

А.И. Кудрявцев, А.А. Кудрявцев

ОЧИСТКА СЖАТОГО ВОЗДУХА

2016

УДК 62.85 + 62-552.7
ББК 32. 965.2 + 34.447
К88

Рецензенты: д-р техн. наук Б.А. Вурье
инж. Е.А. Коробков

А.И. Кудрявцев, А.А. Кудрявцев.
К88 Очистка сжатого воздуха. 2016. 161с., табл. 59, ил. 43.

В книге изложены основные сведения о источниках, составе и содержании загрязнений во всасываемом и нагнетаемом воздухе. Приводятся данные о негативном воздействии загрязнителей на компоненты пневмосистем и технологические процессы, классах чистоты сжатого воздуха по национальным и международным стандартам. Освещены вопросы рационального выбора степени очистки сжатого воздуха, устройств и схем очистки. Приведены основные требования к монтажу и эксплуатации пневмолиний и устройств очистки, а также методы контроля чистоты сжатого воздуха.

Книга предназначено для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, изготовлением и техническим обслуживанием пневмосистем в промышленности, учебных курсов подготовки специалистов предприятий в этой области и студентов энергетических и машиностроительных специальностей.

УДК 62.85 + 62-552.7
ББК 32. 965.2 + 34.447

ВВЕДЕНИЕ

Сжатый воздух широко используется в промышленном и сельскохозяйственном производствах, добыче и переработке нефти, строительстве, энергетике, медицине, сервисе и др. областях. По масштабам его применение уступает только электроэнергии.

Очистка сжатого воздуха от загрязнителей в (3 – 7) раз повышает ресурс и в (4 – 5) раз снижает количество отказов пневмоустройств, устраняет одну из основных причин брака в пищевом, фармацевтическом, электронном и др. производствах, где сжатый воздух контактирует с изготавливаемой продукцией, что является важным фактором в повышении эффективности использования сжатого воздуха.

Отметим, что в СССР впервые в мировой практике, одним из авторов книги [14], введено понятие о классах чистоты сжатого воздуха, разработаны и внедрены соответствующие стандарты (ГОСТ 17433, СТ СЭВ 1704, ГОСТ 24484). В 2005 г. в СНГ введён стандарт на классы чистоты ISO 8573-1 (ГОСТ Р ИСО 8573–1), на Украине ДСТУ 4169.

В книге, состоящей из 4 глав, освещены вопросы очистки сжатого воздуха.

В первой главе коротко изложены данные о воздухе и его основных параметрах.

Сведения о загрязнителях и их негативном воздействии на пневматические системы, устройства и технологические процессы, стандарты на классы чистоты сжатого воздуха и рекомендации по их выбору, расчёты состояния и содержания влаги в пневмосистемах приведены во второй главе. В 3 главе рассмотрены устройства и схемы очистки сжатого воздуха, их рациональный выбор и размещение, основные требования к монтажу и эксплуатации пневмолиний и устройств очистки воздуха. Сведения о методах контроля загрязнителей сжатого воздуха даны в 4 главе. В приложениях 2, 3 и 4 приведены таблицы с данными для расчётов состояния и содержания воды в сжатом воздухе.

Книга, наряду с разработанными авторами «Пневматические системы и устройства в промышленности». Справочник, 2011, «Системы и компоненты воздухообеспечения». 2014 (см. приложение 1), преследуют цель способствовать повышению эффективности использования сжатого воздуха.

Авторы выражают благодарность рецензентам, чьи замечания способствовали улучшению качества книги к.т.н. В. Н. Воробьеву, Г. И. Подгорному, К. В. Звереву, А. Н. Звычайному, А. С. Антонову (НПП ООО ЭНСИ), С. А. Захарову (корпорация «Пневмотек») за помощь в разработке ряда разделов 3 главы и И. А. Кудрявцевой, выполнившей техническое редактирование, компьютерную графику и вёрстку книги.

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОЗДУХЕ

1.1. Единицы измерения

В книге, как правило, применены единицы Международной системы единиц (СИ) по ГОСТ 8.417. Для сравнения и облегчения перевода внесистемных единиц к системе СИ можно воспользоваться таблицей в приложении 5.

1.2. Состав атмосферного воздуха

Рабочей средой в пневмосистемах является засасываемый нагнетателями атмосферный воздух, который представляет собой механическую смесь азота, кислорода, аргона, углекислого газа (соответственно, $\approx 78, 21, 0,94$ и $0,03\%$ по объёму для сухого воздуха на высоте уровня моря) и незначительное количество водорода, неона, метана, криптона, ксенона, закиси азота и других газов (менее $0,003\%$ по объёму). В промышленных зонах и помещениях концентрация углекислого газа в воздухе обычно увеличивается. Атмосферный воздух содержит также пары и аэрозоли воды ($0,5 - 4\%$ по объёму) и твёрдые загрязнители, концентрация которых зависит от климатических и окружающих условий мест. Указанный выше состав воздуха практически не меняется в пределах тропосферы, до $(8 - 10)$ км над уровнем моря.

1.3. Основные свойства и параметры воздуха

Состояние воздуха характеризуется следующими основными параметрами: давлением, температурой, удельным объёмом (или плотностью), вязкостью и влажностью.

Давление (p) представляет собой силу, действующую по нормали к поверхности тела и отнесённую к единице площади этой поверхности. Приняты следующие понятия давления: атмосферное, избыточное, абсолютное, вакуумное.

Атмосферным или барометрическим⁴ давлением (p_n) принято считать давление, уравновешиваемое столбом ртути высотой 760 мм, что соответствует среднему давлению атмосферы на уровне моря.

Избыточным или манометрическим давлением (p_m) принято считать давление, превышающее значение атмосферного давления. Его измеряют манометрами и указывают в технических характеристиках пневматических устройств и систем.

Абсолютное давление – параметр состояния газа, равный сумме избыточного и атмосферного давлений, т.е. отсчитывается от 100% вакуума. В теоретические зависимости обычно подставляют абсолютное давление.

Давление разрежения (вакуума), применяемое в вакуумной технике, также отсчитывается от значения атмосферного давления и измеряется вакуумметрами. Оно указывается в единицах измерения давления со знаком минус.

Понятие *разность давлений* выражает разницу между двумя значениями давления сжатого воздуха (абсолютного, избыточного или вакуума).

В технических характеристиках пневматических систем и устройств используются также термины – *номинальное, максимальное и минимальное давления*, которые указываются в значениях избыточного (манометрического) давления.

В системе СИ единицей измерения давления служит паскаль (Па), равный давлению силы в 1 ньютон (Н), равномерно распределённой по нормали на поверхность площади 1 м^2 ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$). Так как давление, выраженное в Па, является малой величиной, в практике обычно применяют единицы измерения МПа ($1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$), кгс/см² и бар.

Соотношение между основными единицами измерения давления, используемыми в отечественной и зарубежной практике, приведены в таблице 1.1.

Температура (Т) –

Таблица 1.1

параметр, характеризующий тепловое состояние воздуха. В технических характеристиках пневматических систем и устройств температура сжатого воздуха и окружающей среды, как правило, указывается в градусах по меж-

Единица измерения	Единица измерения					
	Па	кгс/см ²	(бар)	psi*	мм рт. ст.	мм вод. ст.
1 Па (Н/м ²)	1	$1,02 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}	$1,45 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	0,102
1 кг/см ²	$9,81 \cdot 10^{-4}$	1	0,98	14,22	736,6	10^4
1 бар	$1 \cdot 10^5$	1,02	1	14,5	750	$1,02 \cdot 10^4$
1 psi	$6,9 \cdot 10^3$	0,07	0,069	1	51,71	703
1 мм рт. ст.	133,3	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$19,34 \cdot 10^{-3}$	1	13,6
1 мм вод. ст.	9,81	10^{-4}	$9,81 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$7,36 \cdot 10^{-2}$	1
Примечание. * – 1 psi (фунт-сила на кв. дюйм).						

дународной стогоградусной шкале Цельсия. Соотношение между другими шкалам дано в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Шкала	Кельвина, К	Цельсия, °С	Фаренгейта, °F
Кельвина, К	1	$T_{ц}^{\circ\text{C}} + 273^{\circ}$	$(T_{F}^{\circ\text{F}} - 32)/1,8 + 273$
Цельсия, °С	$T \text{ К} - 273$	1	$(T_{F}^{\circ\text{F}} - 32)/1,8$
Фаренгейта, °F	$1,8 T \text{ К} - 459$	$1,8 T_{ц}^{\circ\text{C}} + 32$	1

В термо- и газодинамические зависимости обычно входит абсолютная температура, измеряемая в Кельвинах (К), отсчёт которой ведут от абсолютного нуля, лежащего ниже на 273° по шкале Цельсия, $T = T_{ц} + 273^{\circ}$, где $T_{ц}$ – температура в градусах Цельсия (°С).

Удельный объём (v) – это объём, занимаемый единицей массы вещества ($\text{м}^3/\text{кг}$):

$$v = \frac{V}{m}, \text{ где } V \text{ и } m \text{ – соответственно объём и масса воздуха.}$$

Плотность (ρ) – величина, обратная удельному объёму: $\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}$. Плотность

воздуха при различных значениях давления и температуры приведена в таблице 1.3.

Вязкость воздуха характе-

Таблица 1.3

ризуется динамическим (η_δ , Па·с) и кинематическим (ν , м²/с) коэффициентами вязкости. Динамический коэффициент вязкости определяется силами внутреннего трения и связан с кинематическим зависимостью: $\eta_\delta = \nu \cdot \rho$.

Зависимость вязкости от температуры определяется вы-

ражением: $\eta_{\delta i} = \eta_\delta \cdot \left(\frac{T_i}{273} \right)^{0,75}$,

где η_δ – динамический коэффициент вязкости при температуре 273 К (0 °С).

Давление, 10 ⁵ Па	Плотность воздуха, кг/м ³ , при температуре °С								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
0,98	1,25	1,21	1,17	1,13	1,09	1,06	1,03	1,00	0,97
1,96	2,51	2,42	2,33	2,26	2,19	2,12	2,05	1,99	1,94
2,94	3,76	3,62	3,50	3,38	3,27	3,18	3,08	2,99	2,91
3,43	4,39	4,23	4,08	3,95	3,83	3,71	3,60	3,49	3,39
3,92	5,01	4,83	4,67	4,51	4,37	4,24	4,11	3,99	3,88
4,41	5,64	5,44	5,25	5,07	4,92	4,77	4,62	4,49	4,36
4,90	6,25	6,04	5,84	5,64	5,46	5,30	5,14	4,99	4,85
5,39	6,89	6,64	6,42	6,20	6,01	5,82	5,65	5,49	5,33
5,88	7,52	7,25	7,00	6,77	6,56	6,35	6,16	5,98	5,81
6,37	8,14	7,85	7,59	7,33	7,10	6,83	6,68	6,48	6,30
6,86	8,77	8,46	8,17	7,90	7,65	7,51	7,19	6,98	6,78
7,35	9,40	9,06	8,75	8,46	8,20	7,94	7,70	7,48	7,28
7,85	10,02	9,66	9,34	9,02	8,74	8,47	8,22	7,98	7,75
8,33	10,55	10,27	9,92	9,60	9,29	9,00	8,73	8,48	8,24
8,83	11,28	10,88	10,51	10,16	9,84	9,53	9,25	8,98	8,72
9,32	11,90	11,48	11,09	10,72	10,38	10,06	9,76	9,47	9,21
9,81	12,53	12,09	11,67	11,29	10,93	10,59	10,27	9,97	9,69

Влажность воздуха. Воз-

дух, содержащий водяные пары, характеризуется абсолютной и относительной влажностью (подробнее, см раздел 2.1).

Теплоёмкость (c) – количество теплоты, необходимое для нагревания тела на 1 °С.

Удельная теплоёмкость – теплоёмкость единицы массы или объёма. Теплоёмкость зависит от характера процесса. Различают удельную теплоёмкость при постоянном давлении (c_p) или при постоянном объёме (c_v), при этом $c_p = c_v + R$, где R – газовая постоянная. Отношение удельных теплоёмкостей c_p/c_v представляет собой показатель степени

адиабатического процесса (k): $k = \frac{c_p}{c_v}$. Теплоёмкость воздуха зависит и от температуры,

однако для практических расчётов из-за небольших колебаний температуры в пневмосистемах предприятий теплоёмкость можно считать величиной постоянной.

Внимание! В приложениях книги приведены: давление насыщенного водяного пара (приложение 2), предельное содержание паров воды в сжатом воздухе (приложение 3) и соотношение между единицами измерения влажности (приложение 4).

Глава 2. ЗАГРЯЗНИТЕЛИ, КЛАССЫ ЧИСТОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ К ОЧИСТКЕ СЖАТОГО ВОЗДУХА

2.1. Загрязнители сжатого воздуха

Загрязнители сжатого воздуха – любое вещество или комбинация веществ, которые оказывают негативное влияние на пневматические системы и устройства, качество изготовления продукции, технологические процессы, человека и окружающую среду.

Стандартом ISO 8573-1-2001 (ГОСТ Р ИСО 8573–1–2005) принята следующая терминология и понятия загрязнителей: **частица** – твёрдый или жидкий дискретный объект с малой массой; **размер частицы** – наибольшее расстояние между наружными границами частицы; **аэрозоли** – взвесь в газовой среде твёрдых или жидких частиц, а также частиц в многообразной форме (твёрдых и жидких) с незначительной скоростью осаждения; **агломерат** – скопления, состоящие из двух и более частиц; **масла** – смесь углеводородов, состоящая из шести и более атомов (C₆); **пар** – газ с температурой ниже критической, при которой он может перейти в жидкую фазу при изотермическом сжатии; **микроорганизмы** – жизнеспособные колонии, образующие единицы (бактерии, грибы, дрожжи).

Основные источники и компоненты загрязнителей сжатого воздуха приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1

Источник внесения загрязнителей	Компоненты загрязнителей											
	Твёрдые частицы								Вода	Масла	Микро-организмы	Газы, пары
	Смолы, нагар	Ржавчина, окалина	Пыль	Продукты износа	Волокна	Абразивы	Лаки, краски	Сорбенты				
Всасываемый воздух	+		+++		++		+		+++	+	++	+++
Компрессоры	без смазки			++		+						
	со смазкой	++		++		+				+++		
Трубопроводы		+++										
Соединения		+	+	+	++		+					
Полости пневмоустройств		+		++	+	+	+			+	+	
Фильтры					+	+						
Устройства осушки								++				+

Примечания. 1. Состав пыли может включать продукты эрозии почвы и производственную пыль. 2. Условные обозначения: + – незначительная, ++ – средняя, и +++ – значительная концентрация.

Загрязнители сжатого воздуха принято разделять на пять основных групп: твёрдые (в стандартах условно принят термин – "твёрдые частицы"), вода, масла, микробиологические организмы и газы.

Для оценки содержания загрязнителей в сжатом воздухе в основном используют понятия массовой и объёмной концентрации, точки росы сжатого воздуха (см. далее).

Массовая концентрация конкретного вида загрязнителя в воздухе определяется отношением его массы (мг, г) к единице объёма (m^3) или массе (кг) смеси воздуха с загрязнителями. В ГОСТ 17433 и ISO 8573-1 классы чистоты по твёрдым частицам, воде и маслам регламентированы по значениям массовой концентрации в mg/m^3 и g/m^3 . Исключения составляют 0, 1, 2, 3, 4 и 5 классы по твёрдым частицам в ИСО 8573-1, которые регламентированы по размеру и количеству этих частиц.

Объёмный процент содержания конкретного вида загрязнителя (например, масла или газа) в сжатом воздухе определяется умножением на 100% соотношения его объёма в смеси воздуха к объёму всей этой смеси. Сокращённое обозначение – «% об.». Так, «содержание масла 1% об.» означает, что 1% от данного объёма смеси воздуха составляет

Таблица 2.2

Характеристика воздушного бассейна	Концентрация, mg/m^3	Дисперсный состав твёрдых загрязнителей, % по массе					
		Размеры, мкм					
		<5	5 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	>60
Чистый воздух	<0,1	90 – 100	0 – 10		-	-	-
Сельские местности:					65 – 80		до 5
чистые	0,05 – 0,15	90 – 100					
загрязнённые	0,2 – 2,0	10 – 20	5 – 10				
Городские жилые районы:							
чистые	0,1 – 0,5	30 – 90	5 – 30		5 – 40		-
загрязнённые	0,5 – 2,4	5 – 30	10 – 30		25 – 35		5 – 60
Городские районы с малыми промышленными предприятиями	0,5 – 3				15 – 35		5 – 70
Промышленные зоны:							
сборочно-сварочные цеха	3 – 6	1 – 3	1 – 10		5 – 20		65 – 85
рудников (поверхность)	2,2 – 20	0,1 – 5					65 – 95
литейного и металлург. про-ва:							
слабо загрязнённые;	до 6	75 – 80	8 – 12	3 – 5	1 – 4	до 2	
загрязнённые;	6 – 16						
сильно загрязнённые	16 – 45						
цементные про-ва: загрязнённые	до 50	35 – 45	15 – 20	5 – 10	5 – 7	10 – 15	18 – 20
сильно загрязнённые	до 2000						
Зоны льнозаводов:							
слабо загрязнённые	до 6	5 – 15		85 – 95			
загрязнённые	6 – 20						
сильно загрязнённые	20 – 200						

масло. При малых концентраций масла или газов в воздухе часто используют миллионные доли (принятое обозначение – «ppm»). 1 ppm = 0,0001 % об.; 1 % об. = 10000 ppm.

Внимание! Содержание загрязнителей указывается для воздуха, приведённого к нормальным условиям – температура 293 К (20°C), давление 101,325 кПа (760 мм рт. ст.).

Приведём основные сведения по источникам и содержанию загрязнителей в сжатом воздухе пневмосистем.

Твёрдые загрязнители. Твёрдые загрязнители попадают в пневмосистемы при всасывании воздуха, процессах нагнетания и передаче его по трубопроводам к потребителям, в результате износа трущихся пар, разрушения и коррозии элементов пневматических линий и устройств.

Концентрация, дисперсный состав и природа твёрдых загрязнителей, вносимых при всасывании воздуха, зависят от загрязнённости воздушного бассейна в месте забора воздуха и эффективности фильтров на линии всасывания. В таблице 2.2 приведены данные по массовой концентрации и примерному дисперсному составу твёрдых загрязнителей в воздушном бассейне промышленных зон и населённых районов.

Из данных таблицы 2.2 следует, что содержание твёрдых загрязнителей воздушного бассейна промышленных зон обычно составляет от 3 до 50 мг/м³ (свыше – только в загрязнённых цементном производстве и льнозаводах). Размеры загрязнителей атмосферного воздуха приведены в таблице 2.3.

В промышленных и запылённых населённых районах содержание твёрдых загрязнителей во всасываемом компрессором воздухе может превышать 200 млн. частиц на один м³, абсолютно большая часть из них имеют размер до (3 – 5) мкм и плохо задерживается устройствами очистки на линии всасывания компрессоров.

В загрязнённом воздушном бассейне металлургического и литейного производств содержание твёрдых частиц с размером менее 5 мкм составляет 85% по массе, а в сильно загрязнённом цементном производстве содержание твёрдых загрязнителей

Таблица 2.3

Наименование загрязнителя	Диапазон размера, мкм
Капли дождя	500 до >1000
Природный туман	1 – 100
Пыль:	
литейная	0,1 до >1000
известковая	0,2 до >1000
цементная	8 – 300
металлургическая	0,5 – 100
угольная	1 – 100
цинковая	1,8 – 20
красителей	0,05 – 8
атмосферная	<0,01 до 20
Летучая зола	9 – 800
Копоть топлива	0,5 – 60
Порошок молока	1 – 20
Сажа	0,5 – 1,5
Металлург. пары	<0,01 до 2,5
Пары щелочей	0,1 – 8
Пары кислот	0,5 – 5
Дым окиси магния и цинка	<0,01 до 0,4
Масляный туман	0,025 – 0,8
Пыльца	14 – 80
Споры	10 – 50
Табачный дым	<0,01 до 0,7

в воздухе – 900 мг/м³. Отметим, что ужесточение национальных законодательств по экологии (например, ограничение загрязнений в промышленных газах, выбрасываемых в атмосферу) способствует значительному снижению твёрдых частиц, масляных аэрозолей и газов в воздухе населённых пунктов, промышленных зон и помещений.

При всасывании воздуха из производственных помещений содержание твёрдых загрязнителей можно ориентировочно определить, исходя из санитарных норм предельно допустимой концентрации вредной пыли в воздухе этих помещений (таблица 2.4).

Таблица 2.4

Наименование пыли	Мах допустимая концентрация
Асбеста, гранита, слюды-сырца, угля, муки, зерна, пуха, хлопка, бумаги, древесины, льна, шерсти	2 мг/м ³
Табака, чая, слюды, талька, оливии	(3 – 4) мг/м ³
Апатита, фосфорита, корунда, цемента, глин, пресспоршков, фенопластов, минералов без SiO ₂	(5 – 6) мг/м ³
Асбестобакелитов и асбесторезины	8 мг/м ³
Угля без содержания SiO ₂	10 мг/м ³

Концентрация мелких частиц морских солей в воздушном бассейне над поверхностью морей и побережьем составляет от 0,004 до 22 мг/м³.

Концентрация твёрдых частиц, вносимых поршневыми и некоторыми типами ротационных компрессоров, составляет (0,004 – 0,02) мг/м³, а их плотность находится в пределах (0,1 – 8) г/см³. Источниками внесения твёрдых частиц могут быть: устройства осушки адсорбционного типа из-за разрушения и выноса потоком сжатого воздуха частиц зёрен адсорбентов; трущиеся поверхности уплотнителей и резиновых шлангов; отслаивающиеся покрытия, эрозия и загрязнения внутренних поверхностей пневмоустройств.

Наибольшее количество твёрдых загрязнителей попадает в поток сжатого воздуха при его движении по магистральным и разводящим линиям. При плохом состоянии трубопроводов и отсутствии устройств очистки в пневмолиниях, концентрация твёрдых частиц, вносимых в поток, может составлять свыше 100 мг на 1 м³ воздуха. Состав этих загрязнителей ≈ 98% ржавчина и окалина, 2% промышленная пыль, частицы уплотнительных материалов, краска и др., которые попадают в сжатый воздух из-за нарушения технологии изготовления и монтажа трубопроводов. Ржавчина появляется в трубопроводах, соединениях и арматуре, изготовленных из углеродистых сталей без защитных покрытий, при относительной влажности сжатого воздуха свыше 50%. Примерный дисперсный состав ржавчины и окислы в стальных трубопроводах в процентах по массе:

(5 – 20) мкм – 10%; (20 – 60) мкм – 13%; более 60 мкм – 77%. Усреднённое значение содержания твёрдых частиц (ржавчины и окалины), вносимых в поток сжатого воздуха на 100 м протяжённости стального трубопровода при скорости потока ≈ 6 м/с для диаметра (100 – 500) мм и ~ 15 м/с – для диаметра 50 мм приведено в таблице 2.5. Из данных таблицы следует, что содержание твёрдых загрязнителей, вносимых одним погонным метром трубопровода из малоуглеродистых сталей, может составить в магистральных линиях от 0,018 до 0,09 мг/м³, а разводящих – до 0,18 мг/м³.

Таблица 2.5.

Диаметр трубопровода, мм	50	100	125	150	200	250	300	400	500
Содержание твёрдых частиц, мг/м ³	18,2	8,85	7,45	6,05	4,05	3,06	3,00	2,25	1,80

На концентрацию твёрдых частиц, вносимых трубопроводами, оказывает влияние режим течения потока сжатого воздуха и наличие в нём жидкой влаги. Так, пульсация давления и резкое увеличение расхода в момент начала подачи сжатого воздуха увеличивают отрыв и содержание ржавчины и окалины. Наличие жидкой влаги в линиях приводит к коагуляции твёрдых частиц, повышая эффективность их отделения в устройствах очистки. Так, в центробежных фильтрах при наличии в потоке сжатого воздуха жидкой влаги эффективность улавливания частиц менее (5 – 10) мкм возрастает на (30 – 50)%.

Осушка сжатого воздуха, применение трубопроводов с антикоррозионным покрытием, проведение регулярной промывки и продувки трубопровода снижает содержание твёрдых загрязнителей в пневмолиниях до (1 – 4) мг/м³.

Вода. Наибольшую часть загрязнителей в пневмосистемах составляет вода, пары которой попадают с засасываемым воздухом в нагнетатели. Содержание паров воды во всасываемом воздухе зависит от климатического региона, времени года и погодных условий. В пневмосистемах вода может находиться в парообразном, жидком и твёрдом (лёд при отрицательных температурах) состоянии.

Абсолютная влажность воздуха (d_n) – максимальное содержание паров воды при данном значении его давления и температуры. Максимально возможное влагосодержание сжатого воздуха (d_n) можно определить по формуле [7]:

$$d_n = 622 \cdot \frac{p_{nn}}{p - p_{nn}}, \quad \text{г/кг}, \quad (2.1)$$

где p – абсолютное давление сжатого воздуха, кгс/см²; p_{nn} – парциальное давление насыщенного водяного пара.

Относительная влажность воздуха (φ) – отношение действительного влагосодержания d воздуха к максимально возможному влагосодержанию d_n при данных значениях температуры и давления. Она указывается в процентах или десятичной дробью и до-

стигает наибольшего значения, равного 100% (или 1) при $d = d_n$. В расчётах содержания жидкой воды, попадающей в пневмосистемы, необходимо учитывать не максимальное ($\varphi = 1$),

Таблица 2.6

а действительное влагосодержание атмосферного воздуха при данных погодных условиях. В таблице 2.6 приведено содержание паров воды в атмосферном воздухе при различной относительной влажности и температуре.

Температура воздуха, °С	Содержание паров, г/кг, при относительной влажности		
	100%	90%	80%
20	14,69	13,22	11,75
25	20	18	16
30	27,24	24,52	21,79
40	48,83	43,95	39,1

В таблице 2.7 указаны диапазоны типичного содержания паров воды во всасываемом воздухе для разных климатических регионов стран СНГ.

Таблица 2.7

Климатические регионы стран СНГ	Содержание паров в воздухе, г/кг	
	Лето, min-max*	Зима, min-max*
Очень холодный (Тикси, Игарка, Якутск, Верхоянск, Дудинка, Оймякон)	5 – 14,7	0,03 – 0,3
Холодный (Красноярск, Караганда, Чита, Хабаровск, Новосибирск, Екатеринбург, Сыктывкар, Салехард, Анадырь)	6,1 – 16,6	0,3 – 1,2
Умеренно холодный (Курск, Архангельск, Москва, Санкт-Петербург, Тамбов)	7 – 18,9	0,9 – 1,9
Умеренно холодный влажный (Сахалин, Владивосток, Курилы, Юг Камчатки)	8 – 19,4	1,2 – 2,5
Умеренно тёплый (Минск, Ростов) и умеренно тёплый влажный (Калининград)	9 – 20	1,4 – 3,6
Жаркий сухой (Астрахань, Волгоград, Красноводск, Душанбе, Ташкент) и очень жаркий сухой (Ашхабад, Керки, Термез)	15,2 – 48,6	1,38 – 6,7
Тёплый влажный (Батуми, Сухуми, Сочи)	12 – 25	4 – 7,6

Примечание. * – min содержание паров воды в атмосферном воздухе определено при относительной влажности $\varphi = 0,8$, а max – при $\varphi = 1$

Из таблицы 2.7 видно, что максимальное содержания паров воды в атмосферном воздухе для большинства регионов СНГ находится в диапазоне (14,7 – 25) г/м³.

Сжатие поступившего в компрессор атмосферного воздуха увеличивает содержание воды в удельном объёме воздуха пропорционально увеличению давления, но его относительная влажность снижается из-за значительного повышения температуры в процессе сжатия. Способность сжатого воздуха удерживать пары воды уменьшается с понижением его температуры и увеличением давления. При подаче сжатого воздуха из компрессора через концевой холодильник, воздухохорбник и пневмолинии к потребителям, его температура понижается из-за теплообмена с окружающей средой, относительная влажность возрастает и после достижения состояния насыщения происходит конденсация (переход избыточного количества паров воды в жидкое состояние). Заметим, что

при отрицательных температурах точка росы воздуха означает не точку образования конденсата, а появление инея. Температуру при которой это происходит принято называть *точкой росы*, которую принято использовать как меру содержания в воздухе водяных паров. Следует различать точку росы воздуха при атмосферном и избыточном давлении. *Атмосферную точку росы* измеряют при атмосферном давлении (этот термин, как правило, не применяют при осушке сжатого воздуха). *Точку росы при давлении* измеряют при действительном значении избыточного давления сжатого воздуха и указывают вместе с этим давлением воздуха, которому она соответствует.

В приложении 4 приведено соотношение между основными единицами измерения влажности.

Количество конденсированной воды на участках линий можно определить из зависимости влагосодержания насыщенного воздуха ($\varphi = 1$) от температуры (t) и давления (p) воздуха по диаграмме $t - d$ (рис. 2.1). Эту зависимость используют для определения количества конденсата, выпадающего при охлаждении сжатого воздуха.

Примечание. Для определения содержания паров воды (г/м^3), находящихся в 1 м^3 насыщенного воздуха при температуре 20°C и давлении 760 мм рт. ст. , значение влагосодержания в г/кг необходимо умножить на плотность воздуха $1,205 \text{ кг/м}^3$.

Пример 1. Определить количество жидкой воды в конечном холодильнике при охлаждении в нём 1 кг сжатого воздуха с абсолютным давлением $0,73 \text{ МПа}$ до температуры 30°C . Температура всасываемого воздуха 20°C , относительная влажность $\varphi = 80\%$.

Количество конденсата (Δd) в холодильнике определяется разностью влагосодержания всасываемого (d_a) сжатого (d_k) воздуха в конечном холодильнике:

$$\Delta d = d_a - d_k,$$

где $d_a = \varphi \cdot d_{на} = 0,8 \cdot d_{на}$ ($d_{на}$ – влагосодержание насыщенного всасываемого воздуха). По диаграмме на рис. 2.1 находим значения $d_{на} = 15 \text{ г/кг}$ и $d_k = 3,3 \text{ г/кг}$. Следовательно, $\Delta d = 0,8 \cdot 15 - 3,3 = 8,7 \text{ г/кг}$. При охлаждении в холодильнике 1 м^3 воздуха при тех же условиях $\Delta d = 8,7 \cdot 1,205 = 10,48 \text{ г/м}^3$.

Масла. Масла могут находиться в сжатом воздухе в трёх фазовых состояниях: парообразном (газообразные частицы); жидком (аэрозоли – микротуман с размером частиц от $0,01$ до 1 мкм и тонкий туман с размером частиц от 1 до 50 мкм , конденсат – пристеночный поток и капли с размером более 50 мкм); твёрдом (продукты термического разложения масел).

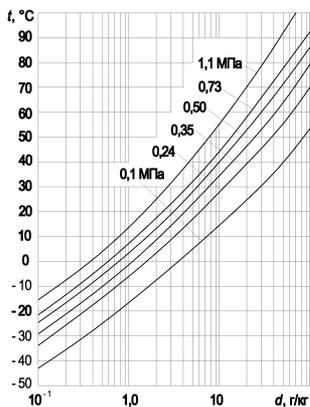


Рис. 2.1. Зависимость влагосодержания воздуха от температуры и давления воздуха ($\varphi = 1$)

Основным источником загрязнения сжатого воздуха маслом является вынос его из полостей сжатия «масляных» компрессоров. Высокая температура в полостях сжатия компрессоров приводит к парообразованию и, частично, к термическому разложению масел. В результате этого до (5 – 6)% масла окисляется и в виде нагара и лакообразной плёнки осажается на внутренних полостях компрессоров и трубопроводов, а его основная часть в виде паров и аэрозолей уносится сжатым воздухом. Содержание масел (аэрозолей, пара и нагара) в нагнетаемом воздухе компрессорами, не оснащёнными маслофильтрами, зависит от их типа и физического состояния, эффективности концевых холодильников и маслородоотделителей и составляет (3 – 50) мг/м³. При охлаждении сжатого воздуха с давлением (0,6 – 1,0) МПа в концевом холодильнике ниже 50°С и эффективном удалении масел в жидкой фазе в маслородоотделителе концентрация паров и аэрозолей масел в воздухе обычно не превышает 10 мг/м³. Наличие маслофильтров в компрессорных установках обеспечивает снижение содержания масел до 0,03 мг/м³.

При применении «безмасляных» компрессоров наличие масел в сжатом воздухе может быть из-за загрязнённости ими всасываемого воздуха в окружающем пространстве или выноса из масляных фильтров. Отметим, что фильтры на линии всасывания даже с тонкостью фильтрации (3 – 5) мкм не задерживают углеводороды и масла.

Концентрация углеводородов и масел в воздухе промышленных районов – (0,5 – 15) мг/м³, а в сильно загрязнённых зонах только масла может быть > 10 мг/м³.

Концентрация и дисперсность масел, вносимых масляными фильтрами на линии всасывания компрессоров, зависят от используемого в них сорта масла, температуры и скорости всасываемого воздуха, качества монтажа и техобслуживания. Вносимое фильтрами этого типа в воздух масло находится в парообразном состоянии, концентрация которого обычно составляет (0,2 – 1,0) мг/м³. При высокой скорости потока через фильтр могут уноситься и аэрозоли, что повышает общую концентрацию до 3 мг/м³.

Масло содержание (максимальное содержание паров масла – d_{nm}) воздуха при данном значении его давления и температуры можно определить по формуле:

$$d_{nm} = \psi \cdot \frac{p_{nmm}}{p - p_{nmm}}, \quad \text{г/кг}, \quad (2.2)$$

где p – абсолютное давление воздуха, кгс/см²; p_{nmm} – парциальное давление насыщенных масляных паров, кгс/см²; ψ – коэффициент, зависящий от молекулярной формулы масла:

$$\psi = R/R_m,$$

где R и R_m – газовая постоянная соответственно воздуха и паров масла. $R = 29,27$ кгс-м/кг, $R_m = 848/M$ (M – молекулярная масса соединений, из которых состоят масляные пары, её значение для компрессорных масел обычно находится в диапазоне от 210 до 400).

Зависимость давления насыщенных паров (p_{nmm}) некоторых сортов масел от темпе-

ратуры приведена на диаграмме (рис. 2.2), где пунктирными линиями нанесены кривые, полученные расчётным путём, а сплошными – по экспериментальным данным [2, 23].

Использование для смазки компрессоров разных сортов масел не позволяет привести точных данных их содержания в воздухе для различных условий. Для ориентировочного определения содержания паров масел в насыщенном

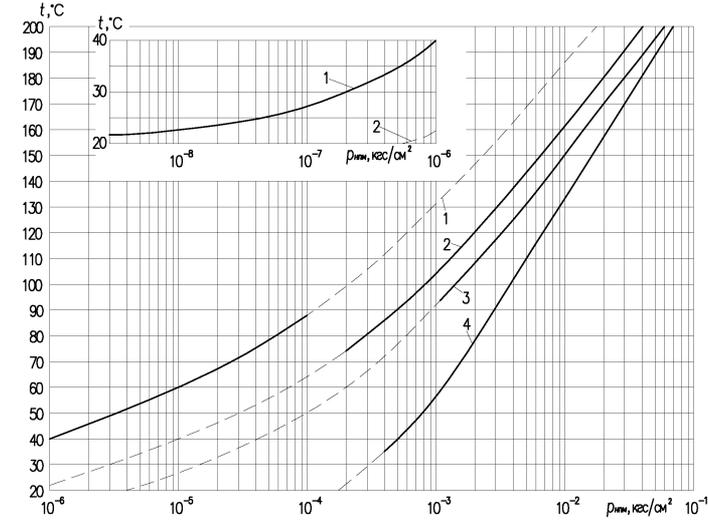


Рис. 2.2. Зависимость давления насыщенных паров масел от температуры: 1 – компрессорное; 2 – машинное СУ; 3 – «Индустриальное 45»; 4 – «Индустриальное 20»

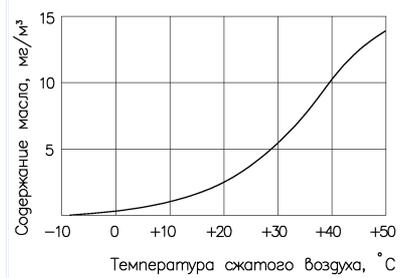


Рис 2.3. Маслосодержание насыщенного воздуха в зависимости от температуры при 0,25 МПа

ими воздухе в зависимости от температуры и давления можно воспользоваться таблицей 2.8 или диаграммами на рисунках 2.2 и 2.3. Из диаграмм и таблицы видно, что содержание паров масел при температуре воздуха ниже (20 – 25)°С и давлении выше 0,4 МПа мало, они не оказывают негативного воздействия на большую часть пневмоприводов и ряд других областей применения сжатого воздуха. В электронном, фармацевтическом, пи-

Таблица 2.8

Температура сжатого воздуха, °С	Содержание паров минеральных масел в сжатом воздухе, мг/м³ при избыточном давлении (МПа)				
	0,14	0,4	0,5	0,6	0,8
-10	0,20	0,10	0,08	0,07	0,05
-4	0,40	0,16	0,15	0,14	0,10
0	0,50	0,25	0,20	0,18	0,14
4	0,80	0,40	0,30	0,28	0,20
10	1,30	0,60	0,50	0,45	0,35
14	1,80	0,90	0,70	0,60	0,50
20	3,00	1,50	1,20	1,00	0,80
24	4,40	2,20	1,80	1,50	1,20
30	6,70	3,20	2,70	2,30	1,80
34	9,00	4,40	3,60	3,20	2,40
40	14,00	6,70	5,60	4,80	3,70
50	16,00	13,50	11,30	9,70	7,50

щевом и ряде других производств содержание масел в сжатом воздухе ограничивается.

Микробиологические загрязнители (микроорганизмы) – это жизнеспособные колонии, которые формируют скопления, состоящие из вирусов (0,005 – 0,05) мкм, бактерий (0,5 – 10) мкм, грибов или дрожжей. Они попадают в системы при всасывании воздуха компрессорами, подсосе воздуха из окружающего пространства или образуются на внутренних поверхностях ёмкостей и линий подачи воздуха. Содержание загрязнителей этого вида во всасываемом воздухе может достигать (5 - 10) мг/м³. Как правило, в пневмосистемах большинства предприятий микробиологические организмы принято относить к твёрдым загрязнителям. При использовании сжатого воздуха в медицине, биоинженерии, фармацевтической, пищевой, электронной и в ряде других областей требования к виду и содержанию этих загрязнителей определяются потребителями.

Газообразные загрязнители. Основную часть газообразных загрязнителей, попадающих в пневмосистемы при всасывании воздуха, составляют газы, образующиеся при сжигании топлива и химических процессах; пары кислот, щелочей, растворителей и др. По стандарту ISO 8573-1 (ГОСТ Р ИСО 8573–1) к загрязнениям газами относятся оксид и диоксид углерода, сернистый ангидрид, оксид и диоксид азота и углеводороды с атомами углерода от C₁ до C₅. К наиболее опасным газовым загрязнителям воздуха в пневмосистемах относят окись углерода CO (около 30 мг/м³), озон (до 0,1 мг/м³) и сернистый газ SO₂ (более 0,5 мг/м³), которые при соединении с конденсатом образуют серную кислоту и сернистый ангидрид. Максимальная разовая концентрация паров кислот и щелочей во всасываемом воздухе не должна превышать в мг/м³: азотной – 0,4; серной – 0,3; соляной – 0,2; едких щелочей, карбонатов и калия – 0,05. Данные о концентрации других видов газообразных загрязнителей во всасываемом воздухе указаны в работе [20].

2.2. Классы чистоты сжатого воздуха

ГОСТ 17433 и стандарт ISO 8573-1-2001 (ГОСТ Р ИСО 8573–1–2005) устанавливают классы чистоты сжатого воздуха в зависимости от состава и содержания основных компонентов загрязнителя. ГОСТ 17433 – первый стандарт в мировой практике, который установил классы загрязнённости сжатого воздуха, предназначенного для питания пневмосистем с давлением до 2,5 МПа (таблица 2.9). Этот стандарт регламентирует классы загрязнённости: семь – по размеру и шесть – по массовой концентрации твёрдых частиц, пять и четыре градации – по массовой концентрации, соответственно, воды и масел в жидкой фазе. Стандарт не регламентирует точку росы осушенного сжатого воздуха (нечётные классы), предоставляя пользователям право выбирать её значение самостоятельно с учётом конкретных условий, требований потребителей и рекомендаций данного стандарта.

Таблица 2.9

Классы загрязнённости по ГОСТ 17433				
Класс	Размер твёрдой частицы, мкм, не более	Содержание загрязнителей, мг/м ³ , не более		
		Твёрдые частицы	Вода (в жидком состоянии)	Масла (в жидком состоянии)
0	0,5	0,001	Не допускаются	
1	5	1	Не допускаются	
2	5	1	500	Не допускаются
3	10	2	Не допускаются	
4	10	2	800	16
5	25	2	Не допускаются	
6	25	2	800	16
7	40	4	Не допускаются	
8	40	4	800	16
9	80	4	Не допускаются	
10	80	4	800	16
11	Не регламентируется	12,5	Не допускаются	
12	То же	12,5	3200	25
13	То же	25	Не допускаются	
14	То же	25	10000	100

Примечания. 1. Содержание загрязнителей указано для воздуха, приведённого к нормальным условиям – температура 293 К (20°С), абсолютное давление 1 бар (0,1МПа, 1101,325 кПа), относительная влажность – 0; 2. Размер твёрдой частицы принимают по наибольшему измеренному значению.

ГОСТ Р ИСО 8573–1-2005 устанавливает классы чистоты сжатого воздуха общего применения. Указанный стандарт ISO с рядом уточнений внедрён в Украине (ДСТУ 4169-2003. Сжатый воздух. Часть 1. Загрязнители и классы чистоты). Классы чистоты сжатого воздуха по этому стандарту приведены в таблицах (2.10 - 2.16). Отметим, что ДСТУ, по сравнению со стандартом ISO, более универсален и экономичен из-за введения дополнительных классов (6,а; 6,б; 7,а и 7,б по твёрдым частицам, 6,а и 7,а по влажности и жидкой воде) и наличию классов по содержанию в сжатом воздухе газов, микробиологических организмов, кислот и щелочей. К достоинствам ДСТУ следует отнести следующее: его классы по основным загрязнителям (твёрдым частицам, влаге и маслу) согласуются с классами ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005 и лучше соответствуют классам по ГОСТ 17433, который с 1972 г. применяется в странах СНГ; введение дополнительных классов позволило расширить требования на все виды загрязнителей и снизить затраты на очистку сжатого воздуха (благодаря увеличению количества классов чистоты).

Примечания. 1. В ГОСТ 17433 и ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005 классы по содержанию газов, микробиологических организмов, кислот и щелочей отсутствуют. 2. ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005 установлены следующие сокращённые обозначения классов чистоты: А – класс чистоты по твёрдым частицам (таблица 2.10); В – класс чистоты по

Таблица 2.10

Классы чистоты по твёрдым частицам ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005						
Класс	Максимальное количество частиц в м ³				Размер частицы, мкм	Концентрация, мг/м ³
	Размер частицы, <i>d</i> , мкм					
	≤ 0,1	0,1 < <i>d</i> ≤ 0,5	0,5 < <i>d</i> ≤ 1,0	1,0 < <i>d</i> ≤ 5,0		
0	В соответствии с требованиями пользователя или поставщика оборудования, но более жёсткие, чем для класса 1				Не задаётся	
1	Не задаётся	00	1	0		
2		100000	1000	10		
3	Не задаётся		10000	500		
4	Не задаётся				1000	
5					20000	
6а	Не применяется				≤ 0,5	≤ 0,01
6б					≤ 1	≤ 1
6					≤ 5	≤ 5
7а					≤ 10	≤ 8
7б					≤ 25	≤ 10
7					≤ 40	≤ 10
8					≤ 80	≤ 12,5
9	Не применяется					≤ 25

Примечания. 1. Коэффициент фильтрации β , относится к частицам определённого размера для данного класса и равен отношению числа частиц в пробе воздуха до фильтра к числу частиц в пробе после фильтра. Он определяется как $\beta = 1/P$, где P – коэффициент проскока частиц, который равен отношению концентрации частиц после фильтра к концентрации частиц до фильтра. Размер частиц используется в качестве индекса, например, $\beta_{10} = 75$ означает, что количество частиц размером 10 мкм и более до фильтра в 75 раз выше, чем на выходе.

