

# 11 Пневмосеть и кондиционеры рабочего газа

## 11.1 Система подготовки сжатого воздуха

Как правило, источником сжатого воздуха как рабочей среды пневмосистем являются *компрессорные установки*. Они могут быть стационарными, установленными на специальном фундаменте, или передвижными, установленными на каких-либо транспортных средствах. Компрессорные установки могут осуществлять централизованное питание нескольких различных по назначению потребителей сжатого воздуха или индивидуальное питание какого-либо потребителя, например пневмопривода тормозов грузового автомобиля.

В состав любой компрессорной установки, помимо самого компрессора, входят элементы контроля и регулирования, а также кондиционеры воздушной среды.

Для того чтобы представить общую систему подготовки и использования сжатого воздуха, рассмотрим упрощенную схему стационарной компрессорной установки, осуществляющей централизованное питание всех возможных потребителей сжатого воздуха. На рисунке 11.1 условными обозначениями показана такая пневмосеть.

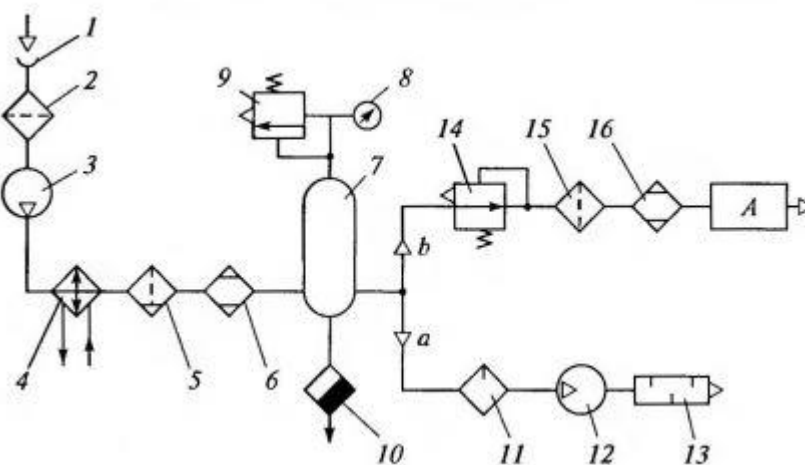


Рисунок 11.1 - Схема промышленной пневмосети: 1 - воздухозаборник; 2, 15 - фильтры; 3 - компрессор; 4 - охладитель; 5 - фильтр-влагоотделитель; 6, 16 - химические осушители; 7 - воздухохоборник; 8 - манометр; 9 - предохранительный клапан; 10 - конденсатоотводчик; 11 - маслораспылителъ; 12 - пневмомотор; 13 - глушитель; 14 - редукионный клапан.

Воздух, который попадает в воздухозаборник 1 из окружающей среды, содержит большое количество пыли. Обладая абразивными свойствами, частицы пыли вызывают быстрый износ деталей компрессора. Поэтому перед компрессором устанавливают специальные пылеуловители или

обычные фильтры, в которых в качестве фильтрующего элемента используют ткань или металлические сетки. Схема фильтра 2 с тканевым фильтрующим элементом представлена на рисунке 11.2. В таком фильтре хлопчатобумажная или шерстяная ткань натягивается на деревянный или металлический каркас так, чтобы воздух мог проходить только через ткань и уже очищенным от пыли поступать во всасывающий трубопровод компрессора.

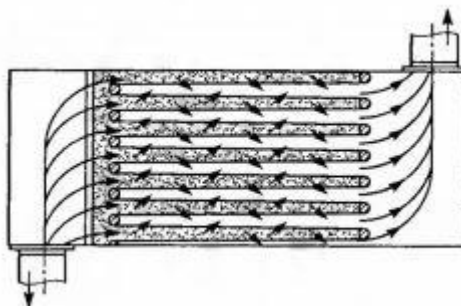


Рисунок 11.2 - Схема фильтра воздухозаборника

Основным требованием к фильтру 2, помимо заданной тонкости фильтрации, является минимально возможное сопротивление потоку воздуха. Площадь фильтрующего элемента должна быть такой, чтобы перепад давления на фильтре  $\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}$  не превышал 100 кПа.

