорная 3.5.1, 3.5.2, 3.5.3
центральное управление 2.5.7
центробежные компрессоры 2.2.2

Ч

частота 1.6.1
частотные кривые 3.9.7
число Рейнольдса 1.3.6
чрезмерное сжатие 2.4.1.3

Ш

шкала Кельвина 1.2.2
шкала Цельсия 1.2.2

Э

эквивалентная длина трубы 3.6.3
эксплуатационные расходы 4.1.1.1-4.1.1.2
электрический ток 1.6.1
электрическое напряжение 1.6.1
электродвижущая сила, ЭДС 1.6.2
электронная оболочка 1.1.1
электроны 1.1.1
эффект Джоуля – Томсона 1.3.7
эффективность разделения 2.4.2

Для записей

What sets Atlas Copco apart as a company is our conviction that we can only excel in what we do if we provide the best possible know-how and technology to really help our customers produce, grow and succeed.

There is a unique wayof achieving that - we simply call it the Atlas Copco way. It builds on **interaction**, on long-term relationships and involvement in the customers' process, needs and objectives. It means having the flexibility to adapt to the diverse demands of the people we cater for.

It's the **commitment** to our customers' business that drives our effort towards increasing their productivity through better solutions. It starts with fully supporting existing products and continuously doing things better, but it goes much further, creating advances in technology through **innovation**. Not for the sake of technology, but for the sake of our customers' bottom line and peace-of-mind.

That is how Atlas Copco will strive to remain the first choice, to succeed in attracting new business and to maintain our position as the industry leader.

420032, Kazan, 13 Delovaya st.
8 (843) 253-62-05, 206-02-10
sales@kraft-air.ru
www.kraftmarket24.ru

Atlas Copco

9780 0380-10