2. Классов 6а; 6б; 7а; 7б, 8 и 9 в ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005 нет.

Таблица 2.11

Классы чистоты по влажности	
Класс	Температура точки росы, °С
0	В соответствии с требованиями пользователя или поставщика оборудования, но жёстче класса 1
1	≤ – 70
2	≤ – 40.
3	≤ – 20
4	≤ + 3
5	≤ + 7
6	≤ + 10
6а*	> + 10

Примечание.
* Класса 6а в ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005 нет.

Таблица 2.12

Классы чистоты по содержанию воды в жидкой фазе	
Класс	Концентрация жидкой воды, C_w , г/м ³
7а*	≤ 0,05
7	≤ 0,5
8	0,5 < C_w ≤ 5
9	5,0 < C_w ≤ 10,0

Примечание.
* Класса 7а в ГОСТ Р ИСО 85731-1-2005 нет.

Таблица 2.13

Классы чистоты по содержанию масел	
Класс	Общая концентрация масел (в фазах аэрозолей, жидкости и паров), мг/м ³
0	В соответствии с требованиями пользователя или поставщика оборудования, но более жёсткие, чем для класса 1
1	≤ 0,01
2	≤ 0,10
3	≤ 1,00
4	≤ 5,00
5*	≤ 25
Примечание. * Класса 5 в ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005 нет	

Таблица 2.14

Классы по содержанию газов	
Класс	Нормы содержания
0	Вид и норму содержания газов определяют в зависимости от области применения сжатого воздуха
1	Не регламентируются

Таблица 2.15

Классы по содержанию микробиологических организмов		Классы по содержанию кислот и щелочей	
Класс	Нормы содержания	Класс	Нормы содержания
0 – стерильный	Вид и норму содержания микробиологических организмов определяют в зависимости от области применения сжатого воздуха	0	Устанавливает потребитель или поставщик жёстче класса 1
		1	Следы кислот и щелочей
1 – нестерильный	Не регламентируются	2	Не регламентируются

Таблица 2.16

влажности (таблица 2.11); С – класс чистоты по общей концентрации масел (таблица 2.13); 3. Если для какого-либо вида загрязнителей класс чистоты не задаётся, то соответствующая буква меняется на дефис.

2.3. Воздействие загрязнителей сжатого воздуха

Загрязнители сжатого воздуха оказывают физическое, химическое и электролитическое воздействие на пневмоустройства и негативное влияние, в т. ч. бактериологическое и токсичное на изготавливаемую продукцию и человека.

Физическое воздействие загрязнителей. Наличие **твёрдых частиц** в сжатом воздухе приводит: к повреждению рабочих поверхностей цилиндров, штоков, золотников, поршней, клапанных пар и уплотнителей; к образованию абразивных сред при их смешении с водомасляными эмульсиями, что вызывает интенсивный износ и заклинивание трущихся пар; к закупорке дроссельных отверстий и капилляров (при наличии масел возможность закупоривания возрастает); к эрозии сопловых отверстий и поверхностей пневмоустройств при высоких скоростях потока сжатого воздуха; к браку при производстве продуктов питания, напитков, лекарств и электронных изделий.

Вода в сжатом воздухе вызывает: смывание смазочных материалов с поверхностей пар трения, что приводит к износу и заклиниванию трущихся пар; гидравлические удары в магистральных линиях; обмерзание и закупорку льдом каналов трубопроводов,

устройств и выхлопных отверстий двигателей; нарушение нормального функционирования воздушных выключателей, электронных датчиков, преобразователей, реле, записывающих и др. приборов; брак или снижение качества при производстве бумаги из-за склеивания и намочания в полиграфии, пищевых продуктов и напитков, фармацевтической и химической продукции, электронных изделий, покрытий (наносимых распылением лака и краски); порчу цемента, муки и других продуктов при их пневматической транспортировке; образование агрессивных кислот при разгрузке сжатым воздухом цистерн с жидким хлором и подобными по агрессии продуктами; повреждение устройств при аэродинамических ис-

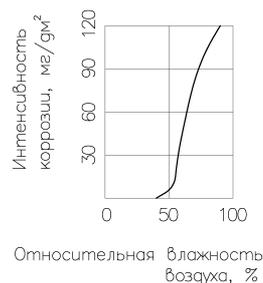


Рис. 2.4. Зависимость интенсивности коррозии чёрных металлов от относительной влажности воздуха

пытаниях из-за ударов капель жидкости при сверхвысоких скоростях потока воздуха; коррозию внутренних поверхностей трубопроводов, соединений, устройств из углеродистой стали и изделий после пескоструйной очистки. На рис. 2.4 приведён график интенсивности коррозии чёрных металлов без защитных покрытий в зависимости от относительной влажности сжатого воздуха. Из графика видно, что интенсивная коррозия происходит при относительной влажности воздуха 50% и выше. Так как осушка воздуха ниже 50% влажности связана со значительными затратами, поверхности устройств, контактирующие со сжатым воздухом, рекомендуется предохранять от коррозии.

Наличие в сжатом воздухе **масел** может привести: к образованию взрывоопасной смеси при определённых условиях в помещениях и возгоранию в трубопроводах; к взрывам баков, испарителей и других устройств в производствах сжижения хлора; к браку или снижению качества продукции в пищевом, фармацевтическом, электронном, фотографическом и других производствах (например, при лакокрасочном покрытии, наносимом сжатым воздухом, может произойти изменение цвета, непрочное сцепление с поверхностью изделий, наплывы и другие поверхностные дефекты); к заклиниванию механизмов с воздушной смазкой из-за разрушения ими воздушной «подушки» и значительного увеличения трения. Способность масел разрушать резину и образовывать смолы весьма опасна для систем с высокими требованиями к надёжности, например, для систем автоматического контроля и регулирования технологических процессов, измерения угловых и линейных размеров. Содержание масел жёстко ограничивается при применении сжатого воздуха в медицине, для дыхания и при выбросе его в пространство рабочих зон из-за опасного воздействия на организм человека.

Нагар, образующийся при сжатии воздуха в «масляных» компрессорах, обычно оседает на стенках камер сжатия, но из-за вибраций отслаивается и уносится потоком воз-

духа в нагнетательный трубопровод, концевой холодильник, маслоразделитель и воздушный ресивер. Смачиваясь маслом, он образует прочные отложения, которые могут воспламениться, приводя к пожарам и взрывам.

Отметим, что компрессорные масла и конденсат их паров в сжатом воздухе, как правило, мало пригодны для смазывания трущихся пар пневмоустройств.

Наличие в сжатом воздухе твёрдых частиц, воды и масел в жидкой фазе может привести к аварии в пневмосистемах золоудаления и подачи силоса.

Химическое воздействие загрязнителей. Содержание недопустимых концентраций **газов** в сжатом воздухе приводит: к негативному воздействию на организм человека и продукцию в фармакологии, пищевой, электронной и химической промышленности; к появлению растворов кислот, щелочей и других химически активных компонентов, разрушающих покрытия, резиновые уплотнители, мембраны и металлические элементы пневмоустройств. Так, при изменении концентрации SO_2 в воздухе от 0,01 до 0,2 мг/м³ (это характерно при заборе воздуха в загрязнённых промзонах) скорость коррозии деталей из углеродистой стали и меди увеличивается вдвое. Наличие в сжатом воздухе даже небольших концентраций сероводорода приводит к разрушению красок с пигментом на базе свинца, а озона – резиновых уплотнителей, мембран и покрытий.

Электролитическое воздействие загрязнителей может проявляться в пневмоустройствах с деталями из разных материалов и покрытий при наличии в сжатом воздухе определённой концентрации кислотных или щелочных растворов. Последние являются электролитом, а детали устройств – электродами, что приводит к разрушению их поверхностей, даже если они изготовлены из латуни, бронзы и легированных сталей.

Бактериологическое и токсичное воздействие загрязнителей проявляется в негативном влиянии находящихся в сжатом воздухе микробиологических организмов (бактерий, грибков или дрожжей) на человека при применении его в медицине, стоматологии, для дыхания, а также на изготавливаемую продукцию в пищевом, фармацевтическом, электронном и др. производствах.

2.4. Требования к очистке сжатого воздуха

Выбор степени очистки сжатого воздуха. Негативное воздействие загрязнителей сжатого воздуха приводит к значительным экономическим потерям в производстве и ухудшению здоровья контактирующих с ним людей. Исключить или снизить это негативное влияние можно путём соответствующей очистки сжатого воздуха.

Требования к чистоте сжатого воздуха устанавливаются разработчиками пневмосистем, технологических процессов с привлечением специалистов по очистке воздуха на основе анализа суммарных затрат на очистку и возможных потерь из-за воздействия за-

грязнителей. При использовании сжатого воздуха в медицине, стоматологии, для дыхания, при изготовлении и упаковке пищевых и фармакологических продуктов степень его очистки должна строго соответствовать санитарным нормам и требованиям.

Приведём рекомендации, которые могут быть полезны при решении этой задачи. Обычно сжатый воздух с содержанием твёрдых частиц размером не более (25 – 40) мкм пригоден для большей части промышленных пневмоприводов. Максимальный размер твёрдых частиц в них рекомендуется принимать $<1/3$ от наименьшего отверстия или зазора в устройствах, через которые они проходят. Для компрессоров, аппаратуры с цилиндрическим притёртым золотником и устройств с малыми дроссельными отверстиями размер твёрдых частиц в сжатом воздухе должен быть не более (3 – 5) мкм.

Содержание влаги в сжатом воздухе в жидком состоянии рекомендуется исключать или ограничивать практически для всех пневмосистем, а её паров – в соответствии с требованиями потребителей. Например, определённое содержание конденсата влаги в сжатом воздухе допускается в магистралях предприятий при условии исключения возможности их обмерзания, но в электронном, пищевом и ряде других производств вводят определённые ограничения даже на наличие паров воды и масла, т.е. необходима определённая степень очистки и осушки сжатого воздуха (см. таблицы 1.17 – 1.19).

Условия окружающей среды также влияют на выбор класса чистоты, особенно в отношении точки росы воды. Так, сжатый воздух для пневматических систем с требованиями высокой надёжности должен иметь точку росы на (3 – 10)°С ниже минимальной температуры окружающей среды.

Класс чистоты сжатого воздуха в пневмосистеме рекомендуется выбрать с учётом обеспечения надёжной работы устройств с наиболее высокими требованиями или дополнительно устанавливать для них устройства очистки, обеспечивающие эти требования. Особо следует ограничивать содержание всех видов загрязнителей в сжатом воздухе, используемом в пищевом, фармацевтическом, биоинженерном, электронном и других ответственных производствах, для дыхания и в медицинской практике.

В таблицах 2.17 и 2.18 приведены рекомендуемые классы чистоты сжатого воздуха (соответственно по ГОСТ 17433 и ДСТУ 4169) для различных областей использования сжатого воздуха.

Выбор класса чистоты из рекомендуемого диапазона в таблицах 1.17 и 1.18 необходимо производить с учётом конкретных условий, требований (в т.ч. надёжности и безопасности) и режима эксплуатации. Например, сжатый воздух при нанесении покрытий распылением, в зависимости от требований к их качеству, должен соответствовать классам загрязнённости по ГОСТ 17433: а) при минимальных требованиях (покраска заборов, ограждений, некоторые виды побелок и т. д.) – (2 – 7) классам с ограничением со-

Таблица 2.17

Наименование устройств и технологических процессов		Класс по ГОСТ 17433	
		Требования надёжности, безопасности	
		Высокие	Невысокие
1. Устройства систем контроля, регулирования ГСП, измерения угловых и линейных размеров, уровня и плотности жидкости.	1.1. Приборы, логические элементы, прецизионные регуляторы, датчики и др.	(0, 1)**	(1, 3)*
	1.2. Силовые исполнительные устройства	3, 5	5 – 7
2. Устройства струйных систем.	2.1. Элементы и входные уст-ва с большими каналами	(1, 3)*	2 – 4
	2.2. Элементы и входные уст-ва с малыми каналами	(0, 1)*	(1 – 3)*
	2.3. Выходные устройства	5, 7	6 – 8
3. Пневмоаппаратура высокого, давления	3.1. С дроссельными отверстиями малого сечения	3, 5	4 – 6
	3.2. Без дроссельных отверстий малого сечения	5, 7	6 – 8
4. Пневматические двигатели и инструменты			
5. Распыление лаков, красок и перемешивание электролитов	5.1. Без требований высокого качества	1, 3*	
	5.2. С требованиями высокого качества	0, 1*	
6. Очистка и осушка воздухом	6.1. Кислородных баллонов, форм для впрыска при изготовлении пластмассовых изделий	(0, 1)****	
	6.2. В машиностроении, литейном и др. производствах	(5 – 8)*	
	6.3. Пескоструйная очистка	(9, 11)*	
7. Транспортирование	7.1. Гранул, зёрен, бумаги	(3, 5)*	
	7.2. Порошков	(0, 1)***	
8. Воздушные подушки высокооборотных подшипников и направляющих станков		(1, 3)*	
9. Применение сжатого воздуха при изготовлении электронных плат, обработке фотоплёнок, нанесение покрытий и электростатическое окрашивание		0****	
10. Изготовление и упаковка лекарств и продуктов и воздух для дыхания			
11. Пневмолинии подачи воздуха	11.1. Предприятия	10 – 12	
	11.2. Цеховые и разводящие	7 – 10	
12. Дутьё и охлаждение	12.1. Дутьё в нагревательные и термические печи	11 – 12	
	12.2. Охлаждение деталей и инструмента	7 – 10	
Примечания. 1. Высокие требования к надёжности безопасности распространяются на устройства оборудования безлюдных производств, автоматических комплексов и др. объектов, где выход из строя может привести к авариям, травмам обслуживающего персонала или большим экономическим потерям. 2. В условия минусовых температур следует использовать осушенный сжатый воздух. 3. Общее содержание масел (пары, аэрозоль), мг/м ³ , не более: * – 1; ** – 0,5; *** – 0,1; **** – 0,01.			

держания масла $\leq 5 \text{ мг/м}^3$; б) при относительно невысоких требованиях (покрытия невысокого качества в машиностроении, автомастерских, при мелком ремонте, в быту) – 1 и 3 классам с точкой росы $< +3^\circ\text{C}$ и ограничением содержания масла не выше 1 мг/м^3 ; при высоких требованиях к качеству (в микроэлектронном и др. ответственных производствах) – 0 и 1 классам с точкой росы от -10 до -20°C и содержанием масла $< (0,1 - 0,5) \text{ мг/м}^3$.

Таблица 2.18

Наименование устройств и технологических процессов		Класс чистоты по ДСТУ 4169																
		A	B	C	Г	Б	К	A	B	C	Г	Б	К					
		Требования к надёжности и безопасности																
		Высокие						Невысокие										
1	1.1	6а, 6б	4 – 6	3	1	1	1	6, 7а	4 – 6	3, 4	1	1	1					
	1.2	7а, 7б	4 – 6а	3 – 5				7б, 7	5 – 6	4, 5								
2	2.1	6б, 7а		3				6, 7б	6а – 7	3, 4								
	2.2	6а, 6б		2				6, 7а	5 – 6а	2, 3								
	2.3	7б, 7		3, 4				7б, 7	6а – 7	4								
3	3.1	7а, 7б		3, 4				7а, 7б	6а – 7а	4								
	3.2	7б, 7		6 – 6а				4	7б, 7	6а – 7				4				
4		7б, 7		4, 5				7б, 7		4, 5								
5	5.1	6, 7а	5 – 6а	3, 4				-										
	5.2	6	3 – 6	3									0, 1	0				
6	6.1	6а, 6б	3 – 5	1	1													
	6.2	7б, 7	6 – 7	3, 4									1					
	6.3	9	6, 6а															
7	7.1	7а, 7б	5 – 6а	2														
	7.2	6а, 6б	4 – 5	3									0, 1	0				
8		6б, 7а	3 – 5	3	1													
9		1	3, 4	1	0, 1													
10		0, 1	4 – 7а	1	0	0	0											
11	11.1	8, 9	5 – 9	4, 5	1	1	1											
	11.2	7, 8	5 – 7	4														
12	12.1	9	9	4, 5														
	12.2	7, 8	6а – 7	4														

Примечания. 1. Высокие требования к надёжности и безопасности распространяются на устройства технологического оборудования, автоматических комплексов и др. объектов, где выход из строя может привести к авариям, травмам обслуживающего персонала или большим экономическим потерям. 2. Наименования устройств и технологических процессов, обозначенных в таблице цифрами, полностью соответствуют наименованиям с аналогичным цифровым обозначением, приведённым в таблице 1.17. 3. Приняты следующие сокращённые обозначения классов чистоты сжатого воздуха: А – по твёрдым частицам; В – по влажности и воде в жидкой фазе; С – по маслам; Г – по газам; Б – по микроорганизмам; К – по кислотам и щелочам. 4. В условиях минусовых температур следует использовать осушенный сжатый воздух.

Примечание. Выбор конкретных значений из указанных в примере диапазонов очистки принимает технолог или ответственный за процесс покрытия исполнитель.

Выбор устройств очистки и схем их установки для обеспечения требуемого класса чистоты сжатого воздуха приведён далее (см. разделы 3.3 и 3.4).

Для выбора классов чистоты по ГОСТ Р ИСО 8573–1–2005 для устройств и технологических процессов можно воспользоваться данными таблицы 2.18, однако из-за отсутствия в данном стандарте классов 6а, 6б, 7а, 7б, 8 и 9 по твёрдым частицам, классов 6а и

7а по влажности и воде в жидкой фазе, класса 5 по маслам это приведёт в ряде случаев к завышению требований к очистке и неоправданным затратам. Кроме того, этот стандарт не имеет классов загрязнённости по газам, микробиологическим организмам, кислотам и щелочам, что не позволяет для ряда областей применения сжатого воздуха чётко сформулировать требования к качеству его очистки от этого вида загрязнителей.

Отметим, что рекомендации ряда зарубежных фирм и организаций по степени очистки сжатого воздуха часто завышены, так как не учитывают разнообразие условий использования сжатого воздуха (температуру окружающей среды и сжатого воздуха, конструктивные отличия и режимы функционирования устройств, состояние пневмолиний, источники подачи воздуха, требования к надёжности и др. факторы). Так, в рекомендациях PNEUROP 6611 требования к содержанию твёрдых частиц и точке росы

Таблица 2.19

Наименование областей применения и устройств	Мах размер тв. частиц, мкм	Мах содерж. тв. частиц, мг/м ³	Точка росы, °С	Мах содерж. влаги, мг/м ³		
Воздушное перемешивание	5	5	+ 7	1		
Воздушные подшипники	1	1	минус 40			
Пневматические измерения			минус 20			
Пневмотурбинки			минус 40			
Миниатюрные пневмомоторы	5	5	минус 20	25		
Тяжёлые пневмомоторы	15	8	+ 3			
Машины для пр-ва кирпича и стекла						
Обдувка деталей			5			
Строительство			+ 7			
Литейные машины			+ 3			
Струйная техника (силовые схемы)					5	
Ручной инструмент			+ 7			
Станки			минус 20			
Горное и угольное производства			+ 7			
Упаковочные и текстильные машины			минус 20			
Буровое оборудование			+ 7			
Сварочные машины и цеховая сеть			+ 3			
Транспортирование зернист. веществ			5		5	+ 3
Пневмоцилиндры				минус 20		25
Прецизионные регуляторы давления	минус 40	1				
Окраска распылением	минус 20					
Пескоструйная обработка	-	-	минус 20	0,1		
Транспортирование порошков	1	1	минус 20	0,01		
Пищевая промышленность						
Струйные датчики			минус 40	0,1		
Приборы систем управления				1		
Обработка фотоплёнок	0,1	0,1	минус 70	0,01		

сжатого воздуха для ряда областей и условий применения завышены (таблица 2.19). Например, для окраски распылением в рекомендации указана точка росы – 20°C, в то время как её значение зависит от требований к качеству нанесения покрытия, что было отмечено ранее. Без учёта конкретных условий и режима работы приведены точки росы для пневматических моторов и цилиндров (см. разделы 2.5.3. и 2.5.6), редукционных клапанов (см. раздел 2.5.2), струйных датчиков (см. раздел 2.5.4) и устройств в других областях применения.

Ряд зарубежных изготовителей пневмоустройств оговаривают их использование только в пневмосистемах с относительно высокой степенью осушки сжатого воздуха, что не всегда можно считать обоснованным. Следует помнить, что завышение степени очистки сжатого воздуха приводит к увеличению капитальных (приобретение более дорогих устройств очистки) и эксплуатационных затрат. Навязывание завышенных требований к очистке выгодно поставщикам пневмоустройств, так как это позволяет увеличить сбыт устройств очистки или под предлогом несоответствия сжатого воздуха требуемой чистоте отклонять претензии потребителя при выходе их устройств из строя.

В то же время необходимо осторожно относиться к рекомендациям ряда организаций и фирм по использованию сжатого воздуха с низкими классами чистоты в ответственных технологических процессах, системах и устройствах, так как это может привести к неоправданным экономическим потерям из-за брака или ухудшения качества изготавливаемой продукции, нарушения технологического процесса, повышения интенсивности отказов и снижения ресурса пневматических систем и устройств.

2.5. Определение состояния и содержания влаги в пневмосистемах

Расчёт термодинамических параметров сжатого воздуха на участках пневмосистемы позволяет определить содержание паров и жидкой влаги, возможность конденсации влаги и обмерзания пневматических линий и устройств, выбор необходимых устройств очистки и осушки воздуха.

Коротко рассмотрим основные условия и подход к проведению этого расчёта. Условием исключения конденсации паров воды и масла в сжатого воздуха является:

$$\text{для паров воды} \quad d < d_n; \quad \text{для паров масла} \quad d_m < d_{nm},$$

где d и d_m – соответственно действительное водо- и маслосодержание, а d_n и d_{nm} – максимально возможное водо- и маслосодержание сжатого воздуха при данных условиях.

По характеру происходящих процессов пневматические линии и устройства можно условно разделить на две группы.

Первая группа – скорость потока сжатого воздуха относительно мала и его температура, в основном, определяется теплообменом с окружающей средой.

Вторая группа – скорость потока сжатого воздуха большая, а длины участков небольшие. При этом изменение термодинамических параметров потока, в основном, определяется расширением (или сжатием) газа и рассчитывается по выражениям:

$$\frac{p_n}{p_k} = \left(\frac{V_k}{V_n} \right)^n \quad (2.3); \quad \frac{T_k}{T_n} = \left(\frac{V_n}{V_k} \right)^{n-1} \quad (2.4); \quad \frac{T_k}{T_n} = \left(\frac{p_k}{p_n} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (2.5);$$

где p_n и p_k , V_n и V_k , T_n и T_k – соответственно абсолютные давления, удельные объёмы и температуры воздуха в начале и в конце процесса; n – показатель политропы, в зависимости от характера процесса, его значение находится в пределах $1 \leq n \leq 1,4$.

Для движения теплоизолированного потока в трубопроводах постоянного сечения при известной скорости потока (v_n) показатель n можно определить из выражения [4]:

$$n = 1 + 0,4 \cdot \frac{v_n^2}{v_{кр}^2}, \quad (2.6)$$

где $v_{кр}$ – критическая скорость потока в заданном сечении:

$$v_{кр} \approx 20 \cdot \sqrt{T_n}, \text{ м/с,} \quad \text{где } T_n \text{ – температура потока воздуха.}$$

Введение показателя n оказывается полезным и в тех случаях, когда теплоизоляция не является полной. Для участков пневматических линий и устройств, где трением можно пренебречь, значение показателя политропы принимают $n = k = 1,4$.

Рассмотрим методы определения термодинамических параметров сжатого воздуха на характерных участках пневматических линий и устройств.

2.5.1. Пневмолинии

В магистральных линиях скорость потока воздуха относительно невелика (6 – 15) м/с, и изменение его температуры происходит, в основном, из-за теплообмена с окружающей средой. Обычно температура сжатого воздуха на выходе из компрессорной выше, чем температура окружающей среды, что приводит к его охлаждению и конденсации влаги в пневмолиниях. Для металлических трубопроводов без теплоизоляции при $T_n > T_o$ температура сжатого воздуха в магистрале (T_m) на заданной длине без учёта влияния на теплоотдачу загрязнений теплопередающей поверхности может быть определена по формуле:

$$T_m(x) = (T_n - T_o) \cdot \exp \left[-x \cdot \frac{\pi}{c_p \cdot Q_n \left(\frac{1}{k_{пс} \cdot D_{вт}} + \frac{1}{k_{со} \cdot D_{нт}} + \frac{1}{2 \lambda_{тп}} \cdot \ln \frac{D_{нт}}{D_{вт}} \right)} \right], \quad (2.7)$$

где T_o – температура окружающей среды, К; T_n – температура потока сжатого воздуха в начале трубопровода, К; $T_m(x)$ – температура потока воздуха на расстоянии “ x ” от начала тру-

Таблица 2.20

Условия течения	Коэффициент теплоотдачи	
Турбулентное течение воздуха в трубах в области $Re = 1 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$	$k_{пс}$	$0,019 \cdot \frac{\lambda}{D_{вт}} \cdot \left(\frac{v_n \cdot D_{вт}}{\nu} \right)^{0,8}$
Турбулентное течение воздуха вдоль труб в области $Re = 1 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$	$k_{со}$	$0,019 \cdot \frac{\lambda}{D_{нт}} \cdot \left(\frac{v_o \cdot D_{нт}}{\nu} \right)^{0,8}$
Ламинарное течение воздуха вдоль труб		$0,017 \cdot \frac{\lambda}{D_{нт}} \cdot \left(\frac{v_o \cdot D_{нт}}{\nu} \right)^{0,33}$
Поперечное омывание труб при угле атаки 90° в области $Re = 1 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$		$0,018 \cdot \frac{\lambda}{D_{нт}} \cdot \left(\frac{v_o \cdot D_{нт}}{\nu} \right)^{0,62}$
Теплопередача горизонтальн. труб в спокойном воздухе		$0,95 \cdot \frac{\Delta T^{0,233}}{D_{нт}^{0,3}}$
Принятые обозначения: λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·град); ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м ² /с; ΔT – средняя разность температур внешней стенки трубы и воздуха, град; v_n – скорость течения сжатого воздуха, м/с; v_o – скорость течения окружающего воздуха (скорость ветра), м/с; Re – число Рейнольдса.		

бопровода, К; x – расстояние от начала до конца участка трубопровода, м; Q_n – расход воздуха (приведённого к нормальным условиям – $p = 0,1$ МПа, $T = 293$ К), протекающего через поперечное сечение трубопровода, м³/с; c_p – удельная объёмная теплоёмкость воздуха при нормальных условиях, Дж/(м³·град); $\lambda_{тр}$ – коэффициент теплопроводности материала трубопровода, Вт/(м·град); $D_{вт}$, $D_{нт}$ – внутренний и наружный диаметры трубопровода, м; $k_{пс}$, $k_{со}$ – коэффициенты теплоотдачи соответственно от сжатого воздуха к стенке и от стенки к окружающему воздуху, Дж/(м²·с·град).

Значение коэффициентов теплоотдачи можно определять по обобщённым зависимостям, приведённым в таблице 2.20 [16, 21].

Сложность решения задачи по определению термодинамических параметров сжатого воздуха в пневмолиниях обусловлена характером процессов, протекающих в двухфазных потоках «газ + жидкость» в условиях интенсивного теплообмена с окружающей средой через стенки трубопроводов.

При понижении температуры потока воздуха ниже точки росы, давление паров воды в потоке становится выше, чем насыщенных, и они конденсируются на внутренней поверхности трубопровода, образуя ($10^6 - 10^8$) капель на см³, а при повышении температуры потока воздуха плёнка конденсата и капли воды испаряются. Динамика этих процессов зависит от температуры воздуха в потоке, его давления, плотности паров воды и других факторов.

Как известно, в двухфазных потоках «газ + жидкость» возможны различные типы течений: кольцевой, дисперсно-кольцевой, снарядный и др. В настоящее время выработаны представления о характере физических процессов, происходящих в этих системах. Согласно этим представлениям, причиной образования капель при течении двухфазного потока в трубе является развитие неустойчивостей на поверхности плёнки конденсата. Этот процесс происходит тем интенсивнее, чем больше толщина плёнки и выше число Рейнольдса в потоке воздуха. Иными словами, доля жидкости, сосредоточенная в каплях, определяется количеством жидкой и газовой фаз.

Количество выпавшей влаги (Δd_i) на 1 кг сухого воздуха определяется разностью влагосодержания в начале (d_{in}) и конце (d_{ik}) участка:

$$\Delta d_i = d_{in} - d_{ik}, \text{ г/кг.} \quad (2.8)$$

Если применить понятие абсолютной влажности (\bar{d}) на 1 м³ атмосферного воздуха, то полное количество выделившейся влаги G_i можно выразить следующим уравнением:

$$G_i = (\bar{d}_{in} - \bar{d}_{ik}) \cdot Q_i, \text{ г/ч,} \quad (2.9)$$

где \bar{d}_{in} , \bar{d}_{ik} – абсолютная влажность воздуха соответственно в начале и конце участка, г/м³; Q_i – расход воздуха, приведённого к нормальным условиям, м³/ч.

При наличии в начале участка влагоотделителя со степенью влагоотделения η общее количество сконденсированной влаги на данном участке будет равно:

$$G_i = (1 - \eta) \cdot G_{i-1} + [\bar{d}_i(T_n) - \bar{d}_i(T_k)] \cdot Q_i, \text{ г/ч,} \quad (2.10)$$

где G_{i-1} – количество жидкой влаги в конце предыдущего участка, г/ч.

Общее количество жидкой влаги на данном участке равно сумме количества конденсата, не удалённого влагоотделителем и выпавшего на данном участке. Если в конце участка имеются разветвления, то количество жидкой влаги, поступающее с основного участка на ответвление (G_y), пропорционально расходу воздуха на это ответвление (Q_y):

$$G_y = G_i \cdot \frac{Q_y}{Q_i}. \quad (2.11)$$

Количество испарившейся влаги (при повышении температуры сжатого воздуха) определяется разностью влагосодержания в конце и начале участка.

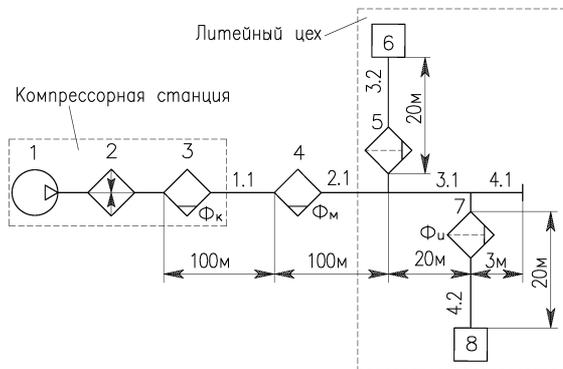


Рис. 2.5. Схема воздушоснабжения литейного цеха: 1 – компрессор; 2 – концевой холодильный агрегат; 3 – концевой маслоотделитель; 4 – магистральный фильтр; 5, 7 – индивидуальные фильтры; 6 и 8 – потребители сжатого воздуха

Таблица 2.21

Наименование параметра	Обозначение	Значение или определение
Относительная влажность всасываемого воздуха	φ	0,8
Температура окружающей среды, К	T_o	см. табл. 2.22
Скорость перемещения окруж. воздуха (скорость ветра), м/с	v_o	
наружного		5
в помещении		0
Давление сжатого воздуха, МПа	p	см. табл. 2.22
Внутренний диаметр трубопровода, м	$D_{вт}$	см. табл. 2.22
Степень влагоотделения концевого и магистрального фильтра	η_k, η_m	0,8
Степень влагоотделения индивидуального фильтра	η_u	0,9
Расход воздуха, приведённого к нормальным условиям, м ³ /ч	Q	см. табл. 2.22
Длина трубопровода, м	L	см. табл. 2.22
Температура потока сжатого воздуха, К	T_m	по формуле 2.7
Абсолютная влажность воздуха, г/м ³	d_n	по формуле 2.1
Количество выделившейся влаги, г/ч	G_i	по формуле 2.9

Таблица 2.22

Этапы	p , МПа	D , м	L , м	T_o , К	T_m , К	d_n , г/м ³	Q , м ³ /ч	G , г/ч
При всасывании	0,1			293	-	13,84	1808	
После концевого холодильника	0,8			293	313	6,18	1808	12866
Участки: (см. рис.2.5)	1.1 Начало Конец	0,8	0,1	100	293		1808	
						313		6,18
	2.1 Начало Конец	0,8	0,1	100	293		1808	
						302,6		3,60
	3.1 Начало Конец	0,8	0,1	20	303		1000	
						298,9		2,90
	3.2 Начало Конец	0,7	0,05	20	303		800	
						300		3,09
	4.1 Начало Конец	0,8	0,1	3	303		0	
						298,9		2,9
	4.2 Начало Конец	0,78	0,05	20	303		1000	
						300,7		3,68
						0		
					300,7		3,09	0
						1000		
					303		3,09	0
						1000		
					300		3,09	1311
						1000		
					301,3		3,42	1,1

Состояние сжатого воздуха, поступающего к потребителю, определяется термодинамическими параметрами потока на всём пути от компрессора до потребителя. Процедура расчёта на заданном участке состоит в последовательном решении уравнений, описывающих изменение состояния потока сжатого воздуха на всём пути от выходного патрубка компрессора до данного участка. При этом необходимо учитывать состояние окружающей среды (температуру, скорость ветра) на всех проточных участках линии.

Порядок термодинамического расчёта покажем на следующем примере.

Пример 2. Требуется определить состояние сжатого воздуха (температуру, абсолютную влажность, количество конденсата) по пути движения сжатого воздуха от компрессора до литейного цеха. Схема воздухообеспечения и исходные данные представлены на рис. 2.5, а результаты расчёта приведены в таблицах 2.21 и 2.22.

Как видно из таблицы 2.22, наибольшее количество влаги конденсируется после конечного холодильника (12866 г/ч). При $\eta_k = 0,8$ конечного масловооделителя через него проходят $12866 \cdot 0,2 = 2573$ г/ч влаги. При дальнейшем охлаждении воздуха на участке 1.1 перед магистральным фильтром, расположенным в начале участка 2.1, будет конденсироваться 7238 г/ч. После него ($\eta = 0,8$) в трубопровод поступит $7238 \cdot 0,2 = 1448$ г/ч влаги. При охлаждении воздуха на участке 2.1 от 302,6 К ($\approx 30^\circ\text{C}$) до 298,9 К ($\approx 26^\circ\text{C}$) сконденсируется 1266 г/ч, но с учётом пропущенной фильтром влаги в конце участка 2.1 будет 2714 г/ч жидкой влаги.

Принимаем количество сконденсированной влаги, поступающее в ответвления, пропорционально расходам воздуха. На участок 3.2 поступит $2714 \cdot 808 / 1808 = 1213$ г/ч, а на участок 3.1 – $2714 \cdot 1000 / 1808 = 1501$ г/ч влаги. После индивидуального фильтра на участке 3.2 будет оставаться $1213 \cdot 0,1 = 121,3$ г/ч влаги, которая испарится из-за повышения температуры сжатого воздуха в конце этого участка и к потребителю поступит сухой воздух.

В связи с повышением температуры в конце участка 3.1 часть поступившей влаги также будет испаряться, и в конце участка останется $1501 - 190 = 1311$ г/ч влаги. После фильтра её останется $1311 \cdot 0,1 = 131,1$ г/ч, а к концу участка 4.2 она испарится из-за повышения температуры и к потребителям цеха поступит сухой воздух.

Приближённое значение изменения температуры (T_n) потока сжатого воздуха по длине стальных магистральных трубопроводов с внутренними диаметрами ($D_{вн}$) 80, 100, 160 и 200 мм, с избыточным давлением $p = 0,7$ МПа, скоростью (v_n) при коэффициенте теплопроводности $\lambda = 44$ ккал/(м·ч·град), в зависимости от температуры окружающей среды (T_0) и скорости ветра (v_0), приведено на рис. 2.6.

Современные пневмолнии предприятий представляют собой разветвлённую сеть с большим количеством отдельных участков, находящихся в различных условиях, что значительно усложняет определение изменения термодинамических параметров воздуха. Эти расчёты целесообразно проводить на компьютере по программе, позволяющей определять температуру, содержание жидкой фазы и паров воды в потоке сжатого воздуха в зависимости от состояния воздуха в окружающей среде (его влажности, темпера-

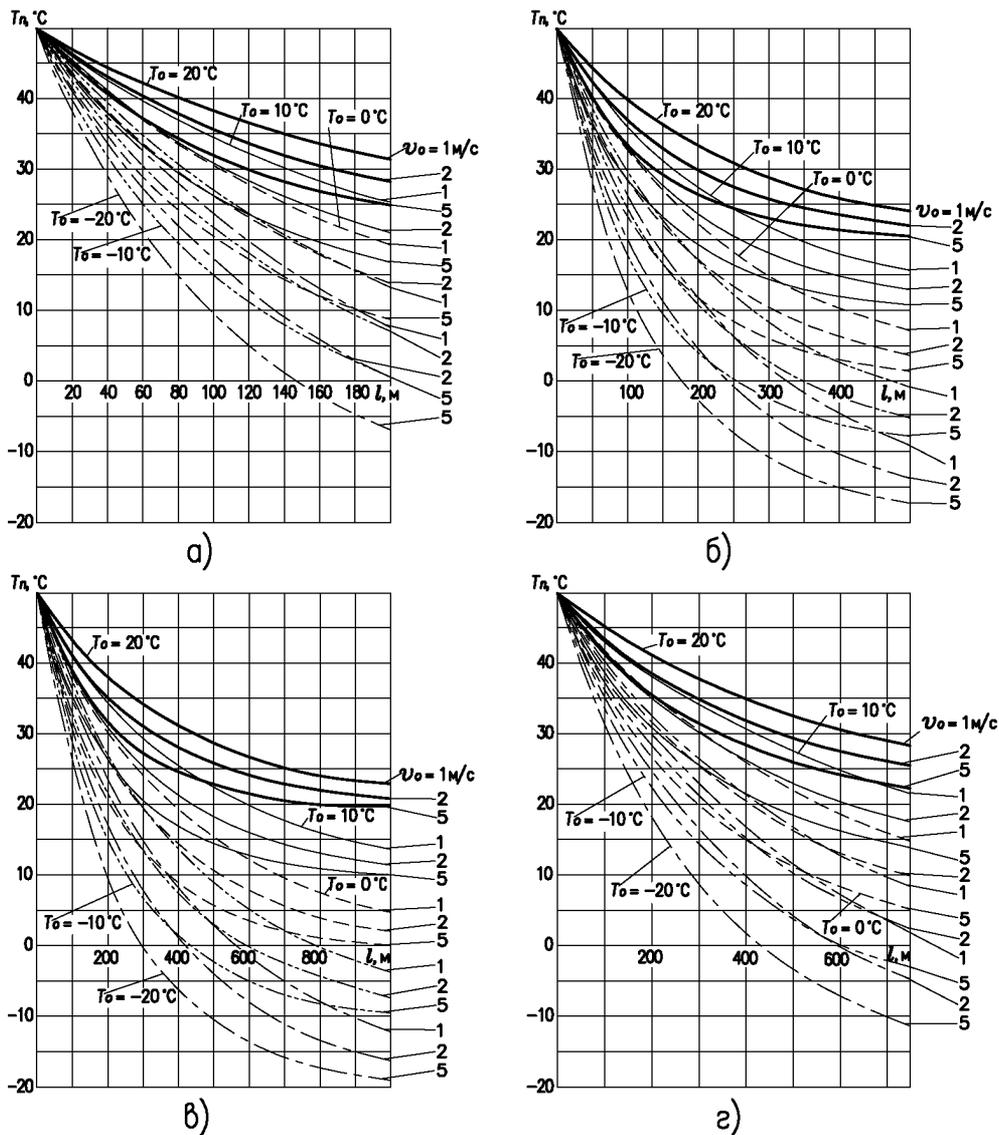


Рис. 2.6. Изменение температуры сжатого воздуха с избыточным давлением $p = 0,7$ МПа по длине трубопровода при скорости ветра 1, 2 и 5 м/с: а) $D_{\text{вн}} = 80$ мм, $v_n = 10$ м/с; б) $D_{\text{вн}} = 100$ мм, $v_n = 8$ м/с; в) $D_{\text{вн}} = 160$ мм, $v_n = 8$ м/с; г) $D_{\text{вн}} = 200$ мм, $v_n = 8$ м/с. На графиках принято следующее обозначение температуры окружающей среды (T_o): 1 = +20°C; 2 = +10°C; 3 = 0°C; 4 = -10°C; 5 = -20°C

туры, скорости и т. д.), расположения и конструктивных особенностей линий.

ВНИИГидроприводом и НПП ООО ЭНСИ были разработаны такие программы, алгоритм одной из них приведён на рис. 2.7.

Для исключения коррозионного разрушения пневмолиний и устройств необходима осушка сжатого воздуха на $(2 - 3)^\circ\text{C}$ выше (глубже) расчётной точки росы сжатого воздуха при 50% влажности в данных условиях. Приближённый расчёт осушки сжатого воздуха с давлением $(0,6 - 0,8)$ МПа до необходимой точки росы можно сделать по предложенной фирмой Atlas Copco диаграмме (рис. 2.8), на которой область над линией 1 указывает 100%, а область под линией 2 – ниже 50% влажность сжатого воздуха. Между линиями 1 и 2 находится область с относительной влажностью от 100 до 50%. Следовательно, область над линией 2 является зоной коррозионного разрушения, а под ней – зоной предотвращения коррозии внутренних поверхностей стальных трубопроводов и устройств.

Пример 3. Определить необходимую степень осушки воздуха при минимальной температуре окружающей среды в районе расположения пневмолиний 20°C . Из точки 20°C на оси абсцисс проводим вертикальную линию до пересечения с линией 2, далее проводим горизонтальную ли-

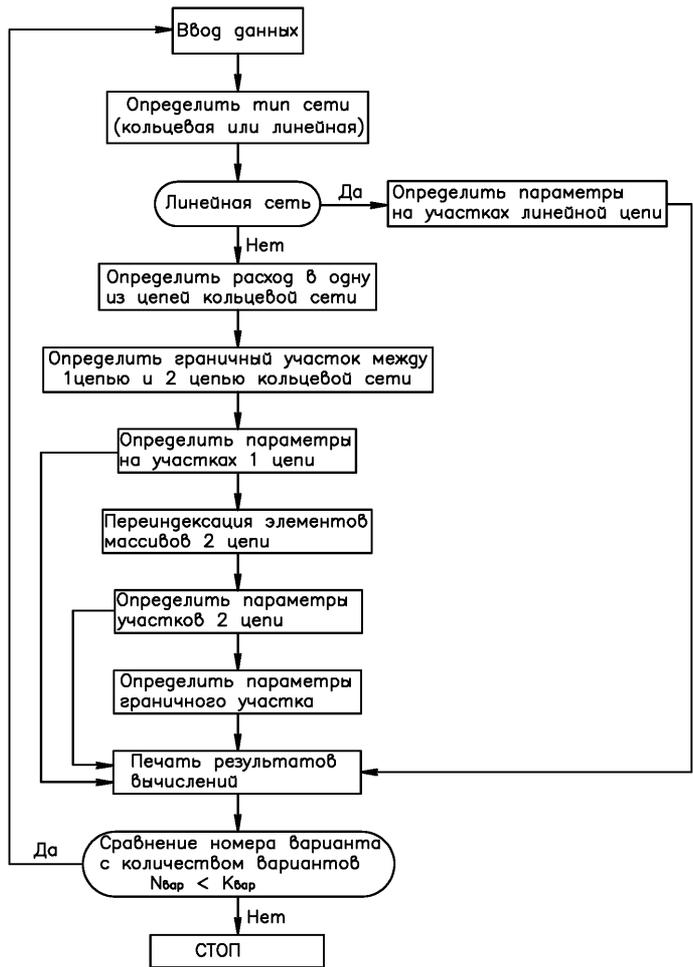


Рис. 2.7. Алгоритм решения задач по определению термодинамических параметров сжатого воздуха.