Из компрессора 3 нагретый в процессе сжатия воздух поступает в водяной охладитель 4, который обычно входит в конструкцию самого компрессора. Охлаждение воздуха приводит к конденсации паров воды, которые попадают в компрессор вместе с воздухом, и паров масел, используемых в компрессоре для смазки трущихся поверхностей. Поэтому после охладителя воздух проходит через фильтр-влагоотделитель 5, который фильтрует воздух, как обычный фильтр, и одновременно осушает его.

На рисунке 11.3 показана конструктивная схема фильтра-влагоотделителя. Сжатый воздух, подведенный по каналу 1, проходит в стакан 3 через щели отражателя 7, которые благодаря своей конструкции сообщают воздуху вихревое вращательное движение. Мелкие частицы воды и масла, находящиеся в потоке воздуха, под действием центробежных сил отбрасываются к стенкам стакана и стекают вниз в зону, отделенную заслонкой 4, которая препятствует конденсату, собранному в этой зоне, снова попадать в поток воздуха. Осушенный воздух через фильтрующий элемент 6 поступает в выходной канал 2. Стакан обычно изготавливают из прозрачного материала, поэтому легко определить уровень конденсата.

При достижении предельного уровня конденсата открывается запорный кран 5 и конденсат выводится из стакана под действием сжатого воздуха. Вместе с конденсатом удаляются и твердые частицы, задержанные фильтром.

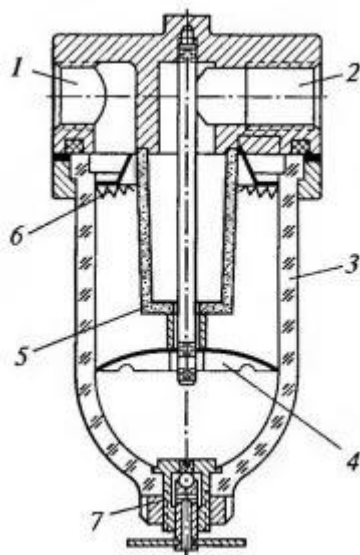


Рисунок 11.3 - Фильтр-влагодделитель: 1 - входной канал; 2 - выходной канал; 3 - стакан; 4 - заслонка; 5 - запорный кран; 6 - фильтрующий элемент; 7 – отражатель.

Наибольшую сложность представляет удаление из потока воздуха компрессорного масла, которое содержится в воздухе в виде аэрозоля с частицами размером 0,01-1 мкм. Из-за малости этих частиц нельзя удалить их в фильтре-влагодделителе центробежного действия. Поэтому воздух из фильтра-влагодделителя 5 (см. рисунок 11.1) поступает в химический осушитель 6, в котором влага адсорбируется при прохождении воздуха через специальное вещество - адсорбент, в качестве которого может использоваться активированный уголь, активный оксид алюминия или силикагель.

После осушения воздух попадает в воздухохоборник (ресивер) 7. В пневмосистемах воздухохоборники выполняют несколько функций: во-первых, создают запас сжатого воздуха для использования в моменты максимального потребления; во-вторых, сглаживают пульсацию подачи воздуха, которая возникает при использовании компрессоров объемного типа, особенно поршневых; в-третьих, отделяют влагу, содержащуюся в потоке воздуха, которая выпадает в виде конденсата в процессе расширения воздуха при заполнении воздухохоборника и при движении воздуха по воздухохоборнику.

Для обеспечения нормальной работы воздухохоборник снабжен аппаратурой контроля и управления: манометром 8 для контроля давления; предохранительным пневмоклапаном 9, ограничивающим верхний предел давления в воздухохоборнике; конденсатоотводчиком 10.

На рисунке 11.4 представлена конструктивная схема типового воздухохоборника. Для лучшего влагодделения ввод воздуха обычно делают в средней части воздухохоборника, загибая входной трубопровод вниз, а вывод - в верхней части. Внутри воздухохоборника устанавливают

перегородки, заставляющие воздух изменять направление движения, создавая тем самым центробежные силы, которые, как и в фильтре-влажготделителе, способствуют осушению воздуха.