нию до оси ординат и получаем значение точки росы $t_{р}$.
 10°C сжатого воздуха при 50%. Принимая степень осушки сжатого воздуха на 2°C глубже (с запасом), получим необходимость осушки его до точки росы $(10^\circ\text{C} - 2^\circ\text{C}) = 8^\circ\text{C}$. Прделав аналогичные процедуры для окружающей температуры 30°C, получим необходимость осушки сжатого воздуха до точки росы 18°C, при температуре 10°C – минус 2°C, а при температуре 0°C — минус 12°C.

Примечание. Введение корректировки (запаса) в сторону более глубокой степени осушки диктуется возможной неточностью расчётов, погрешностью измерения окружающей температуры и скорости ветра.

При непрерывной подаче сжатого воздуха потребителям (моторам, ручному инструменту, вибраторам и т. д.) по коммутационным трубопроводам со скоростью $v_n < 50 \text{ м/с}$, характер термодинамического процесса можно принимать аналогичным рассмотренному выше для магистральных трубопроводов.

При подаче воздуха в пневматические устройства периодического действия, например цилиндры, процесс течения отличен от вышеописанного. Так как отношение значений давления в заполняемой полости устройства и давления в коммутационном трубопроводе на входе в неё, обычно, меняется от менее 0,528 в начале процесса до 1 в конце, скорость течения потока воздуха также изменяется от максимального значения до нуля. Показатель политропы при этом изменяется в пределах $k > n \geq 1$. Процесс протекает со сжатием и возрастанием температуры воздуха в конце процесса заполнения, что обычно исключает возможность конденсации паров воды и масла.

В выхлопных трубопроводах процесс истечения воздуха в атмосферу из устройств с непрерывным расходом может происходить при надкритическом и докритическом режимах, что приводит к значительному понижению температуры и конденсации влаги, а при определённых условиях может вызвать обмерзание выхлопных каналов.

Температура воздуха на участке непосредственного выхлопа в атмосферу ($T_в$) может быть приближённо определена по следующим формулам:

$$\text{при надкритическом режиме истечения} - T_в = 0,84 T_n, \quad (2.12)$$

$$\text{при докритическом режиме истечения} - T_в = T_n \cdot \left(\frac{p_a}{p_n} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad (2.13)$$

где T_n – температура потока до истечения, её значение принимают равным температуре сжатого воздуха в подводящем трубопроводе (T_m), К; p_n и p_a – давление воздуха, соответ-

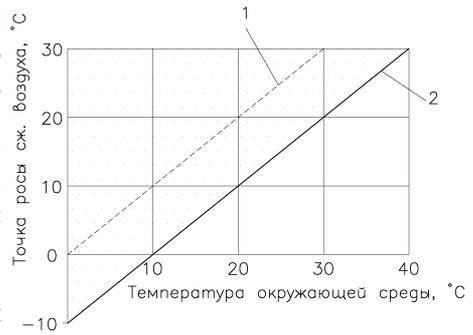


Рис. 2.8 Диаграмма для определения точки росы сжатого воздуха

ственно, до выхлопа и атмосферное, МПа.

Отметим, что реальная температура выхлопного воздуха будет немного выше расчётной.

2.5.2. Пневматическая проточная аппаратура

При малых перепадах давления в проточной аппаратуре (распределителях, обратных клапанах, маслораспылителях, фильтрах и др.) температура потока воздуха на выходе изменяется мало, и её можно принимать равной температуре на входе.

Однако в редукционных клапанах, дросселях и др. устройствах расширение воздуха на выходе из сопротивлений (дросселирующих каналов, щелей и отверстий) при относительно большом перепаде давления приводит к понижению его температуры и возможности конденсации влаги и обмерзанию. Приблизённую оценку температуры воздуха на выходе из этих устройств (T_k) можно сделать по формуле (2.5):

$$T_k = T_n \cdot \left(\frac{p_k}{p_n} \right)^{\frac{n-1}{n}},$$

где p_n и p_k – давление воздуха перед сопротивлением и на выходе из него, МПа; T_n – температура воздуха перед сопротивлением, К; n – показатель политропы (его значение при p_k менее $0,5 p_n$ принимают равным $k = 1,4$, а при p_k более $0,5 p_n$ – $n = 1,39 - 1,2$, причём чем больше значение отношения p_k/p_n , тем меньше n).

Из-за сопротивления проточного устройства скорость потока воздуха снижается, а его температура возрастает до значения, близкого до входа в устройство. Повышение температуры воздуха при уменьшении давления может привести к испарению части сконденсированной влаги и уменьшению относительной влажности.

Температура в трубопроводе за сопротивлением (T_m) определяется по формуле [4]:

$$T_m = T_n + \frac{v_n^2 - v_k^2}{2R} \cdot \frac{k-1}{k}, \quad (2.14)$$

где T_n – температура воздуха перед сопротивлением, К; v_n и v_k – скорости потока соответственно перед сопротивлением и за ним в трубопроводе, м/с.

Температура воздуха (T_k) при расширении на выходе из очень малых отверстий с необратимым процессом дросселирования (смятия) воздуха ориентировочно равна:

$$T_k = T_n + \gamma \cdot (p_k - p_n). \quad (2.15)$$

Значение коэффициента γ для систем при давлении воздуха (0,4 – 1,6) МПа и температуре (0 – 50)°С можно принимать из диапазона (1,6 – 2,5) град/МПа.

В длинных капиллярах из-за значительного влияния сил трения и теплообмена с окружающей средой температуру воздуха на выходе из них можно принимать равной температуре окружающей среды. Конденсация влаги в этом случае может произойти

только при температуре окружающей среды ниже температуры сжатого воздуха на его входе $T_o < T_n$.

Пример 4. Определить температуру и относительную влажность воздуха на выходе из щели редукционного клапана и в трубопроводе за ним при одинаковых размерах подводящего и отводящего трубопроводов, скорости воздуха до редуцирования $v_n = 20$ м/с, абсолютном давлении $p_n = 7 \cdot 10^{-1}$ МПа, $T_n = 293$ К, $\varphi_n = 0,8$ и абсолютном давлении на выходе $p_k = 4 \cdot 10^{-1}$ МПа.

Так как $p_k = 0,57 p_n$, принимаем $n = 1,39$. Температуру воздуха на выходе из щели редукционного клапана находим по формуле (2.5):

$$T_k = 293 \cdot \left(\frac{0,4}{0,7} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} = 250,4 \text{ К.}$$

Относительную влажность на выходе из щели клапана (при указанном давлении воздуха p_n и p_k , давление насыщенного водяного пара составляет – $p_{ннп} = 0,283$ и $p_{кнп} = 0,00183$) определим из выражения [7]:

$$\varphi_k = \varphi_n \cdot \frac{p_k \cdot p_{ннп}}{p_n \cdot p_{кнп}} = 0,8 \cdot \frac{4 \cdot 0,283}{7 \cdot 0,00183} = 6,8 \quad .$$

Следовательно, на выходе щели клапана возможно появление конденсата. Возможность обмерзания стенок клапана можно проверить по формулам, приведённым далее в разделе 2.5.6.

Определим скорость потока воздуха в пневмолинии за клапаном:

$$v_k = v_n \cdot \frac{p_n}{p_k} = 20 \cdot \frac{7}{4} = 35 \text{ м/с.}$$

Температуру воздуха в линии за редукционным клапаном ($T_{кт}$) найдём из уравнения (2.14):

$$T_{кт} = 293 + \frac{20^2 - 35^2}{2 \cdot 287} \cdot \frac{1,4 - 1}{1,4} = 292,6 \text{ К.}$$

Следовательно, повышение температуры потока в пневмолинии за клапаном приведёт к испарению конденсата, а значение относительной влажности $\varphi_{кл}$ на этом участке будет равно:

$$\varphi_{кл} = 0,8 \cdot \frac{0,02383 \cdot 4}{0,02324 \cdot 7} = 0,4 \quad .$$

Пример 5. Определить температуру воздуха и возможность конденсации влаги на выходе блока подготовки (фильтра, редукционного клапана, маслораспылителя) при абсолютном давлении на входе $7 \cdot 10^{-1}$ МПа и выходе $p_k = 6 \cdot 10^{-1}$ МПа, температуре на входе $T_n = 293$ К.

Температуру воздуха на выходе из блока определим по формуле (2.5), принимая $n = 1,25$, так как длина канала относительно велика, а сопротивление блока и перепад давления малы:

$$T_k = 293 \cdot \left(\frac{0,6}{0,7} \right)^{\frac{1,2-1}{1,2}} = 285,5 \text{ К.} \quad \text{Следовательно, конденсация невозможна.}$$

2.5.3. Пневмодвигатели

Конденсация паров воды и масла в двигателях (цилиндрах и моторах) возможна в полости выхлопа при расширении воздуха в период истечения его в атмосферу и в рабо-

чей полости из-за быстрого перемещения поршня при отсечённой или сильно задрессированной подаче воздуха в рабочую полость.

Точно рассчитать термодинамические параметры воздуха в полостях двигателей достаточно сложно. Для ориентировочных расчётов можно использовать уравнения политропического расширения при следующих значениях показателя политропы (n):

для цилиндров, мембранных камер, неполноповоротных моторов

$$n = (1,22 - 1,36);$$

для поршневых и мембранных моторов $n = (1,25 - 1,38)$;

для шиберных и шестерёнчатых моторов $n = (1,22 - 1,39)$.

При работе моторов на полных оборотах и цилиндров со свободным выхлопом процесс расширения воздуха при истечении обычно приближается к адиабатическому. Значение показателя политропы в этом случае при определении температуры в выхлопной полости можно принимать близким к значению 1,4. А при небольшом уровне рабочего давления в полостях цилиндров и моторов до истечения показатель политропы принимают менее указанных выше средних значений.

Для пневматических цилиндров и моторов температура в полости выхлопа (T_v) может быть определена по формуле:

$$T_v = T_m \cdot \left(\frac{p_v}{p_m} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad (2.16)$$

где T_m – температура воздуха в магистрали, К; p_m и p_v – давление воздуха, соответственно, в магистрали и полости выхлопа, МПа.

Для цилиндров периодического действия, когда время между срабатываниями достаточно велико (т.е. процесс происходит с задержкой выхлопа), температуру (T_v) и давление (p_v) воздуха в выхлопной полости до истечения принимают равными их значениям в подводящей магистрали $T_v = T_m$, $p_v = p_m$ [5]. При высокой частоте срабатываний и абсолютном рабочем давлении $p_m = (0,5 - 1,1)$ МПа, давление до выхлопа (p_v) принимают из диапазона $(0,25 - 0,8)$ МПа в зависимости от времени цикла, характера изменения нагрузки, сопротивления линий подвода и выхлопа. Так, дросселирование выхлопа увеличивает значение давления p_v , а наличие сопротивления на линии подачи воздуха его уменьшает.

Для моторов, в зависимости от режимов работы, пропускной способности подводящей и выхлопной линий, абсолютное давление в выхлопной полости до начала истечения принимается равным $p_v = (0,6 - 0,9) p_m$, а в конце выхлопа $p_v = (0,16 - 0,28)$ МПа. Температура в полости выхлопа до истечения приблизительно равна T_m .

Ориентировочное значение температуры в полости выхлопа можно найти также при помощи графиков на рис. 2.9.

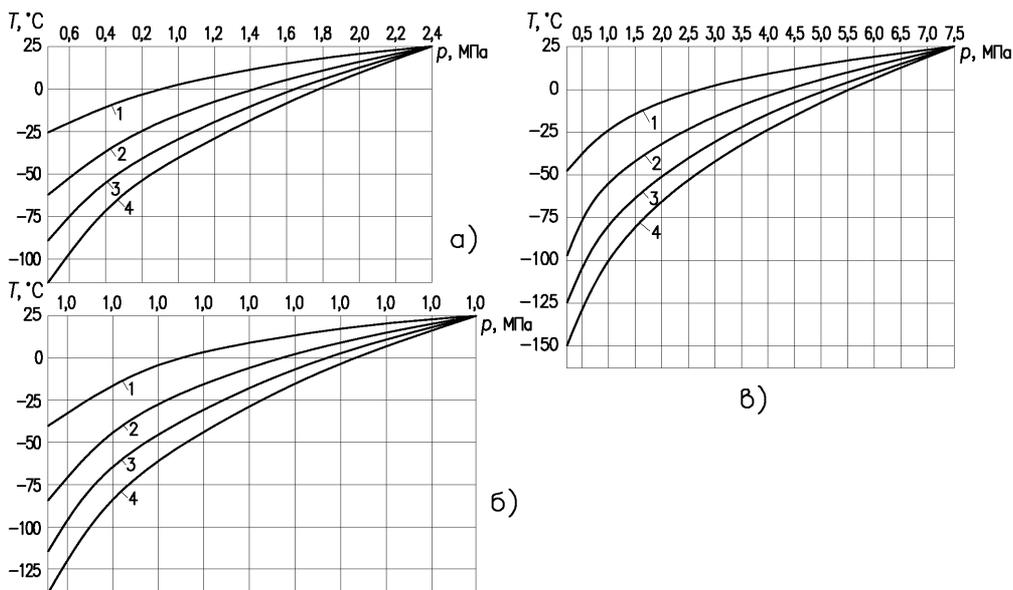


Рис. 2.9. Изменение температуры сжатого воздуха в полости выхлопа цилиндров и моторов в зависимости от степени его расширения при начальном абсолютном давлении в полости, равном а) – 0,24 МПа, б) – 0,5 МПа, в) – 0,73 МПа и следующих значениях показателя политропы: 1 – $n = 1,1$; 2 – $n = 1,2$; 3 – $n = 1,3$; 4 – $n = k = 1,4$.

Понижение температуры воздуха ниже 273 К, при выхлопе из полостей пневмодвигателей, может привести к обмерзанию их стенок и выхлопных трубопроводов.

Процесс заполнения рабочих полостей цилиндров и поворотных двигателей из-за малого объёма до начала движения поршня мало влияет на температурный баланс, но их опорожнение при большом объёме оказывает существенное влияние, так как расширение воздуха при высокой скорости его истечения (до 300 м/с) приводит к сильному понижению его температуры (в ряде случаев ниже минус 100°C). Наибольшее охлаждение следует ожидать при работе цилиндра в длительном режиме и высокой частоте срабатывания (кратковременности периодов между выхлопами). Понижение температуры стенок цилиндра (ΔT_c) рассчитывается по эмпирической зависимости [21]:

$$\Delta T_c = 30 - 20,5 \cdot \lg \frac{1}{f_{\text{э}}}, \text{ К}, \quad (2.17)$$

где $f_{\text{э}}$ – эквивалентная частота срабатывания цилиндра, Гц,

$$f_{\text{э}} = \left(\frac{s}{0,12} \right)^{0,75} \cdot \frac{D}{0,063} \cdot f, \quad (2.18)$$

где D – диаметр поршня цилиндра, м; s – рабочий ход, м; $f = 1/t_u$ – частота срабатывания

цилиндра, Гц, t_u – время полного рабочего цикла, с.

Уравнение (2.17) можно написать также в следующем виде:

$$\Delta T_c = 30 - 20,5 \cdot \lg \left[\left(\frac{0,12}{s} \right)^{0,75} \cdot \frac{0,063}{D} \cdot t_u \right], \text{ К.} \quad (2.19)$$

2.5.4. Устройства со смешением потоков воздуха

При функционировании струйных аппаратов (эжекторов, инжекторов, обдувочных и пескоструйной очистки сопел), элементов и конечных выключателей струйных систем (рис. 2.10) происходит смешение сжатого (рабочего) и инжектируемого или атмосферного воздуха, что при определённых условиях может привести к конденсации паров воды.

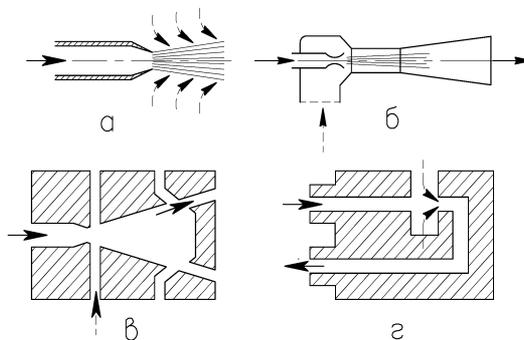


Рис. 2.10. Устройства со смешением потоков воздуха:

a – сопло; b – струйный компрессор; $в$ – струйный логический элемент; $г$ – струйный выключатель

практически невозможно, то исключить конденсацию можно только путём осушки сжатого (рабочего) воздуха.

Степень осушки в этом случае определяется из выражения [1, 7]:

$$\text{влажность} - d < \frac{622}{\frac{p_m}{(1+k_u) \cdot p_{снп} - k_u \cdot p_{ин}} - 1}}, \quad (2.20)$$

$$\text{масло} - d_m < \frac{\psi}{\frac{p_m}{(1+k_u) \cdot p_{снп}^I - k_u \cdot p_{ин}^I} - 1}}, \quad (2.21)$$

где k_u – коэффициент инжекции, т.е. отношение массы инжектируемого воздуха в смешанном потоке к массе рабочего воздуха. Значение k_u для устройств на рис. 2.10, б, в, г обычно не превышает 6, а для сопловых устройств (рис. 2.10, а) в зависимости от выбранного для расчёта места расположения в зоне смешения лежит в диапазоне от 0 до ∞ ; p_m – абсолютное давление рабочего воздуха, МПа; $p_{ин}$, $p_{ин}^I$ и $p_{снп}$, $p_{снп}^I$ – давление паров воды и масла, соответственно в инжектируемом и смешанном потоках воздуха, МПа.

Значение ψ находят по зависимости, приведённой в разделе 2.1.

Наиболее опасным с точки зрения конденсации влаги является смешение при $k_u < 6$, так как более высокие его значения практически не приводят к конденсации.

Температуру воздушной смеси (T) находят из уравнения теплового баланса [1]:

$$T = \frac{T_m + T_u \cdot k_u}{1 + k_u}, \text{ К} \quad (2.22)$$

где T_m и T_u – температура соответственно магистрального и инжектируемого воздуха, К.

Пример 6. Определить степень осушки сжатого воздуха, обеспечивающую исключение конденсации паров воды в зоне смешения при обдуве изделия. **Исходные данные:** абсолютное давление сжатого воздуха $p_m = 5 \cdot 10^{-1}$ МПа, температура $T_n = 323$ К; коэффициент инжекции $k_u = 3$; параметры инжектируемого (атмосферного) воздуха – давление $p_u = 10^{-1}$ МПа, температура $T_u = 288$ К, $\varphi = 0,8$, давление паров воды $p_{un} = \varphi p_{унн} = 0,8 \cdot 1,73 \cdot 10^{-3} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ МПа (где $p_{унн} = 1,73 \cdot 10^{-3}$ МПа – давление насыщенных паров воды в инжектируемом воздухе при $T_u = 288$ К, см. приложение 2).

По формуле (2.22) определяем температуру смешанного воздуха $T = \frac{323 + 288 \cdot 3}{1 + 3} = 297$ К.

При $T = 297$ давление насыщенных паров воды в смешанном потоке воздуха $p_{снн} = 3 \cdot 10^{-3}$ МПа. Влагосодержание потока рабочего сжатого воздуха, исключающего возможность конденсации:

$$d < \frac{622}{5 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{(1+3) \cdot 3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3}}{1+3}} - 1 < 9,86 \text{ г/кг.}$$

При давлении сжатого воздуха $p_m = 0,5$ МПа это значение влагосодержания обеспечивается при его осушке до температуры точки росы ниже 276 К (3°C).

2.5.5. Устройства с замкнутыми полостями

В периоды отсутствия расхода из замкнутых полостей ресиверов, трубопроводов, цилиндров и др. устройств процесс теплообмена заключённого в них воздуха происходит при постоянном объёме, т.е. процесс является изохорным. При известных начальных параметрах сжатого воздуха температуры (T_n), давления начального (p_n) и конечно-го (p_k), изменение его температуры (T_k) определяется из выражения:

$$T_k = \frac{p_k}{p_n} \cdot T_n \quad (2.23)$$

Если конечные параметры сжатого воздуха неизвестны, а известно количество отводимого или подводимого тепла (θ) в джоулях за данный промежуток времени и масса сжатого воздуха (M_θ , кг) в замкнутом пространстве, то при условии постоянной теплоёмкости конечную его температуру (T_k) находят по формуле:

$$T_k = T_n \pm \frac{\theta}{c_v \cdot M_\theta} \quad (2.24)$$

где c_v – удельная массовая теплоёмкость воздуха, дж/(кг·град).

При длительном процессе теплообмена замкнутого объёма сжатого воздуха с окружающей средой его конечную температуру принимают равной температуре этой среды.

2.5.6. Методика оценки возможности обмерзания пневмоустройств

На рис. 2.11 представлен алгоритм определения возможности обмерзания внутренних стенок цилиндров и его выхлопных патрубков в зависимости от интенсивности переключения движения поршня пневмоцилиндра [22].

Для непрерывно работающих редукционных клапанов, пластинчатых, шестерёнчатых и др. моторов температуру их стенок и выхлопных трубопроводов (T_c) определяют по формуле [19]:

$$T_c = \frac{k_{нз} \cdot T_{зн} + \frac{k_{эсо}}{k_{нс}} \cdot T_o}{1 + \frac{k_{эсо}}{k_{нс}}}, \quad (2.25)$$

где $T_{зн}$ и T_o – температура соответственно заторможенного потока сжатого воздуха и окружающей среды, К; $k_{нз}$ – коэффициент, показывающий, какая часть полной энергии потока превращается вблизи стенок в тепловую энергию, его значение лежит в пределах [3] $0,95 \leq k_{нз} < 1$; $k_{нс}$ – коэффициент теплоотдачи от потока к стенке; $k_{эсо}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи от стенок в окружающую среду.

Температуру заторможенного потока для моторов принимают $T_{зн} = T_s$ и определяют по формуле (2.16). Для редукционных клапанов

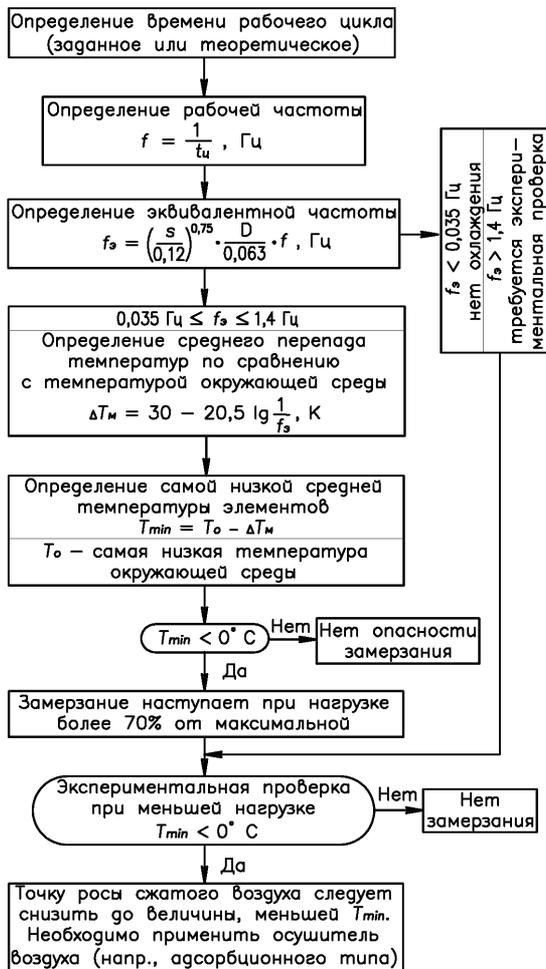


Рис. 2.11. Алгоритм определения возможности обмерзания внутренних стенок цилиндров и выхлопных патрубков

$T_{зп}$ зависит от перепада давления на входе и выходе. При малом редуцировании $T_{зп}$ близка к температуре потока в магистрали, а при большом перепаде давления её находят по формуле (2.5), в которой p_n – абсолютное давление в магистрали, а p_k – на выходе редуционного клапана.

Значение $k_{эсо}$ в редуционных клапанах пропорционально отношению площади поверхности контакта с окружающим воздухом f_n к площади торца f_t :

$$k_{эсо} \simeq k_{со} \cdot \frac{f_n}{f_t}, \quad (2.26)$$

где $k_{со}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки в окружающую среду.

В выхлопных трубопроводах теплоотдача осуществляется по двум направлениям: первый – непосредственный теплообмен стенки с окружающей средой, второй – теплообмен через корпус пневмоустройства, к которому он подсоединён.

Первое направление теплообмена является основным, если длина трубопровода (L) достаточно большая, т. е. $L > L_o$. Значение L_o находят по формуле:

$$L_o = \sqrt{\frac{h_{тп} \cdot \lambda_{тп}}{k_{со}}}, \quad (2.27)$$

где $h_{тп}$ – толщина стенки трубопровода, м; $\lambda_{тп}$ – коэффициент теплопроводности материала трубопровода.

В коротких трубопроводах ($L < L_o$) основной отвод тепла происходит вдоль трубопровода на корпус. Для устройств с массивным корпусом приближённую оценку значения $k_{эсо}$ можно сделать по формуле:

$$k_{эсо} \simeq \frac{h_{тп} \cdot \lambda_{тп}}{L \cdot D_{нт}}, \quad (2.28)$$

где $D_{нт}$ – наружный диаметр трубопровода, м.

Соотношения между коэффициентами теплопередачи в различных системах измерения – в таблице 2.23.

Таблица 2.23

Коротко рассмотрим процесс обмерзания внутренних поверхностей пневматических устройств и трубопроводов. При понижении температуры

Единицы	Вт/см ² ·К	кВт/м ² ·К	эрг/см ² ·с·°С	кал/см ² ·с·°С	ккал/м ² ·ч·°С
1 Вт/см ² ·К	1	10	107	0,239	8600
1 кВт/м ² ·К	0,1	1	10,7	0,239·10 ⁻¹	860
1 эрг/см ² ·с·°С	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	1	23·10 ⁻⁹	860·10 ⁻⁶
1 кал/см ² ·с·°С	4,187	41,87	41,87·10 ⁶	1	36000
1 ккал/м ² ·ч·°С	116·10 ⁻⁶	1,16·10 ⁻³	1,16·10 ³	27,8·10 ⁻⁶	1

стенок T_c ниже 273 К, образование на них льда происходит, в основном, из-за конденсации пара из воздуха, так как инерционное осаждение аэрозолей, появляющихся в ре-

зультате быстрого расширения воздуха в полостях, мало. Конденсация пара на стенках происходит при температуре стенок ниже температуры сжатого воздуха, подаваемого в полости устройств периодического действия. Количество конденсата G , выпадающего за единицу времени на единичную площадь поверхности, находят по формуле [1]:

$$G = \beta \cdot (\rho_n - \rho_c) \cdot \tau / (c \cdot m^2), \quad (2.29)$$

где β – коэффициент массоотдачи, м/с; ρ_n, ρ_c – плотность паров воды соответственно в потоке и у стенки, г/м³. При наличии на стенках конденсата $\rho_c = \rho_n$ (ρ_n – плотность насыщенных паров при температуре, равной T_c).

Значение коэффициента β при турбулентном течении в гладких трубопроводах определяется зависимостью:

$$\beta = 0,05 \cdot v / Re^{0,2}, \text{ м/с,}$$

где v – скорость потока в трубопроводе, м/с; Re – число Рейнольдса.

Скорость потока в выхлопном трубопроводе из цилиндра определяют по формуле:

$$v = \frac{s}{t_u} \cdot \left(\frac{D_u}{D_T} \right)^2,$$

где s – значение хода; t_u – время срабатывания цилиндра; D_u, D_T – внутренние диаметры соответственно цилиндра и трубопровода.

Плотность паров в потоке воздуха (ρ_n) зависит от его степени осушки (относительной влажности — φ) и температуры (T_m) в магистрали:

$$\rho_n = \varphi \cdot \rho_{нтм}, \quad (2.30)$$

где $\rho_{нтм}$ – плотность насыщенных паров воды в потоке при температуре T_m .

Степень осушки сжатого воздуха для предотвращения обмерзания стенок:

$$\varphi \leq \frac{\rho_{нтс}}{\rho_{нтм}}, \quad (2.31)$$

где $\rho_{нтс}$ – плотность насыщенных паров воды в воздухе при температуре стенок (T_c).

Скорость нарастания толщины ледяного покрытия (v_l) приближённо оценивают:

$$v_l \leq 6 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{s}{t_u} \cdot \left(\frac{D_u}{D_T} \right)^2 \cdot (\varphi \cdot \rho_{нтм} - \rho_{нтс}), \text{ м/с.} \quad (2.32)$$

Приведём примеры расчёта возможности обмерзания стенок пневмоустройств.

Пример 7. Определить возможность обмерзания внутренних стенок цилиндра с $D_u = 100$ мм, ходом 100 мм, временем рабочего цикла $t_u = 30$ с, температурой поступающего в цилиндр воздуха $T_m = T_o = 278$ К. Находим частоту цилиндра:

$$\text{рабочую } f = \frac{1}{30} = 0,33 \text{ Гц; эквивалентную } f_s = \left(\frac{0,1}{0,12} \right)^{0,75} \cdot \frac{0,1}{0,063} \cdot f = 0,047 \text{ Гц}$$

Определим минимальную температуру стенок цилиндра, используя зависимость (2.17):

$$T_c = 278 - \left(30 - 20,5 \cdot \lg \frac{1}{0,047} \right) = 275 \text{ К},$$

т. к. температура выше 273 К, обмерзания стенок цилиндра не произойдёт.

Пример 8. Определить возможность обмерзания стенок цилиндра с $D_{ц} = 100$ мм, ходом 50 мм, временем цикла $t_{ц} = 5$ с, при температуре окружающей среды $T_M = T_o = 275$ К.

Находим частоту цилиндра:

$$\text{рабочую } f = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ Гц}; \quad \text{эквивалентную } f_3 = \left(\frac{0,05}{0,12} \right)^{0,75} \cdot \frac{0,1}{0,063} \cdot f = 0,165 \text{ Гц}$$

Минимальная температура стенок цилиндра:

$$T_c = 275 - \left(30 - 20,5 \cdot \lg \frac{1}{0,165} \right) = 261 \text{ К}, \text{ т. к. } T_c < 273 \text{ К}, \text{ то обмерзание возможно.}$$

Пример 9. Определить возможность обмерзания выхлопного трубопровода шестерёнчатого мотора при параметрах: абсолютное давление $p_M = 0,5$ МПа, $k_{нз} = 0,95$, $L = 5 \cdot 10^{-2}$ м, $h_{тр} = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $D_{нт} = 10^{-2}$ м, $\lambda_{тр} = 259,2 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}$, $k_{нс} = 86,4 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}$, $k_{со} = 4,32 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}$, $T_M = T_o = 293$ К, $n = 1,3$.

Оцениваем, длинный или короткий трубопровод:

$$L_o = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 259,2}{4,32}} = 0,55 \text{ м}.$$

Так как $L < L_o$, трубопровод короткий, по формуле (2.26) находим значение $k_{эсо}$:

$$k_{эсо} \approx \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 259,2}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-2}} = 2592 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}.$$

Принимая значение давления $p_g = 0,16$ МПа (см. раздел 2.5.3), по выражению (2.16) находим:

$$T_g = 293 \cdot \left(\frac{1,6}{5} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} = 225,45 \text{ К}.$$

По формуле (2.25) определяем температуру стенок трубопровода T_c :

$$T_c = \frac{0,95 \cdot 225,45 + \frac{2592}{86,4} \cdot 293}{1 + \frac{2592}{86,4}} = 290,46 \text{ К}.$$

Следовательно, обмерзания выхлопного трубопровода не произойдёт.

Пример 10. Определить возможность обмерзания редукционного клапана при параметрах: $f_n = 3 \cdot 10^{-2}$, $f_T = 10^{-3}$, $k_{нс} = 10^2 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}$, $k_{со} = 1 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}$, $k_{нз} = 0,95$, $T_{зн} = T_M = T_o = 293$ Эффективный коэффициент теплоотдачи - $k_{эсо} \approx k_{со} \cdot f_n / f_T \approx 1 \cdot (3 \cdot 10^{-2} / 10^{-3}) = 30$.

Определим T_c по формуле (2.25):

$$T_c = \frac{293 \cdot \left(0,95 + \frac{30}{10^2} \right)}{1 + \frac{30}{10^2}} = 281,73 \text{ К}, \text{ так как } T_c > 273 \text{ К}, \text{ то обмерзание невозможно.}$$

Пример 11. Определить возможность обмерзания редукционного клапана при $T_{zn} = T_M = T_o = 280$ К и всех остальных параметрах, указанных в примере 10.

Находим температуру стенок T_c по формуле (2.25):

$$T_c = \frac{280 \cdot \left(0,95 + \frac{30}{10^2}\right)}{1 + \frac{30}{10^2}} = 269 \text{ К} , \text{ так как } T_c < 273 \text{ К, то обмерзание возможно.}$$

Пример 12. Определить необходимую степень осушки сжатого воздуха для предотвращения обмерзания стенок выхлопного трубопровода цилиндра. Исходные данные: $D_{ц} = 0,08$ м, $s = 0,16$ м, $t_{ц} = 2,7$ с, $T_M = T_c = 293$ К.

Используя формулы (2.17) и (2.18), найдём температуру стенки:

$$T_c = T_M - \Delta T_c = 293 - 30 + 20,5 \cdot \lg \left[\left(\frac{0,12}{0,16} \right)^{0,75} \cdot \frac{0,063}{0,08} \cdot 2,7 \right] = 267 \text{ К} , \text{ следовательно, для исключения об-}$$

мерзания стенок трубопровода точка росы сжатого воздуха должна быть ниже 267 К

Пример 13. Оценить скорость (v_n) нарастания ледяного покрытия стенки выхлопного трубопровода при $D_{т} = 1 \cdot 10^{-2}$ м, относительной влажности воздуха в потоке $\varphi = 60\%$ и других данных в примере 12. Значения плотности насыщенного пара при T_M и $T_c - \rho_{нтM} = 17,3$ г/м³; $\rho_{нтTc} = 3,05$ г/м³.

Скорость нарастания льда (v_n) оцениваем по формуле (2.32):

$$v_n \leq 6 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,16}{2,7} \cdot \left(\frac{0,08}{0,01} \right)^2 \cdot (0,6 \cdot 17,3 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-3}) \leq 0,15 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$$

Вниманию специалистов!

В отечественные и международные стандарты периодически вносятся изменения, что приводит к необходимости при ссылке на них обращать внимание на год издания. Например, в стандарт ИСО 8573-1-2003 (ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005), приведённый в данной книге, внесены изменения по количеству содержания твёрдых частиц в (1 – 5) классах (см. редакцию стандарта ИСО 8573-1-2010).

Глава 3. СПОСОБЫ, УСТРОЙСТВА И СХЕМЫ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

Очистка сжатого воздуха обеспечивается устройствами для удаления твёрдых частиц и жидкой влаги, паров влаги, газов, запахов, микробиологических и других токсичных загрязнителей. На рынке эти устройства представлены тысячами исполнений по способу и эффективности очистки, пропускной способности, гидравлическому сопротивлению, надёжности и другим параметрам, что затрудняет их выбор.

В практике, каталогах и технической литературе вместо термина *устройство очистки от твёрдых и жидких загрязнителей* обычно применяют краткие термины – *фильтр* или *фильтр-влагоотделитель*, которые будут использованы в этой книге.

Приведём основные сведения по способам и устройствам очистки всасываемого и сжатого воздуха, их рациональному выбору, размещению и эксплуатации для наиболее широко применяемых в промышленности пневмосистем с давлением до 1,6 МПа.

Дополнительную информацию по устройствам очистки воздуха отечественного и зарубежного производства можно найти в каталогах, проспектах и интернете.

3.1. Параметры устройств очистки воздуха

К основным параметрам устройств очистки относят: коэффициент (эффективность) очистки определённого вида загрязнителей; гидравлическое сопротивление; расходную характеристику (другие применяемые термины – *пропускная способность* или *производительность*); диапазон рабочего давления; герметичность; работоспособность; надёжность; габаритные размеры и массу; ёмкость сбора жидкой влаги и пылеемкость. Для специальных исполнений могут быть указаны параметры, характеризующие работоспособность в условиях высоких или низких температур, радиации, вибрации и др.

Коэффициент (эффективность) очистки твёрдых загрязнителей ($k_{оф}$) – отношение разности количества твёрдых частиц в воздухе на входе ($S_{чв}$) и после фильтра ($S_{чп}$) к их количеству на входе:

$$k_{оф} = 100 \frac{S_{чв} - S_{чп}}{S_{чв}}, \% \quad (3.1)$$

Аналогом коэффициента очистки ($k_{оф}$) является коэффициент фильтрации β , который относится к частицам определённого размера для данного класса и равен отношению числа частиц в пробе воздуха перед фильтром к числу частиц в пробе после фильтра. Он определяется как $\beta = 1/P$, где P – коэффициент проскока частиц, который равен отношению концентрации частиц после фильтра к концентрации частиц до него (подробнее, см. примечание в таблице 2.10 раздела 2.2).

Из-за сложности определения действительного значения дисперсного состава твёрдых загрязнителей в сжатом воздухе и коэффициентов очистки и фильтрации в практике часто принято выражать их косвенными параметрами. Например, для устройств очистки с применением силовых полей – минимальным диаметром улавливаемых твёрдых частиц, а для устройств очистки фильтрующего типа – номинальной и абсолютной тонкостями фильтрации.

Коэффициент (эффективность) очистки жидкой влаги ($k_{жв}$) – отношение содержания жидкой влаги в воздухе после фильтра ($S_{пжв}$) к её содержанию на входе ($S_{вжв}$):

$$k_{жв} = \frac{S_{пжв}}{S_{вжв}} . \quad (3.2)$$

Так как на эффективность фильтров и влагоотделителей существенно влияет дисперсность влаги в потоке сжатого воздуха, то при оценке этого параметра следует учитывать следующие обстоятельства. 1. Для фильтров центробежных и других видов инерционных влагоотделителей этот коэффициент обычно отражает процент улавливания пристеночного потока и крупных капель конденсата, поступающего на их вход. То есть, чем выше содержание в потоке сжатого воздуха не улавливаемых этими фильтрами мелких аэрозолей влаги, тем больше указанный изготовителем коэффициент будет отличаться от его фактического значения. Так, для влагоотделителя с указанным в паспорте $k_{жв} = 90\%$ не улавливаемые им мелкие аэрозоли из потока сжатого воздуха составляют 50%, фактическое значение удаления всей жидкой влаги $k_{жв}$ будет составлять 45%. 2. Для фильтров по п. 1 с наличием на входе фильтроэлемента, укрупняющего мелкие аэрозоли, паспортное значение $k_{жв}$ обычно ближе к реальному значению эффективности удаления всей жидкой влаги. 3. В тонких и ультратонких коалесцентных фильтрах эффективность очистки жидкой влаги составляет 99% и выше. Её, как правило, выражают остаточным содержанием масла в мг/м^3 , а остаточное содержание воды в жидкой фазе на выходе из этих фильтров будет значительно меньше, чем масла.

Эффективность очистки воды в паровой фазе ($k_{пв}$) принято выражать точкой росы, которая характеризует меру содержания в сжатом воздухе этих паров. Точка росы указывается вместе с давлением сжатого воздуха, которому она соответствует.

Эффективность очистки токсичных газов, мельчайших аэрозолей и паров масел. Так как в сжатом воздухе могут находиться разные сорта масел и токсичных газов, указание точки росы не позволяет определить точное значение их содержания в воздухе. По этой причине эффективность устройств очистки от масел и токсичных газов обычно принято указывать остаточным значением их массовой концентрации в воздухе на выходе (мг/м^3) или объёмной (в ppm или % объёма), а некоторые изготовители устройств очистки указывают только минимальный размер улавливаемых частиц за-

грязнителей этого вида.

Эффективность способов и устройств очистки от основных загрязнителей (твёрдых частиц, в т.ч. микробиологических организмов, воды, масел) даны в разделах 3.2 – 3.4.

Гидравлическое сопротивление (потери давления) характеризует энергетические потери в устройствах очистки при номинальном расходе воздуха. Этот параметр обычно указывается в миллиметрах водного столба (мм вод. ст.) или паскалях (Па) для устройств очистки в линии всасывания воздуха и в МПа, кгс/см² или барах – для устройств очистки сжатого воздуха.

Так как сопротивление фильтра зависит от его нагрузки (скорости протекания через него воздуха), то более объективным показателем его работы является коэффициент сопротивления ($k_{сф}$), определяемый отношением сопротивления фильтра ($h_ч$) к удельной нагрузке (q , м³/с на м²):

$$k_{сф} = \frac{h_ч}{q}, \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{м}^3. \quad (3.3)$$

Средние значения коэффициента $k_{сф}$ фильтров окончательной очистки на всасывающей линии компрессной приведены в работах [8, 10, 17].

Часто используют и параметр **допускаемое повышение сопротивления фильтра** ($h_ф$), который определяет разность сопротивления фильтра, загрязнённого перед его чисткой ($h_з$), и не загрязнённого в начальный момент его работы ($h_ч$): $h_ф = h_з - h_ч$.

Расходная характеристика (пропускная способность или производительность) – параметр, который характеризует количество (массу или объём) воздуха, проходящего через устройство очистки в единицу времени, в зависимости от значения и соотношения давлений на его входе и выходе. В настоящее время нет единого критерия оценки различных устройств очистки по этому параметру. Изготовители устройств очистки обычно указывают номинальный расход (максимальную пропускную способность) воздуха через устройство очистки при определённом давлении на входе и рекомендуемом гидравлическом сопротивлении (реже – скорости потока), значениях других параметров (например, температуры сжатого воздуха на входе и окружающей среды). Как правило, номинальный расход устанавливают исходя из условия обеспечения заданной эффективности очистки и допустимых энергопотерь.

В технической литературе и документации изготовителей используется также термин **«производительность устройства очистки»**, которая характеризуется номинальным расходом воздуха при определённых значениях давления и ряда других параметров (например, температуры сжатого воздуха на входе и окружающей среды).

Внимание! В соответствии с ГОСТ 2939-63 номинальный объёмный расход воздуха через устройства очистки указывается приведённым к стандартной атмосфере (нор-

мальной атмосфере), что соответствует давлению 0,1 МПа (101325 Па), температуре 293 К (20°C), относительному давлению водяных паров равным нулю.

Для ряда устройств очистки (например, центробежных фильтров) указывают диапазон расхода воздуха (максимальный и минимальный), при котором обеспечивают заданные параметры эффективности очистки.

Герметичность — это один из показателей качества устройства, который определяется значением утечки или падения давления воздуха в единицу времени из его полости в рабочем диапазоне давлений. Предельное значение утечки воздуха для фильтров-влагоотделителей регламентированы ГОСТ 18460.

Работоспособность – параметр, который для устройств очистки обычно характеризуется *термостойкостью* и *стойкостью к агрессивному воздействию*.

Термостойкость определяет диапазоны рабочей температуры окружающей среды и сжатого воздуха, при которых гарантируется нормальная работа устройства.

Стойкость к агрессивному воздействию — параметр определяющий возможность функционирования устройств в условиях загрязнённости окружающей среды парами кислот и щелочей, радиации, вибрации и др. воздействий.

Надёжность – это свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в установленных пределах промежутка времени (в часах) или наработки (в циклах). Параметры надёжности характеризуются безотказностью, долговечностью, сохраняемостью и ремонтпригодностью. Дополнительные сведения по этим параметрам приведены в ГОСТ 18460 и работах [6, 10, 11].

Для потребителей важно также знать параметр **срок службы элементов улавливания загрязнителей** (фильтроэлементов, адсорбентов, абсорбентов, электродов и др.) до их замены или регенерации. Критериями оценки этого параметра являются достижение максимально допустимых следующих величин: перепада давления или снижения эффективности очистки для фильтроэлементов; потери поглотительной способности загрязнений для адсорбентов и абсорбентов; потери эффективности очистки для электродов.

Ёмкость сбора жидкой влаги – параметр, определяющий максимально возможное накопление конденсата в резервуаре влагоотделителя до его сброса (в литрах или см³).

Пылеёмкость фильтра – параметр, который обычно используют для характеристики устройств очистки на всасывающей линии компрессора. Он определяется количеством твёрдых частиц, которые фильтр в состоянии поглотить в течение непрерывной работы между двумя очередными чистками.

Критерием пылеёмкости является величина удельного роста сопротивления

$$\varphi = \frac{h_2 - h_1}{z}, \quad (3.4)$$

где h_1 и h_2 – сопротивление фильтра до и после чистки, Па; $z = m/F$ – запылённость фильтра, кг/м², (m – пылеемкость фильтра, кг; F – площадь рабочей поверхности фильтра, м²). Значение пылеемкости фильтра определяется из выражения:

$$m = \frac{(h_2 - h_1) \cdot F}{\varphi}. \quad (3.5)$$

Коэффициент φ для кассетных фильтров принимают (0,2 – 0,3), а для самоочищающихся фильтров коэффициент φ и пылеемкость определяются размерами ванны.

Следует отметить, что кроме указанных выше основных параметров устройств очистки в практике используют и ряд других. Например, при наличии в устройствах электрических компонентов указывается *род, напряжение и сила тока*, для установок осушки с холодной регенерацией — *расход воздуха на регенерацию*, для автоматических конденсатоотводчиков – *периодичность и время сброса конденсата*.

Внимание! При отсутствии в каталогах и техдокументации данных параметров (например, ударопрочности, работоспособности в средах с наличием паров кислот и щелочей, радиации и вибрации), необходимых для определения возможности применения приобретаемого устройства очистки в конкретных условиях эксплуатации, их следует письменно запрашивать у поставщика или непосредственно у изготовителя.

3.2. Способы очистки воздуха от загрязнителей

В устройствах очистки удаление загрязнителей из воздуха обеспечивается силовыми полями (гравитационными, инерционными, электростатическими), фильтрацией, осушкой (теплообменной, адсорбционной, абсорбционной, мембранной) или их сочетанием.

Для примера на рис. 3.1 представлены упрощённые конструктивные схемы устройств очистки воздуха с использованием ряда указанных выше способов. Приведём основные сведения о способах очистки всасываемого и сжатого воздуха.

3.2.1. Способы очистки воздуха от твёрдых и жидких частиц

Гравитационный способ очистки (осаждение частиц за счёт сил гравитации) воздуха применяют в устройствах очистки на всасывающих линиях компрессорных станций, в воздухохраниках и ёмкостях сбора конденсата (для разделения масла и воды). Гравитация обычно сочетается с инерционными силами (в пылеулавливающих камерах и аэродинамических устройствах) и фильтрацией (в коалесцентных фильтрах для отвода жидкой влаги).

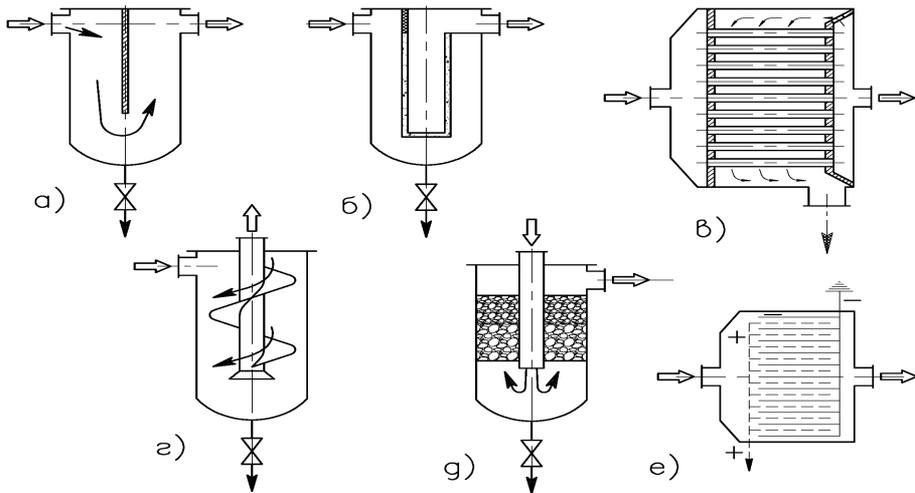


Рис. 3.1. Конструктивные схемы устройств очистки:

a – с ударом о перегородку; *б* – с фильтроэлементом; *в* – мембранных; *г* – центробежных; *д* – адсорбционных и абсорбционных; *е* – электростатических

Минимальный диаметр частиц (d_{min}), которые оседают из потока воздуха при отсутствии завихрений, может быть определён по формуле П. Уайта и С. Смита:

$$d_{min} = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta_{\delta} \cdot H \cdot v}{g \cdot L \cdot (\rho_{ч} - \rho_{св})}}, \quad (3.6)$$

где η_{δ} – коэффициент динамической вязкости воздуха; H и L – соответственно высота и длина камеры осаждения устройства; v – скорость потока воздуха в устройстве; g – ускорение свободного падения; $\rho_{ч}$ и $\rho_{св}$ – плотность соответственно частиц и сжатого воздуха.

На рис. 3.2 показана зависимость фракционной эффективности фильтров этого типа от диаметра твёрдых частиц.

Пропускная способность фильтров гравитационного типа зависит от конструктивных параметров, плотности и размера частиц, которые должны быть удалены из потока воздуха, а максимальный расход воздуха определяется по формуле:

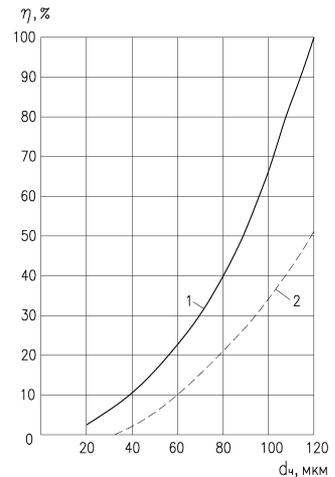


Рис. 3.2 Зависимость фракционной эффективности от диаметра частиц: 1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

$$Q_{max} = \frac{d_{min}^2 \cdot g \cdot L \cdot F \cdot (\rho_{ч} - \rho_{св})}{18 \cdot \eta_{\delta} \cdot H}, \quad (3.7)$$

где F – площадь сечения потока сжатого воздуха в рабочей зоне осаждения частиц устройства. Для обеспечения надёжного осаждения частиц заданного размера фактический расход рекомендуется принимать в (1,5 – 2) раза меньше расчётного. В воздухохраниках и пылевых камерах компрессорных станций обычно достигается очистка от частиц размерами более (40 – 60) мкм, а их эффективность в десятки раз ниже инерционных при одинаковых габаритных размерах. При прикидочных расчётах гидравлическое сопротивление указанных выше гравитационных устройств очистки принимают равным сопротивлению эквивалентного ему по длине подводящего трубопровода.

Техническое обслуживание устройств этого типа заключается в периодической промывке, а срок службы определяется физическим износом. Применение гравитационных устройств ограничено из-за больших габаритов и жёстких требований к конструкции, исключающей завихрения и неравномерность скорости воздуха в зоне осаждения.

Инерционный способ очистки воздуха от частиц основан на использовании центробежных, аэродинамических и ударов о перегородку сил или их сочетаний. Эффективность удаления твёрдых и жидких частиц в них (40 – 98)%, в зависимости от вида силы, конструктивного исполнения, расхода воздуха и дисперсности загрязнителей.

Устройства очистки центробежного типа (далее – *центробежные фильтры*) нашли широкое применение в промышленности. Очистка сжатого воздуха в них происходит за счёт центробежных сил, возникающих при придании потоку воздуха направленного вниз вращательного движения (рис. 3.1, 2).

Современные конструкции фильтров этого типа, при работе в рекомендуемом диапазоне расхода, обеспечивают достаточно высокую эффективность очистки. Так, очистка от твёрдых частиц менее 10 мкм – (60 – 80)%; свыше 10 до 20 мкм – (80 – 90)%; свыше 20 до 40 мкм – (90 – 95)%; свыше 40 мкм – (95 – 99)% по массе.

На рис. 3.3 представлена кривая фракционной эффективности фильтров этого типа. Зона А указывает область

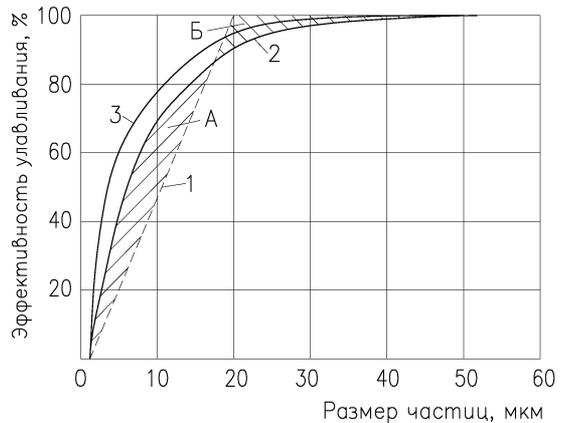


Рис. 3.3. Кривые эффективности центробежных фильтров-влагоотделителей:

1 – теоретическая без фильтроэлемента;
2 и 3 – экспериментальная без и с фильтроэлементом.

частиц загрязнителя, которые теоретически должны были пройти через зону отделения на выход, но улавливаются вследствие коагуляции и столкновения с крупными частицами. Зона Б – область частиц, которые по теоретическим расчётам удаляются из потока, но из-за турбулентности срываются со стенок и уносятся потоком к выходу. Наличие влаги в сжатом воздухе повышает эффективность удаления твёрдых частиц благодаря усилению коагуляции в зоне А и уменьшению срыва частиц в зоне Б, что позволяет в магистральных фильтрах обходиться без фильтроэлемента. Это значительно повышает параметры их надёжности, уменьшает гидравлическое сопротивление, стоимость и эксплуатационные затраты.

Для повышения эффективности улавливания центробежными фильтрами аэрозолей влаги с размерами менее 50 мкм (туман и микротуман) их оснащают металлокерамическим фильтроэлементом, который укрупняет аэрозоли влаги на входе в зону их отделения, повышая коэффициент очистки, но гидравлическое сопротивление фильтра при этом возрастает.

Центробежные фильтры, предназначенные для установки возле потребителя, имеют фильтроэлемент, предотвращающий проскок твёрдых частиц к выходному отверстию.

Эффективность этих фильтров снижается при работе вне пределов рекомендуемого диапазона расхода воздуха. При выходе за нижний предел – из-за уменьшения центробежной силы, за верхний – из-за увеличения турбулентности потока в зоне отделения.

Способ очистки с использованием аэродинамических сил нашёл применение в устройствах на линии всасывания компрессорных станций для предварительной очистки воздуха от твёрдых частиц. Их стоимость, эффективность и гидравлическое сопротивление выше, чем пылевых камер. Для очистки сжатого воздуха эти устройства не применяются.

Способ очистки ударом потока воздуха в перегородку (рис. 3.1, а) обычно используется в масловодоотделителях и воздухохорониках компрессорных станций в сочетании с гравитационным способом. Их эффективность зависит от конструктивного исполнения, расхода воздуха, дисперсности частиц загрязнителя и обычно не превышает 60%. Достоинствами устройств этого типа являются: низкие стоимость и затраты на техобслуживание, относительно небольшое гидравлическое сопротивление и большой срок службы.

Электростатический способ очистки воздуха основан на использовании сил электрического притяжения (рис. 3.1, е). Фильтры этого типа имеют зону ионизации, где твёрдые частицы получают заряд, сталкиваясь с ионами, потоки которых образуют проволочные электроды, и зону осаждения заряженных твёрдых частиц на пластины симметрично расположенных электродов под действием кулоновых электрических сил.

Теоретическое определение эффективности этих фильтров трудоёмко и может при-

вести к большим погрешностям, ввиду чего на практике для решения этой задачи обычно используют экспериментальные данные. Их пропускная способность лимитируется скоростью потока воздуха в зоне осаждения (0,5 – 2) м/с, её находят по формуле:

$$Q_{\max} \approx 60 \cdot v \cdot F \cdot p_m, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (3.8)$$

где v – скорость потока воздуха в устройстве, м/с; F – площадь поперечного сечения зоны осаждения, м²; p_m – абсолютное значение давления воздуха, бар.

Эти фильтры эффективны для очистки сжатого воздуха от твёрдых частиц с размером до 0,01 мкм при низком гидравлическом сопротивлении (до 50 мм вод. ст.) и имеют высокую термостойкость. К их недостаткам относятся: большие габариты из-за малых скоростей потока воздуха; возможность образования озона в опасных для здоровья концентрациях; пропуск токсичных летучих загрязнителей (например, формальдегида и окислов азота) и др. загрязнителей с высоким электрическим сопротивлением; необходимость частой очистки электродов. Из-за указанных недостатков эти фильтры не нашли применения в пневмосистемах предприятий (иногда их используют для очистки небольших объёмов сжатого воздуха от определённого вида загрязнителей).

Способ очистки фильтрацией. При этом способе (рис. 3.1, б) очистка воздуха происходит благодаря взаимодействию частиц загрязнителей с пористой перегородкой при прохождении через неё потока воздуха (краткий термин – *процесс фильтрации*).

Роль пористой перегородки выполняют элементы с наличием пористого фильтрующего материала (принят термин — *фильтроэлементы*). Их принято подразделять на два вида: *поверхностные*, в которых твёрдые частицы задерживаются на поверхности фильтрующего материала за счёт прямого контакта (удара), и *глубинные* (другой термин – *объёмные*), в которых крупные твёрдые частицы остаются на поверхности фильтроэлемента за счёт контакта, а попадающие вместе с воздухом в толщу фильтроэлемента мелкие частицы (более 0,3 мкм) задерживаются в изгибах каналов, субмикронные частицы (менее 0,3 мкм) благодаря броуновскому молекулярному движению в потоках воздуха соприкасаются и сцепляются с поверхностью каналов фильтрующего материала.

Поверхностные фильтроэлементы изготавливают из сетки, одного слоя тонкой бумаги и ткани, а объёмные – из картона, пластика, металлокерамики, керамики, фетра, войлока, нескольких слоёв волокнистых или поверхностных материалов.

Снижение сопротивления в фильтрах этого типа достигается увеличением фильтрующей поверхности (например, путём изготовления гофрированных фильтроэлементов).

Следует отметить, что фильтроэлементы глубинного вида с размером пор ≤ 3 мкм при относительно низких скоростях потока воздуха могут применяться для удаления аэрозолей масла и воды (тумана и микротумана) благодаря процессу укрупнения аэрозолей при соприкосновении с поверхностью фильтрующего материала и образованию

крупных капель или жидкой плёнки (термин *коалесценция* – процесс коагуляции, обусловленный действием сил межмолекулярного притяжения). Собранный при этом жидкая влага удаляется из фильтроэлемента в ёмкость для сбора конденсата под действием гравитационных сил. Эффективность коагуляции жидких аэрозолей повышается при обработке фильтроматериалов кремнийорганическими жидкостями (гидрофобизации), что снижает срыв с поверхности и унос осаждённой жидкости потоком воздуха.

Наибольшее применение в фильтрах для очистки сжатого воздуха получили металлокерамические, керамические и волокнистые фильтроэлементы.

Устройства с фильтроэлементами из металлической проволочной сетки, как правило, применяются для очистки воздуха на линии всасывания компрессоров и реже – для предварительной очистки больших расходов сжатого воздуха. Их изготавливают припайкой к каркасу тканой латунной сетки из проволок круглого сечения. Для уменьшения размера ячеек в свету, улучшения фиксации и установки рядов проволок относительно друг друга тканую сетку обычно прокатывают. Имеются исполнения фильтроэлементов с двумя и тремя слоями сеток, что повышает эффективность очистки, но сопротивление возрастает в разы пропорционально количеству слоёв сеток. Параметры сеток, наиболее часто применяемых в фильтрах для очистки воздуха, даны в ГОСТ 6613.

Номинальная толщина фильтрации – (15 – 200) мкм. Эффективность очистки от частиц номинального размера – (70 – 95)%. Пропускная способность этих фильтроэлементов зависит от живого (проходного) сечения на единицу его поверхности, которое выражается коэффициентом ($k_{жс}$):

$$k_{жс} = \frac{F_o}{F_c} = \left(\frac{a}{a + d_{пр}} \right)^2, \quad (3.9)$$

где F_o и F_c – соответственно площадь сечения проходных ячеек и общая площадь сетки; a – размер стороны ячейки в свету; $d_{пр}$ – диаметр проволоки сетки.

Фильтроэлементы металлокерамические. Фильтроэлементы этого вида практически полностью вытеснили сетчатые в современных фильтрах, что объясняется их прочностью, температуростойкостью в широком диапазоне, однородностью пор, возможностью получения элементов любой нужной формы и хорошей технологичностью обработки. Как правило, номинальная толщина фильтрации их – (3 – 100) мкм. Эффективность очистки от частиц номинального размера – (95 – 100)%. Пропускная способность фильтров этого типа лимитируется гидравлическим сопротивлением и снижением эффективности очистки из-за высокой скорости потока воздуха (явление продувки). Рекомендуемая скорость потока при прохождении фильтроэлемента обычно не превышает (0,5 – 2) м/с. При этом гидравлическое сопротивление серийных фильтров с толщиной фильтрации: (40 – 80) мкм в среднем составляет $\approx 0,02$ МПа, (15 – 25) мкм –

(0,03 – 0,05) МПа, (5 – 10) мкм — (0,06 – 0,08) МПа.

Основным преимуществом металлокерамических фильтров по сравнению с бумажными, пластиковыми и тканевыми является лучшая восстанавливаемость пропускной способности путём очистки от загрязнителей обратным потоком воздуха или химическим растворителем, либо прокаливанием фильтроэлемента в потоке горячего газа.

Фильтроэлементы керамические. Этот вид фильтроэлементов применяется гораздо реже металлокерамических. Обычно их используют для очистки сжатого воздуха с высокой температурой (например, в линии за масловодоотделителем в компрессорной) или при наличии в сжатом воздухе аэрозолей кислот и щелочей. Параметры керамических фильтроэлементов (номинальная толщина фильтрации, пропускная способность, гидравлическое сопротивление и др.) практически не отличаются от металлокерамических, но они более стойки к температурному и кислотно-щелочному воздействию.

Фильтроэлементы из волокнистых материалов применяют в современных устройствах тонкой очистки сжатого воздуха. Их изготавливают из бумаги, фетра, войлока, тонкого и ультратонкого волокна, а также других видов волокнистых материалов.

Эффективность очистки фильтроэлементов из волокнистых материалов зависит от толщины волокон, глубины слоя, плотности и равномерности укладки слоя (слоёв). Так, фильтроэлементы из фетра, войлока, бумаги с различными пропитками и ряд других материалов из-за наличия неоднородности пор пропускают (20 – 40)% частиц с размерами, соответствующими средней тонкости фильтрации (см. рис. 3.4) [11, 23].

Скорость воздуха при фильтрации находится в диапазоне (0,05 – 1,0) м/с и зависит от применяемого фильтрующего материала, вида и содержания загрязнителей на входе и других факторов. Обычно изготовители указывают расход воздуха через фильтр, при котором обеспечивается паспортная эффективность очистки.

При высоком содержании загрязнителей на входе фильтроэлементы из волокнистых материалов быстро засоряются, их эффективность снижается, ввиду чего перед ними в зависимости от тонкости фильтрации на выходе рекомендуется установка фильтров с определённой степенью очистки (от грубой до тонкой) и осушителей. Особенно опасна для фильтроэлементов этого типа высокая концентрация твёрдых частиц и влаги в жидкой фазе, так как уловленные твёрдые частицы, смоченные влагой (осо-

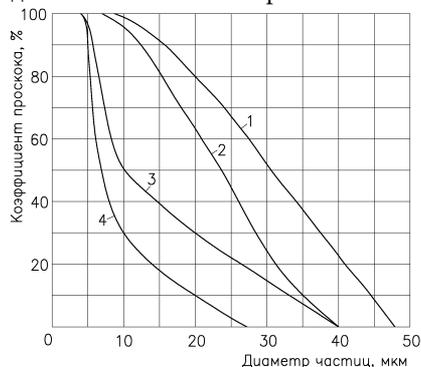


Рис. 3.4. Зависимость коэффициента проскока от диаметра частиц: 1) – хлопчатобумажная ткань; 2) – фетр; 3) – бумага с резиновой пропиткой

бенно маслом), быстро выводят их из строя.

Глубинные фильтроэлементы из пластика обычно используют для очистки от твёрдых частиц с номинальным размером (5 – 40) мкм. Их эффективностью близка к 100%, а недостатки: плохая регенерация, относительно малая прочности и термостойкость.

Глубинные бумажные фильтроэлементы применяются для очистки сжатого воздуха от твёрдых, воды и масла частиц. Эффективность очистки масляного тумана (размер частиц до 5 мкм) в современных конструкциях составляет (95 – 99)%. В исполнении с пропиткой дезинфицирующими составами они могут быть применены в стерильных фильтрах. Их достоинства – относительно небольшие стоимость и сопротивление, а недостатки – малая прочность и срок службы.

Тканевые фильтроэлементы глубинного вида обычно изготавливают с размерами ячеек (1 – 20) мкм. По сравнению с бумажными они более прочны, но дороже. Область их применения – фильтры на линии всасывания компрессорных станций.

Фильтроэлементы из войлока и фетра обычно применяют в устройствах очистки мелкосерийного и индивидуального производства. Эффективность очистки воздуха от капель масла войлочных фильтров можно ориентировочно оценить по следующим данным. При скорости фильтрации $\leq 0,07$ м/с эффективность очистки фильтроэлемента толщиной 12 мм составляет примерно 80%, а при прохождении потока воздуха через 6 последовательно установленных таких фильтроэлементов – $>99\%$. Эффективность очистки фильтроэлементов из фетра от твёрдых частиц и крупных капель масла несколько выше.

Фильтроэлементы из тонкого и ультратонкого стекло- и боросиликатного волокна получили наиболее широкое применение для высокоэффективной очистки сжатого воздуха. Так, в отечественной практике волокнистые материалы ФПП и ФПА применяются не один десяток лет. Они устойчивы к влаге (гидрофобны), допускают рабочую температуру воздуха от 40 до 150°C (в зависимости от вида материала), имеют высокую эффективность удаления аэрозоль и субмикронных частиц (свыше 99,9% при испытаниях стандартным масляным туманом с размером частиц 0,3 мкм). Отметим, что масляные частицы с размерами (0,1 – 0,5) мкм, являются наиболее проникающими через фильтрующие среды. Широкое применение для тонкой очистки сжатого воздуха получили также элементы из микрофибры с эффективностью улавливания частиц размером 0,01 мкм от 99,9 до 99,99999%, что обеспечивает остаточное содержание масла от 0,1 до 0,01 мг/м³. Фильтроэлементы этого вида обычно используют на последней ступени очистки после фильтров предварительной очистки с максимально возможной низкой температурой сжатого воздуха на входе.

3.2.2. Способы очистки от паров воды и масла

Для удаления **паров воды и масел** (*осушки сжатого воздуха*) применяют способы: теплообменный, адсорбцию, абсорбцию, компрессионный, разделительный (мембранный) или их сочетания. Рассмотрим эти способы осушки.

Теплообменный способ. Осушка сжатого воздуха при этом способе производится путём его охлаждения с удалением жидкой фазы или подогрева сжатого воздуха.

Осушка сжатого воздуха охлаждением. При охлаждении сжатого воздуха с помощью конечных холодильников или теплообменных холодильных установок он становится насыщенным, и часть паров влаги конденсируется. Количество выпавшего конденсата равно разности между действительным содержанием влаги в воздухе и содержанием, соответствующим насыщению воздуха при данной температуре. Выпавший конденсат отделяется от потока воздуха и сбрасывается в дренаж. Степень осушки сжатого воздуха зависит от температуры охлаждения воздуха. В качестве охлаждающей среды обычно используют воздух, воду, фреон-12, аммиак, хлорметил, углекислоты и др. Температура сжатого воздуха на выходе из холодильных установок с водяным охлаждением примерно на (6 – 10)°С выше температуры охлаждающей воды. Для охлаждения сжатого воздуха летом до точки росы (18 - 20)°С необходима вода с температурой не выше 10°С, что можно достичь только подачей её из артезианской скважины. В установках трубчатого холодильника с воздушным охлаждением точка росы воздуха на выходе примерно на ≈16°С выше охлаждающего потока воздуха, а в современных конструкциях осушителей этого типа она выше только на (6 – 10)°С. Минимальную точку росы сжатого воздуха на выходе установок с использованием хладагентов (фреона, аммиака и др.) можно обеспечить в пределах (2 – 3)°С.

Осушка сжатого воздуха подогревом. Одним из способов осушки является подогрев сжатого воздуха до температуры, при которой не происходит конденсации влаги. Подогрев не уменьшает влагосодержание, но понижает относительную влажность. Так, повышение температуры воздуха от 20 до 30°С приводит к понижению его влажности со 100% до 54%. Подогрев воздуха осуществляют подогревающими установками или прокладкой пневмолинии рядом с паропроводами. Последнее используется обычно для предотвращения конденсации паров воды и обмерзания проходных сечений магистральных линий. В производственных процессах этот способ осушки воздуха применяется для пневматических молотов, песко- и дробеструйных аппаратов, мартеновских печей, сушки изделий путём обдувки и др. Для повышения эффективности этот способ часто применяют в сочетании с предварительным охлаждением воздуха, отделением и удалением жидкой влаги.

Адсорбционный способ осушки (конструктивная схема устройства дана на

рис. 3.1, д) основан на свойстве ряда пористых материалов избирательно концентрировать на своей развитой поверхности пары воды и масел, находящихся в потоке сжатого воздуха. Количество адсорбированного пара возрастает с понижением температуры и увеличением его концентрации в сжатом воздухе, что определяет такое важное свойство адсорбентов, как обратимость (регенерацию). Следовательно, адсорбенты обеспечивают полное или частичное удаление (десорбцию) водяных паров со своей поверхности при повышении температуры или снижении парциального давления водяного пара в газовой среде в слое адсорбента. Для осушки сжатого воздуха наиболее широкое применение получили следующие адсорбенты: силикагели; активированная окись алюминия и цеолиты (молекулярные сита). Они отличаются друг от друга влагоёмкостью и её зависимостью от температуры, глубиной осушки и механическими свойствами.

Влагоёмкость – предельное количество адсорбированной влаги на единицу массы адсорбента (указывается в процентах или граммах поглощённой влаги на 100 г адсорбента). В зависимости от условий поглощения различают статическую и динамическую влагоёмкость. Под статической влагоёмкостью понимают максимальное количество влаги, поглощённое из газа единицей массы адсорбента к моменту достижения полного насыщения адсорбента при данной температуре и концентрации влаги в осушаемом газе.

Под динамической влагоёмкостью понимают количество влаги, поглощённой единицей массы адсорбента в слое данной высоты из газового потока с определённым влагосодержанием при данной скорости и температуре газа до момента проскока влаги в нём при выходе из слоя адсорбента.

Поглотительная способность адсорбентов зависит от влажности и температуры сжатого воздуха и окружающей среды. Так, наибольшая эффективность силикагеля находится при относительной влажности сжатого воздуха 100% и температуре (30 – 35)°С, а зависимость его динамической поглотительной способности от температуры окружающей среды приведена на рис. 3.5.

Время с начала процесса поглощения до момента проскока влаги принято называть временем защитного действия адсорбента.

Важным свойством адсорбентов является их механическая прочность. Разрушение

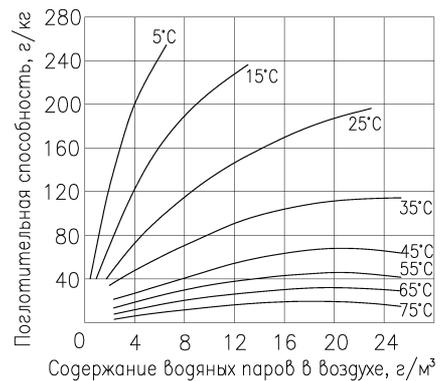


Рис. 3.5. Зависимость динамической поглотительной способности силикагеля от температуры окружающей среды

адсорбентов обуславливается следующими факторами: изменением температуры в процессе адсорбции и десорбции, наличием влаги и давлением лежащих выше слоёв адсорбента. Потери адсорбента от первоначального количества в результате разрушения за год, ориентировочно, составляют: активная окись алюминия, алюмогель, цеолиты марки NaA – (5 – 10)%; цеолиты марки CaA, Na X – (8 – 12)%; силикагели – (10 – 15)%.

Силикагели наиболее широко используются в установках осушки воздуха. В зависимости от размера диаметра пор их подразделяют на мелко- и крупнопористые. Мелкопористые обладают большей влагоёмкостью в области малых парциальных давлений, крупнопористые – в области высоких парциальных давлений. Предельное остаточное влагосодержание осушенного воздуха, обеспечиваемое силикагелями: крупнопористыми – до точки росы минус 30°C, мелкопористыми – минус 55°C. Недостаток силикагелей – невысокая механическая прочность и разрушение при наличии в потоке воздуха капельной влаги.

По параметрам пористой структуры и ряду других показателей алюмогель во многом аналогичен мелкопористым силикагелям. Степень осушки воздуха при применении этого адсорбента может достигать точки росы минус 60°C. Преимуществом этого адсорбента является высокая механическая прочность и устойчивость к воздействию капельной влаги. Для осушки сжатого воздуха рекомендуется использовать марки активной окиси алюминия с высокой насыпной массой и однородностью пористой структуры.

Наиболее глубокую осушку воздуха до точки росы - 60°C и выше обеспечивают цеолиты. Их поглотительная способность мало изменяется с повышением температуры и скорости прохождения воздуха, а эффективность высока даже при относительной влажности воздуха < 70%. Температура регенерации выше, чем силикагелей и алюмогеля, что увеличивает энергозатраты. Недостатком является и невысокая устойчивость к жидкой влаге. Основные показатели и свойства адсорбентов приведены в таблице 3.1 [11].

При выборе адсорбента исходят из требований степени осушки, температурных условий эксплуатации, стоимости, затрат на обслуживание и других факторов.

Наиболее целесообразна многослойная загрузка адсорберов несколькими адсорбентами. Первыми по течению воздуха засыпают адсорбенты с высокой устойчивостью к капельной влаге и большой влагоёмкостью при высокой относительной влажности сжатого воздуха (активная окись алюминия, крупнопористый силикагель), а в конце – адсорбенты с высокой влагоёмкостью в области малых парциальных давлений (мелкопористые силикагели, цеолиты). Отметим, что цеолиты способны поглощать пары масла.

Осушку сжатого воздуха от паров масел, как правило, производят адсорбционным способом. В качестве адсорбента используют активированный уголь, реже – активную

окись алюминия и силикагель. Активированные угли по сравнению с другими адсорбентами более эффективны и способны поглощать из воздуха масла до (20 – 50)% от собственной массы. Увеличение контакта сжатого воздуха с углём повышает степень удаления паров. Так, увеличение высоты слоя активированного угля в 3 раза повышает эффективность поглощения масла на (20 – 30)%. Однако при $\approx 45\%$ насыщении активиро-

Таблица 3.1

Наименование показателя	Силикагели	Активная окись алюминия	Цеолиты
Насыпная масса, кг/м ³	500 – 700	350 – 850	600 – 650
Размер зёрен, мм	3 – 7		2 – 4,5
Теплоёмкость, кДж/(кг·К)	0,92	0,84	0,8
Теплопроводность (30°С), кДж/(м·ч·К)	0,71	-	2,1
Теплота адсорбции паров воды, кДж/кг	2500		4200
Достигаемая точка росы (в практике), °С	минус (25 – 35)	минус (55 – 60)	минус 60 и выше
Динамическая влагоёмкость, %: в процессе эксплуатации; свежего адсорбента	5 – 8 18 – 21	4 – 6 13 – 15	8 – 16 -
Температура регенерации, °С: на входе в адсорбер; на выходе из адсорбера	180 – 220 80 – 140	230 – 280 100 – 150	320 – 370 120 – 200
Температуре сжатого воздуха и окружающей среды при работе, °С, не более	35	25	35 и выше
Влагоёмкость при парциальн. давлениях: низких; высоких	низкая высокая		высокая
Устойчивость: к капельной влаге, к кислым компонентам (СО ₂ , SO ₂ и др.)	низкая высокая	высокая низкая	низкая ограниченная
Механическая прочность	низкая	высокая	
Потери адсорбента, % от начал. засыпки	\approx (10 - 15)	\approx (5 - 12)	
Стоимость	относит. низкая		высокая

ванного угля влагой начинается вытеснение поглощённого масла в поток воздуха.

В короткоцикловых безнагревных установках насыщение адсорбентов до регенерации обычно не превышает (10 – 25)% массы адсорбента, поэтому они могут быть использованы для улавливания паров масла из насыщенного водяным паром воздуха. Эффективность очистки воздуха от паров масла в установках этого типа зависит от высоты слоя адсорбента, скорости прохождения воздуха через адсорбент, продолжительности регенерации и может достигать (90 – 98)%.

Способность адсорбентов поглощать пары воды снижается при загрязнении их мас-

лами и физическом износе из-за уменьшения гранулированной поверхности.

По способу регенерации адсорбента установки осушки изготавливают с горячей и холодной регенерацией. Установки первого типа имеют большую стоимость и габариты, а второго типа – дешевле, но расход воздуха на регенерацию составляет (12 – 20)%.

Как правило, адсорбционный способ используют для обеспечения минусовых значений точки росы сжатого воздуха (обычно до минус 20, 40 и 60°C и реже глубже).

Адсорбционный способ осушки сжатого воздуха (рис. 3.1, д) основан на химическом взаимодействии паров воды с твёрдыми или жидкими адсорбентами. Для примера в таблице 3.2 приведены характеристики ряда адсорбентов, используемых для осушки.

Таблица 3.2

Тип адсорбента	$V_{\text{ов}}/V_{\text{уов}}, \text{ м}^3/\text{м}^3$	Остаток водн. паров, г/м ³	Точка росы, °C
Медный купорос CuSO_4	36/50	2,3	-6
Хлористый кальций техн. безводный CaCl_2	115/150	1,25	-15,5
Хлорнокислый барий безводный $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$	26/36	0,82	-20
Едкий калий в прутках КОН	55/65	0,014	-56
Оксид бария	63/66	0,00065	-78
Примечание. $V_{\text{ов}}/V_{\text{уов}}$ – отношение часового объёма осушаемого воздуха к объёму осушителя			

Жидкие адсорбенты обычно впрыскивают в поток воздуха или пропускают через колонки, в которых адсорбирующая жидкость движется навстречу потоку воздуха. В качестве жидких адсорбентов в промышленности используют диэтиленгликоль или триэтиленгликоль. Твёрдые адсорбенты при насыщении влагой могут разжижаться (хлорид кальция, гидраты окисей щелочей и др.) или оставаться твёрдыми (безводный сульфат кальция, перхлорат магния и др.). Они могут быть восстанавливаемыми и невозстанавливаемыми. К основным недостаткам адсорбентов относятся: невозможность восстановления большей частью из них, что приводит к относительно высоким затратам на их приобретение; для восстанавливаемых – необходимость применения сложных и дорогих технологий регенерации; коррозионное воздействие на внутренние поверхности устройств; сложность регулирования работы; необходимость установки фильтров на входе и выходе (для улавливания частиц адсорбента). Применение адсорбентов для осушки сжатого воздуха обычно ограничено имеющимися опытом работы с ними химическими предприятиями и лабораториями. В настоящее время на рынке имеются устройства с твёрдыми адсорбентами, которые позволяют в ряде случаев (например, при эпизодическом потреблении небольших объёмов осушенного воздуха) снизить первоначальные и эксплуатационные затраты (требуется только периодическая добавка адсорбента и надёжный дренаж влаги) по сравнению с устройствами осушки других типов.

Расход адсорбента на осушку значителен. Так, один кг соли на основе NaCl способен поглотить не более (12 – 13) кг воды. Устройства осушки этого типа обычно применяют

для осушки сжатого воздуха в диапазоне от +10°C до минус (5 – 10)°C.

Компрессионный способ осушки сжатого воздуха основан на свойстве уменьшения относительной влажности сжатого воздуха при снижении его давления. Реализация этого способа осуществляется путём сжатия воздуха до давления, выше уровня, необходимого при его применении, с последующим охлаждением и отделением сконденсированной влаги. Затем расширением до требуемого давления. Основной недостаток этого способа – высокие энергопотери. Его применение обычно ограничено системами с небольшим эпизодическим расходом воздуха (например, в пневмосистемах высоковольтных электровыключателей, переключателей стрелок на железных дорогах и др.).

Пример 14. Определить температуру эксплуатации воздушных выключателей, исключающие конденсацию водяных паров в редуцированном воздухе, используемом для вентиляции полюсов высоковольтных выключателей. *Исходные данные:* абсолютное давление воздуха в сети до редуцирования 2,1 МПа, температура 5°C, а давление насыщенного пара составляет 0,0089 (см. приложение 2); избыточное давление в выключателях (после редуцирования) 0,02 МПа. Определим влагосодержание воздуха в сети при заданном давлении и температуре:

$$d = 622 \cdot 0,0089 / (21 - 0,0089) = 263 \text{ мг/кг}$$

При избыточном давлении воздуха 0,02 МПа такое влагосодержание соответствует температуре точки росы, примерно минус 31°C (см. приложение 3), т.е. эксплуатация при более высоких температурах окружающей среды исключает конденсацию водяных паров в выключателях.

Разделительный способ осушки основан на свойстве специального мембранного фильтра (рис. 3.1, в), состоящего из полых проницаемых для паров воды волокон, поглощать внутренней поверхностью пары воды из протекающего в них потока влажного сжатого воздуха и удалять их в атмосферу за счёт обтекания наружной поверхности волокон частью осушенного воздуха. Этот процесс происходит из-за разницы парциальных давлений водяного пара во влажном воздухе внутри волокон и обтекающем их снаружи осушенном воздухе. Устройства осушки этого типа обычно изготавливают на небольшие расходы и устанавливают непосредственно перед потребителем для обеспечения точки росы сжатого воздуха до минус 20°C (реже до минус 40°C). Осушку в них обеспечивают подачей на вход сжатого воздуха с высокой степенью очистки от жидкой влаги, твёрдых частиц и масла.

Комбинированные способы осушки воздуха осуществляются сочетанием двух или более способов осушки. Например, предварительная осушка сжатого воздуха в теплообменных установках с последующей осушкой в установках адсорбционного типа позволяет обеспечить точку росы воздуха до минус (5 - 10)°C, а сочетание установок типа "воздух-воздух" с адсорбционными может снизить энергозатраты на осушку в (1,5 – 2) раза. Применение осушителей разного типа с переключением их при изменении требований к степени осушки сжатого воздуха также значительно снижает энергозатраты.

Для снижения расхода осушенного воздуха, в ряде случаев (например, подачи воздуха в краскораспылители), применяют смешение осушенного и влажного (очищенного от капельной влаги) сжатого воздуха. Точку росы этой смеси можно найти по приложению 3, предварительно определив её влагосодержание (d_c) по выражению:

$$d_c = \frac{d_s \cdot m_s + d_o \cdot m_o}{m_s + m_o},$$

где d_s и d_o – влагосодержание соответственно влажного и осушенного воздуха; m_s и m_o – масса соответственно влажного и осушенного воздуха.

Пример 15. Определить точку росы смеси 1 кг влажного с температурой 15°C и 1,5 кг осушенного сжатого воздуха с точкой росы минус 20°C (избыточное давление влажного и осушенного воздуха 0,4 МПа). По приведённому выше выражению находим влагосодержание смеси:

$$d_c = (2162 \cdot 1 + 165,5 \cdot 1,5)/(1 + 1,5) = 941 \text{ мг/кг.}$$

Этому значению d_c при избыточном давлении 0,4 МПа соответствует точка росы 3°C.

3.2.3. Очистка от микробиологических организмов, запахов и газов

Очистка сжатого воздуха от микробиологических организмов, запахов и газов производится фильтрами: тонкой и ультратонкой очистки (размер задерживаемых частиц $\geq 0,01$ мкм); на основе активированного угля; специальными.

При использовании обычных фильтров для подачи стерильного воздуха применяют периодическую дезинфекцию их фильтроэлементов специальными составами, паром и горячим газом. Сведения об очистке сжатого воздуха фильтрацией и адсорбцией были описаны выше. Приведём краткие сведения о стерильных фильтрах и установках.

Стерильные фильтры и установки применяются для очистки воздуха от токсичных загрязнителей (микробов, аллергенов, дыма, аммиака и других химических веществ) с использованием следующих способов: *мощной ионизации (плазменные фильтры); ультрафиолетового облучения (ультрафиолетовые фильтры); биологически активных веществ (биофильтры); разложения загрязнителей до безвредных составляющих (фотокатализные и каталитические фильтры); специальных антитоксичных веществ (например, кахетиновые фильтры)*. Каждый из перечисленных выше стерильных фильтров и установок имеет свою рациональную область применения исходя из требований удаления или стерилизации конкретных видов загрязнителей, пропускной способности, стоимости, условий и временного интервала применения.

Например, в фотокаталитических фильтрах очистка сжатого воздуха от токсичных загрязнителей (вирусов, бактерий, токсичных и органических соединений) производится разложением и окислением их до воды и углекислого газа благодаря воздействию ультрафиолетового излучения. К их достоинствам следует отнести исчезновение орга-

нических загрязнителей (они не остаются в фильтре), а к недостаткам – значительные габариты (из-за большой поверхности фильтра) и мощное излучение (десятки ватт на 1 м² поверхности фильтра), что ограничивает использование для больших расходов воздуха. Они применяются в системах очистки воздуха в медицине, быту, биоинженерии, пищевом, фармацевтическом и др. производствах. Отметим, что определённый ассортимент стерильных фильтров на рынке СНГ предлагает компания Parker Hiross Zander.

В России ООО «Техэлектромонтаж-сервис» (г. Нижний Новгород) изготавливает типоразмерный ряд блоков химической очистки сжатого воздуха производительностью (1 – 50) м³/мин на давление 1,6 МПа, обеспечивающих очистку от масел до остаточного содержания 0,001 мг/м³. Это достигается применением специального катализатора, который разлагает масла и др. углеводы на воду и СО₂.

Из-за специфичности проблемы стерильной очистки сжатого воздуха, относительной ограниченности круга специалистов предприятий, интересующихся этим видом очистки, и необходимостью сокращения объёма книги, в неё не включены сведения по стерильным устройствам очистки и их выбору.

Технические характеристики, рекомендации по применению и другие сведения по стерильным фильтрам и установкам для очистки сжатого воздуха можно найти в каталогах, интернете и специальной литературе.