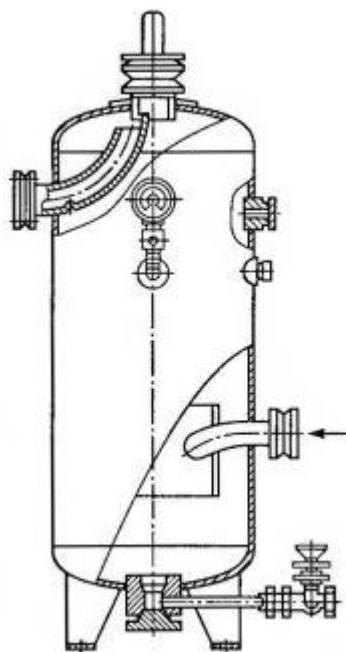


Рисунок 11.4 – Воздухосборник.

Конденсат собирается в нижней части воздухосборника и через конденсатоотводчик периодически вручную или автоматически сливается. Объем воздухосборника определяют в зависимости от производительности компрессора и цикличности потребления сжатого воздуха, при этом объем воздухосборника должен быть не менее  $0,5W_0$  где  $W_0$  - объем свободного воздуха (при атмосферном давлении и нормальной температуре), всасываемого компрессором за 1 мин.

За воздухосборником пневмосеть, показанная на рисунке 11.1, разделяется на две ветви. По пневмолинии а сжатый воздух подводится к различным пневмодвигателям с рабочим давлением 0,5-0,6 МПа по избыточной шкале, например к пневмоцилиндрам подъемников, формовочных машин и зажимных механизмов, к пневмомоторам ручного пневмоинструмента, сверлильных головок и транспортирующих устройств. Пневмосистемы, работающие при таких давлениях, называются *пневмосистемами высокого давления*.

По пневмолинии а сжатый воздух поступает в маслораспылитель 11, который обеспечивает смазку трущихся деталей пневмодвигателей за счет подачи в поток воздуха распыленного жидкого смазочного материала, обычно минеральных масел.

В машиностроении наибольшее распространение получили маслораспылители эжекторного типа. В них подача масла в поток воздуха происходит за счет разности между давлением над жидкостью в стакане

маслораспылителя и давлением в том месте потока воздуха, где в него вводится масло. Принцип работы такого маслораспылителя легко объяснить по схеме, представленной на рисунке 11.5, а.

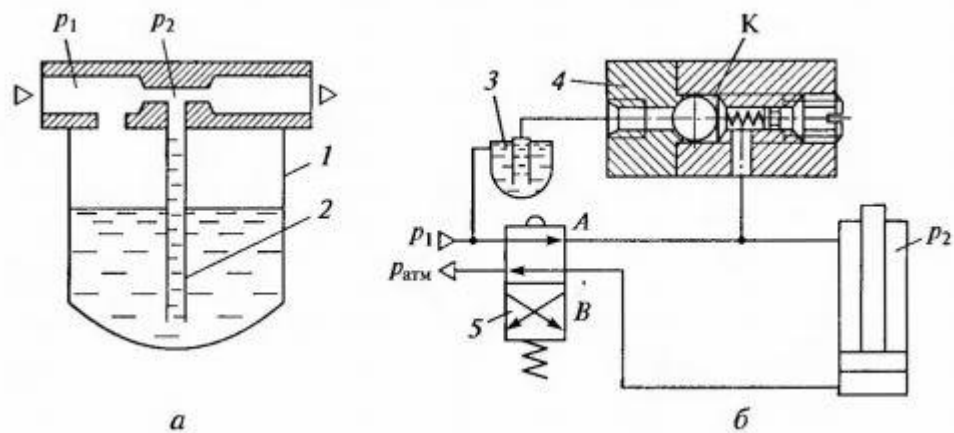


Рисунок 11.5 - Схема устройств для внесения масла в поток воздуха: а - маслораспылитель; б - смазочный питатель; 1 - стакан; 2 - трубка; 3 - резервуар с маслом; 4 - питатель; 5 – пневмораспределитель.