3.3. Типовые конструкции и параметры устройств очистки воздуха

В зависимости от функционального назначения, используемые в системах очистки воздуха средства подразделяют на следующие: устройства очистки всасываемого и сжатого воздуха; устройства удаления, сбора и разделения загрязнителей; датчики, приборы, устройства контроля и управления процессом очистки параметрами воздуха.

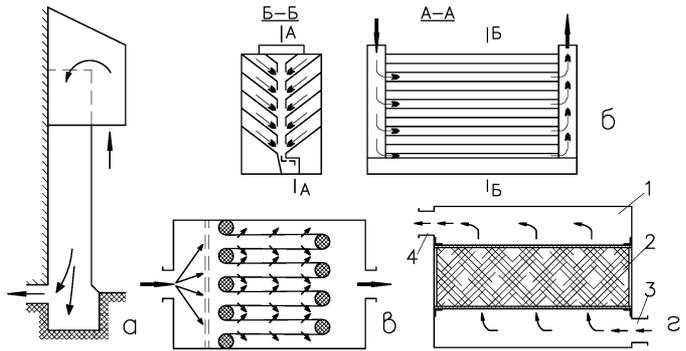
Из-за большого разнообразия этих устройств, ниже приведены сведения о наиболее распространённых в промышленности конструкциях. Подробную информацию об устройствах этого вида можно найти в каталогах, проспектах, интернете и работах [6, 9].

3.3.1. Устройства очистки на линии всасывания воздуха

Очистка в этих устройствах происходит за счёт действия гравитационных и инерционных сил (шахтные пылеуловители, гравитационные камеры, жалюзийные фильтры, циклоны и др.), фильтрации и масляных фильтров.

Шахтные пылеуловители (рис. 3.6, а) улавливают твёрдые частицы размером более (150 – 200) мкм. В зависимости от концентрации и дисперсности твёрдых частиц, их эффективность очистки не превышает (20 – 60)%, а по частицам с малым удельным весом (например, волокнистым) ещё ниже. Эти устройства устанавливают у наружной стены

компрессорной с расположением всасывающего окна на высоте (3 – 4) м, где воздух меньше загрязнён. Над окном монтируют навес для защиты от попадания влаги при осадках и для отделения крупных твёрдых частиц из всасываемого воздуха за счёт двойного поворота. Воздух, пройдя вертикальный ка-



фильтр, в) – тканевый фильтр, г) – масляный фильтр с одной нал, поворачивает в горизонтальный, а крупные

твёрдые частицы по инерции падают в пылесборник, из которого их удаляют. Достоинства этих устройств: простота и высокая надёжность; низкие сопротивление, стоимость и трудоёмкость обслуживания. Недостатки: большие габариты; малая эффективность удаления мелких частиц и волокон; снижение эффективности очистки при пульсации всасывания, что ограничивает их применение для поршневых компрессоров.

Гравитационный фильтр (камера Виста, рис. 3.6, в). Всасываемый воздух со скоростью менее 1 м/сек проходит между полками, расположенными равномерно по всему сечению камеры на расстоянии менее 20 см друг от друга. Твёрдые частицы, проходя с потоком воздуха между полками, силой тяжести опускаются вниз и, входя в соприкосновение с их поверхностью, падают в пылесборник. Фильтры просты, их сопротивление мало и составляет около 50 Па (5 мм вод. ст.), улавливают твёрдые частицы с размером более 20 мкм, однако эффективность по частицам с малым удельным весом хуже.

Имеются конструкции фильтров с очисткой загрязнителей за счёт действия *центробежных сил (циклоны)* и инерционной силы при резком повороте потока (*жалюзийные* и другие устройства этого типа). Эти устройства компактны, имеют хорошую среднюю очистку (коэффициент очистки до 70%). Они не обеспечивают тонкую очистку и имеют большое сопротивление до 400 Па (40 мм вод. ст.), последнее определяет рациональность их использование только в линиях всасывания с наддувом.

Установки влажного пылеудаления путём орошения потока всасываемого воздуха имеют высокую эффективность очистки, но из-за большого сопротивления и увеличения энергозатрат на орошение и принудительный наддув, их применяют обычно при необходимости сочетания охлаждения всасываемого воздуха с его очисткой от мелких

твёрдых частиц.

Фильтры металлические сетчатые применяются обычно для фильтрации всасываемого воздуха для компрессоров небольшой производительности и защиты от засорения всасывающих линий компрессорных станций.

Фильтры тканевые выпускаются с ручной и автоматической очисткой фильтроэлементов (плоской или цилиндрической формы), изготавливаемых из войлока, фетра, фланели, бязи, миткаля, сукна и других материалов. Они задерживают крупные и мелкие частицы до 3 мкм и при скорости воздуха (0,5 – 0,6) м/с обеспечивают пропускную способность: плоские – около 500 м³/м², а цилиндрические – до 300 м³/м². Рекомендуемое предельное значение их сопротивления – 100 Па (10 мм вод. ст.). Засорение фильтров повышает их сопротивление, снижая производительность компрессора. По этой причине фильтры этого типа без автоматической очистки рекомендуется выбирать из расчёта обеспечения необходимой пропускной способности при скорости прохождения воздуха через ткань 0,5 м/с и сопротивления при принятом регламенте техобслуживания до 100 Па. С целью уменьшения их габаритов фильтрующую ткань размещают в корпусе зигзагообразно (рис. 3.6, в.) или в форме рукава.

При эксплуатации фильтрующую ткань необходимо очищать от пыли с периодичностью, зависящей от концентрации и дисперсности пыли в месте всасывания.

Контроль степени засорения фильтра производят манометрами низкого давления.

Фильтры этого типа устанавливают внутри камеры всасывания или вне здания с обеспечением надёжной защиты от попадания влаги. Основные недостатки этих фильтров: быстрое засорение, требующее проведение частой промывки фильтроэлементов в специальных растворах (продувка мало эффективна) или замены; низкая прочность и чувствительность ткани к наличию масел и воды; большие габариты и стоимость при оснащении автоматическими устройствами очистки.

Масляные фильтры применяются для компрессорных установок любой производительности при высокой концентрации загрязнителей во всасываемом воздухе. Они улавливают загрязнения на покрытой маслом поверхности фильтрующих элементов, очистка или замена которых производится вручную или автоматически. Фильтры с ручным способом нанесения масла на фильтрующие элементы просты и изготавливаются в кассетном или трубчатом исполнении. Наиболее распространены кассетные фильтры, представляющие собой набор кассет прямоугольной формы площадью не более 500х500 мм и высотой от 50 до 100 мм. Каждая кассета с обеих сторон имеет редкую жёсткую сетку из литого или перфорированного металла. Пространство между сетками заполняется алюминиевыми или латунными трубками длиной (10 – 20) мм, диаметром (10 – 15) мм с толщиной стенки до 1 мм (иногда применяют крупную металлическую

стружку или канитель). Скорость прохождения воздуха через фильтр обычно не превышает (0,8 – 0,9) м/с. Фракционная эффективность кассетных фильтров зависит от вида набивки и составляет: частиц до 5 мкм – (50 – 70)%; свыше 5 до 10 мкм – (65 – 90)%. Их размещают вне или внутри компрессорной в зависимости от условий эксплуатации и наличия площадей.

В последнее время широкое применение получают различные конструкции самоочищающихся фильтров. Конструкции самоочищающихся автоматических фильтров значительно сложнее, смачивание фильтроэлементов в них производится маслом, захватываемым потоком воздуха из ванны (фильтры с масляной ванной) или автоматическим окунанием их в ванну (например, в фильтрах самоочищающихся со шторками или сетчатой панелью). Фильтроэлементы изготавливают из витой стальной проволоки.

В фильтре с масляной ванной поток воздуха сначала проходит через масло в ванной, где отделяется значительная часть загрязнителей. Далее воздух с остатками загрязнителей и унесёнными капельками масла проходит через фильтрующий элемент, задерживающий загрязнители и масло, которое по мере накопления в нём стекает в ванну. Загрязнённое масло периодически заменяют. Коэффициент очистки фильтров зависит от дисперсности и концентрации твёрдых частиц и составляет (80 – 98)%, пылеемкость – 50 кг, сопротивление – 140 Па, пропускная способность – (6 – 7) м³/с.

Для более тонкой очистки всасываемого воздуха от частиц диаметром более 2 мкм применяют масляные фильтры системы Е.В. Рекк, содержащие фильтрующие панели, собранные из ячеек размером 520x520x70 мм (малое исполнение) и 520x520x120 мм (большое исполнение). Малое исполнение ячеек применяется для очистки воздуха с концентрацией загрязнителей до 5 мг, а большое – до 20 мг на 1 м³. Ячейка состоит из металлической коробки, заполненной несколькими рядами гофрированных стальных сеток с расположением гофр смежных сеток перпендикулярно друг другу. Укладку сеток в коробку производят с последовательным уменьшением размера отверстий в них в направлении движения потока воздуха. Ячейки закрепляются с помощью защёлок в установочных рамках с войлочными прокладками для устранения просачивания загрязнённого воздуха между поверхностями задних стенок коробок и прилегающими к ним стенками установочных рамок, которые скрепляются между собой заклёпками. Фильтрующие панели монтируют в проёмах всасывающих каналов на пути движения потока воздуха. Исходя из требований жёсткости, в панели не допускается более 16 ячеек (с размещением по сторонам 4x4) малого исполнения или 30 ячеек (6x5) большого исполнения. Изготавливают два варианта фильтра: вертикальный плоский фильтр (ВФ) с количеством ячеек 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 12, 16, 20 и зигзагообразный фильтр (ЗФ) с 8, 12, 16, 18, 24 и 32 ячейками. Их достоинства: высокая степень очистки, относительно не-

большие масса и сопротивление. Периодичность очистки ячеек зависит от дисперсности и концентрации загрязнителей всасываемого воздуха. Так, при концентрации загрязнителей до 15 мг/м^3 очистку необходимо проводить через (5 – 7) дней, а при (60 – 80) мг/м^3 – через ≈ 16 ч. Лучшим способом определения периодичности очистки является контроль сопротивления ячеек при эксплуатации. Если оно в два раза выше, чем у чистых, их необходимо очищать.

Для компрессорных станций и установок производительностью до $(15 - 18) \text{ м}^3/\text{мин}$ используют фильтры с одной (рис. 3.6, з) или двумя ячейками с наполнением кольцами Рашига. Фильтры размещают вертикально или горизонтально перпендикулярно движению потока воздуха.

Фильтрокамеры. Эти устройства состоят из камеры Виста на первой ступени очистки и фильтра тонкой очистки на второй. Они применяются для одного или нескольких компрессоров, однако для повышения удобства обслуживания и обеспечения требований, предъявляемых к всасывающим воздухопроводам, их рекомендуется устанавливать отдельно на каждый компрессор. Применение одной камеры для нескольких компрессоров целесообразно в системах с наддувом на всасывании при условии наличия устройств отключения всасывающего воздухопровода каждого из компрессоров при ремонте.

3.3.2. Устройства очистки сжатого воздуха

Устройства очистки сжатого воздуха, в зависимости от вида и агрегатного состояния загрязнителей, принято разделять на следующие: от твёрдых (в т.ч. микробиологических) и жидких частиц; от паров воды и масла (осушка воздуха); токсичных загрязнителей, включая газы.

3.3.2.1. Устройства очистки сжатого воздуха от твёрдых и жидких частиц.

Наибольшее применение получили устройства очистки (далее – фильтры) с удалением частиц загрязнителей из сжатого воздуха действием центробежных сил, фильтрации или их сочетания. Фильтры условно подразделяют: по месту установки в сети на *магистральные* с большой пропускной способностью и *индивидуальные*, устанавливаемые возле потребителей, с условным проходом до (40 – 50) мм; по тонкости фильтрации на *грубой* очистки с размером улавливаемых частиц загрязнителей от 40 до 100 мкм, *средней* – от 5 до 25 мкм, *тонкой* – от 0,1 до 3 мкм и *ультратонкой* – $\geq 0,01$ мкм. Приведённое выше разделение фильтров не регламентировано стандартами и по этим признакам у ряда изготовителей и в литературе оно может отличаться (например, фирма Parker и компания Dali относят к грубым фильтры с тонкостью фильтрации ≥ 3 мкм).

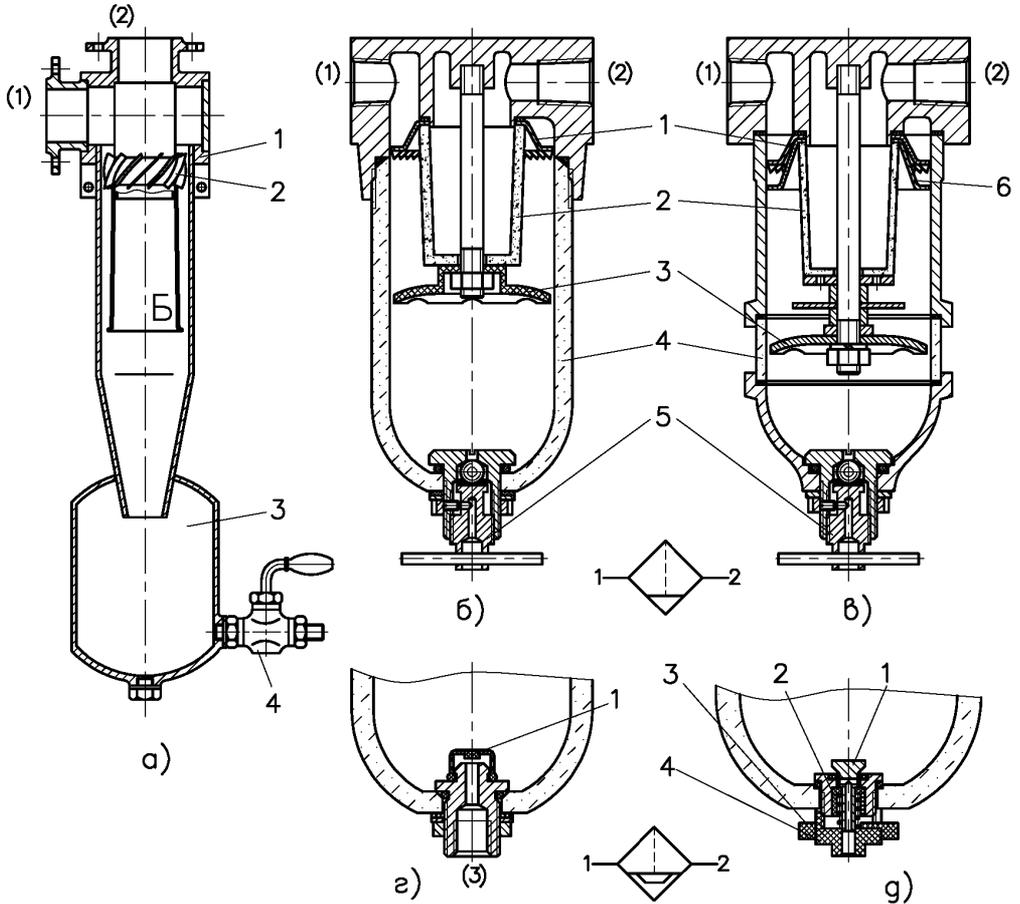


Рис. 3.7. Фильтры по ГОСТ 17737: а – тип 1; б и в – тип 2

Рассмотрим типовые конструкции фильтров, наиболее широко используемых в отечественной и зарубежной практике.

Фильтры центробежного типа. На рис. 3.7, а, б, в представлены конструкции фильтров-влажнотделителей по ГОСТ 17737, предназначенных для очистки сжатого воздуха от твёрдых и жидких частиц. Фильтры типа 1 по этому стандарту (рис. 3.7, а) на давление 1,0 МПа с условным проходом $d_y = (32 - 250)$ мм, эффективностью удаления жидкой влаги не менее 80%, ёмкостью резервуара для сбора загрязнителей 4, 6,3 и 10 л предназначены для установки в магистральных и разводящих пневмолиниях. Подводимый к входному отверстию (1) сжатый воздух попадает в крыльчатку 2 и получает нисходящее вращательное движение. Загрязнители (жидкая влага и твёрдые частицы), находящиеся в сжатом воздухе, под действием центробежных сил отбрасываются на цилиндрическую часть корпуса 1 и опускаются в резервуар 3 сбора загрязнителей. Очищенный воздух поступает к выходному отверстию (2) по каналу В. Отсутствие фильтро-

элемента обеспечивает значительное снижение гидравлического сопротивления и длительную эксплуатацию с минимальными затратами на техническое обслуживание. Сброс конденсата производится вручную при помощи крана 4 или подсоединением к нему автоматического конденсатоотводчика. Пропускная способность (K_v) и максимальный расход (Q_{max}) этих фильтров (изготовитель ООО «Курганхиммаш») приведены в таблице.

d_v , мм	32	40	50	63	80	100	160	200	250
K_v , м ³ /ч	22	31	44	61	88	128	326	509	815
Q_{max} , м ³ /мин	6,3	10	16	25	40	63	160	250	400

В последние годы на рынке СНГ появились центробежные фильтры на большие расходы, благодаря ряду усовершенствований более эффективные по сравнению с фильтрами типа 1 (например, фильтры Parker-Zander улавливают более 92% капельной влаги в диапазоне расхода от 25 до 125% от номинального).

В России магистральные фильтры-влагоотделители на большие расходы изготавливает ООО «ЭНСИ» (таблица 3.3) и ООО «Курганхиммаш».

Таблица 3.3

Наименование параметра	MBO - 150	MBO - 200	MBO - 300	MBO - 500
Диаметр условного прохода, мм	150	200	300	500
Степень влагоотделения, %	90			
Габаритные размеры, мм	960x600x270	990x690x360	1570x1050x530	1710x1710x1160
Масса, кг	140	160	570	800

Фильтры центробежного типа с фильтроэлементом. Для очистки сжатого воздуха возле потребителей наибольшее применение в СНГ получили центробежные фильтры типа 2 (средней очистки) по ГОСТ 17737 с ручным и полуавтоматическим отводом конденсата (рис. 3.7, б и в). Сжатый воздух, подводимый к отверстию (1), проходя через крыльчатку 1, получает нисходящее вращательное движение. Жидкие и твёрдые частицы загрязнителей под действием центробежных сил отбрасываются на цилиндрическую поверхность резервуара 4 и опускаются вниз в спокойную зону, отделённую заслонкой 3. Поток воздуха, очищенный от крупных жидких и твёрдых частиц, проходит через металлокерамический фильтроэлемент 2, который задерживает частицы с размером более его пор, и поступает к выходному отверстию (2). Дефлектор 6 способствует созданию необходимой скорости в зоне отделения загрязнителей и исключению поступления плёнки влаги в фильтроэлемент. Сброс загрязнителей из резервуаров производится через клапан 5 или полуавтоматическими и автоматическими конденсатоотводчиками (см. рис. 3.7, г и д).

Устройства полуавтоматического отвода конденсата функционируют следующим образом. При подключении фильтра давление сжатого воздуха, преодолевая упругое сопротивление эластичного колпачка 1, перекрывает седло отверстия 3 сброса конденсата

(рис. 3.7, з). Отключение от магистрали и сброс давления из фильтра приводит к отрыву колпачка 1 от седла, и конденсат через отверстие 3 сбрасывается в дренаж. В устройстве, приведённом на рис. 3.7, д, сброс конденсата происходит аналогично описанному выше с помощью подпружиненного клапана 1. Его преимущество – сброс конденсата можно произвести и при наличии давления в резервуаре нажатием снизу на обойму 3. При этом выступы обоймы 3, входящие в пазы корпуса 4, упираются в торец втулки 2 и поднимают её вместе с клапаном 1, что приводит к сбросу конденсата.

Фильтры типа 2 по ГОСТ 17437 имеют исполнения для трубного и модульного монтажа со следующими параметрами: ном. давление – 1,0 МПа; условный проход – 4, 6, 10, 16, 25 и 40 мм; мах расход воздуха – 0,125; 0,25; 1,25; 2,0; 4,5 (5,0) и 12,5 м³/мин; эффективность удаления жидкой влаги – не менее (90 – 95)%, тонкость фильтрации – 25 и 40 мкм; ёмкость резервуара – 0,01; 0,025; 0,1; 0,25 и 1 л. Производством ряда типоразмеров этих фильтров занимается ОАО «Пневматика» (г. Симферополь, Россия).

Для выбора типоразмера этих фильтров можно воспользоваться диаграммой на

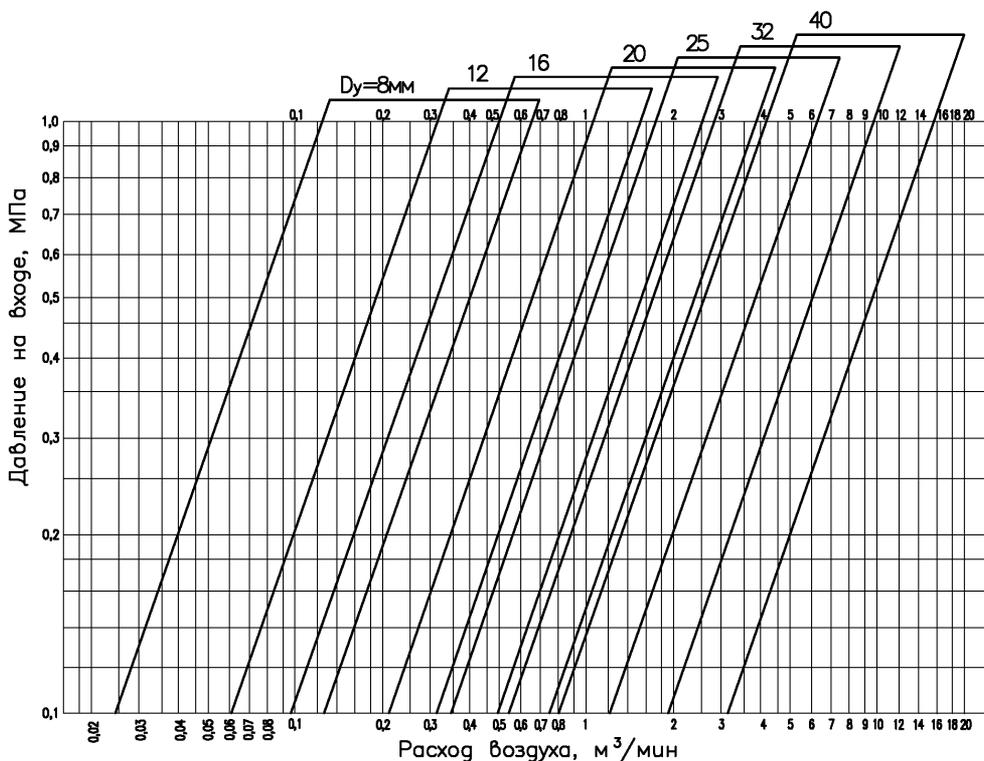


Рис. 3.8. Диаграмма для выбора типоразмера фильтра

рис. 3.8, на которой для каждого условного прохода (D_y) показаны максимальный и минимальный расходы сжатого воздуха, приведённые к нормальным условиям. Для выбора требуемого типоразмера необходимо найти точку, соответствующую заданным расходу и давлению. Если эта точка лежит в области, где заданный расход соответствует нескольким типоразмерам, то предпочтение следует отдать типоразмеру, для которого точка расположена ближе к середине или несколько смещена к верхнему диапазону расхода.

Конструкции зарубежных центробежных фильтров этого типа с металлокерамическим и керамическим фильтроэлементами практически не отличаются от описанных выше. Параметры этих фильтров находятся в широком диапазоне: давление – от 1,0 до 7,0 МПа, пропускная способность – от 0,5 до 520 м³/мин, тонкость фильтрации – от 10 до 100 мкм; эффективность удаления жидкой влаги – > 80%, диапазон рабочей температуры для фильтров с поплавковым конденсатоотводчиком и металлокерамическим фильтроэлементом – + (1,5 – 80)°С, а для фильтров с ручным дренажным краном и керамическим фильтроэлементом – + (1,5 – 150)°С.

Фильтры высокой эффективности очистки. В последние 15 лет на рынке СНГ появились фильтры на расходы до 800 м³/мин, обеспечивающие практически любую требуемую тонкость фильтрации частиц загрязнителей. Типовая конструкция этих фильтров (рис. 3.9) состоит из крышки 1 с присоединительными отверстиями для подвода (1) и отвода (2) сжатого воздуха, корпуса 2, который значительно удлинен по сравнению с корпусами традиционных фильтров, описанных выше. В корпусе размещён фильтроэлемент 3, поставляемый по заказу с требуемой тонкостью фильтрации. В днище корпуса имеется резьбовое отверстие для подсоединения устройства ручного или автоматического сброса конденсата.

Приведём краткие сведения о фильтрах этого типа ряда изготовителей в СНГ и за рубежом. Компания Dali (производство в КНР), изготавливает высокоэффективные фильтры с параметрами очистки пяти классов по международной классификации «Н».

Фильтр грубой очистки класса НС устанавливают в магистралях и для предварительной очистки перед фильтрами тонкой очистки и осушителями. Он состоит из слоя мелкопористой металлической сетки и слоя стекловолокна, что позволяет улавливать до 99% жидких и твёрдых частиц размером ≥ 3 мкм (остаточное содержание масла ≈ 3 мг/м³).

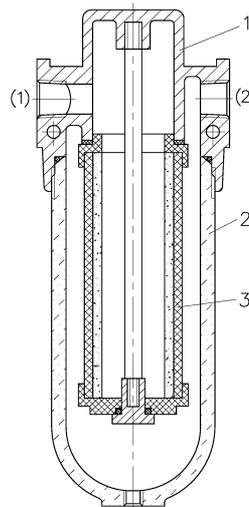


Рис. 3.9. Типовая конструктивная схема высокоэффективных фильтров

Фильтр тонкой очистки класса НТ используют для очистки сжатого воздуха на выходе устройств осушки и предварительной очистки перед фильтрами сверхтонкой очистки. Его фильтроэлемент, состоящий из многослойного стекловолокна, задерживает частицы размером ≥ 1 мкм, что обеспечивает эффективность улавливания жидкой воды выше 99,99% и остаточное содержание масла ≈ 1 мг/м³.

Фильтр очистки от масляных примесей класса НА применяется в пищевом, фармакологическом и других производствах. Воздух в нём проходит через многослойную губку, улавливающую часть масляных паров, твёрдых и жидких частиц, затем – через слой из специального стекловолокна с поверхностной обработкой, задерживающего частицы $\geq 0,01$ мкм. Эффективность очистки от масла – 99,99%, остаточное содержание – 0,1 мг/м³.

Фильтр сверхтонкой очистки от масляных примесей класса HF предназначен для пневмосистем с жёстким ограничением содержания масла в сжатом воздухе (удаления частиц $\geq 0,01$, включая мелкие аэрозоли масла. Остаточное содержание масла 0,01 мг/м³). Его фильтроэлемент состоит из слоя пористого синтетического материала с покрытием, обеспечивающим предварительную фильтрацию и равномерное распределение потока, и многослойного композитного волокна.

Угольный фильтр класса НН для удаления запахов состоит: из слоя активированного угля для поглощения паров масла; слоя стекловолокна с защитной синтетической губкой, задерживающего твёрдые частицы размером $\geq 0,01$ мкм; слоя специального волокнистого материала, улавливающего остатки паров и мельчайшие аэрозоли масла.

Эффективность очистки от масляных паров и углеводов 95% (остаточное содержание 0,003 мг/м³) исключает запахи. Эти фильтры применяют в медицине, системах подачи воздуха для дыхания под водой, в рабочих и оздоровительных зонах, при перемешивании продуктов в пищевом и фармацевтическом производствах, брожении пива и т.д.

Наиболее полный ассортимент фильтров очистки сжатого воздуха этого класса в СНГ изготавливают ООО «Курганхиммаш» типов ФВОВ-П и ФВП (Россия), завод промышленной техники Remeza (Белоруссия), ООО ЭНСИ (Россия). Их параметры не уступают лучшим образцам зарубежных фирмы и имеют меньшую стоимость. Основные параметры фильтров тонкой

очистки ФСВ (ООО «ЭНСИ») приведены в таблице 3.4.

Типоразмерный ряд фильтров серии Remeza HF включает 9 моделей с пропускной способностью 1, 2, 3, 5, 7,

Таблица 3.4

Наименование параметра	ФСВ - П	ФСВ - О	ФСВ - Т
Расход сжатого воздуха, м ³ /мин	2,5 – 30		
Тонкость фильтрации, % (не менее):			
размер твёрдых частиц >5 мкм	99,9	99,999	99,9999
размер твёрдых частиц >0,03 мкм	-	98	99,9
Гидравлическое сопротивление, МПа	0,01 – 0,02		

11, 14, 18 и 22 м³/мин, а серии Remeza 302-317 (магистральных) – 14 моделей с пропускной способностью (0,58 – 43,7) м³/мин, max рабочим давлением 1,6 МПа для фильтров с расходом до ≈12 м³/мин и давлением до 1,1 МПа – на большие расходы. Приведём краткие характеристики фильтроэлементов (картриджей) фильтров Remeza.

Фильтроэлемент **S3** обеспечивает улавливание частиц размером ≥3 мкм (≈99%), остаточное содержание масла – ≤(3 – 5) мг/м³. Его обычно применяют в магистралях и для предварительной очистки перед фильтрами тонкой очистки и осушителями.

Фильтроэлемент **P3** задерживает частицы размером ≥1 мкм, эффективность улавливания жидкой влаги – выше 99,99%, остаточное содержание масла – ≤(0,5 – 0,6)мг/м³. Используется для очистки сжатого воздуха на выходе устройств осушки и предварительной очистки перед фильтрами ультратонкой очистки.

Фильтроэлемент **H3** улавливает твёрдые частицы размером ≥0,01 мкм, остаточное содержание масла – ≤0,01 мг/м³. Его используют для очистки сжатого воздуха в пневмосистемах электронной, пищевой и др. отраслях промышленности.

Фильтроэлемент **U3** улавливает твёрдые частицы размером ≥0,01 мкм, остаточное содержание масла – ≤0,008 мг/м³. Применяется в системах с более строгими ограничениями содержания масла (например, дыхания) по сравнению с фильтроэлементом **H3**.

Фильтроэлемент **C3** (угольный) улавливает твёрдые частицы размером ≥0,01 мкм, остаточное содержание масла – ≤0,003 мг/м³. Он удаляет из сжатого воздуха запахи и применяется для ответственных процессов в фармацевтических и пищевых производствах, медицине, системах дыхания и др. областях.

Следует иметь в виду, что угольные фильтры хорошо удаляют запах паров масла и газообразных углеводородных частиц, для удаления запахов других газовых соединений необходимы специальные стерильные фильтры (см. раздел 3.3).

Изготовители обычно поставляют фильтры в следующей комплектации: с поплавковым конденсатоотводчиком или краном для ручного отвода конденсата; с наличием или без дифференциального манометра для контроля загрязнённости фильтроэлемента; крепёжными элементами для их стыкового монтажа или крепления к стенке; с датчиком содержания масла на выходе и без него для исполнения с угольным фильтроэлементом.

Таблица 3.5

Параметр или характеристика	Наименование очистки и обозначение фильтроэлемента			
	Грубая, VL	Общая, ZL	Тонкая, XL	Угольная, A
Способ очистки	П*-фильтрация	ГК*-фильтрация		адсорбция
Очистка на входе	не требуется	VL или их аналоги	ZL	требуется XL
Очистка на выходе	не требуется			VL или ZL
Удаляемые частицы, мкм	≥3	≥1	≥0,01	не регламент.
Эффективн. очистки, %	99,95	99,925	99,9999	не регламент.
Остат. содержание масла	не регламент.	≤0,6 мг/м ³	≤0,01 мг/м ³	≤0,003 мг/м ³
Примечание. Сокращение П* – означает поверхностная, ГК* – глубинно-коалесцентная				

В таблице 3.5 приведены данные фильтров компании Parkier Hiros Zadnder.

Внимание! 1. Остаточное содержание масла в табл. 3.5 компании Parkier Hiros Zadnder определено по стандарту ISO 12500-1, регламентирующему следующие значения начального содержания загрязнителей в сжатом воздухе, проходящем очистку в тестируемом фильтре: ($10^9 - 10^{12}$) твёрдых частиц размером (0,01 – 5) мкм и (10 – 40) мг масляных аэрозолей с размером капель (0,15 – 0,4) мкм на 1 м³ воздуха (приведённого к нормальным условиям); паров масла – 1000 мг n-гексана на 1 кг воздуха. В процессе испытаний компания использует начальную концентрацию 10 мг/м³ при определении остаточного содержания масла фильтроэлементов XL и концентрацию 40 мг/м³ – фильтроэлементов ZL. 2. Принято считать воздух без масла, если его содержание (в т.ч. паров) < 0,01 мг/м³ (1 класс по ГОСТ Р ИСО 8573).

При выборе фильтров этого класса необходимо выяснить у поставщика следующее: значение потерь давления на фильтре; требования к очистке сжатого воздуха на входе и срок службы фильтроэлемента; состав комплектации; соответствие их методики тестирования остаточного содержания масла стандарту ISO 12500-1. Отметим, что при отсутствии ссылок у поставщиков на использование методики стандарта ISO 12500-1 при тестировании фильтров, сделать объективную оценку эффективности очистки от масел очень сложно.

Гидросопротивление фильтров, представленных на рынке разными изготовителями, с новыми фильтроэлементами лежит в диапазоне (0,01 – 0,04) МПа. При возрастании сопротивления выше (0,05 – 0,06) МПа, фильтроэлементы рекомендуется менять или регенерировать.

Период эксплуатации фильтроэлементов до замены зависит от содержания загрязнителей на входе и расхода воздуха. При хорошем техобслуживании и содержании загрязнений на входе в пределах, указанных изготовителем, он обычно составляет от 6 до 12 месяцев. Стоимость фильтроэлементов составляет (5 – 40)% от стоимости фильтра (малые значения относятся к исполнениям для грубой и средней очистки, а большие –

для тонкой и ультратонкой очистки, особенно больших типоразмеров).

Для большей части предприятий СНГ установка фильтров тонкой очистки в магистралях нерациональна из-за физической изношенности и коррозии трубопроводов.

3.3.2.2. Устройства осушки сжатого воздуха

Областями, где необходима подача осушенного сжатого воздуха, являются: пневмолинии при минусовой температуре окружающей среды в местах их расположения; пневматические двигатели, устройства смешения и распыления, в которых из-за снижения температуры сжатого воздуха при расширении возможно обмерзание или появление жидкой влаги, что недопустимо (см. раздел 2.5); медицина и стоматология; электронное, пищевое, фармацевтическое, текстильное, бумажно-целлюлозное, биоинженерное и ряд других производств; пневмосистемы КИП, лазерной техники, робототехники, оптического и высокоточного оборудования, газовой хроматографии, спектрометров; производства кислорода, воздуха для дыхания, лабораторных исследований и т. д.

Осушка сжатого воздуха осуществляется применением установок, которые в зависимости от применяемого способа осушки (см. раздел 3.3) принято подразделять на теплообменные, адсорбционные, абсорбционные и разделительные.

Теплообменные установки осушки (реже используют термин – **установки осушки холодильного типа**) изготавливают с охлаждением сжатого воздуха атмосферным воздухом, водой или хладагентами.

Установки осушки сжатого воздуха с воздушным охлаждением (используемый термин – «воздух-воздух») нашли применение на предприятиях СНГ в последние 20 лет. Характерным представителем их являются установки осушки типа ОСВ (НПП ООО

Таблица 3.6

Модель осушителя ОСВ	Ном. давление, МПа	Расход, м ³ /мин	Мощность потребляемая, кВт	Гидросопротивление, МПа	Габариты, ДхШхВ, м	Масса
0,8/0,8Г-0,1	0,8	0,6	0,04	0,003	0,6x0,3x0,6	50
1,2/0,8Г-0,1		1			0,8x0,4x0,7	70
5/1,0Г-0,1	1,0	4	0,37	0,01	1,6x0,9x1,2	330
8/0,8В-0,1	0,8	6	0,75		1,2x1,2x2,1	600
15/1,2В-0,1	1,2	12			1,5x1,1x2,5	1300
30/0,8В-0,1	0,8	25	3		1,5x1,3x3	1800
50/1,2В-0,1	1,2	40	6		1,9x1,8x4	2500
125/0,8В-0,1	0,8	100	11		2x1,9x3,6	2250
125/0,8ВС-0,1				2,4x2x5,4	4000	
150/0,8ВС-0,1		125	14	2,1x2,1x6,4	5100	
180/0,8Г-0,1		150		5,6x2x2,9	7500	
250/0,8ГМ-0,1		200		6,4x2,3x3,2	10500	
300/0,8ВМ-0,1	250	2,6x2,3x7,1	11500			

«ЭНСИ»), которые представляют собой трёхпоточный теплообменник, изготовленный по схеме «труба в трубе». Охлаждение сжатого воздуха производится атмосферным воздухом, нагнетаемым вентиляторами в основной теплообменник. Выделяемая из сжатого воздуха жидкая влага улавливается во влагоотделителе и удаляется автоматическим конденсатоотводчиком. Осушенный сжатый воздух перед выходом в магистраль нагревается потоком сжатого воздуха в теплообменнике предварительного охлаждения, что снижает его относительное влагосодержание. Установки осушки ОСВ эффективно и надёжно функционируют в климатических условиях всех регионов СНГ с размещением вне здания (рис. 3.10). Основные параметры этих установок приведены в таблице 3.6.

Модульный принцип их конструкции обеспечивает возможность создания установок осушки с производительностью от 0,5 до 250 м³/мин. Температура сжатого воздуха ($T_{св}$), выходящего из установок ОСВ, примерно на 10°С выше температуры атмосферного воздуха (T_a), нагнетаемого вентилятором. Например, при $T_a = 20^\circ\text{C}$ летом, $T_{св} \approx 30^\circ\text{C}$, а при $T_a = -20^\circ\text{C}$ зимой, $T_{св} \approx -10^\circ\text{C}$.

Преимущества установок этого типа, по сравнению с аналогичными по параметрам рефрижераторными и адсорбционными осушителями: меньшие капитальные затраты примерно на (25 – 40)% и



Рис. 3.10. Фото размещения установок осушки ОСВ

эксплуатационные затраты в (2 – 3) раза; низкое гидравлическое сопротивление; надёжность работы в широком диапазоне минусовых и плюсовых температур окружающей среды; возможность применить на компрессорной станции воздухохраник меньшего размера или обойтись без него благодаря наличию значительного объёма полостей сжатого воздуха в осушителе. Недостаток – «плавающая» точка росы сжатого воздуха при изменении расхода сжатого воздуха и температуры атмосферного воздуха.

Отметим, что на базе осушителей ОСВ созданы концевые теплообменники (холодильники) типа ОСВ и автономный блок подготовки сжатого воздуха типа АБ-ОСВ.

Концевые холодильники типа ОСВ с охлаждением сжатого воздуха атмосферным воздухом имеют производительность 50, 100 и 250 м³/мин. По сравнению с традиционными концевыми холодильниками они более надёжны, обеспечивают снижение эксплуатационных затрат и размещение вне помещения, не нуждаются в воде. Их недостатки — более высокая температура сжатого воздуха на выходе, большие габариты и масса.

Автономный блок типа АБ-ОСВ состоит из установок осушки «воздух-воздух» и фреоновой (для дополнительного охлаждения), устройства улавливания и удаления загрязнителей. Основные параметры: пропускная способность – 200 м³/мин; рабочее давление – 0,8 МПа; потребляемая мощность – ≈40 кВт; температура воздуха на входе – до 170°С, выходе – на (1 – 2)°С ниже температуры окружающей среды.

Установки осушки с хладагентом (далее будем использовать термин – **рефрижераторные установки**) получили наибольшее применение для обеспечения осушки сжатого воздуха в плюсовом диапазоне точки росы (не глубже +2°С) и расходов до 800 м³/мин.

В качестве хладагента используют фреон, углекислоты, воду и др. Принципиальная схема установки дана на рис. 3.11. Сжатый воздух через отверстие (1) поступает в теплообменник 2 по трубопроводам 1, обдуваемым противоположно направленным потоком охлаждённого сжатого воздуха (предварительное охлаждение). Затем сжатый воздух поступает в теплообменник 3 с хладагентом (обычно, фреоном-12) и окончательно охлаждается до + (2 – 3)°С. Далее воздух проходит в зону влагоотделения 4, где выпавший конденсат улавливается и стекает в ёмкость В. Свободный от конденсата сжатый воздух поступает в теплообменник 2, где его температура повышается, а относительная влажность понижается, и через выходное отверстие (2) идёт в магистраль. Хладагент подаётся к входному отверстию А и, пройдя теплообменник 3, через отверстие Б, возвращается к нагнетателю. Сброс жидкой влаги из ёмкости В обеспечивает конденсатоотводчик 5.

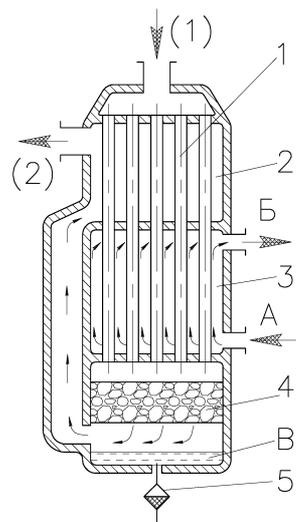


Рис. 3.11. Принципиальная схема рефрижераторной установки осушки

Установки этого типа изготавливаются с наличием или без устройства регулирования производительности холодильного контура. Первые дороже, но они обеспечивают надёжность работы и стабильное поддержание заданной точки росы сжатого воздуха при отклонении расхода и температуры воздуха от паспортных значений. В установках без устройств регулирования точка росы сжатого воздуха на выходе может повышаться более чем на 10°С от настроенного значения (при отсутствии перепускного клапана возможен даже выход их строя из-за обмерзания испарителя). Для систем с переменными условиями работы изготовители рекомендуют выбирать такие устройства осушки с несколько меньшей производительностью, чем у компрессора, но это не всегда гарантирует исключение этого недостатка. При температуре сжатого воздуха на входе в рефрижераторную установку выше её значения в паспорте, следует применять охладитель.

Рефрижераторные установки предлагает ряд предприятий в СНГ. В Белорусии рефрижераторные установки осушки Remeza серий RFD и RFDx изготавливаются на рабочее давление 0,7 МПа (max 1,6 МПа), производительностью от 0,33 до 203 м³/мин с цифровой системой управления параметрами нагрузки и контрольной панелью, обеспечивающими простоту управления, надёжность, стабильное поддержание точки росы, снижение энергозатрат и визуальный контроль за ходом осушки.

Установки осушки с охлаждением водой, как правило, применяются для дополнительного охлаждения сжатого воздуха (см. далее – **вторичные охладители**).

Установки осушки с использованием холодильного агента (другой термин – **холодильные машины**) осушку сжатого воздуха производят его охлаждением (вымораживанием). Их обычно используют для осушки больших объёмов сжатого воздуха до точки росы не глубже – 20°C. В России **холодильные машины ОВ** с холодильным агентом R22 по ГОСТ 8502, производительностью 92 и 250 м³/мин выпускает ООО «Курганхиммаш». Энергозатраты на осушку 1 нм³ установками большой производительности ≈ 1,3 Втч, а малой – ≈ 4 Втч. Гидросопротивление потоку – не более 0,025 МПа, температура воздуха на входе в холодильную машину не должна превышать 40°C.

Установки осушки адсорбционного типа предназначены для глубокой осушки сжатого воздуха. Обычно изготовители поставляют их с настройкой на точку росы сжатого воздуха минус 20, 40 и 60°C (глубже – по заказу). Как правило, они состоят из двух баллонов с адсорбентом, которые поочерёдно переключаются с режима осушки сжатого воздуха на регенерацию адсорбента. Переключение адсорберов с одного режима на другой производится через определённый временной интервал или по сигналу датчика контроля заданной точки росы сжатого воздуха на выходе. Применение микропроцессорных систем управления с монитором позволяет настраивать и контролировать необходимую точку росы, что в сочетании с переключением адсорберов по датчику точки росы на выходе может сократить энергопотери на осушку >50%. Установки осушки этого типа выпускают с холодной и горячей регенерацией адсорбента. Срок службы адсорбента обычно составляет 2000 – 4000 циклов регенерации, ≈ (3 – 5) лет. Но плохое качество очистки от загрязнителей (особенно жидких масел и воды) подаваемого в осушители сжатого воздуха и превышение температуры горячей регенерации приводит к загрязнению, окислению и разрушению адсорбента, значительно сокращая срок его службы.

Поглотительная способность адсорбентов (кроме цеолита) резко снижается с увеличением температуры сжатого воздуха на входе выше 35°C. Так, при температуре сжатого воздуха на входе 45°C, стоимость установки будет более чем в 1,5 раза выше по сравнению с установкой для температуры ≤35°C. В этом случае целесообразно до входа в осушитель установить вторичный охладитель типа «воздух-воздух» или «воздух-вода».

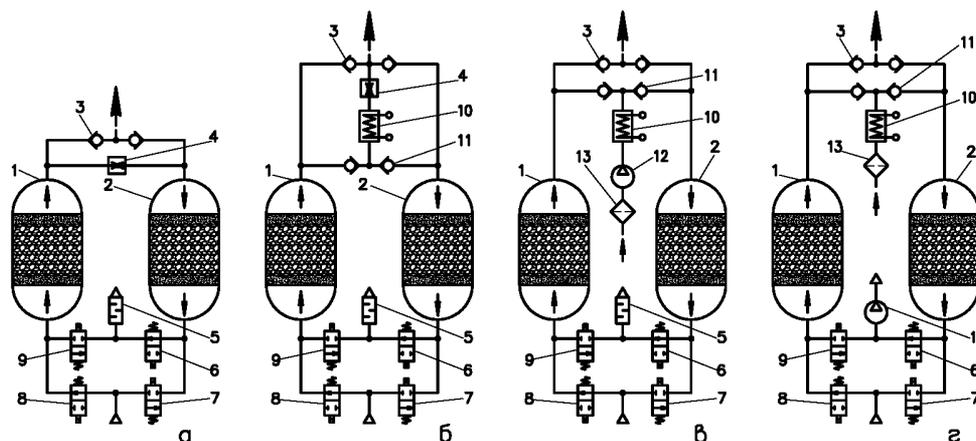


Рис. 3.12. Принципиальные схемы адсорбционных установок осушки: *а* – с холодной регенерацией; *б* – с горячей регенерацией осушенным воздухом, *в* – с регенерацией атмосферным воздухом с вентилятором; *г* – с регенерацией атмосферным воздухом с вакуумным насосом

На рис. 3.12 приведены упрощённые принципиальные схемы основных исполнений адсорбционных устройств осушки.

Установки осушки с холодной регенерацией представлены на рынке с пропускной способностью (0,1 – 110) м³/мин, с пневматическим или электронным управлением, с возможностью монтажа на стене (для небольшой производительности) и полу (средней и большой производительности), с наличием или отсутствием регулирования подач воздуха на регенерацию и приборов контроля процесса осушки.

Установки состоят из двух баллонов (рис. 3.12, *а*), заполненных адсорбентом. Влажный сжатый воздух подаётся через распределитель 8 в нижнюю часть баллона 1, проходит через адсорбент, осушается и, перебрасывая обратный клапан 3, идёт на выход. Регенерацию адсорбента в баллоне 2 обеспечивает воздух, поступающий через дроссель 4 на выходе баллона 1. Проходя с верхней в нижнюю часть баллона 2, этот воздух осушает адсорбент и через распределитель 6 и глушитель 5 сбрасывается в атмосферу. При осушке воздуха в баллоне 2, влажный воздух в него поступает через распределитель 7. Регенерация адсорбента в баллоне 1 обеспечивается подачей осушенного воздуха на выходе из баллона 2, а его выхлоп идёт через распределитель 9 и глушитель 5. По окончании регенерации и охлаждения адсорбента выхлоп из баллона (2 или 1) в атмосферу перекрывают распределителем (6 или 9) для выравнивания давления. По достижении в баллоне уровня рабочего давления, он готов для переключения на осушку сжатого воздуха.

Продолжительность регенерации находится в диапазоне (1 – 12) мин. Потери сжатого воздуха на регенерацию при оптимальной производительности составляют

(10 – 25)%, а при снижении производительности в (2 – 3) раза они увеличиваются примерно до (35 – 45)%. Их основными преимуществами по сравнению с установками с горячей регенерацией являются меньшая стоимость, высокая надёжность, компактность, низкие затраты на техобслуживание. Недостаток – значительные потери сжатого воздуха на регенерацию адсорбента, что ограничивает их применение для систем большим расходом осушенного воздуха.

При применении установок осушки этого типа необходимо иметь в виду следующее: а) при давлении <0,4 МПа эффективность регенерации адсорбента снижается из-за недостаточного понижения влажности осушаемого воздуха; б) при запуске установки выход на заданную точку росы сжатого воздуха произойдёт через определённый промежуток времени (от десятков минут до $\approx 1,5$ ч, конкретное значение указывается в инструкции по эксплуатации); в) при изменении условий работы, например, расхода и температуры сжатого воздуха на входе, точка росы на выходе изменяется («плавает»), если установка не оснащена системой её контроля и поддержания; г) при работе установок в режиме неполной производительности процентное отношение расхода воздуха на регенерацию увеличивается, как это было уже отмечено ранее.

Установки осушки с горячей регенерацией выпускают на пропускную способность до 500 м³/мин и выше в следующих исполнениях: с регенерацией горячим осушенным сжатым или атмосферным воздухом; с регенерацией путём нагрева адсорбента или подачей горячего компрессорного воздуха (теплом сжатия). Температурные режимы регенерации: силикагеля – (180 – 220)°С; алюмогеля – (230 – 280)°С, цеолита – (320 – 380)°С. Процесс регенерации заканчивается при температуре воздуха на выходе из баллона адсорбера: силикагеля – (80 – 140)°С; алюмогеля – (100 – 150)°С, цеолита – (120 – 200)°С. Время циклов переключения баллонов с осушки на регенерацию зависит от производительности, температуры и влажности сжатого воздуха на входе, марки и физического состояния адсорбента. Ориентировочное значение времени циклов переключения при производительности до 25 м³/мин – 2 ч, более 25 до 50 м³/мин – 4 ч; более 50 до 100 м³/мин – 6 ч; свыше 100 м³/мин – 8 ч. Установки производительностью свыше 250 м³/мин из-за больших габаритов обычно собирают на предприятии заказчика.

Установки осушки с регенерацией горячим осушенным воздухом, как правило, рациональны для осушки больших расходов воздуха. Имеются сведения об изготовлении таких установок производительностью более 1000 м³/мин. Принцип работы их аналогичен описанному выше. Основным отличием от установок с холодной регенерацией является наличие нагревательного элемента 10 и обратных клапанов 11 (рис. 3.12, б) на линии подачи осушенного воздуха на регенерацию в баллоны. Обратные клапаны 11, или установленные вместо них 2-х линейные распределители, должны обеспечивать надёжную

работоспособность при высокой температуре нагрева воздуха. При установке нагревательного элемента за обратными клапанами (или 2-х линейными распределителями) необходимость в термостойком исполнении их отпадает. Фильтры на входе и выходе должны быть защищены от возгорания. Охлаждение адсорбента после регенерации производится осушенным воздухом без нагрева. Потери осушенного воздуха в них составляют до 5% от номинального расхода.

Установки осушки с регенерацией горячим атмосферным воздухом. Отличием этого типа установок является регенерация и охлаждение адсорбента атмосферным воздухом, нагнетаемым вентилятором или воздуходувкой (рис. 3.12, в), вакуумным насосом (рис. 3.12, г). Подогрев атмосферного воздуха для регенерации обеспечивается нагревательным элементом 10, а охлаждение адсорбента – потоком атмосферного воздуха без подогрева или естественным охлаждением. Требования к термостойкости обратных клапанов 11 (или распределителей) зависит от места установки нагревательных элементов (см. описание выше). Современные конструкции установок этого типа серии RDB производительностью от 12 до 226 м³/мин с микропроцессорной системой контроля и управления выпускает завод Remeza (Белоруссия). Эти установки не имеют потерь сжатого воздуха на регенерацию адсорбента, гидросопротивление при номинальном расходе – менее 0,01 МПа, а энергозатраты на регенерацию и охлаждение зависят от мощности нагревателя и привода нагнетателя. Имеются установки этого типа с кратковременной подачей осушенного воздуха для охлаждения, потери которого составляют до 2,5%.

Отметим, что установки осушки этого типа с вакуумным насосом обеспечивают более эффективную регенерацию и меньшее увлажнение адсорбента при охлаждении.

Установки осушки с регенерацией электронагревательным элементом, погружённым в адсорбент (внутри баллона), более эффективно используют тепло нагревательного элемента на регенерацию. Но из-за непосредственного контакта нагревательного элемента с адсорбентом, его термостойкость должна быть выше 350°C. Для стабильного поддержания заданной температуры регенерации термостаты размещают в разных местах баллонов. Расход осушенного воздуха на регенерацию в них составляет ≈ (2,2 – 2,5)%. В СНГ установки этого типа серии RMWE производительностью от 4 до 70 м³/мин выпускает завод Remeza.

Установки осушки «теплом сжатия». Как и все адсорбционные установки, они имеют два баллона, поочередно переключаемые на осушку и регенерацию. В них сжатый воздух из последней ступени сжатия компрессора поступает на регенерацию адсорбента в один из баллонов, затем охлаждается в теплообменнике с удалением влаги в жидкой фазе и направляется на осушку в другой баллон с адсорбентом. Установки этого типа наиболее эффективны по энергозатратам на регенерацию, но из-за более высокой стои-

мости, сложности и затрат на техобслуживание применяются крайне редко. Как правило, их используют в системах с турбо-или «безмасляными» винтовыми компрессорами большой производительности и высокой температурой воздуха на выходе из последней ступени сжатия, а также с «масляными» поршневыми компрессорами с подачей горячего воздуха на десорбцию через теплообменник-рекуператор.

В настоящее время имеется производство адсорбционных установок с горячей регенерацией адсорбента с одним баллоном. Так, фирма Kaeser Kompressoren (ФРГ) оснащает компрессорные установки для стоматологии осушителями этого типа с соотношением периодов производства сжатого воздуха и регенерации 4/1 и 6/1. По параметрам осушки и стоимости эти осушители сравнимы с осушителями других типов, но имеют меньшие габариты.

Отметим, что в России производством адсорбционных осушителей занимаются десятки предприятий. Традиционным поставщиком адсорбционных установок осушки с холодной регенерацией типа ОВБ производительностью $(0,25 - 8) \text{ м}^3/\text{мин}$ и горячей регенерацией типа ОВН производительностью $(5 - 160) \text{ м}^3/\text{мин}$ с электронным управлением контроля точки росы, рефрижераторных осушителей, вторичных охладителей, фильтров и других устройств очистки воздуха является ООО «Курганхиммаш». Челябинский компрессорный завод выпускает адсорбционные установки серий ОВА с холодной и ОВА-Т с горячей регенерацией, производительностью от 0,7 до $55 \text{ м}^3/\text{мин}$, на рабочее давление $(0,5 - 1) \text{ МПа}$ с точкой росы -40 и -70°C . Бежицкий завод «АСО» изготавливает установки этого типа производительностью $(0,7 - 6) \text{ м}^3/\text{мин}$ на давление 1,0 и 1,6 МПа. Установки осушки этого типа на высокое давление $(5 - 40) \text{ МПа}$ и расход $(0,8 - 4,7) \text{ м}^3/\text{мин}$ выпускает фирма «Компрессор-газ» (Санкт-Петербург). Большой ассортимент установок осушки представлен на рынке СНГ зарубежными изготовителями SMC (Япония), Festo (ФРГ), Atlas Copco (Швеция), Parker-Zander (Италия), Donaldson (США), Kraftmann (ФРГ) и др.

Внимание! Некоторые поставщики называют адсорбционные установки осушки абсорбционными, что может привести к ошибкам при выборе типа осушителя.

Адсорбционные установки осушки выпускаются зарубежными фирмами с расходом от 0,1 до $320 \text{ м}^3/\text{мин}$. Потери давления в них (без фильтров на входе и выходе) обычно не превышают 0,01 МПа. При наличии защиты от обмерзания устройств сбора и сброса конденсата с раствором абсорбента их можно размещать на открытом воздухе.

В СНГ осушители этого типа небольшой производительности с твёрдым абсорбентом изготавливают несколько мелких фирм, а масштабы применения в промышленности мизерны. Они обычно используются для незначительного понижения точки росы сжатого воздуха, значение которой на выходе линейно зависит от температуры сжатого

воздуха на входе. Для стабильного получения минусовых значений точки росы сжатого воздуха рекомендуется его предварительная осушка в теплообменных осушителях. Абсорбционные осушители для обеспечения точки росы сжатого воздуха глубже минус (5 - 10)°С практически не применяют.

Конструктивная схема осушителя с твёрдым абсорбентом показана на рис. 3.13. Сжатый воздух через коалесцентный фильтр 1, улавливающий жидкие частицы влаги, поступает в баллон 4 снизу, проходит последовательно через фильтрующий слой 2, абсорбент 3, который химически поглощает пары влаги, и фильтрующий слой 6, снижающий вынос пыли абсорбента в выходное отверстие. Абсорбент в результате этого процесса растворяется и стекает в влагосорбник 9. Для обеспечения нормального функционирования осушителя, в него необходимо регулярно через люк 7 добавлять абсорбент, а из влагосорбника – удалять жидкий раствор абсорбента. Для визуального контроля уровня заполнения абсорбентом баллона имеется смотровое окно 5. Сброс влаги производится при помощи 2-линейного распределителя 10 с ручным или электрическим управлением. Автоматический конденсатоотводчик может быть установлен только в исполнении, стойком к агрессивному воздействию раствором абсорбента. Для исключения выноса частиц адсорбента в магистраль на выходе устанавливают фильтр 8 с требуемой тонкостью очистки. Эффективность и стабильность поддержания точки росы этих осушителей повышается при подаче в них сжатого воздуха, осушенного в теплообменных установках. К недостаткам этих осушителей следует отнести необходимость частой досыпки абсорбента при их непрерывной работе и сильное коррозионное воздействие некоторых марок абсорбентов на элементы установки, а также пневмосети при его выносе из осушителя.

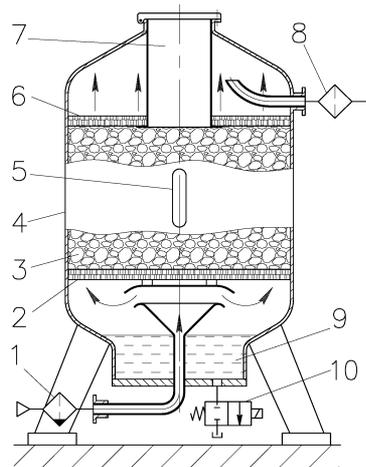


Рис. 3.13. Конструктивная схема осушителя абсорбционного типа

Разделительные устройства осушки (далее будем использовать термин — **мембранные осушители**), наиболее широко представленные на рынке, имеют следующие основные параметры: производительность – до 4 м³/мин; рабочее давление – (0,6 – 1,3) МПа, максимальное понижение точки росы – на 55°С; диапазон температуры сжатого воздуха на входе – (+2 – +60)°С. Отметим, что при температуре выше 35°С эффективность улавливания масляных частиц установленного на входе ультратонкого фильтра с фильтроэлементом из боросиликатного волокна значительно снижается. Эти

устройства применяют обычно для осушки сжатого воздуха до точки росы в диапазоне от +10 до минус 20°C (реже до минус 40°C).

Отметим, что некоторые зарубежные фирмы изготавливают их и на относительно большие расходы. Так, фирма HANKISON выпускает мембранные осушители: серии НММ – производительностью (0,7 – 87) м³/мин, серии EMD – производительностью (0,5 – 50) м³/мин для минусовых значений точки росы и до 280 м³/мин – для плюсовых.

Конструктивная схема этих устройств приведена на (рис. 3.14). В корпусе 1 размещена специальная мембрана, состоящая из тысяч тонких волокон (капилляров) 2 с радиальными микропорами. Полость А подачи влажного сжатого воздуха в каналы волокон герметично отделена от полости Б, а полость В выхода осушенного воздуха соединена с полостью Б через дроссель 3. Стенки волокон непроницаемы для молекул кислорода и азота, но легко пропускают молекулы воды благодаря разнице парциального давления паров во влажном (внутри волокон) и обдуваемом снаружи волокна сухом воздухе. Сжатый воздух, проходя по каналам волокон к выходу, освобождается от части молекул воды, что понижает его влажность. Часть осушенного сжатого воздуха (15 – 25)% на выходе через дроссель 3 поступает в правую часть полости Б. Из-за наличия дросселя сжатый воздух расширяется до давления несколько выше атмосферного (это понижает его влажность), огибает перегородку 4, обдувает наружные поверхности волокон 2 и, поглощая из них молекулы воды, сбрасывается через отверстие Е в атмосферу.

Достоинства этих осушителей следующие: нет потребления электроэнергии, что позволяет применять их во взрыво- и пожароопасных условиях; высокая надёжность, простота, компактность, небольшие габариты и масса; лёгкость и минимальные затраты на монтаж, демонтаж и техобслуживание; не корродируют; бесшумность; возможна установка вне помещения при плюсовых значениях окружающей среды. Недостатки: большие потери

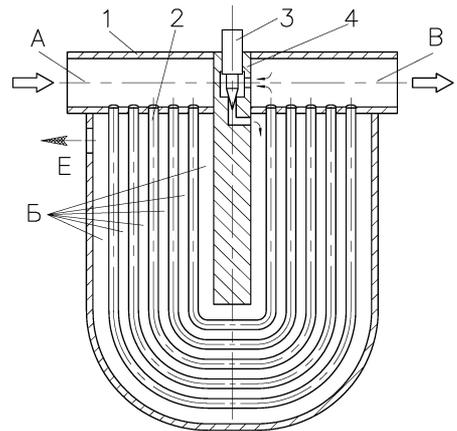


Рис. 3.14. Конструктивная схема мембранного осушителя

Рис. 3.15. Исполнения мембранных осушителей по дизайну



сжатого воздуха на осушку, что сужает область их рационального применения для больших расходов воздуха; ограничения по уровню рабочего давления, температуре и содержанию загрязнителей в подаваемом на вход сжатом воздухе. Последнее приводит к необходимости установки высокоэффективных фильтров на входе. Эти осушители изготавливают с наличием или отсутствием регулирования расхода воздуха на осушку, в различных исполнениях по дизайну. Для примера на рис. 3.15 показан дизайн осушителей Zander (в настоящее время их производство передано другой фирме).

При выборе и применении мембранных осушителей необходимо учесть следующее.

1). Область их эффективного применения зависит от требуемой степени осушки и расхода сжатого воздуха. Для осушки сжатого воздуха до точки росы минус 20°C и глубже (до - 40°C) их обычно применяют для расходов до $\approx 1 \text{ м}^3/\text{мин}$, а для обеспечения плюсовых значений точки росы они могут быть использованы и на относительно большие расходы. Эти рекомендации основаны на анализе параметров этих осушителей. Так, в установках серии КММ фирмы Kraftmann (ФРГ) потери от всего объёма осушаемого воздуха составляют: при точке росы минус 40°C – до 41%, при минус 20°C – до 31%, а при +3°C – менее 15%. Производительность осушенного воздуха установок концерна SMC при давлении 0,7 МПа и изменении точки росы с 0°C до минус 5°C снижается примерно в (1,7 – 2,5) раза, а с минус 20°C до минус 30°C – в (2 – 3) раза, пропорционально этому возрастают потери воздуха на осушку.

2). При изменении условий работы осушителя (расхода, давления и температуры сжатого воздуха) степень осушки воздуха изменяется, т.е. точка росы «плавает». Так, при увеличении расхода воздуха в два раза точка росы уменьшается на (5 – 10)°C.

3). Температура окружающей среды в месте их расположения, как правило, не должна быть ниже температуры сжатого воздуха, поступающего на осушку.

Примечание. Некоторые изготовители допускают работу установок с температурой окружающей среды на (2 – 5)°C ниже температуры сжатого воздуха.

4). Поставщики часто указывают степень осушки сжатого воздуха температурой точки росы при атмосферном давлении или значением её понижения (обычно на 20, 32 и 55°C). Для перевода данных точки росы при атмосферном давлении к точке росы сжатого воз-

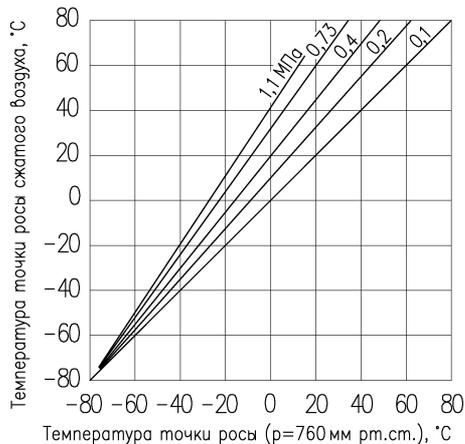


Рис. 3.16. Диаграмма преобразования температур точки росы

духа с заданным абсолютным давлением можно воспользоваться диаграммой на рис. 3.16 (например, если температура точки росы воздуха при атмосферном давлении указана на минус 32°С, то при давлении 0,63 МПа точка росы будет минус 10°С).

Если в технических данных поставщика указано понижение осушителем точки росы на 20°С, то при температуре точки росы воздуха при атмосферном давлении равной 18°С, точка росы сжатого воздуха на выходе составит минус 2°С.

5). На вход осушителя необходимо подавать сжатый воздух с высокой степенью очистки от капельной влаги и твёрдых частиц.

6). Температура и давление сжатого воздуха, подаваемого в осушитель, не должны превышать максимальных значений, указанных изготовителем для осушителя и ультратонкого фильтра на его входе. Нарушение этого требования может привести к выходу мембранного модуля из строя.

7). Изготовители обычно ограничивают применение осушителей этого типа в системах с резкими колебаниями давления.

Вторичные теплообменные охладители (доохладители) сжатого воздуха применяются для дополнительного охлаждения сжатого воздуха, подаваемого в устройства очистки (например, при температуре подаваемого сжатого воздуха в установки осушки выше 35°С), понижения влажности на участках магистрали или пневмосистем (например, пневмотранспорта). Принцип действия их аналогичен концевым холодильникам с воздушным или водяным охлаждением в сочетании с водомаслоотделителями, а основное отличие – компактность. Сжатый воздух в них охлаждается потоком атмосферного воздуха или воды и, проходя далее через влагоотделитель, очищается от жидкой влаги (см. конструктивные схемы на рис. 3.17, а, б). Для примера приведём основные парамет-

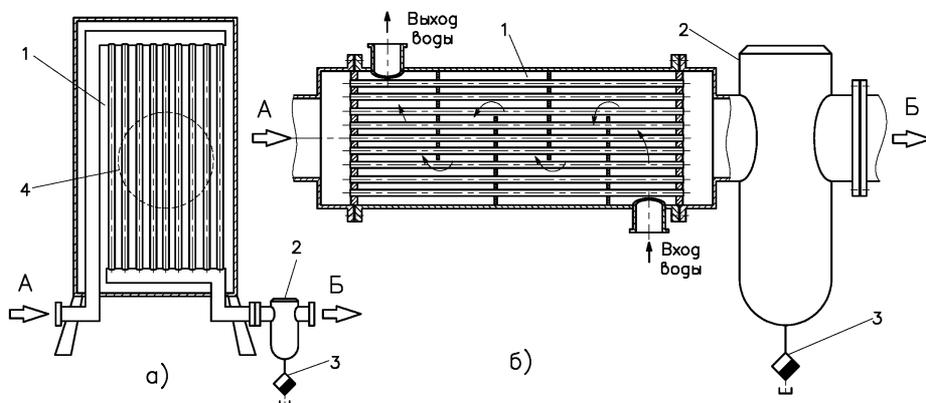


Рис. 3.17. Вторичные охладители Parker Hiross с воздушным (а) и водяным (б) охлаждением: 1 – теплообменник; 2 – влагоотделитель; 3 – конденсатоотводчик; 4 – вентилятор

ры вторичных охладителей фирмы Parker-Hiross. С *воздушным охлаждением* стандартной серии: расход воздуха – (0,6 – 75) м³/мин, давление – 1,6 МПа, температура сжатого воздуха на входе – 120°С, на выходе – на (8 – 10)°С выше температуры охлаждающего воздуха. С *водяным охлаждением* стандартной серии: расход – (1,2 – 90) м³/мин, стьёмной серии – (3 – 550) м³/мин, давление – 1,6 МПа, температура сжатого воздуха на входе – 120°С (максимальная – 200°С), на выходе – на (5 – 8)°С выше температуры охлаждающей воды. Нагнетание охлаждающего воздуха осуществляется малошумными осевыми вентиляторами. Расход воды на охлаждение – \approx (5 – 6) л/мин на 1 м³. Как было уже отмечено выше, температура сжатого воздуха на выходе охладителей зависит от его температуры на входе и температуры охлаждающей среды.

В России вторичные охладители типа ТЭРА (производительностью 5, 20, 63, 100, 160 и 200 м³/мин, с температурой сжатого воздуха на входе 60°С, на выходе 30°С) и конечные охладители ТЭРАК (производительностью 2, 5, 10, 30, 100, 160 и 200 м³/мин, с температурой сжатого воздуха на входе 160°С, на выходе 60°С) выпускает ООО «Курганхиммаш». Наименьшие по габаритам охладители этого типа изготавливает корпорация SMC (Япония). В качестве вторичных охладителей можно использовать охладители воздуха типа ОСВ, но их габариты и масса больше охладителей зарубежных фирм и ТЭРА.

3.3.3. Устройства сбора, удаления и сепарации конденсата

Содержание жидких и твёрдых загрязнителей в пневмолиниях предприятий может быть значительно снижено за счёт установки в определённых местах водосборников и устройств сброса конденсата.

Наличие этих устройств диктуется необходимостью предотвращения обводнения пневмолиний при отсутствии централизованной осушки сжатого воздуха. Например, при всасывании 100 м³/мин воздуха с влажностью \approx (75 – 80)%, температурой \approx 35°С, давлением нагнетания 0,6 МПа и удалением 80% влаги на компрессорной станции, при 2-х сменном режиме работы в пневмолиниях может появиться более 400 л конденсата.

Водосборники. Для этой цели используют небольшие ресиверы, баллоны и ёмкости с устройствами ручного, полуавтоматического и автоматического удаления конденсата.

Устройства удаления конденсата. В качестве устройств удаления конденсата с ручным управлением используют вентили, краны и другие виды 2-х линейных распределителей.

Устройства удаления конденсата с полу- и автоматическим управлением (далее – **конденсатоотводчики**) выпускаются в исполнениях для встройки в резервуары и как отдельные устройства на разную пропускную способность.

Типовые конструктивные исполнения конденсатоотводчиков даны на рис. 3.18.

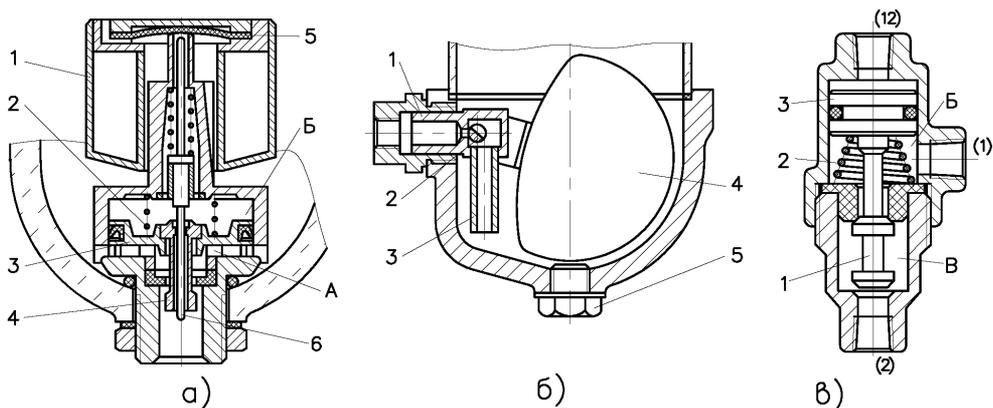


Рис. 3.18. Типовые конструкции конденсатоотводчиков

На рис. 3.18, а показан конденсатоотводчик поплавкового типа, встраиваемый в резервуары водосборников и фильтров. При отсутствии давления в пневмосистеме (в перерыв, в нерабочую смену) поршень 3 под действием пружины 2 опускается вниз, открывая клапан 4. Происходит сброс конденсата. Функционирование его при наличии давления в пневмосистеме происходит следующим образом. Когда конденсат в резервуаре поднимется до уровня, при котором выталкивающая сила преодолет вес поплавка 1 и давление сжатого воздуха на мембрану 5, она отрывается от седла, сжатый воздух поступает в полость Б. Проходное сечение дроссельного выхлопного отверстия в клапане 4 мало, что позволяет давлению в полости Б подняться до уровня, близкого давлению в резервуаре. Поршень 3 давлением воздуха и усилием пружины перемещается вниз и открывает дренажный клапан 4. Конденсат идёт на слив. Поплавок опускается из-за понижения уровня конденсата, мембрана 5 садится на седло, перекрывая доступ воздуха в полость Б. Слив конденсата будет продолжаться до тех пор, пока давление над поршнем понизится до значения, при котором давление воздуха в полости А переместит поршень в верхнее положение и перекроет дренажный клапан. Так как загрязнение дроссельных отверстий часто является причиной отказов в работе конденсатоотводчиков, в конструкции предусмотрены установка игольчатого стержня 6 для очистки дроссельных отверстий. Повышению надёжности способствует также применение пустотелого поплавка 1, применение мембранного клапана и установка сетчатого фильтра на входе. Простая и надёжная конструкция конденсатоотводчика для тяжёлых условий эксплуатации показана на рис. 3.18, б. Пустотелый поплавок 4 жёстко скреплён с осью 2, которая имеет возможность проворачиваться в корпусе клапана сброса 1. При наполнении резервуара конденсатом поплавок поднимается вверх, проворачивая ось 2 со срезом в месте её контакта с седлом отверстия сброса. Проходное сечение отверстия клапана

сброса открывается, конденсат идёт на слив. Удаление твёрдых загрязнителей и загустевших масляных отложений со дна резервуара производится через отверстие, закрываемое пробкой 5. Расположение клапана сброса выше места сбора твёрдых загрязнителей на дне резервуара, наличие трубки отбора 3 и острой кромки на срезе оси 2 обеспечивают удаление загрязнений с седла клапана, что значительно повышает надёжность работы конденсатоотводчика.

Для удаления конденсата в труднодоступных местах применяют конденсатоотводчики с дистанционным или встроенным пневматическим или электрическим управлением. Одна из конструкций устройств с дистанционным пневмоуправлением изображена на рис. 3.18, в. Сброс конденсата производится небольшими порциями в закрытую полость В с последующим перекрытием полости Б, которая сообщается с опороняемой полостью фильтров-влагоотделителей, водосборников и ресиверов через отверстие (1). При подаче давления в отверстие (12) поршень 3 перемещается, открывая клапаном 1 проход конденсату из полости Б в полость В. Снятие управляющего сигнала с отверстия (12) приводит к возврату поршня в исходную позицию, перекрытию клапаном 1 полости Б и открытию прохода в дренажное отверстие (2). Перекрытие полости Б при сбросе конденсата позволяет снизить потери сжатого воздуха.

Конденсатоотводчики с управлением временными устройствам (встроенными или расположенными вне их) изготавливаются с регулируемым временем периодичности слива от 2 с и более, продолжительностью слива от 1 до 90 мин (настройка зависит от содержания конденсата в сети и размера ёмкости сбора конденсата). Их основным недостатком является то, что при малой продолжительности открытия клапана сброса или большом промежутке времени между сбросами возможно переполнение ёмкости конденсатом, приводящее к его поступлению в сеть потребителей. По этой причине их обычно настраивают с увеличенными временем открытия для сброса конденсата и частотой сброса (с запасом), что приводит к повышению потерь сжатого воздуха.

Конструктивная схема автоматического конденсатоотводчика с электронным управлением по уровню конденсата фирмы Parker Zander представлена на рис 3.19. Конденсат поступает в полость А через входное отверстие (1). Заполняя полость, конденсат поднимает поплавок 1 и, по достижении встроенным в него магнитом 2 уровня датчика 4, последний переключается и подаёт сигнал на включение

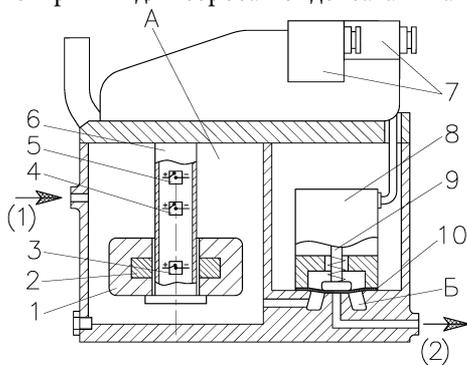


Рис. 3.19 Автоматические конденсатоотводчики с управление по уровню конденсата

соленоида 8. Сердечник 9 соленоида, преодолевая усилие пружины, поднимается и открывает мембранный клапан 10 для сброса конденсата через отверстие (2). Полости А и Б соединены каналом. Перемещение поплавка вниз при сбросе конденсата приводит к переключению датчика 3, который подаёт сигнал на отключение соленоида. Мембранный клапан сброса конденсата закрывается. Большое проходное сечение мембранного клапана сброса обеспечивает продолжительный срок его службы и малую вероятность засорения. В случае выхода из строя узла сброса конденсата поплавок всплывает выше и переключает датчик 5, дающий команду на включение аварийного звукового или светового сигнала. Основное преимущество этого вида управления конденсатоотводчиками, по сравнению с временным управлением, – отсутствие потерь сжатого воздуха при сбросе конденсата.

Соединять автоматические конденсатоотводчики с резервуарами водосборников следует через трехлинейный распределитель, что позволяет при их техобслуживании перекрыть линию от водосборника и сообщить резервуар конденсатоотводчика с атмосферой. Для повышения надёжности работы конденсатоотводчиков рекомендуется установка сетчатого фильтра на их входе с регулярной очисткой от загрязнителей. Там, где нет жёстких ограничений к габаритным размерам, поплавковые конденсатоотводчики типа, изображённого на рис. 3.18, б, благодаря низкой стоимости, простоте обслуживания и высокой надёжности предпочтительнее других.

В России производство водосборников с встроенными и автономными конденсатоотводчиками организовано на ряде предприятий. Так, ООО "ЭНСИ" выпускает устройства типа АУС с пропускной способностью 10, 20 и 30 м³/мин, эффективностью улавливания жидкой влаги более 80%.

Внимание! *Производительность (расход конденсата через сливное отверстие в дренаж) конденсатоотводчиков выбирают исходя из условий гарантированного отвода максимально возможного скопления конденсата в резервуарах фильтров и водосборников в установленный промежуток времени между сливами.*

Устройства сепарации конденсата (разделения масла и воды) предназначены для экологически безопасной утилизации конденсата в пневмосистемах предприятий. Они очищают воду от масла до санитарных норм, требуемых для её сброса в канализацию, с использованием способов: флотации, фильтрации (мембранные и коалесцентные фильтры), абсорбции или их сочетания. Эти устройства изготавливают производительностью от 1 до более 1000 л/мин и устанавливают обычно на компрессорных станциях и участках сети с большим количеством улавливаемого конденсата.

Следует отметить, что утилизация неочищенного конденсата, приводит к загрязнению окружающей среды и наказывается крупными штрафами.

Очистку конденсата проводят на предприятиях или сервисные организации. Затраты на очистку 1 м^3 конденсата до санитарных норм (например, содержания масла в сбрасываемой в дренаж воде $\leq 20 \text{ мг/л}$) зависят от вида конденсата (с разделяемыми и не разделяемыми под силой тяжести загрязнителями) и составляют от 50 до 180 дол.

Выбор устройства сепарации конденсата производят с учётом максимального содержания и вида конденсата, требуемой степени очистки конденсата от загрязнителей (масел, пыли, железа, свинца, меди, диоксида серы и др.). В разделяемом конденсате масло всплывает, образуя пленку, а тяжёлые частицы скапливаются на дне. Для очистки такого конденсата от масла до требований санитарных норм и расходах воздуха до $100 \text{ м}^3/\text{мин}$ обычно применяют устройства с последовательным улавливанием масла путём флотации + фильтрации + абсорбции.

Конструктивная схема устройства этого типа компании Parker Zander приведена на рис. 3.20. Конденсат из масловодоотделителей, фильтров, воздухо- и водосборников по трубопроводам (через определённые промежутки времени или по достижению в них определённого уровня) подаётся в камеру сброса давления А. Сжатый воздух из этой камеры выходит в атмосферу через фильтроэлемент 2 и дроссель 1. Наличие фильтроэлемента 2 снижает уровень шума выхлопа и исключает вынос масла (для предотвращения выноса аэрозолей масла в нём имеется фильтрующий слой с активированным углём). Конденсат стекает вниз камеры и по трубке 3 поступает в ёмкость отстаивания Б. Конец трубки 3 расположен ниже уровня возможного слоя всплывающего масла. Вода из ёмкости Б по каналу 4 поступает в коалесцентный фильтр 5, затем в угольный фильтр 6 и, очищенная от масла, по трубопроводу 7 сбрасывается в дренаж. Масло через регулирующую по высоте переливную ванну по шлангу 8 сливается в канистру 9. Типоразмерный ряд этих устройств выпускается с ёмкостью от 1,4 до 790 л для работы с неэмульгированным конденсатом. Устройства сепарации подобного типа других изготовителей не имеют принципиальных отличий от описанной выше конструкции.

Примерное значение объёма резервуара (V_p) этих устройств в зависимости от производительности компрессора (Q_k) дано в таблице.

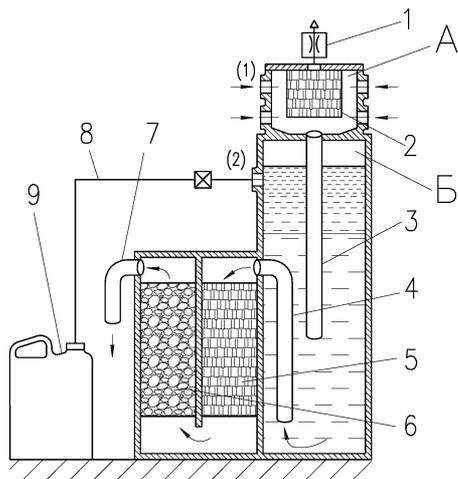


Рис. 3.20. Конструктивная схема устройства сепарации конденсата

$Q_k, \text{м}^3/\text{мин}$	1 – 1,5	2 – 2,5	4 – 6	7 – 9	12 – 16	25 – 35	50 – 70	80 – 100
$V_p, \text{литры}$	12 – 20	22 – 30	60 – 90	100 – 135	140 – 180	195 – 270	560 – 790	800 – 1100

Примечание. 1. Большие значения резервуара (V_p) из указанных выше диапазонов следует принимать при большей производительности (Q_k) и изношенности компрессоров, а меньшие – для новых компрессоров и меньшей производительности. 2. Методы и примеры расчёта содержания конденсата в пневмолиниях приведены в разделах 2.1 и 2.5.1.

На компрессорных станциях с приводной мощностью от 90 кВт до 3 мВт используют и устройства, в которых сепарация конденсата обеспечивается флотацией с последующей фильтрацией через пористую керамическую мембрану. Объём резервуара для сбора конденсата выбирают с учётом достижения требуемой степени флотации (для приближенной оценки значений этих объёмов можно воспользоваться таблицей выше.

На отечественных предприятиях чаще всего ограничиваются только использованием способа флотации, собирая конденсат в резервуары и удаляя верхний слой масла в отдельную ёмкость. Использование этого способа не обеспечивает очистку от масла воды до санитарных норм. Сочетание флотации с последующим пропуском конденсата через коалесцентные фильтры значительно повышает степень очистки от масла.

Затраты на очистку конденсата этого вида можно значительно сократить отделением масла путем флотации и передачи его на переработку как отработанное масло.

В неразделяемых конденсатах вода, масла, твёрдые частицы пыли и металлов, эфиры и др. вещества образуют стабильные эмульсии, которые невозможно или очень трудно разделить на составляющие путём флотации. Для очистки конденсата этого вида используют специальные деэмульсационные установки с применением порошков, образующих с маслом хлопья, которые затем удаляются путём фильтрации.

Имеются установки, в которых предварительно очищенный конденсат проходит через мембранные ультрафильтры, задерживающие масло, пропуская чистую воду.

3.3.4. Датчики, измерительные приборы и устройства автоматического управления очисткой

Изделия этого вида условно подразделяют на две группы: 1-я – датчики, приборы и устройства для измерения и контроля параметров сжатого воздуха и содержания в нём загрязнителей; 2-я – датчики, приборы и устройства, в т.ч. программируемые, для контроля функционирования и автоматического управления работой систем и устройств очистки сжатого воздуха.

Подробные сведения по изделиям 1 группы и их применению для контроля загрязнителей сжатого воздуха приведены в ГОСТ 24484, ГОСТ Р ИСО 8573-2, ISO 8573-3, ГОСТ Р ИСО 8573-4, ISO 8573-5, ГОСТ Р ИСО 8573-6, ГОСТ Р ИСО 8573-7, ISO 8573-8.

В общем случае, к изделиям 2 группы, применяемым для контроля функционирова-

ния и управления систем и устройств очистки сжатого воздуха, относят следующие: манометры и дифференциальные манометры; термометры; датчики давления, перепада давления, температуры и расхода сжатого воздуха; датчики наличия в сжатом воздухе загрязнителей определённого вида (твёрдых и жидких частиц, паров воды и масла, газов); датчики уровня конденсата в ёмкостях; временные устройства; программируемые контроллеры и другие виды электронных устройств управления.

Приведём краткие сведения о назначении этих устройств. Манометры, термометры, дифференциальные манометры и расходомеры предназначены для визуального контроля параметров сжатого воздуха и работы устройств очистки. Например, по показаниям дифференциального манометра определяют степень загрязнённости и необходимость замены фильтроэлемента. По показаниям термометра и расходомера делают оценку допустимости этих параметров для устройств очистки и осушки на данном участке линии.

Датчики, как правило, предназначены для управления устройствами очистки и передачи информации о контролируемых параметрах на центральный щит управления воздушоснабжением и системой очистки сжатого воздуха.

Так, датчики наличия в сжатом воздухе загрязнителей позволяют постоянно контролировать заданную степень очистки сжатого воздуха от конкретного вида загрязнителей. Например, для постоянного контроля содержания масла в режиме реального времени применяют датчик (анализатор) содержания масла «oilguard PRO» (ФРГ). Он позволяет визуально контролировать содержание масла на дисплее или передавать данные на расстояние (при необходимости со световой или звуковой сигнализацией). Аналогичную задачу решают датчики влажности сжатого воздуха. Датчики перепада давления используются для визуального контроля загрязнённости или разрушения (прорыва) фильтроэлемента. Имеются их исполнения с наличием светового или звукового сигналов. Датчики уровня конденсата в ёмкостях дают команду на сброс конденсата или сигнал о достижении предельного уровня, что может привести к его прорыву в систему. Временные устройства управляют переключением конденсатоотводчиков, баллонов адсорберов осушителей и др. устройств.