Согласно уравнению Бернулли в потоке воздуха давление  $p_1 > p_2$ . За счет  $\Delta p = p_1 - p_2$  масло из стакана 1 по трубке 2 подается в поток воздуха, распыляется и вместе с потоком поступает в пневмодвигатели. Такой маслораспылитель централизованно обеспечивает смазкой либо все пневмодвигатели пневмосистемы, либо группу пневмодвигателей.

Для индивидуального обеспечения смазкой одного пневмодвигателя используют смазочные питатели различных типов. Конструктивная схема одного из них и схема его включения в пневмосеть показаны на рисунке 11.5, б. Сжатый воздух, имеющий давление  $p_1$ , подводится к резервуару 3 с минеральным маслом. Масло по трубопроводу с малым диаметром поступает в питатель 4. Если пневмораспределитель 5 находится в позиции В, то штоковая полость пневмоцилиндра соединена с атмосферой ( $p_2 = p_{\text{атм}}$ ). Тогда под действием перепада давлений  $\Delta p = p_1 - p_2$  запорный шарик питателя перемещается вправо и открывает вход в дозирующую камеру К, перекрывая одновременно сообщение камеры с пневмолинией. Камера заполняется маслом. При переключении распределителя в позицию А давление  $p_2$  становится равным  $p_1$  и шарик под действием пружины перемещается влево, перекрывая вход в дозирующую камеру и одновременно соединяя ее с пневмолинией, по которой масло из камеры К вместе с потоком воздуха поступает в рабочую полость пневмоцилиндра. Обычно питатель 4 размещают непосредственно возле пневмодвигателя, а к резервуару 3 могут быть подключены несколько питателей.

На рисунке 11.1 в качестве пневмодвигателя показан пневмомотор 12. Отработавший воздух из пневмомотора поступает в атмосферу через глушитель 13, который служит для снижения уровня шума, возникающего

при работе пневмодвигателей. Этот шум может быть механического или аэродинамического происхождения.

Механический шум возникает в основном при ударах подвижных деталей в пневматических двигателях и устройствах управления (удары поршней о стенки цилиндра, клапанов о седла, вибрация трубопровода и т.п.). Снижение уровня шума механического происхождения достигается за счет оптимизации конструктивных решений, применения тормозных и амортизирующих устройств. Следует также отметить, что механический шум в пневмосистемах, как правило, не превышает уровень шума другого работающего на участке оборудования и имеет относительно невысокую частоту.

Шум аэродинамического происхождения возникает в основном из-за турбулентного смешивания отработавшего воздуха с воздухом окружающей среды при выхлопе. В пневмосистемах высокого давления истечение воздуха в атмосферу при выхлопе происходит со скоростью, близкой к скорости звука, а интенсивность аэродинамического шума весьма существенно зависит от скорости струи воздуха.

Уровень аэродинамического шума при работе большинства пневмодвигателей, не оснащенных средствами его снижения, составляет 95-120 дБ, причем наибольший уровень находится в высокочастотной части звукового спектра, что существенно усугубляет вредное воздействие на человека. Для снижения уровня аэродинамического шума применяют специальные устройства - глушители, которые снижают скорость воздуха при выхлопе.

Наиболее широко в промышленных пневмосистемах используют активные глушители (глушители трения), в которых скорость гасится при прохождении воздуха через пористый проницаемый материал (синтетика, металлокерамика, минеральные порошковые материалы и т. п.).

На рисунке 11.6, а представлена конструктивная схема глушителя трения со втулкой из пористой керамики с радиальным выходом потока воздуха. Наиболее эффективны такие глушители с порами размером до 100 мкм. Простота и низкая стоимость указанных глушителей позволяют использовать их индивидуально на выходе каждого пневмодвигателя.

Однако через такие глушители проходят аэрозольные частицы масел, которые были внесены в поток воздуха маслораспылителями, что приводит к загрязнению окружающей среды в производственных помещениях. Установлено, что концентрация масляных аэрозолей более 5 мг на 1 м<sup>3</sup> воздуха может привести к повреждению легких. Поэтому при повышенных требованиях к улавливанию масляных аэрозолей используют специальные глушители комбинированного типа - фильтры-глушители (рисунок 11.6, б).