Программируемые контроллеры управляют централизованными устройствами очистки и осушки сжатого воздуха с учётом изменения его расхода и требований к степени очистки, температуры окружающей среды и других факторов. Данные о контроллерах, временных и других управляющих устройствах, входящих в комплект поставки систем управления устройствами очистки и осушки сжатого воздуха, обычно приводятся в каталогах, паспортах и инструкциях по эксплуатации изготовителей.

3.4. Выбор и размещение устройств очистки воздуха в пневмосистемах

Оптимальное решение проблемы очистки сжатого воздуха на предприятии можно обеспечить только правильным выбором, размещением и техобслуживанием средств очистки на всасывающей и нагнетательной линиях компрессорных станций, в магистральных и разводящих линиях, перед потребителем, т. е. созданием эффективной системы очистки.

В общем случае, для выбора систем и устройств очистки сжатого воздуха на предприятии необходимы следующие исходные данные.

1. Требуемые расходы, давления и их диапазон колебаний, степень очистки (классы чистоты) сжатого воздуха на всех участках пневмосистемы предприятия.

2. Экспертная оценка возможных потерь от брака продукции, простоя оборудования, аварий и др. причин из-за необеспечения требуемой очистки сжатого воздуха (условимся обозначать суммарную стоимость этих потерь индексом « Z_n »).

3. Вид существующей системы воздухообеспечения (централизованная, децентрализованная, комбинированная), тип пневмолиний (линейная, радиальная, кольцевая, тупиковая) предприятия.

4. По компрессорной станции: количество, тип, производительность, давление нагнетания и физическое состояние компрессоров; температура сжатого воздуха на выходе конечных холодильников; эффективность маслоразделителей, вторичных охладителей (при их наличии) и других устройств; наличие и ёмкость воздухохранилища.

5. По локальным компрессорным установкам: тип, производительность, режим работы, давление и температура сжатого воздуха на выходе, оснащённость устройствами очистки и ресивером, протяжённость и расположение линий подачи потребителям.

6. Пневмолинии. Схема прокладки магистральных линий с указанием диаметра, протяжённости, расположения под или над землёй, наличия уклона и теплоизоляции по участкам, материала и защитных покрытий внутренних поверхностей. Схемы прокладки разводящих и коммутационных линий с данными: материала и защитных покрытий внутренних поверхностей; расположения (на стенах с указанием расстояния до их поверхности, над или под полом); наличия вентиляционных окон и фрагментов над линиями; наличия уклона по течению воздуха и прогибов; расположения точек и исполнения отбора (с верхней или нижней точки разводящей линии) к потребителям.

7. Температура и влажность окружающей среды вне и в помещениях, где расположены пневмолинии в течение года.

8. Для существующих линий указать тип и расположение устройств очистки на участках пневмосистемы предприятия.

9. В дополнительных данных следует указать предпочтительных поставщиков

очистных устройств и ограничения по капитальным и эксплуатационным затратам и др.

В зависимости от постановки задачи и результатов пневмоаудита системы воздухо-снабжения предприятия этот перечень данных может быть расширен или сокращён.

Оптимальный выбор и размещение устройств очистки уменьшает на (20 – 25)% капитальные и эксплуатационные затраты без снижения качества очистки воздуха.

3.4.1. Методика выбора систем и устройств сжатого воздуха

Выбор систем и устройств очистки должен обеспечивать заданные требования к качеству очистки при минимальных суммарных затратах (первоначальных и эксплуатационных). Решение этой сложной задачи следует проводить с привлечением квалифицированных специалистов по очистке сжатого воздуха в следующей последовательности.

1. По исходным данным и проектной документации (строящегося или модернизируемого предприятия) или пневмоаудита (для действующего предприятия) устанавливают: вид системы воздухоснабжения (централизованная, децентрализованная или комбинированная); тип магистральных пневмолиний (линейный с ответвлениями, кольцевой, радиальный, тупиковый) и их расположение; тип и параметры компрессорного оборудования станции и локальных установок (производительность, давление, содержание загрязнителей в нагнетаемом воздухе) и их расположение; загрязнённость, влажность и температура атмосферного воздуха; температура окружающей среды в месте расположения пневмолиний и потребителей; расход сжатого воздуха (минимальный и максимальный) на участках пневмолиний и потребителями в течение суток (или смен).

2. С использованием данных по п. 1 и методов расчёта (см. раздел 2.5) определяют термодинамические параметры сжатого воздуха в линиях, устройствах и процессах.

3. По исходным и п. 1 данным, результатам расчётов по п. 2 и рекомендациям разделов 2.3 и 2.4 устанавливаются требования к очистке сжатого воздуха в магистральных и разводящих пневмолиниях, на всех участках пневмосистемы у потребителей.

4. С учётом данных пунктов 1, 2 и 3, по методике (см. далее) определяют рациональный тип системы очистки сжатого воздуха в магистральных линиях предприятия (в т.ч. с централизованной или децентрализованной осушкой) и участках, состав и расположение устройств очистки в пневмосистеме предприятия или его отдельных участков. Выбор вида системы очистки (централизованной или децентрализованной) проводят с учётом следующих факторов: процента потребляемого объёма сжатого воздуха, для которого не требуется степень очистки, обеспечиваемая централизованной очисткой (если это значение больше 15 – 20%, то централизованная система очистки обычно нецелесообразна); режима работы потребителей с различными требованиями к степени очистки воздуха; физического состояния магистральных линий (при их плохом состоянии цен-

трализованная система очистки, как правило, нецелесообразна).

Выбор системы очистки сжатого воздуха обычно проводят в два этапа (предварительно и окончательно).

Предварительный этап выбора системы очистки обычно проводят экспертным методом, что позволяет уменьшить время и трудоёмкость решения этой задачи.

Используя указанные выше исходные данные и финансовые возможности предприятия, эксперты анализируют и исключают варианты систем, которые не удовлетворяют условиям или требованиям предприятия. При проведении этого этапа часто требуется делать приближённую оценку альтернативных вариантов по первоначальным или суммарным затратам. Приведём примеры экспертной оценки.

Пример 16. На предприятии имеются потребители с разными требованиями к содержанию в сжатом воздухе жидкой влаги: $\approx 70\%$ потребителей и магистральная линия допускают ограниченное наличие жидкой влаги; одной группе компактно расположенных потребителей ($\approx 18\%$) необходимо осушенный воздух с точкой росы $+3^\circ\text{C}$, а второй группе (около 12%) – минус 20°C . Расположение магистральных линий предприятия исключает их обмерзание в холодные времена года.

Экспертами были рассмотрены четыре варианта системы очистки. 1 вариант – с наличием установки осушки типа «воздух-воздух» на компрессорной станции и размещением соответствующих устройств очистки (включая установки осушки с требуемой точкой росы) возле потребителей. 2 вариант — с наличием на компрессорной станции рефрижераторной установки осушки и размещением адсорбционных установок осушки возле второй группы потребителей. 3 вариант — с наличием адсорбционной установки на компрессорной станции. 4 вариант – без централизованной осушки с размещением соответствующих установок осушки возле потребителей. Так как все варианты обеспечивают заданные параметры очистки, то из-за финансовых ограничений экспертами и руководством предприятия было принято решение проводить оценку по стоимости комплекта оборудования систем. По результатам такой оценки эксперты предложили для дальнейшей проработки и окончательного выбора вариант 4 (наименьшая стоимость) и вариант 1, стоимость которого несколько выше варианта 4, но из-за снижения нагрузки на устройства очистки в сети эксплуатационные расходы меньше. Варианты 2 и 3 были отклонены из-за большей первоначальной стоимости.

Отметим, что при наружном расположении магистрали и требовании исключения возможности её обмерзания, был бы предпочтителен вариант 3, несмотря на его высокую стоимость.

Пример 17. На предприятии имеется литейный, металлообрабатывающий и сборочный цеха, потребляющие $12,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ (требования к очистке – 4, 6 и 8 классы по ГОСТ 17433) и покрасочное отделение, потребляющее $3,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ (требования к очистке – 1 класс по ГОСТ 17433 с точкой росы сжатого воздуха 3°C). Необходимо выбрать рациональную по затратам систему очистки (централизованную или децентрализованную). Так как из всего объёма сжатого воздуха только для 22% необходима осушка и тонкая фильтрация, экспертами было принято решение принять децентрализованную систему осушки с рефрижераторной установкой и фильтрами тонкой очистки в покрасочном отделении и фильтров, обеспечивающих необходимую степень очистки, у

каждого потребителя в цехах. Централизованная система очистки сжатого воздуха для данного случая экономически нецелесообразна из-за высоких общих затрат.

Окончательный выбор системы очистки проводят из вариантов, выбранных на предварительном этапе, путём сравнением суммарных затрат ($Z_{\text{сco}}$):

$$Z_{\text{сco}} = Z_{\text{кco}} + Z_{\text{эco}},$$

где $Z_{\text{кco}}$ – первоначальные затраты (стоимость всего комплекса оборудования, монтажа, наладки и инженерно-консалтинговых услуг поставщиков и сервисных организаций); $Z_{\text{эco}}$ – эксплуатационные затраты (на электроэнергию, техническое обслуживание, приобретение расходуемых материалов, ремонт и запасные части). $Z_{\text{кco}}$ и $Z_{\text{эco}}$ определяются за расчётный период их эксплуатации, который устанавливается экспертами и руководством предприятия из диапазона (5 – 15) лет.

Из-за финансовых ограничений часто возникает необходимость принимать решение о сокращении затрат (как правило, первоначальных) на систему очистки, что приводит к снижению качества очистки воздуха на предприятии или его отдельных участках. Такие решения следует принимать только на основе сопоставления экономии от сокращения первоначальных ($Z_{\text{кco}}$) или суммарных ($Z_{\text{сco}}$) затрат с возможными суммарными потерями ($Z_{\text{п}}$) из-за необеспечения требуемой очистки сжатого воздуха. Если они превышает экономию от снижения затрат на систему очистки, то специалисты должны рекомендовать руководству отказаться от снижения затрат на очистку.

Выбор устройство очистки сжатого воздуха. Выбор устройств очистки с относительно большой стоимостью (установок осушки, вторичных охладителей, фильтров тонкой очистки больших типоразмеров) рекомендуется также проводить в два этапа.

Предварительный этап. Экспертным методом исключаются из дальнейшего рассмотрения устройства, не отвечающие требованиям по параметрам или стоимости.

Окончательный выбор устройств очистки, выбранных на предварительном этапе, проводят путём сравнения суммарных затрат (Z_{cy}) за принятый расчётный период их эксплуатации:

$$Z_{\text{cy}} = Z_{\text{ку}} + Z_{\text{зу}} + Z_{\text{эку}},$$

где $Z_{\text{ку}}$ – первоначальные затраты; $Z_{\text{зу}}$ – энергозатраты в устройстве на очистку сжатого воздуха; $Z_{\text{эку}}$ – затраты на эксплуатацию.

Расчётный период эксплуатации устанавливается экспертами и руководством предприятия с учётом стоимости и срока службы устройств очистки (гарантии изготовителей на корпусные детали устройств очистки, как правило, не превышают 10 лет). Для дорогих устройств очистки (например, осушителей всех типов, кроме мембранных, вторичных охладителей, магистральных фильтров и др.) его рекомендуется принимать 10 лет (иногда – 15 лет), средней стоимости – 5 лет, а малой стоимости – (1 – 3) года.

Рассмотрим подробнее составляющие суммарных затрат (Z_{cy}).

Первоначальные затраты, в общем случае, включают стоимость устройств очистки, монтажных и пусконаладочных работ. При проведении выбора, монтажа и пусконаладочных работ иногда приходится прибегать к услугам поставщиков этого оборудования или сервисных организаций. Стоимость этих работ также входит в первоначальные затраты, удорожая их, но грамотное и комплексное решение этой задачи может оказаться дешевле и надёжнее. Оценку первоначальных затрат делают на основании данных стоимости устройств очистки и вспомогательного оборудования, полученных от поставщиков, а также сметной стоимости работ по вводу в эксплуатацию, представляемых их исполнителями. Затраты по вводу устройств очистки в эксплуатацию зависят от их типа, производительности, оснащённости средствами автоматики. Ориентировочная стоимость 1 н/ч работ по монтажу – (15 – 22) долл., а пусконаладке – (25 – 32) долл. Эти данные не относятся к устройствам, поставляемым изготовителями готовыми для подключения в сеть.

Энергозатраты устройств на очистку ($Z_{эпу}$) являются одним из основных параметров, которые определяют их выбор. В общем случае стоимость этих затрат включает:

$$Z_{эпу} = Z_{гсу} + Z_{эзу} + Z_{нву},$$

где $Z_{гсу}$ – затраты из-за гидравлического сопротивления устройства; $Z_{эзу}$ и $Z_{нву}$ – затраты соответственно на электроэнергию и из-за потерь сжатого воздуха устройством при функционировании. $Z_{гсу}$ имеют все проточные устройств очистки. $Z_{эзу}$ имеют устройства, потребляющие электроэнергию при работе (например теплообменные и адсорбционные установки осушки с горячей регенерацией). $Z_{нву}$ имеют устройства с потерей части сжатого воздуха при работе (например, установки осушки мембранные и адсорбционные с холодной регенерацией, устройства сброса конденсата).

Затраты на эксплуатацию устройств очистки ($Z_{эу}$) включают затраты:

$$Z_{эу} = Z_{об} + Z_{ру},$$

где $Z_{об}$ – затраты на техобслуживание и расходные материалы, которые зависят от периодичности, объёма и стоимости регламентных работ; $Z_{ру}$ – затраты на запчасти и проведение ремонтных работ. Оценку $Z_{об}$ и $Z_{ру}$ проводят на основе данных регламентов технического обслуживания устройств очистки, приводимых в паспортах и инструкциях изготовителя.

Для примера приведём краткую оценку техобслуживания осушителей.

Мембранные осушители. Практически не нуждаются в техобслуживании, так как не имеют изнашивающихся деталей и не подвержены коррозии, но необходимо следить за состоянием фильтров на входе в них и своевременно менять их фильтроэлементы*. Замену мембранного модуля рекомендуется поводить примерно через 4 года, но часто это

нецелесообразно из-за незначительной разницы в цене всего осушителя и модуля.

Абсорбционные осушители. Необходим постоянный контроль уровня абсорбента в баллоне, функционирования устройства сброса конденсата, состояния фильтров на его входе и выходе и своевременная замена их фильтроэлементов*. Требуется регулярная досыпка абсорбента (расход абсорбента составляет примерно 1 кг на 13 л поглощённой воды), частая ревизия и очистка устройства сброса конденсата.

Осушители адсорбционного типа с холодной регенерацией. Необходим контроль функционирования распределителей и состояния фильтров на входе и выходе и своевременная замена их фильтроэлементов*. Замена адсорбента через \approx 5 лет.

Осушители адсорбционного типа с горячей регенерацией. Необходим контроль функционирования распределителей, нагревательных элементов, нагнетателей атмосферного воздуха; состояния фильтров на входе и выходе и своевременная замена их фильтроэлементов*. Замена адсорбента через (3 – 4,5) года.

Осушители рефрижераторного типа. Необходим периодический контроль функционирования системы подачи хладагента, устройства сброса конденсата и загрязнённости фильтра на входе (при его отсутствии значительно увеличивается объём работ по очистке отложений загрязнителей на поверхности теплообменных элементов).

Осушители типа «воздух-воздух». Необходим периодический контроль работы вентиляторов и устройства сброса конденсата.

Угольные фильтры. Замена фильтроэлементов зависит от концентрации масляных аэрозолей и паров в сжатом воздухе на входе в них. Если она соответствует рекомендуемой изготовителями, замену обычно производят через (800 – 1200) ч.

Примечания. 1. * – Замену фильтроэлементов тонкой и ультратонкой очистки производят не реже, чем через (6 – 12) месяцев или при превышении допустимого уровня перепада давлений. 2. Стоимость фильтроэлементов обычно составляет (12 – 35)% от стоимости фильтра. Чем выше эффективность, тонкость фильтрации и размер фильтроэлемента, тем выше его стоимость. Низкую стоимость имеют пластмассовые, керамические, металлокерамические и сетчатые фильтроэлементы.

3.4.2. Выбор устройств очистки всасываемого воздуха

Анализ параметров устройств очистки всасываемого воздуха для компрессорных станций позволяет сделать следующие основные выводы и рекомендации.

Шахтные пылеулавливатели и гравитационные камеры несложны по конструкции, дешёвы, имеют малое сопротивление. Поэтому они широко применяются для предварительной очистки всасываемого воздуха на компрессорных станциях, повышая ресурс и снижая трудоёмкость обслуживания фильтров тонкой очистки. Так как пылеулавли-

тели обеспечивают только грубую степень очистки от твёрдых частиц (более 100 мкм), а гравитационные – среднюю (20 – 100) мкм, то их устанавливают перед фильтрами тонкой очистки, которые обеспечивают улавливание частиц < 10 мкм.

В зависимости от концентрации и дисперсности твёрдых частиц коэффициент очистки пылевых камер обычно находится в диапазоне (20 – 60)%, циклонов и инерционных устройств – (40 – 70)%

Устройства тонкой (окончательной) очистки всасываемого воздуха должны отвечать следующим основным требованиям: иметь высокий коэффициент очистки (90 – 95)% от твёрдых частиц, содержащихся во всасываемом воздухе (рекомендуемое содержание твёрдых частиц на входе в компрессор не должно превышать 5 мг/м³); сохранять эффективность своей работы при относительно высоких скоростях засасываемого воздуха (в металлических фильтрах скорость обычно составляет до 0,9 м/с, а в матерчатых – от 0,5 до 2 м/с); быть компактными и простыми; обладать удобством и малой трудоёмкостью обслуживания и ремонта; быть безопасными в взрыво- и пожарном отношении; иметь малую стоимость и низкое сопротивление (металлические фильтры – < 250 Па, а матерчатые – до 100 Па). Увеличение сопротивления фильтра на 100 Па снижает производительность компрессора на 0,1%, повышая удельный расход энергии более чем на 0,05%.

Для окончательной очистки всасываемого воздуха наибольшее применение получили масляные и тканевые фильтры, параметры которых приведены в таблице 3.7 [8, 10].

Таблица 3.7

Наименование показателей	Масляные фильтры			Тканевые фильтры	
	кассетные	с ванной	авт. очисткой	цилиндрич.	авт. очисткой
Коэфф. очистки	(80 – 85)%			(70 – 90)%	
Коэфф. сопротивл., кг·с/м ³	до 400*, 20**, 35***	20 – 50	35	600 – 1100	
Допуск. нагрузка, м ³ /с на м ²	до 0,6 для поршневых, 1,0 для винтовых и турбокомпрессоров			до 0,1	
Относит. стоимость	средняя	средняя	высокая	ниже средней	высокая
Относит. габариты	небольшие	средние	большие	небольшие	большие
Техобслуживание	частое	редкое	отн. редкое	частое	отн. редкое
Примечание. * – для кассетных с кольцами, ** – для кассетных с гофрированными сетками, *** – для кассетных из перфорированных стальных листов.					

Количество и тип устройств очистки на линии всасывания зависит от загрязнённости всасываемого воздуха и требований к степени его очистки. При небольшой и средней загрязнённости всасываемого воздуха обычно достаточно установить последовательно устройство инерционного типа, масляный или тканевый фильтр. В сильно загрязнённом воздушном бассейне горнорудного, цементного, металлургического и др. производств в линию всасывания обычно последовательно устанавливают три устройства

очистки (например, шахтный пылеуловитель + камеру Виста + масляный или сухой фильтр).

При высокой температуре всасываемого воздуха и значительной концентрации в нём мелкой пыли и волокон может быть целесообразной схема размещения – шахтный пылеуловитель + устройство влажной очистки + масляный или сухой фильтр.

3.4.3. Выбор и размещение устройств очистки сжатого воздуха

Прежде чем приступить к изложению рекомендаций по данному вопросу, напомним ещё раз о важности тщательного анализа и учёта исходных данных. Для примера покажем влияние ряда данных на выбор и размещение устройств очистки.

Параметры воздуха окружающей среды. Температура, влажность и загрязнённость воздуха в окружающем пространстве предприятия зависит от сезона, региона и места его расположения (см. гл. 2). Так, минимальная температура воздуха в северных регионах России зимой может опускаться до -50°C , а в южных регионах летом максимальная – до $+50^{\circ}\text{C}$, что выходит за пределы требуемого диапазона температуры всасываемого воздуха в компрессоры ($2 - 40^{\circ}\text{C}$). Это приводит к необходимости подогрева или охлаждения (например, путём водного орошения) всасываемого воздуха.

Концентрация, размер и плотность твёрдых загрязнителей в атмосферном воздухе в месте забора определяет выбор средств очистки на линии всасывания.

Температура воздуха зимой в отапливаемых помещениях находится в плюсовом диапазоне ($12 - 20^{\circ}\text{C}$), а в неотапливаемых может опускаться до минусовых значений. Летом её максимальное значение в помещениях южных регионов может достигать 40°C .

В разделе 2.5 приведены расчёты термодинамических параметров сжатого воздуха с учётом температуры окружающей среды, результаты которых необходимы для рационального выбора устройств очистки и мест их расположения.

Тип и физическое состояние компрессоров. Эти данные важны для оценки значений температуры, концентрации и фазового состояния масла в нагнетаемом воздухе. Например, содержание масла в сжатом воздухе на выходе компрессоров при давлении нагнетания ($0,6 - 0,8$) МПа: турбо-, спиральных, мембранных, «безмасляных» поршневых и винтовых – $<0,5 \text{ мг/м}^3$; «масляных» винтовых с фильтром маслосепарации – ($2 - 5$) мг/м^3 , а без фильтра стационарных – до 15 мг/м^3 , передвижных – до 32 мг/м^3 ; «масляных» новых поршневых – до 40 мг/м^3 и пластинчатых – до 10 мг/м^3 , а изношенных – соответственно до 180 и 60 мг/м^3 . Тип компрессора влияет также на фазовое состояние и дисперсность компрессорного масла в нагнетаемом воздухе.

Температура сжатого воздуха в пневмосистемах влияет на выбор устройств очистки. Приведём её типичные значения. Температура сжатого воздуха на выходе из

нагнетательного патрубка компрессоров при давлении нагнетания (0,4 – 1) МПа составляет: турбо – $\approx 80^{\circ}\text{C}$; «масляных» винтовых – на $\approx 15^{\circ}\text{C}$ выше температуры всасываемого воздуха; поршневых одноступенчатых – $(120 - 130)^{\circ}\text{C}$, двухступенчатых – $(160 - 190)^{\circ}\text{C}$; пластинчатых – до 200°C . На выходе из концевого холодильника, в зависимости от температуры охлаждающей среды, она составляет $(35 - 60)^{\circ}\text{C}$, а после масловодоотделителя – на $\approx 2^{\circ}\text{C}$ ниже. В воздухоборнике, в зависимости от режима расхода воздуха, её значение обычно выше температуры окружающей среды при постоянном большом расходе и практически равно ей при малом или отсутствии расхода. В магистралях происходит охлаждение сжатого воздуха до температуры окружающей среды, в плюсовом диапазоне – летом, а зимой – в минусовом (при наружном расположении трубопроводов). В разводящих и коммутационных линиях, расположенных внутри помещения, температура сжатого воздуха близка к температуре воздуха в помещениях. Однако при расположении разводящих линий возле стен, температура сжатого воздуха может быть ниже температуры в помещении. Например, при температуре минус $(10 - 15)^{\circ}\text{C}$ вне помещения и $(18 - 20)^{\circ}\text{C}$ внутри его, температура сжатого воздуха в трубопроводах у стен может составлять $(8 - 12)^{\circ}\text{C}$. Для определения температуры сжатого воздуха в пневматических линиях и устройствах можно воспользоваться методиками расчёта, приведёнными в разделе 2.5, или фактическими замерами.

Физическое состояние и расположение пневмолиний оказывает существенное влияние на выбор вида системы, типа и размещение устройств очистки. Так, при плохом состоянии стальных магистральных трубопроводов в сжатый воздух вносится значительное количество твёрдых загрязнителей (окалины, ржавчины и др.), что делает нецелесообразным централизованную очистку сжатого воздуха на компрессорной станции. Это приводит также к необходимости более частой установки в них центробежных фильтров без фильтроэлементов или водосборников, используемых для сбора загрязни-

Таблица 3.8

Способ очистки	Тип устройства	Коэффициент очистки от частиц размером	Гидросопротивление, МПа	Расход, м ³ /мин
С использованием силовых полей	гравитационный	≥ 60 мкм – $(20 - 60)\%$.	$\leq 0,001$	до 500
	инерционный	≥ 10 мкм – до 90%	0,003 – 0,015	
	электростатический	$\geq 0,01$ мкм – до 85%	0,005 – 0,05	
С использованием фильтрации	грубой	$\geq (40 - 100)$ мкм – до 100%	0,01 – 0,02	до 800
	средней	$\geq (5 - 25)$ мкм – до 100%	0,02 – 0,03	
	тонкой	$\geq (0,1 - 3)$ мкм – до 99,99%	0,03 – 0,04	
	ультратонкой	$\geq 0,01$ мкм – до 99,9999%	0,04 – 0,05	
Комбинированный (инерционный с фильтрацией)	грубой	≥ 40 мкм – до 100%	0,02 – 0,03	до 500
	средней	$\geq (5 - 25)$ мкм – 100%	0,025 – 0,35	
	тонкой	≥ 3 мкм – до 99,95%	0,035 – 0,045	

телей. А размещение фильтров с фильтроэлементами (особенно тонкой и ультратонкой очистки) следует производить непосредственно перед потребителями.

Влияние ряда других факторов и условий на выбор и размещение устройств очистки будет освещено далее.

Выбор устройств очистки для специфических условий (например, стерильных или систем с высоким уровнем давления) в данной книге не рассматриваются.

3.4.3.1. Выбор устройств очистки сжатого воздуха от твёрдых и жидких частиц

Предварительную оценку для выбора альтернативных вариантов устройств, обеспечивающих требуемую очистку сжатого воздуха от твёрдых и жидких загрязнителей, можно сделать, используя следующие данные: требования потребителей к степени очистки; сведения раздела 3.3.2; о температуре сжатого воздуха на входе и окружающей среды в месте их установки; рекомендации по очистке от масла (см. далее) и таблицу 3.8.

При выборе устройств очистки необходимо также учитывать условия эксплуатации, которые могут привести к выходу их из строя (например: из-за механических повреждений; воздействия температуры, вибрации, щелочной или кислотной среды).

Рекомендации по очистке сжатого воздуха от масел. Из-за высокой проникающей способности аэрозолей масел, удаление их из сжатого воздуха представляет достаточно сложную задачу. Приведём рекомендуемое расположение фильтров в пневмолинии без централизованной очистки и осушки сжатого воздуха на компрессорной станции с «масляными» поршневыми и винтовыми компрессорами. Эти условия наиболее характерны для многих предприятий в СНГ и сложны для очистки, т. к. загрязнённость сжатого воздуха на входе в магистраль может быть грубее 14 класса по ГОСТ 178433.

Предлагаемая последовательность размещения фильтров учитывает требования их изготовителей по степени очистки подаваемого на входы сжатого воздуха. При загрязнённости сжатого воздуха (12 – 14) классов по ГОСТ 178433 рекомендуется предварительная очистка воздуха центробежным фильтром, что позволяет снизить нагрузку на фильтроэлементы последующих ступеней очистки. Приведём значения остаточного содержания масла на выходе фильтров каждой ступени очистки [25]: предварительная ступень очистки центробежным фильтром с $\geq 85\%$ эффективностью по жидкой влаге – $< 16 \text{ мг/м}^3$; 1-я ступень с центробежным фильтром, оснащённым фильтроэлементом $\geq 99\%$ эффективности удаления частиц размером $\geq 3 \text{ мкм}$ – $< 5 \text{ мг/м}^3$; 2-я ступень с фильтром тонкой очистки $\geq 99,9\%$ эффективности удаления частиц размером $\geq 1 \text{ мкм}$ – $< 1 \text{ мг/м}^3$, а с фильтром тонкой очистки $\geq 99,9\%$ эффективности удаления частиц размером $\geq 0,3 \text{ мкм}$ – $\leq 0,3 \text{ мг/м}^3$; 3-я ступень с фильтром ультратонкой очистки $99,999\%$ эффективности удаления частиц размером $\geq 0,01 \text{ мкм}$ – $\leq 0,1 \text{ мг/м}^3$, а эффективности

99,99995% – 0,03 мг/м³; 4-я ступень с фильтром ультратонкой очистки $\geq 99,99999\%$ эффективности удаления частиц размером $\geq 0,01$ мкм – $\leq (0,01 - 0,008)$ мг/м³, т.е. сжатый воздух практически очищен от жидкой фазы масла и содержит только его пары.

Примечание. Приведённое выше остаточное содержание масла на выходе фильтров приведено по результатам испытаний изготовителями по методике и требованиям ISO 12500-1 в указанной последовательности расположения ступеней очистки.

Следует отметить, что охлаждение сжатого воздуха и его осушка на входе в фильтры повышает эффективность очистки от масел.

Удаление паров масла и других газообразных углеводов из сжатого воздуха обеспечивается применением фильтров с адсорбирующим элементом на основе активированного угля и ультратонкого фильтроэлемента на выходе (остаточное содержание масла – $\leq 0,005$ мг/м³). Исполнения этих фильтров с последовательным расположением поглочительных элементов из гранулированного и мелкоизмельчённого активированного угля и ультратонкого фильтроэлемента обеспечивают остаточное содержание масла $\leq 0,003$ мг/м³. Более низкое остаточное содержание масла и других углеводородов (до $\approx 0,001$ мг/м³) может быть достигнуто применением специальных фильтров или блоков очистки (например, фотокаталитических).

Следует обратить внимание специалистов, что на эффективность улавливания масляных частиц фильтрами ультратонкой очистки отрицательно влияет повышения температуры сжатого воздуха. Так, повышение температуры воздуха на входе с 20°С до 30°С увеличивает проскок масляных частиц примерно в 4,5 раза, а до 40°С – ≈ 10 раз.

3.4.3.2. Выбор устройств осушки сжатого воздуха

Выбор типа осушителя производят с учётом следующих факторов: требуемой точки росы сжатого воздуха на выходе и максимальной пропускной способности; давления и температуры сжатого воздуха на входе; температуры окружающего воздуха или охлаждающей воды (для теплообменных осушителей); места размещения; требований к ограничению энергопотерь из-за гидравлического сопротивления, потребления электроэнергии и потерь сжатого воздуха; изменения расхода на входе; финансовых ограничений.

Следует отметить важность правильного выбора степени осушки (точки росы сжатого воздуха), ибо завышенные требования приводят к увеличению суммарных затрат.

Выбор точки росы сжатого воздуха определяют исходя из следующих требований: степени осушки сжатого воздуха для пневмоустройств и технологических процессов (см. раздел 2.4); исключения возможности выпадения конденсата или обмерзания внутренних сечений пневмолиний или выхлопных отверстий пневмодвигателей (см. рас-

чѣты в разделе 2.5); исключения или снижения интенсивности коррозии трубопроводов и устройств за сѣт осушки сжатого воздуха до 50% влажности в данных условиях.

Примечание. Для ответственных случаев следует корректировать точку росы, по сравнению с расѣтной, на (2 – 5) $^{\circ}$ C глубже (отметим, что ГОСТ 17433-80 регламентирует принимать её на 10 $^{\circ}$ C глубже, но это значительно повышает затраты на осушку). Введение поправок связано с возможной неточностью расѣтов, колебанием температуры окружающей среды и сжатого воздуха, погрешностью измерений. Например, если для исключения обмерзания линий расѣтная точка росы сжатого воздуха должна быть минус 3 $^{\circ}$ C, то рекомендуется осушать его до точки росы не менее минус (5 – 8) $^{\circ}$ C.

Приведѣм краткие характеристики основных типов установок осушки (более подробные данные можно найти в разделах 3.2.2 и 3.3.2 книги, каталогах и интернете).

Установки осушки «воздух-воздух» (например, типа ОСВ) наиболее просты, надёжны и экономичны по суммарным затратам для обеспечиваемого ими диапазона осушки. Основной недостаток – невозможность обеспечения значения точки росы ($T_{тр}$) осушаемого воздуха глубже, чем температура окружающего воздуха (T_o) + $\approx 8^{\circ}$ C. По этой причине, их применение рационально в пневмосистемах, для которых достаточен обеспечиваемый ими диапазон осушки, а также для предварительной осушки воздуха, подаваемого в адсорбционные, абсорбционные и мембранные осушители.

Установки осушки рефрижераторного типа являются наиболее распространѣнным типом осушителей для обеспечения стабильного поддержания точки росы сжатого воздуха в плюсовом диапазоне от 3 до 15 $^{\circ}$ C. Этой степени осушки достаточно для многих областей применения сжатого воздуха. Их преимущества: относительно низкие стоимость и эксплуатационные расходы по сравнению с адсорбционными.

Отметим, что хотя наличие масел и твѣрдых частиц на входе в рефрижераторные осушители не оказывает прямого влияния на степень осушки сжатого воздуха, но приводит к увеличению затрат на очистку от загрязнений поверхности теплообменных элементов. По этой причине рекомендуется установка фильтра на входе в эти осушители.

Адсорбционные установки осушки применяют для обеспечения минусовых значений точки росы сжатого воздуха. Из-за высоких суммарных затрат, по сравнению с осушителями теплообменного типа, использование их для осушки сжатого воздуха в плюсовом диапазоне точки росы, как правило, нерационально. Эффективность установок этого типа понижается при повышении температуры сжатого воздуха на входе. При её значении выше (35 – 45) $^{\circ}$ C, сжатый воздух следует охлаждать.

Адсорбционные установки с холодной регенерацией наиболее просты и надёжны, а их техобслуживание не требует больших затрат. Они могут обеспечить наиболее глубокую осушку (до минус 80 $^{\circ}$ C) сжатого воздуха. Основной недостаток – большие потери

(15 – 25)% сжатого воздуха на регенерацию, что ограничивает их применение для систем с значительными объёмами осушенного воздуха и систем с изменением расхода осушенного воздуха (например, на компрессорных станциях с периодическим отключением части компрессоров или участках системы с отключением части потребителей). Расход воздуха на регенерацию адсорбента в них зависит от входного давления (например, при работе установки на номинальной производительности при давлении на входе 0,5 МПа с точкой росы минус 40°C, объём воздуха на регенерацию в $\approx 3,5$ раза больше, чем при том же значении производительности, но давлении на входе 1,6 МПа).

Адсорбционные установки осушки горячей регенерацией сложнее, имеют большую стоимость и затраты на техобслуживание. Преимущество — меньшие энергозатраты на регенерацию, что особенно важно при расходах сжатого воздуха более (250 – 300) м³/мин. Установки этого типа с регенерацией теплом сжатия наиболее экономичны по энергозатратам, но их применяют обычно для безмасляных компрессоров.

Срок службы адсорбентов в осушителях с горячей регенерацией меньше, чем в уста-

Таблица 3.9

Показатели	Теплообменные	Адсорбционные	Абсорбционные	Мембранные
Производительность, м ³ /мин	1,4 – 860	0,1 – 500	0,1 – 440	0,1 – 28
Тем-ра точки росы, при p = 0,7 МПа, °C	(от +10 до +2) – Y _х ; (T _в + 6) – Y _в ; (T _а + 10) – Y _а	до – 70*	от + 10 до – 10	от +10 до – 20*
Гидросопротивление, МПа	(0,02 – 0,04) – Y _х , Y _в (0,003 – 0,012) – Y _а	до 0,01	(0,005 – 0,01)	<0,003
Потери с/в на осушку	отсутствуют	≤ 5% – гор/рег (10 – 25)% – хол/рег	отсутствуют	5 – 30)%
Доп. тем-ра с/в на входе, °C	max: 45 – Y _х , Y _в ; Y _а	max: 35 – 50	max: 35	max: 60 min: 2
Доп. тем-ра окр. среды, °C	min: 2 – Y _х , Y _в ; минус 45 – Y _а	min: 2	не лимитируется	
Требование к с/в на входе	Огранич. жидкого масла и т/ч** – Y _х , Y _в	ограничение всех видов загрязнителей***		
Очистка с/в на выходе	не требуется	необходима от т/ч***		не требуется
Капитальные и эксплуатационные затраты	см. рис. 3.21 и 3.22			
Место размещения	Y _х , Y _в – в помещен. Y _а в любом месте	в помещении	в любом месте при T _а >2°C	
Примечания. 1. Данные приведены для диапазона рабочего давления осушителей (0,4 – 1) МПа. 2. Принятые в таблице сокращённые обозначения означают: с/в – сжатый воздух; т/ч – твёрдые частицы; T _в и T _а – температура соответственно охлаждающей воды и атмосферного воздуха; Y _х – установки осушки с хлад-агентом, Y _в – водой, Y _а – воздухом. 3. Гидросопротивление, капитальные и эксплуатационные затраты приведены без фильтров на входе и выходе. 4. * – возможна более глубокая осушка; 5 ** – обеспечивается центробежным фильтром на входе 5. *** – обеспечивается фильтрами эффективной очистки.				

новках с холодной регенерацией.

Мембранные установки осушки обычно используют для осушки сжатого воздуха в диапазоне точки росы от плюс 3°C до минус 20°C. Их основные преимущества: небольшие габариты, лёгкость монтажа, низкие затраты на техобслуживание; функционирование без потребления электроэнергии, взрыво- и пожаробезопасность, широкий температурный диапазон подаваемого на вход сжатого воздуха (от 2 до 65°C). Недостатки: большие потери сжатого воздуха для обеспечения точки росы глубже минус (15 – 20)°C, что ограничивает их применение для этого диапазона осушки производительностью до (1,5 – 3) м³/мин; высокие требования к степени очистки подаваемого в них сжатого воздуха от всех видов загрязнителей.

Абсорбционные установки осушки обычно используют для понижения точки росы сжатого воздуха не более чем на (10 – 12)°C. Их преимущества: простота конструкции и малая стоимость; низкое гидросопротивление; функционирование без потребления электроэнергии; взрыво- и пожаробезопасность; возможность применения в загрязнённых условиях. Недостатки: необходимость частого обслуживания при непрерывной работе из-за большого расхода абсорбента, невозможность обеспечения осушки глубже точки росы минус 10°C; повреждение трубопроводов и устройств в пневмосистеме при выбросе раствора абсорбента в магистраль из-за поломки устройств сброса; необходимость очистки поступающего воздуха от загрязнителей (особенно масел в жидкой фазе) для исключения замасли-

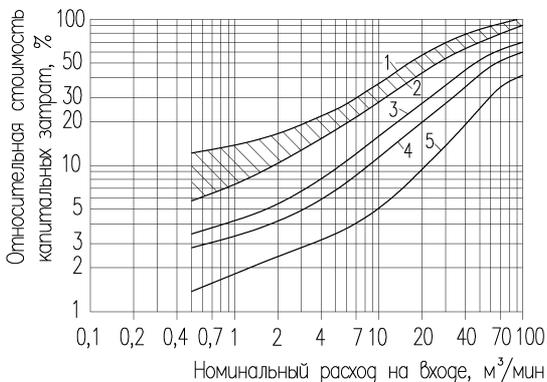


Рис. 3.21. Зависимость относительной стоимости капитальных затрат осушителей от производительности: область между 1 и 2 – адсорбционных; 3 – рефрижераторных; 4 – «воздух-воздух»; 5 – абсорбционных

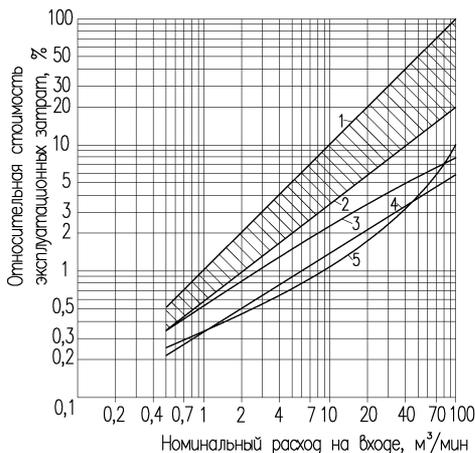


Рис. 3.22. Зависимость относительной стоимости эксплуатационных затрат осушителей от производительности: область между 1 и 2 – адсорбционных; 3 – рефрижераторных; 4 – «воздух-воздух»; 5 – абсорбционных

вания абсорбента.

Для предварительной оценки при выборе типа осушителей можно воспользоваться данными таблицы 3.9 и разделов 3.2.2 и 3.3.2.

Кривые относительной стоимости капитальных (первоначальных) затрат на рис. 3.21 построены на основе усреднённой стоимости для каждого типа осушителей, которая зависит от степени оснащённости их системами автоматики, фильтрами, приборами, объёма и сложности монтажных и пусконаладочных работ.

Приведённые на рис. 3.22 кривые характеризуют примерные значения относительной стоимости эксплуатационных затрат осушителей разных типов: 1 и 2 – адсорбционных (заштрихованная область ближе к линии 2 характерна для осушителей с холодной регенерацией и осушкой до точки росы не глубже минус 20°C, а ближе к линии 1 – с горячей регенерацией и точкой росы до минус 40°C). При осушке сжатого воздуха адсорбционным осушителем до точки росы минус 70°C затраты возрастают примерно в 2 раза по сравнению с усреднёнными; 3 – рефрижераторного с фреоновым хладагентом и точкой росы от 2 до 10°C; 4 – «воздух-воздух» (типа ОСВ) с точкой росы, равной температуре окружающей среды плюс (8 – 10)°C; 5 – абсорбционного с точкой росы не глубже минус 5°C.

Кривые 3, 4 и 5 построены на базе усреднённых данных, т. е. лежат примерно в середине области затрат для каждого типа осушителей. Эксплуатационные затраты зависят также и от других факторов (температуры и загрязнённости сжатого воздуха на входе в осушитель, температуры окружающей среды, качества техобслуживания и др.).

Отметим, что для большей части потребителей предприятий с расположением пневмолиний в помещениях достаточна осушка сжатого воздуха до точки росы в диапазоне от 3 до 15 °C, обеспечиваемая установками теплообменного типа.

Ориентировочное увеличение стоимости производства сжатого воздуха при применении осушителей разного типа составляет: «воздух-воздух» – до 1%; рефрижераторных – ≈3%, адсорбционных – до 25% (в ряде случаев – до 50%).

Грубую оценку удельной потребляемой мощности в кВт на 1 м³/мин осушенного воздуха установками разного типа можно сделать по следующим данным:

- установки «воздух-воздух» (Y_a) – (0,1 – 0,2) кВт для точки росы ($T_a + 10$)°C;
- установки с охлаждением водой (Y_b) – (0,1 – 0,2) кВт для а точки росы ($T_b + 6$)°C;
- установки с хладагентом (Y_x) – (0,1 – 0,2) кВт для точки росы плюс (3 – 10)°C;
- установки адсорбционные с холодной регенерацией – (1,3 – 1,4) кВт для росы до минус 20°C и (1,6 – 1,7) кВт для точки росы минус 40°C;
- установки адсорбционные с горячей регенерацией – (0,5 – 0,6) кВт для точки росы до минус 20°C и (0,7 – 1,0) кВт для точки росы минус 40°C;

- установки мембранные – 1,4 кВт для точки минус 20°C;

Напомним, что окончательный выбор устройств очистки от твёрдых, жидких частиц и осушки рекомендуется проводить по указанной выше методике сравнением альтернативных вариантов, выбранных на предварительном этапе, на базе конкретных данных стоимости и других параметров, представленных поставщиками.

3.4.3.3. Выбор производительности устройств очистки сжатого воздуха

Как правило, изготовители в техдокументации для каждого типоразмера устройств очистки указывают производительность (номинальный расход воздуха Q_n в м³/мин или м³/ч, приведённый к стандартной атмосфере) для определённых рабочих условий: избыточного давления воздуха на входе, обычно при 0,7 МПа; температуры сжатого воздуха на входе и окружающей среды; других параметров (например, требуемой точки росы для рефрижераторных устройств осушки).