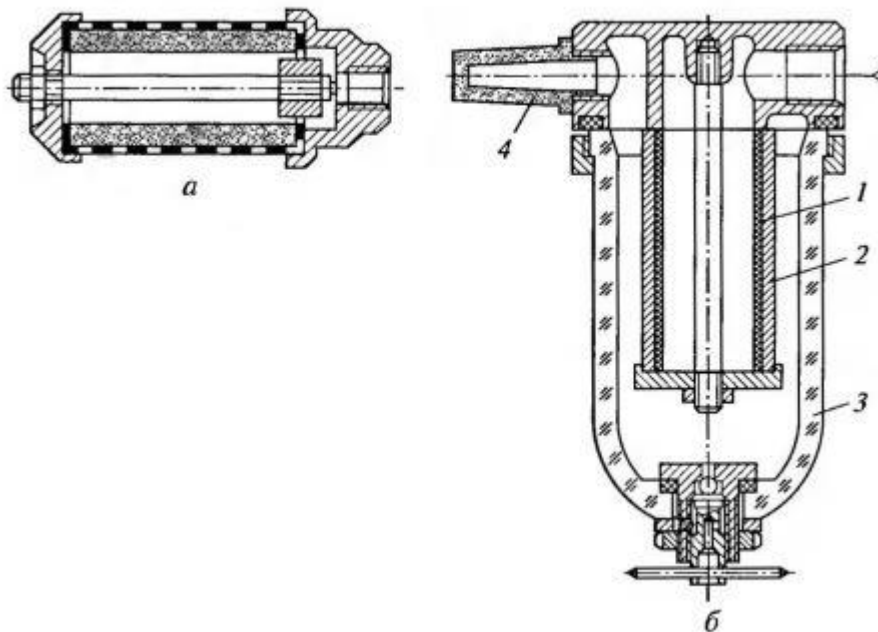


Рисунок 11.6 – Глушители: а – глушитель трения; б – фильтр-глушитель; 1 – мелкопористый фильтрующий элемент; 2 – грубоволокнистый фильтрующий элемент; 3 – стакан; 4 – пористая втулка.

В фильтре-глушителе воздух проходит через мелкопористый слой фильтрующего элемента 1, в котором аэрозольные частицы объединяются в более крупные капли, а затем через грубоволокнистый фильтрующий элемент 2. Расширение воздуха во втором слое фильтроэлемента приводит к значительному снижению скорости воздуха, и капельки масла под действием силы тяжести стекают на дно стакана 3. Выхлоп воздуха в атмосферу происходит через пористую втулку 4, которая является обычным глушителем трения. Фильтры-глушители эффективно снижают шум и улавливают аэрозоли масла. Однако, учитывая более сложную конструкцию и более высокую стоимость фильтров-глушителей, их обычно устанавливают на общем выхлопном трубопроводе, объединяющем выхлоп нескольких пневмодвигателей.

По пневмолинии б (см. рисунок 11.1) сжатый воздух из воздухоотборника 7 поступает к пневмоэлементам регулирования и контроля, которые на схеме условно объединены в блок А. Избыточное рабочее давление пневмоэлементов, включенных в блок А, находится в пределах 0,05-0,20 МПа. Пневмосистема с таким рабочим давлением считается *пневмосистемой низкого давления*, поэтому сжатый воздух по пневмолинии б поступает в пневматический редуцирующий клапан (редуктор) 14, который понижает уровень давления и поддерживает его постоянным в процессе работы.

На рисунке 11.7 представлена конструктивная схема пневматического редуцирующего клапана, работающего в пневмосистемах с рабочим избыточным давлением до 0,6 МПа.

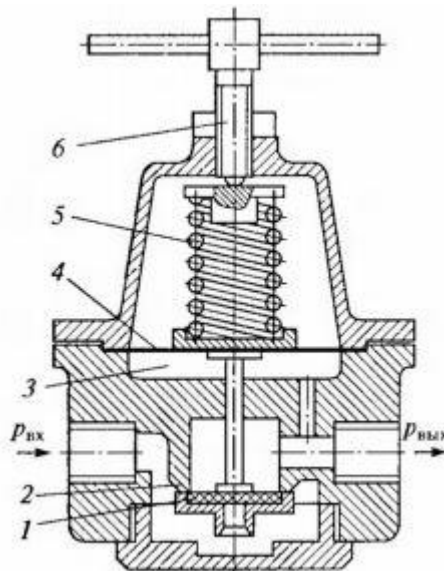


Рисунок 11.7 - Пневматический редукционный клапан: 1 - запорно-регулирующий элемент; 2 - корпус; 3 - полость; 4 - мембрана; 5 - пружина; 6 - регулировочный винт.

Воздух с давлением  $p_{вх}$  подается в редуктор и через зазор между седлом корпуса 2 и поверхностью клапанного запорно-регулирующего элемента 1 поступает на выход с давлением  $p_{вых} < p_{вх}$ . Выходная полость редуктора через канал сообщается с полостью 3. Поэтому давление  $p_{вых}$  воздействует на мембрану 4, нагруженную сверху усилием пружины 5, которое регулируется винтом 6.

Уравнение статических сил на запорно-регулирующем устройстве может быть записано в виде

$$p_{вх}S_k - p_{вых}S_k + p_{вых}S_m - F_{пр} = 0, \quad (11.1)$$

где  $S_k$  - эффективная площадь тарелки клапана;  $S_m$  - эффективная площадь мембраны;  $F_{пр}$  - усилие пружины 5.

Из уравнения (11.1) получаем

$$p_{вых} = \frac{F_{пр} - p_{вх}S_k}{S_m + S_k} \quad (11.2)$$

В пневматических редукционных клапанах, работающих при давлениях, значительно меньших, чем давление в гидросистемах,  $S_k \ll S_m$ , поэтому формула (11.2) может быть записана в виде

$$p_{вых} = \frac{F_{пр}}{S_m} = const.$$

Принцип действия и уравнение сил пневматического редукционного клапана точно такие же, как у гидравлического редукционного клапана. Некоторое же отличие в конструкции запорно-регулирующего устройства, прежде всего использование эластичных мембран большой площади, обусловлено низким уровнем рабочего давления и необходимостью высокой степени герметизации.

После редукционного клапана (см. рисунок 11.1) воздух через дополнительный фильтр 15 и химический осушитель 16 поступает к пневмоэлементам блока А. Дополнительные фильтры, фильтры-влагоотделители и химические осушители обычно устанавливаются перед пневмоэлементом или блоком пневмоэлементов, при работе которых к воздуху предъявляются повышенные требования по загрязнению и влажности, особенно в том случае, если сжатый воздух от источника питания подводится к пневмоэлементам по длинным трубопроводам. В процессе движения воздуха по трубопроводу происходит его охлаждение и выпадение конденсата (паров влаги), а также загрязнение воздуха частицами окалина, ржавчины и т. п.

Сжатый воздух в пневмосистемах транспортируется по пневмолиниям, конструкция которых зависит от рабочего давления. В магистральных пневмолиниях высокого давления воздух, как правило, транспортируется по жестким металлическим трубопроводам, выполненным из стали, алюминия, меди или латуни.

Трубы из меди, медных и алюминиевых сплавов отличаются высокой гибкостью, удобны для коротких участков пневмолинии со сложными изгибами и при необходимости подгонки размера в процессе монтажа. Эти преимущества в наибольшей степени проявляются при небольших диаметрах, поэтому такие трубы применяют до диаметров 20-25 мм. Кроме того, трубы из цветных металлов не требуют антикоррозийных покрытий. Однако их стоимость выше стоимости стальных труб, которые обычно применяют для больших диаметров, изготавливают из углеродистой стали и предохраняют от коррозии за счет покрытия цинком, медью и т.п.

К пневмодвигателям, например к пневмоцилиндрам или пневмомоторам ручного инструмента, воздух подводится по гибким резиновым шлангам с текстильным каркасом (резиновым рукавам).

Соединение трубопроводов и присоединение их к пневмоагрегатам как для жестких трубопроводов, так и для резиновых шлангов осуществляются с помощью соединительной арматуры, полностью аналогичной арматуре гидравлических систем.

В пневмолиниях низкого давления, как правило, используются пластмассовые трубопроводы, выполненные из полиэтилена или поливинилхлорида. Основными преимуществами таких трубопроводов являются: отсутствие коррозии, малая стоимость, малая масса и удобство монтажа. Соединения пластмассовых трубопроводов, которые широко используют, например, в струйных пневмоэлементах, представлены на рисунке 11.8. Такие безрезьбовые соединения осуществляются с помощью

металлического или пластмассового ниппеля с различной конфигурацией уплотнительной поверхности.

При эксплуатации таких соединений в условиях температур более 40°C пластмассовые трубки надевают на ниппели в разогретом до температуры 100 °С состоянии, а затем охлаждают до температуры окружающей среды. Расчет пневмолинии включает в себя два основных компонента: определение внутреннего диаметра трубопровода и определение потерь в трубопроводе. Сначала определяют внутренний диаметр по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4Q \rho_0}{\pi v \rho}},$$

где  $Q$  - объемный расход воздуха;  $v$  - скорость движения воздуха;  $\rho_0$  и  $\rho$  - соответственно плотность воздуха при атмосферном давлении и при давлении в трубопроводе.

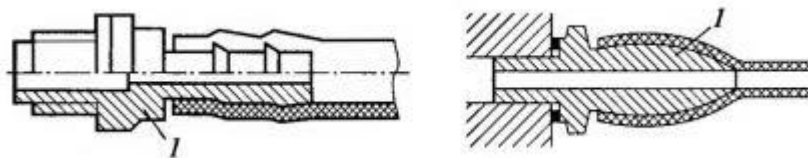


Рисунок 11.8 - Соединения эластичных трубопроводов: 1 – ниппель.

При этом руководствуются правилом, что для магистральных трубопроводов высокого давления длиной более 500 м скорость движения воздуха не должна превышать 10 м/с. Для более коротких трубопроводов рекомендуется принимать скорость до 15 м/с, а для трубопроводов, соединяющих элементы одного пневмопривода, допускается скорость до 40 м/с.

После определения внутреннего диаметра рассчитывают потери давления при движении воздуха по трубопроводу:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м}},$$

где  $\Delta p_{\text{тр}}$  - потери на трение по длине;  $\Delta p_{\text{м}}$  - потери в местных сопротивлениях. Обычно потери в трубопроводе при правильном выборе его параметров составляют не более 5-10 % рабочего давления.

## 11.2 Основные требования к монтажу, наладке и эксплуатации элементов пневмосети

Монтаж, наладка и соблюдение правил эксплуатации во многом определяют надежность и долговечность как отдельных пневмоустройств, так и пневмосистемы в целом.

Общие требования к монтажу любых пневматических устройств можно свести к следующим:

- исключить возможность внешнего повреждения при эксплуатации;
- исключить возможность загрязнения внутренних полостей;
- обеспечить доступность для регулирования и обслуживания;
- монтировать пневматические устройства так, чтобы направление потока воздуха совпадало с направлением стрелок на этих устройствах.

Монтаж *пневмомоторов* и *пневмодвигателей* поворотного типа необходимо осуществлять так, чтобы соблюдалась соосность с валом.

После монтажа пневмомотор следует опробовать в холостом режиме ведомого механизма. Осевые усилия на валу не допускаются. Далее пневмомотор необходимо опробовать в рабочем режиме в течение 15-20 мин, обращая внимание на герметичность соединений, отсутствие стуков и шумов внутри мотора, нагрев наружной поверхности, особенно в области установки подшипников. Нагрев свыше 60°C недопустим.

Монтаж пневмоцилиндров должен обеспечивать отсутствие смещения или перекоса осей штока пневмоцилиндра и ведомого механизма, которые приводят к возникновению радиальных усилий на штоке.

Пневмоцилиндры следует устанавливать вниз отверстиями для подвода сжатого воздуха во избежание сбора конденсата в рабочих полостях. В пневмоцилиндрах одностороннего действия для предотвращения попадания загрязнений в нерабочую полость в отверстие, соединяющем эту полость с атмосферой, устанавливают фильтр (сапун).

После монтажа определяют свободу и плавность совместного перемещения штока и ведомого механизма, для чего снимают транспортные заглушки с присоединительных отверстий, обеспечивая свободу хода.

Фильтр-влагоотделитель, исходя из его принципа действия, необходимо монтировать в вертикальном положении. Такие устройства удаляют только капельную влагу и твердые частицы загрязнения, а оставшиеся пары могут конденсироваться в трубопроводе. Поэтому фильтр-влагоотделитель необходимо располагать как можно ближе к пневмоэлементам.

Если конденсат из фильтра-влагоотделителя удаляется через автоматический конденсатоотводчик, то при эксплуатации необходимо следить за возможным засорением его каналов. Ручной конденсатоотводчик более прост, дешев и надежен, однако его следует применять только в том случае, когда опасность накопления конденсата в отстойнике сверх нормы мала, а сброс его производится не чаще одного раза за рабочую смену. В процессе эксплуатации необходимо периодически удалять и твердые частицы загрязнения, которые оседают на фильтрующем элементе.

Дешевые фильтрующие элементы (бумажные, тканевые) просто заменяют, а дорогие (керамические, порошковые) очищают от загрязнения либо путем промывки, либо пропуская воздух в направлении, обратном направлению движения в рабочем процессе.

*Маслораспылитель* также монтируют только в вертикальном положении, причем устанавливают как можно ближе к объекту смазки и выше него. Это делается для того, чтобы масло перемещалось в нужном направлении под действием силы тяжести. Во время эксплуатации необходимо контролировать уровень смазывающей жидкости в бачке маслораспылителя.

Монтаж *глушителя* производится непосредственно у отверстия выхлопа пневматического двигателя или на выхлопных трубопроводах, объединяющих выхлоп нескольких пневмодвигателей. В последнем случае глушители следует располагать на удалении от рабочих мест. При эксплуатации следует учитывать, что часть выносимого из пневмодвигателя масла задерживается в глушителе и может стекать с него, загрязняя окружающую среду.

Монтаж *трубопроводов* должен обеспечивать: прочность и герметичность труб, их соединений между собой и присоединений к пневмоагрегатам; надежность их закрепления на опорных конструкциях; возможность удаления влаги, продувки и промывки трубопроводов. При монтаже не допускается образование впадины, так как это приводит к скоплению влаги и грязи. Если избежать впадин не удастся, то обязательно предусматривают в низких местах установку устройств для удаления влаги и твердых частиц загрязнения. При присоединении пневмоустройств, например к магистральному трубопроводу, необходимо располагать точки присоединения в верхней части трубы, что уменьшает вероятность попадания конденсата к потребителю.

Особое значение при монтаже имеет изгиб трубопроводов. Минимальный радиус изгиба  $R_{\min}$  ограничен значениями, при которых не нарушается статическая и усталостная прочность труб. Для стальных труб  $R_{\min}=(3-5)D$ , где  $D$  - наружный диаметр трубы. Для труб из цветных металлов  $R_{\min}=(2-3)D$ , а для труб из пластмассы  $R_{\min}=(3-6)D$ . При монтаже гибких шлангов, особенно при подсоединении их к подвижным пневмодвигателям, необходимо учитывать, что они могут работать только на изгиб, а работа на скручивание не допускается.

При монтаже в трубопроводе кранов, клапанов и других пневмоустройств их необходимо располагать на опорах (скобах, кронштейнах и т.п.).

В процессе эксплуатации трубопроводы следует периодически очищать. Очистку металлических труб проводят двумя способами: продувкой сжатым воздухом и промывкой.

Продувка хорошо очищает трубу от обычных загрязнений, но не позволяет удалять коксообразующие отложения, ржавчину, окалину и т. п. Эти продукты загрязнения удаляют промывкой труб различными растворами синтетических моющих средств.

При эксплуатации пластмассовых трубопроводов следят за отсутствием перегибов, соприкосновений трубопровода с подвижными

детальми, нарушений целостности. В случае потери работоспособности трубопроводы заменяют.