Если параметры рабочих условий при эксплуатации устройства очистки отличаются от указанных для номинального расхода, то их требуемую производительность определяют по максимальному расходу и минимально возможному давлению воздуха на входе с использованием поправочных коэффициентов.

Отметим, что изготовители устройств осушки в техдокументации указывают значения поправочных коэффициентов по разному – с повышением или уменьшением их значений по мере изменения параметра (например, повышения давления на входе).

Внимание! 1. Более высокое давление на входе в устройство, по сравнению с значением давления, указанного изготовителем для номинального расхода, повышает его производительность, а низкое – уменьшает. Следовательно, при возрастающем значении поправочного коэффициента по мере повышения давления на входе, определение минимально необходимой производительности устройства очистки (Q_y) производится **делением** максимального расхода на входе в устройство ($Q_в$) на поправочный коэффициент, а при убывающем значении этого коэффициента по мере возрастания давления – **умножением** максимального расхода на входе в устройство ($Q_в$) на поправочный коэффициент.

2. Повышение температуры окружающей среды и сжатого воздуха на входе в устройство очистки, по сравнению с указанными изготовителем для номинального расхода, снижает его производительность, а понижение – повышает. Следовательно, при убывающем значении этих поправочных коэффициентов по мере повышения температуры окружающей среды и сжатого воздуха на входе, определение минимально необходимой производительности устройства (Q_y) производится **умножением** максимального расхода на входе в устройство ($Q_в$) на поправочные коэффициенты.

3. Проверка соответствия конкретного типоразмера устройства очистки для работы в условиях с параметрами (давлением, температурой сжатого воздуха на входе и температурой окружающей среды), отличными от указанных изготовителем для номинальной производительности (Q_n), производится в следующей последовательности: а) по данным изготовителя находят значения поправочных коэффициентов при работе на этих параметрах; б) по максимальному расходу на входе и поправочным коэффициентам определяют требуемую производительность (Q_y); в) рассчитывают фактическую производительность (Q_f) для данных условий **умножением** или **делением** номинальной производительности (Q_n) на поправочные коэффициенты (эти действия **противоположны** действиям при определении требуемой производительности, т. е. – где было деление на коэффициенты, должно быть умножение, а где умножение – деление); г) проводят сравнение требуемой и фактической производительностей. При $Q_f \geq Q_y$ устройство обеспечивает необходимую производительность при работе в данных условиях.

При отсутствии поправочных коэффициентов максимальное значение производительности устройств (Q_{max}) в зависимости от давления на входе находят по формуле:

$$Q_{max} = Q_n \cdot \frac{p_v + 1}{p_n + 1}, \text{ м}^3/\text{мин}$$

где Q_n – наибольший рекомендуемый изготовителем расход при номинальном давлении ($\text{м}^3/\text{мин}$); p_v и p_n – избыточное давление сжатого воздуха соответственно на входе в устройство и номинальное ($\text{кг}/\text{см}^2$, бар). Отметим, что превышение рекомендуемого изготовителем значения максимального расхода устройства очистки повышает его гидросопротивление и может снизить эффективность очистки.

Внимание! Устройства очистки должны эксплуатироваться в рабочих условиях (рабочего давления, температуры сжатого воздуха и окружающей среды), параметры которых не выходят за пределы значений, установленных изготовителем.

Фильтры. Выбор нужного типоразмера фильтров с параметрами, отличающимися от указанных для номинальных расходов, производят по максимальному расходу и минимальному давлению в сети с применением поправочных коэффициентов. Для примера в таблице 3.10 приведены значения поправочного коэффициента ($k_{др}$) в зависимости от давления на входе (p_v) для фильтров модели R35... завода Remeza.

Порядок

определения

Таблица 3.10

p_v , МПа	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
-------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Таблица 3.11 2

Модель	R302	R303	R304	R306	R307	R308	R310	R311	R312	R313	R314	R315	R316	R317
Q_n , $\text{м}^3/\text{мин}$	0,58	1,02	1,47	2,18	3,0	4,58	7,5	10,48	11,67	16,63	22,57	30,0	34,95	43,7

производительности

фильтра.

1. По минимальному значению рабочего давления на входе находят поправочный коэффициент ($k_{др}$). 2. Для определения минимально необходимой производительности фильтра (Q_y), максимальное значение расхода на входе необходимо поделить или умножить (см. выше разъяснение в тексте «Внимание») на поправочный коэффициент $k_{др}$. 3. По полученному значению минимальной производительности (Q_y) и номинальных расходов (при давлении в сети 0,7 МПа) конкретных моделей фильтров выбирают необходимый типоразмер фильтра с большим, чем Q_y , значением номинального расхода, но не превышающим Q_{max} .

Пример 18. Исходные данные: максимальный расход на входе – 16 м³/мин; избыточное рабочее давление – 0,5 МПа. 1. В табл. 3.10 значение поправочного коэффициента $k_{др}$ для этого давления равно 0,75. 2. Следовательно, требуемая минимальная производительность фильтра $Q_y = 16/0,75 = 21,3$ м³/мин. 3. По полученному значению Q_y и данным номинальных расходов (Q_n) типоразмерного ряда фильтров модели R3... (таблица 3.11) выберем фильтр R314 с номинальным расходом 22,57 м³/мин.

Пример 19. Проверить возможность использования фильтра с номинальной производительностью 16,63 м³/мин для его работы с минимальным избыточным давлением на входе 0,5 МПа и максимальным расходом 16 м³/мин. Порядок расчёта. 1. По табл. 3.10 для данного давления находим $k_{др} = 0,75$. 2. Определим требуемую минимальную производительность делением максимального расхода на входе в фильтр на поправочный коэффициент $k_{др}$. $Q_y = 16/0,75 = 21,3$ м³/мин. 3. Находим фактическое значение производительности фильтра при работе на давлении 0,5 МПа. $Q_ф = 16 \cdot 0,75 = 12$ м³/мин. 4. Сравнивая Q_y и $Q_ф$, мы видим, что этот фильтр явно непригоден.

Пример 20. Исходные данные: максимальный расход на входе – 16 м³/мин; избыточное рабочее давление – 1,0 МПа. 1. По таблице 3.10 для данного давления $k_{др} = 1,38$. 2. Определим требуемую минимальную производительность делением максимального расхода на входе в фильтр на поправочный коэффициент $k_{др}$. $Q_y = 16/1,38 = 11,59$ м³/мин. 3. По полученному значению расчётной производительности Q_y и данным номинальных расходов фильтров модели R3... (табл. 3.11) выберем фильтр R312 с номинальным расходом 11,67 м³/мин, который близок к расчётному.

Наряду с поправочным коэффициентом $k_{др}$ иногда приводятся данные, позволяющие корректировать выбор производительности фильтров с учётом перепада давления. Например, производительность фильтров Parker-Zander серии WS может быть увеличена в $\approx (1,5 - 1,6)$ раза, если допускается увеличение перепада давления с 50 до 120 мбар.

Отметим, что для некоторых исполнений фильтров (например, центробежных) фактический расход должен лежать в рекомендуемом изготовителем диапазоне (см., например, рис. 3.8).

Таблица 3.14

$T_{в, \text{°C}}$	35	40	45	50	55
$k_{гв}$	1,0	0,84	0,71	0,63	0,55

Таблица 3.15

$T_o, \text{°C}$	25	30	35	40	45
$k_{то}$	1,0	0,94	0,89	0,83	0,78

Таблица 3.16

$T_{тр}, \text{°C}$	3	5	7	10
$k_{тр}$	1,0	1,09 - 1,11	1,2 - 1,23	1,39 - 1,41

Таблица 3.1

№ модели	160	240	315	360	470	580	680	820	1000	1200	1700
$P_n Q_n, \text{ м}^3/\text{мин}$	2,7	4,0	5,8	6,0	7,8	9,7	11,3	13,7	18,3	21,7	28,3
$k_{др}$	0,79	0,87	0,92	0,96	1,0	1,03	1,07	1,10	1,13	1,16	1,18

Установки осушки воздуха. Наиболее сложен выбор производительности установок осушки рефрижераторного типа, предполагающий учитывать: температуру и минимальное значение давления сжатого воздуха на входе; температуру окружающей среды; требуемое значение точки росы на выходе. Например, в таблице 3.12 приведены номинальные расходы (Q_n) рефрижераторных установок осушки завода Remeza модели RFD160 - RFD1700 при избыточном давлении сжатого воздуха на входе 0,7 МПа и температуре 35°C, температуре окружающей среды 25°C, точке росы 3°C. Для определения расходов при других условиях работы, в таблицах 3.13, 3.14, 3.15 и 3.16 приведены поправочные коэффициенты, зависящие от: давления на входе (p_b) – $k_{др}$; температуры сжатого воздуха на входе (T_b) – $k_{тв}$; температуры окружающей среды (T_o) – $k_{то}$; требуемой температуры точки росы сжатого воздуха ($T_{тр}$) – $k_{тр}$.

Пример 21. Выбрать установку осушки из типоразмерного ряда рефрижераторных установок осушки моделей RFD - RFD1700 (см. таблица 3.12). Исходные данные: максимальный расход воздуха на входе $Q_b = 5,5 \text{ м}^3/\text{мин}$; избыточное давление воздуха на входе в установку – 0,4 МПа, а его температура – 40°C; температура окружающей среды – 30°C; требуемое значение точки росы потребителем равно +7°C.

1. По исходным данным находим поправочные коэффициенты в таблицах: 3.13 – $k_{др} = 0,87$; 3.14 – $k_{тв} = 0,84$; 3.15 – $k_{то} = 0,78$, 3.16 – $k_{тр} = 1,2$. 2. Определим требуемую производительность $Q_y = Q_b / (k_{др} \cdot k_{тв} \cdot k_{то} \cdot k_{тр}) = 5,5 / (0,87 \cdot 0,84 \cdot 0,94 \cdot 1,2) = 6,67 \text{ м}^3/\text{мин}$. 3. По значению Q_y и данным номинальных расходов этого ряда установок осушки (таблица 3.12) выбираем установку RED470 с номинальным расходом 7,8 м³/мин, который наиболее близок к расчётному.

Холодильные машины ОВ (ООО

Таблица 3.17

«Курганхиммаш»). Расчёт соответствия номинальной производительности (Q_n) требуемой минимальной производительности (Q_y) при работе с давлением и температурой воздуха на входе, отличающихся от указанных паспортных данных расходов, изготовитель рекомендует проводить по формуле:

$$Q_y \leq Q_n \cdot \frac{I_n}{I_{m\delta}},$$

где $I_n = 30 \text{ Дж/кг}$ и $I_{m\delta}$ – энтальпия сжатого воздуха соответственно при паспортных данных и фактическая (выбирается из таблицы 3.17 по температуре и давлению на входе).

Установки осушки адсорбционного типа. Минимально необходимая производительность (Q_y) (при возрастающем значении $k_{др}$ по мере повышения давления на входе и убывающем значении $k_{тв}$ по мере повышения температуры сжатого воздуха на входе)

Давление избыточное, МПа	Значения $I_{m\delta}$					
	Температура сжатого воздуха, °С					
	10	15	20	25	30	35
0	29,53	42,36	57,90	76,97	100,64	130,31
0,1	19,99	28,78	39,10	51,05	65,41	82,76
0,2	16,55	24,18	32,71	42,42	53,67	66,91
0,3	14,92	21,90	29,56	38,10	47,80	58,99
0,4	13,95	20,54	27,67	35,51	44,28	54,23
0,5	13,30	19,63	26,41	33,78	41,93	51,06
0,6	12,84	18,98	25,51	32,55	40,25	48,80
0,7	12,49	18,49	24,84	31,62	38,99	47,10
0,8	12,22	18,12	24,31	30,90	38,01	45,78

определяется делением расхода на входе ($Q_в$) на поправочные коэффициенты по давлению ($k_{др}$) и температуре ($k_{тв}$) сжатого воздуха на входе, т. е. $Q_y = Q_в / (k_{др} \cdot k_{тв})$.

А при противоположном изменении значений $k_{др}$ и $k_{тв}$ по мере повышения давления и понижения температуры на входе – $Q_y = Q_в \cdot (k_{др} \cdot k_{тв})$. Порядок определения минимально необходимой производительности и выбора установки осушки этого типа аналогичен приведённому выше для рефрижераторных осушителей.

Установки осушки мембранного типа Выбор производительности (типоразмера) следует производить по максимальному расходу и минимальному давлению на входе с учётом требуемой точки росы сжатого воздуха на выходе. Как правило в технической документации поставщиков приводятся данные производительности (расхода воздуха на входе и выходе) в зависимости от точки росы. Чем глубже осушка, тем меньший процент воздуха, поступающего на вход, поступает на выход. Грубую оценку зависимости расхода воздуха на выходе этих осушителей от требуемой точки росы можно сделать по следующим данным. Если расход воздуха на выходе осушителя при точке росы 3°C принять за 100%, то при минус 20°C его значение снизится до (55 – 66)%, а при минус 40°C – до (32 – 50)%.

Внимание! Следует помнить, что в адсорбционных и мембранных осушителях не весь осушенный воздух поступает на выход, так как часть его используется в процессе осушки. Так как реальный расход осушенного воздуха на выходе зависит от целого ряда факторов (температуры и давления на входе, эффективности фильтра на входе, марки абсорбента и его состояния и др.), его следует определять по данным изготовителя.

Примечание. Ориентировочное значение осушенного воздуха на выходе из адсорбционных установок в процентах от поступающего на их вход (при работе на номинальной производительности, давлении (6 – 8) МПа и температуре сжатого воздуха $\leq 35^\circ\text{C}$), в зависимости от вида регенерации: горячей осушенным воздухом – (93 – 96)%; горячей атмосферным воздухом и охлаждением осушенным воздухом – (95 – 97)%; горячей и охлаждением атмосферным воздухом – (96 – 98)%; холодной осушенным воздухом – (85 – 88)%.

Объём осушенного воздуха на выходе из адсорбционной установки с холодной регенерацией можно найти из уравнения материального баланса влаги в установке:

$$Q_{\text{вых}} = Q_{\text{вх}} \cdot \frac{p_в - p_p}{p_в}, \text{ где } Q_{\text{вх}} = Q_{\text{вых}} + Q_p - \text{объём воздуха на входе в установку,}$$

$\text{м}^3/\text{мин}$, а Q_p – объём осушенного воздуха, поступающего на регенерацию в одну из ёмкостей с адсорбентом; $p_в$ и p_p – абсолютное давление воздуха соответственно при адсорбции (на входе в установку) и регенерации, бар ($\text{кгс}/\text{см}^2$).

Пример 22. Исходные данные. На вход адсорбционной установки с холодной регенерацией подаётся $Q_{\text{вх}} = 10 \text{ м}^3/\text{мин}$ воздуха, приведённого к нормальным условиям. Абсолютное давление сжатого воздуха на входе $p_в = 6$ бар, а регенерации $p_p = 1$ бар. Определим объём воздуха на выходе:

$$Q_{\text{вых}} = Q_{\text{вх}}(p_{\text{в}} - p_{\text{р}})/p_{\text{в}} = 10 \cdot (6 - 1) / 6 \approx 8,3 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Таблица 3.18

Расход воздуха на выходе в % от номинального (Q_n)						
Температура $T_{\text{в}}$, °С	Рабочее давление на входе $p_{\text{в}}$, МПа					
	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	1,6
35	(75 – 78)	(79 – 81)	(81 – 84)	(83 – 86)	(88 – 91)	(91 – 94)
40	(69 – 71)	(73 – 76)	(75 – 78)	(79 – 82)	(83 – 86)	(90 – 93)
45	(63 – 66)	(68 – 71)	(71 – 74)	(75 – 78)	(81 – 84)	(88 – 90)
50	(57 – 60)	(64 – 67)	(68 – 71)	(72 – 75)	(79 – 81)	(85 – 88)

Отметим, что объём осушенного воздуха на выходе (в % от поступающего на вход) адсорбционных установок с холодной регенерацией зависит не только от рабочего давления, а и от изменения расхода и температуры сжатого воздуха на входе. Так, при уменьшении расхода в (2,5 – 3) раза от номинального, объём воздуха на выходе составит всего лишь (50 – 58)% от всего осушаемого воздуха. Значение расхода на выходе этого исполнения установок, в зависимости от рабочего давления ($p_{\text{в}}$) и температуры сжатого воздуха на входе ($T_{\text{в}}$), следует принимать по данным изготовителя. При отсутствии этих данных приближённое значение объёма воздуха на выходе можно определить по таблице 3.18.

Ведущие изготовители мембранных осушителей приводят в технической документации данные расхода воздуха на входе и выходе в зависимости от точки росы. Так, концерн SMC приводит графические зависимости этих параметров, а фирма KRAFTMANN указывает расход воздуха на входе и выходе для минусовых точек росы 3, 20 и 40°С.

При отсутствии этих данных, приближённое значение осушенного воздуха на выходе из этих установок (% от номинального расхода на входе) в зависимости от точки росы на выходе составляет: 10°С – (85 – 90)%; 0°С – (80 – 85)%; минус 10°С – (74 – 80)%; минус 20°С – (67 – 73)%; минус 30°С – (62 – 68)%; минус 40°С – (56 – 62)%.

3.4.3.4. Очистка сжатого воздуха на компрессорных станциях

Охлаждение сжатого воздуха в конечном холодильнике приводит к переходу части паров воды и масла в конденсат (жидкую фазу), улавливаемый в масловодоотделителе.

Воздухосборники обеспечивают не только накопление запаса сжатого воздуха и снижение пульсации давления в сети, а и улавливание твёрдых и жидких загрязнителей.

Системы очистки сжатого воздуха на предприятиях могут быть выполнены как с централизованной осушкой на компрессорной станции (как правило, это наиболее рациональный способ снижения загрязнителей в пневмосистемах), так и без неё, с расположением необходимых устройств очистки на участках пневмосистемы.

Рассмотрим несколько вариантов схем очистки сжатого воздуха на компрессорных станциях (см. рис. 3.23), обозначенных заглавными буквами.

Вариант А – схема с конечным холодильником (с однократной или повторной циркуляцией)

кулящей охлаждающей воды) и маслоразделителем без осушки сжатого воздуха на компрессорной станции. Всасываемый воздух, пройдя фильтр 1, нагнетается компрессором 2 через концевой холодильник 3, маслоразделитель 4, воздухохранилище 5 и фильтр 6 в магистраль. На станциях с турбокомпрессорами и магистральными линиями большей протяженности установку воздухохранилища обычно не производят.

При применении холодильника с однократной циркуляцией воды температура сжатого воздуха на его выходе на $(6 - 10)^\circ\text{C}$ выше температуры охлаждающей воды, что обеспечивает точку росы сжатого воздуха: зимой $-(17 - 25)^\circ\text{C}$; летом при подаче охлаждающей воды из общей сети $-(32 - 40)^\circ\text{C}$, а из артезианской скважины $-(15 - 22)^\circ\text{C}$.

При применении концевых холодильников с повторной циркуляцией воды охлаждение сжатого воздуха до температуры $(30 - 35)^\circ\text{C}$ обеспечивается подачей вентилятором на поверхность холодильника воздуха с водой, вносимой в него насосом через распылитель. Охлаждение воды производится в промежуточном охладителе. Эту схему применяют при невозможности обеспечить компрессорную станцию достаточным количеством воды. Отметим, что сравнительная стоимость комплекта оборудования с повторной циркуляцией воды в $(1,2 - 1,8)$ раза выше однократной.

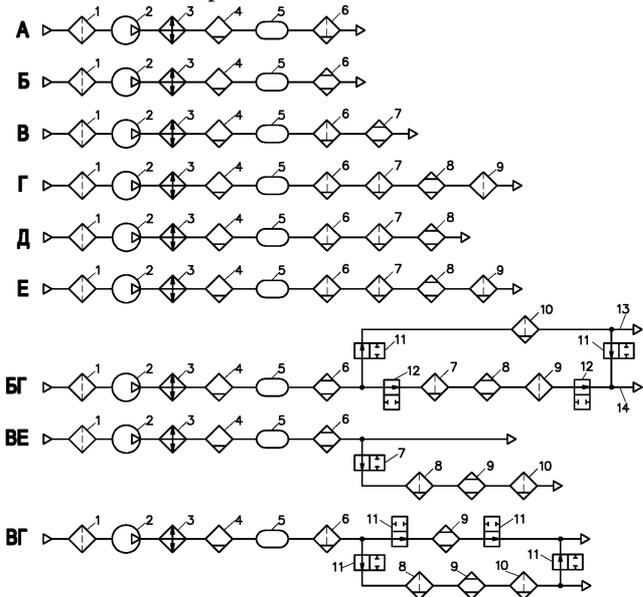


Рис. 3.23. Схемы очистки сжатого воздуха на компрессорных станциях.

Вариант Б — схема с установкой осушки «воздух-воздух» типа ОСВ. Сжатый воздух из компрессора 2, пройдя концевой холодильник 3, маслоразделитель 4 и воздухохранилище 5 (в некоторых случаях его установка не требуется), поступает в осушитель 6, где он охлаждается нагнетаемым атмосферным воздухом и обратным потоком охлажденного сжатого воздуха. Затем сжатый воздух, пройдя узел удаления конденсата, нагревается в осушителе, что уменьшает его относительную влажность, и поступает в магистраль. Точка росы на выходе осушителя (T_{\min}) при температуре атмосферного возду-

ха (T_0): $T_{\min} = T_0 + \approx 8^\circ\text{C}$.

Вариант В – схема с установкой осушки рефрижераторного типа с хладагентом. Сжатый воздух, пройдя концевой холодильник 3 и масловодоотделитель 4, воздухо-сорбник 5 и фильтр 6, поступает в осушитель 7, в котором происходит его охлаждение за счёт испарения хладагента, циркулирующего в змеевике. Из испарителя воздух проходит в встроенный влагоотделитель, освобождается от конденсата и поступает в змеевик концевой холодильника 1, где его температура повышается из-за отбора тепла от нагнетаемого компрессором сжатого воздуха, а относительная влажность уменьшается. Далее воздух проходит в магистраль. Точку росы сжатого воздуха на выходе из установки осушки этого типа обычно настраивают в диапазоне (3 – 15) °С. Отметим, что этот вариант предпочтителен для большинства пневмосистем с защищёнными от обмерзания магистралями и регионов с температурой воздуха выше нуля зимой.

Вариант Г – схема с установкой осушки адсорбционного типа. Сжатый воздух из компрессора 2, пройдя концевой холодильник 3, масловодоотделитель 4, воздухосорбник 5, грубый 6 и коалесцентный 7 фильтры, поступает в установку осушки 8 с адсорбентом, в котором происходит поглощение паров влаги. На выходе осушителя размещают фильтр 9 для улавливания выносимых частиц адсорбента (в ряде случаев его установка не требуется). Изготовители обычно поставляют осушители с настройкой точки росы минус 20, 40 и 60 °С. Установки этого типа применяются для гарантированного обеспечения точки росы сжатого воздуха в минусовом диапазоне (до 60 °С и глубже).

Вариант Д – схема с мембранной установкой осушки. Сжатый воздух, пройдя концевой холодильник 3, масловодоотделитель 4, воздухосорбник 5, фильтры тонкой 6 и ультратонкой 7 очистки, поступает в мембранную установку осушки 8 и далее в магистраль. Область их применения – осушка сжатого воздуха до точки росы в диапазоне от 3°С до минус 20°С. Реже их применяют для обеспечения точки росы до минус 40°С. Из-за больших потерь сжатого воздуха, их применение для осушки больших объёмов сжатого воздуха с точкой росы глубже минус (10 – 15)°С обычно нерационально.

Вариант Е – схема с установкой осушки абсорбционного типа. Сжатый воздух, пройдя концевой холодильник 3, масловодоотделитель 4, воздухосорбник 5, грубый 6 и коалесцентный 7 фильтры, поступает в установку осушки 8 с абсорбентом, в котором происходит поглощение влаги. На выходе осушителя размещают фильтр 9 для улавливания выносимых частиц и капель абсорбента. Точка росы на выходе осушителя зависит от температуры и давления сжатого воздуха на входе в установку и марки используемого абсорбента. Так, при давлении сжатого воздуха 0,7 МПа, температуре на входе в осушитель $\approx 35^\circ\text{C}$ и применении эффективных марок абсорбентов точка росы составляет от 15 до минус 5°С, а при температуре на входе до 25°С — от 5 до минус 10°С.

В настоящее время на предприятиях всё шире применяются схемы с наличием на компрессорной станции установок осушки с регулированием точки росы или сочетанием установок разного типа, что позволяет снизить затраты на осушку сжатого воздуха.

Для примера приведём три возможных варианта комбинированных систем осушки.

Вариант БГ – схема с установками осушки «воздух-воздух» и адсорбционного типа. Воздух из воздухохоборника 5 поступает в осушитель 6 типа ОСВ, из которого (при перекрытых кранах 11) проходит через фильтр 7, адсорбционный осушитель 8 и фильтр 9 (установка этого фильтр не всегда необходима) в магистраль. В схеме имеется байпасная линия с фильтром 10, что позволяет кранами 12 отключать при необходимости поток сжатого воздуха через адсорбционный осушитель. Эта схема применяется для систем, где не требуется постоянной подачи сжатого воздуха глубокой осушки во все пневмолинии предприятия или при режиме работы с периодическим отключением глубокой осушки. Схема обеспечивает также непрерывную подачу сжатого воздуха при выходе из строя или плановом ремонте адсорбционной установки. Увеличение стоимости оборудования этого варианта может окупиться за (1,5 – 3) года благодаря снижению эксплуатационных затрат примерно до 50% из-за уменьшения подачи воздуха глубокой осушки в линию 13, энергозатрат на регенерацию и охлаждение адсорбента, затрат на текущий ремонт по сравнению с применением варианта Г для таких пневмосистем.

Вариант ВЕ – схема с установками осушки рефрижераторного и абсорбционного типа. Сжатый воздух из воздухохоборника 5 проходит через рефрижераторный осушитель 6 и поступает в магистраль. При требованиях более глубокой осушки (например, минус 3°С) воздух поступает в магистраль через открытый кран 7, фильтр 8, абсорбционный осушитель 9 и фильтр 10. Наличие крана 7 позволяет автоматически или вручную отключать поток сжатого воздуха через абсорбционный осушитель. Эта схема может быть рациональна для предприятий с радиальным типом магистральных линий, в одну из которых требуется периодическая подача небольшого количества сжатого воздуха с точкой росы до минус (5 – 10)°С. Снижение суммарных затрат при применении этого варианта достигается за счёт уменьшения первоначальных и эксплуатационных затрат по сравнению вариантом С и затрат на абсорбенты по варианту Д.

Вариант ВГ – схема с установками рефрижераторного 7 и адсорбционного 9 типов (принципиальная схема аналогична схеме варианта ВЕ). Эта схема, в зависимости от необходимости, может обеспечить в одной или обеих пневмолиниях точку росы осушенного воздуха в плюсовом диапазоне не глубже 3°С установкой рефрижераторного типа, а в минусовом диапазоне – адсорбционной. Экономический эффект, по сравнению с вариантом Г, может быть достигнут сокращением энергозатрат.

Внимание! 1. Расположение устройств на схемах вариантов (Г – ВГ) приведено для

пневмосистем со средним расходом менее производительности осушителя, а максимальным расходом – не более производительности одновременно включённых компрессоров станции. 2. В вариантах БГ, ВЕ и ВГ исполнение теплообменных установок осушки должно быть без подогрева воздуха на выходе.

Размещение установок осушки зависит от их типа, режима расхода воздуха в системе и условий окружающей среды. Приведём ряд рекомендаций по их размещению.

1. Установки осушки обычно размещают: адсорбционные и небольшие рефрижераторные – в помещениях (имеются исполнения для установки на открытых площадках); мембранные – в помещениях и открытом воздухе (при температуре не ниже 2°C); «воздух-воздух», адсорбционные и рефрижераторные большой производительности – на открытом воздухе с защитой системы слива конденсата от обмерзания.

2. Для пневмосистем со средним расходом менее производительности осушителя, а максимальным – не более производительности компрессора, установки осушки всех типов (кроме адсорбционного с регенерацией теплом сжатия) обычно размещают за воздухохранилищем или ресивером (рис. 3.23). Это, как правило, системы предприятий с потребителями, каждый из которых имеет небольшое потребление воздуха. Это размещение снижает содержание загрязнителей и температуру сжатого воздуха на входе в осушители, способствует стабильному поддержанию точки росы благодаря постоянству нагрузки из-за наличия воздухохранилища, даёт возможность применять осушитель меньшей производительности, когда нет необходимости осушать весь нагнетаемый воздух.

3. Рефрижераторные, адсорбционные, адсорбционные и мембранные осушители следует устанавливать до воздухохранилища (или ресивера) при резких колебаниях давления или кратковременных расходах в пневмосистеме больших, чем производительность компрессора (для примера, на рис. 3.24 приведена схема установки рефрижераторной установки осушки). Это позволяет исключить перегрузку установок осушки благодаря наличию определённого запаса осушенного воздуха в воздухохранилище, повышает стабильность их работы и снижает поступление конденсата в воздухохранилище. Недостатки этого размещения: производительность осушителя должна быть не менее, чем у компрессора или работающих на станции компрессоров; при высокой температуре сжатого воздуха на входе в осушитель необходима установка вторичного охладителя или осушителя большей производительности.



Рис. 3.24. Схема размещения осушителя при резких колебаниях давления и расхода сжатого воздуха: 1 – всасывающий фильтр; 2 – компрессор; 3 – концевой холодильный агрегат; 4 – маслоотделитель; 5 – фильтр; 6 – устройство осушки; 7 – воздухохранилище.

4. На станциях с периодическим отключением части компрессоров мембранные осушители, а также адсорбционные с холодной регенерацией, работающие по временному режиму без автоматического переключением адсорберов до достижения точки росы, размещают после каждого компрессора, что снижает потери сжатого воздуха на обдувку мембранного модуля и регенерацию. Это достигается отключением установки осушки одновременно с прекращением подачи сжатого воздуха компрессором.

Расход воздуха на регенерацию адсорбционного осушителя в процентах от всего объёма воздуха, поступающего на осушку из компрессорной станции, возрастает с уменьшением подачи. При номинальной производительности расход составляет (15 – 20)%, при 75% от номинальной – (27 – 32)%, при 50% от номинальной – (42 – 46)%, а при 25% от номинальной – (85 – 89)%.

5. В установки осушки всех типов следует подавать сжатый воздух с минимальным содержанием твёрдых и жидких (особенно масла) частиц, что повышает их эффективность и срок службы, снижает затраты на техобслуживание. Это достигается установкой на входе фильтров: грубой очистки для установок «воздух-воздух» и более высокой степени очистки для установок рефрижераторного (при большом загрязнении сжатого воздуха твёрдыми частицами и наличии масла), адсорбционного, абсорбционного и мембранного типов.

6. Для очистки от пыли сорбентов на выходе адсорбционных и абсорбционных установок осушки следует устанавливать фильтр, эффективность которого должна соответствовать требованиям потребителей к степени очистки от твёрдых частиц.

7. Установки осушки размещают до редукционных клапанов, а температура сжатого воздуха на их входе не должна превышать значения, указанного изготовителем (например, для адсорбционного типа она обычно не должна превышать (35 – 40)°С.

8. При требовании бесперебойной подачи сжатого воздуха потребителям установки осушки должны быть оснащены байпасной линией. Следует отметить, что наличие байпасной линии позволяет в ряде случаев обеспечить снижение энергозатрат на осушку путём смешения влажного и осушенного воздуха. Например, смешение в тёплое время года влажного и осушенного воздуха с использованием байпасной линии в системах с адсорбционными осушителями позволяет снизить энергопотери на осушку до 50%.

3.4.3.5. Размещение устройств очистки сжатого воздуха для обеспечения классов чистоты по стандартам

Требования к очистке сжатого воздуха в СНГ задают классом чистоты по ГОСТ 17433-1985 или ГОСТ Р ИСО 8573-1 2005 и ДСТУ 4169-2003, а для ряда областей – отраслевыми стандартами (например, ГОСТ 9.010-80) или нормативными документами.

Таблица 3.19

Класс	Последовательность установки и тип устройств очистки для обеспечения классов по ГОСТ 17433
0	ЦФ + УОВ* + ТФ ($k_{O3} \geq 99,95\%$) + ТФ ($k_{O1} \geq 99,95\%$) + (УФ + ФСт + УТФ ($k_{O001} \geq 99,9999\%$))**
1	ЦФ + УОВ* + ТФ ($k_{O3} \geq 99,95\%$) + ТФ ($k_{O1} \geq 99,95\%$) + УТФ ($k_{O001} \geq 99,999$)
2	ЦФ + ТФ ($k_{O3} \geq 99,95\%$) + ТФ ($k_{O1} \geq 99,95\%$) + УТФ ($k_{O001} \geq 99,999$) или ЦФ + УОВ* + ТФ ($k_{O3} \geq 99,95\%$) + ТФ ($k_{O1} \geq 99,999\%$)
3	ЦФ + УОВ* + СФ ($k_{O10} = 100\%$)
4	ГФ($k_{O80} \geq 90\%$) + СФ ($k_{O10} = 100\%$)
5	ЦФ + УОВ* + СФ ($k_{O25} = 100\%$)
6	ЦФ + СФ ($k_{O25} = 100\%$)
7	ЦФ + УОВ* + ГФ ($k_{O40} = 100\%$)
8	ЦФ + ГФ ($k_{O40} = 100\%$)
9	ЦФ + УОВ* + ГФ ($k_{O80} = 100\%$)
10	ГФ ($k_{O80} = 100\%$)
11	ЦФ + УОВ*
12	ЦФ
13	ЦФ + УОВ*
14	ЦФ

Примечания. 1. Тип УОВ* определяется с учётом требуемой точки росы сжатого воздуха и др. факторов. 2. Для УОВ_р, УОВ_д и УОВ_л, устанавливаемых без фильтра на входе, подаваемый в них сжатый воздух рекомендуется очистить ТФ ($k_{O3} \geq 99,95\%$), а для УОВ_м – ТФ ($k_{O1} \geq 99,95\%$) + УТФ ($k_{O001} \geq 99,999$). 3. Установка (УФ, ФСт + УТФ ($k_{O001} \geq 99,9999\%$))** зависит от требований к степени очистки воздуха от паров масла и стерилизации сжатого воздуха.

Таблица 3.20

Класс	Последовательность установки и тип устройств очистки для обеспечения классов чистоты по твёрдым частицам ГОСТ Р ИСО 8573 - 1 и ДСТУ 4169
0	ГФ ($k_{O80} \geq 90\%$) + ТФ ($k_{O3} \geq 99,95\%$) + ТФ ($k_{O1} \geq 99,99\%$) + ТФ ($k_{O01} \geq 99,9999\%$) + (ФСт + УТФ)
1	ГФ ($k_{O80} \geq 90\%$) + ТФ ($k_{O3} \geq 99,95\%$) + ТФ ($k_{O1} \geq 99,99\%$) + ТФ ($k_{O01} \geq 99,9999\%$)
2	ГФ ($k_{O80} \geq 90\%$) + ТФ ($k_{O3} \geq 99,95\%$) + ТФ ($k_{O1} \geq 99,99\%$) + ТФ ($k_{O01} \geq 99,9\%$)
3	ГФ ($k_{O80} \geq 90\%$) + ТФ ($k_{O3} \geq 99,95\%$) + ТФ ($k_{O05} \geq 99,9\%$)
4	ГФ ($k_{O80} \geq 90\%$) + ТФ ($k_{O3} \geq 99,95\%$) + ТФ ($k_{O1} \geq 99,99999\%$)
5	ГФ ($k_{O80} \geq 90\%$) + ТФ ($k_{O3} \geq 99,95\%$) + ТФ ($k_{O1} \geq 99,9999\%$)
6a*	ГФ ($k_{O80} \geq 90\%$) + ТФ ($k_{O3} \geq 99\%$) + ТФ ($k_{O05} \geq 99,99\%$)
6б*	ГФ ($k_{O80} \geq 90\%$) + ТФ ($k_{O3} \geq 99\%$) + ТФ ($k_{O1} \geq 99,99\%$)
6	ГФ ($k_{O80} \geq 90\%$) + ТФ ($k_{O3} \geq 99\%$)
7a*	ГФ ($k_{O80} \geq 90\%$) + СФ ($k_{O10} = 100\%$)
7б*	ЦФ + СФ ($k_{O25} = 100\%$)
7	ЦФ + ГФ ($k_{O40} = 100\%$)
8	ГФ ($k_{O80} = 100\%$)
9	ЦФ

Примечания. 1. * – Классы 6a, 6б, 7a и 7бв ГОСТ Р ИСО 8573-1 отсутствуют. 2. Целесообразность установки и выбора тонкости фильтрации (ФСт + УТФ)** зависит от требований потребителей к степени очистки от твёрдых частиц и стерилизации сжатого воздуха.

Обеспечение требований по очистке сжатого воздуха достигается выбором и размещением устройств очистки в пневмосистеме (компрессорной станции или установке, на участках пневмолиний и непосредственно у потребителей) с учётом ряда факторов.

Для примера, в пневмосистемах без централизованной осушки на компрессорной станции с большим содержанием твёрдых и жидких загрязнителей в сжатом воздухе (12 и 14 класса по ГОСТ 17433) и его температурой на входе в сеть до 35°C в таблицах 3.19 – 3.24 приведено возможное размещение устройств очистки, обеспечивающее классы чистоты по указанным стандартам.

В таблицах приняты следующие сокращённые обозначения. 1. ФЦ и ГФ – центробежный фильтр соответственно без и с наличием фильтроэлемента, коэффициентом очистки от жидкой влаги $\geq 85\%$ (например, тип 1 по ГОСТ 17437 или тип ФВОВ завода Курганхиммаш). 2. СФ – центробежный фильтр с фильтроэлементом, коэффициентом очистки от жидкой влаги $\geq 90\%$ (например, тип 2 по ГОСТ 17437 или тип ФВОВ-П завода

Таблица 3.21

Класс	Тип устройств осушки для обеспечения классов чистоты по влажности (ГОСТ Р ИСО 8573-1 и ДСТУ 4169)
0	УОВ _{АД} (т/р глубже -70°C)
1	УОВ _{АД} (т/р $\leq -70^\circ\text{C}$)
2	УОВ _{АД} ** , УОВ _М ** , (т/р $\leq -40^\circ\text{C}$)
3	УОВ _{АД} ** , УОВ _М ** , (т/р $\leq -20^\circ\text{C}$)
4, 5, 6	УОВ _Р ** , УОВ _{ВВ} ** , УОВ _{АБ} ** , УОВ _М **
6а*	УОВ _Р ** , УОВ _{ВВ} ** , УОВ _{АБ} **

Примечания. 1. ** – выбор УОВ определяется с учётом требуемой точки росы сжатого воздуха и др. факторов. 2. Для УОВ_Р, УОВ_{АД} и УОВ_{АБ} без фильтра на входе подаваемый сжатый воздух рекомендуется очистить ТФ ($k_{\text{O}_3} \geq 99,95\%$), а для УОВ_М – ТФ ($k_{\text{O}_1} \geq 99,95\%$) + УТФ ($k_{\text{O}001} \geq 99,999$). 3. * – Класс 6а в ГОСТ Р ИСО 85731-1 отсутствует.

да Курганхиммаш). 3. ТФ и УТФ – фильтры соответственно тонкой и ультратонкой очистки. 4. ФСт – стерильный фильтр. 5. УОВ_{ВВ}, УОВ_Р, УОВ_{АД}, УОВ_{АБ} и УОВ_М – установки осушки соответственно типов «воздух-воздух», рефрижераторные, адсорбционные, абсорбционные и мембранные. 6. УФ – угольный фильтр. 7. k_{O} – коэффициент эффективности очистки твёрдых частиц заданного размера в процентах, а цифра за нижним индексом «О» – размер частицы в мкм. Так, ГФ ($k_{\text{O}80} = 100\%$) – грубый фильтр с эффективностью очистки 100% твёрдых частиц ≥ 80 мкм, ТФ ($k_{\text{O}_3} \geq 99,95\%$) – тонкий фильтр с эффективностью очистки $\geq 99,95\%$ твёрдых частиц ≥ 3 мкм, а УТФ ($k_{\text{O}001} \geq 99,95\%$) – ультратонкий фильтр с эффективностью очистки $\geq 99,95\%$ твёрдых частиц $\geq 0,01$ мкм.

Примечания. 1. Последовательность размещения устройств сделана с учётом обеспечения их паспортной эффективности и надёжности функционирования (например, исключения быстрой загрязнённости фильтроэлементов, адсорбентов, абсорбентов,

мембранных модулей и поверхностей теплообменных элементов).

2. Рекомендуемая последовательность размещения фильтров тонкой и ультратонкой очистки предложена для условий: температура сжатого воздуха на входе не превышает (35 – 40)°; трубопроводы и соединения между ними и осушителем не вносят загрязнители в поток сжатого воздуха. 3. Приведённое в таблицах размещение устройств необходимо скорректировать для пневмосистем: с централизованной на компрессорной станции осушкой сжатого воздуха, достаточной для всех участков и потребителей сети (для примера в таблице 3.24 приведено размещение устройств для этого случая); с подачей

Таблица 3.22

Класс	Последовательность установки и тип устройств очистки для обеспечения классов чистоты по содержанию воды в жидкой фазе (ГОСТ Р ИСО 8573-1 и ДСТУ 4169)
7а*	ГФ (k _{О80} ≥ 90%) + ТФ (k _{О3} ≥ 99,95%) + ТФ (k _{О1} ≥ 99,25%)
7	ГФ (k _{О80} ≥ 90%) + ТФ (k _{О3} ≥ 99,95%)
8	ЦФ + ГФ (k _{О80} ≥ 90%)
9	ЦФ

Примечание. * – Класс 7а в ГОСТ Р ИСО 8573-1 отсутствует.

Таблица 3.23

Класс	Последовательность установки и тип устройств очистки для классов чистоты по содержанию масел (ГОСТ Р ИСО 8573 - 1 и ДСТУ 4169)
0	ГФ (k _{О80} ≥ 90%) + ТФ (k _{О3} ≥ 99,95%) + ТФ (k _{О1} ≥ 99,925%) + УТФ (k _{О001} ≥ 99,9999%) + УФ**
1	ГФ (k _{О80} ≥ 90%) + ТФ (k _{О3} ≥ 99,95%) + ТФ (k _{О1} ≥ 99,925%) + УТФ (k _{О001} ≥ 99,9999%)
2	ГФ (k _{О80} ≥ 90%) + ТФ (k _{О3} ≥ 99,95%) + УТФ (k _{О01} ≥ 99,99%)
3	ГФ (k _{О80} ≥ 90%) + ТФ (k _{О3} ≥ 99,95%) + ТФ (k _{О1} ≥ 99,9%)
4	ГФ (k _{О80} ≥ 90%) + ТФ (k _{О3} ≥ 99,95%)
5*	ЦФ

Примечание. 1. * – Класс 5 в ГОСТ Р ИСО 8573-1 отсутствует. 2. Выбор УФ** зависит от степени очистки

Таблица 3.24

Класс	Последовательность установки и тип устройств очистки для классов по ГОСТ 17433 при централизованной осушке сжатого воздуха
0	ЦФ ++ ТФ (k _{О3} ≥ 99,95%) + ТФ (k _{О1} ≥ 99,95%) + УТФ (k _{О001} ≥ 99,9999%) + [УФ, ФСт]*
1, 2	ЦФ + ТФ (k _{О3} ≥ 99,95%) + ТФ (k _{О1} ≥ 99,95%) + УТФ (k _{О001} ≥ 99,999)
3, 4	ГФ (k _{О80} ≥ 90%) + СФ (k _{О10} 100%)
5, 6	ЦФ + СФ (k _{О25} = 100%)
7, 8	ГФ (k _{О40} = 100%)
9, 10	ГФ (k _{О80} = 100%)
11, 12, 13, 14	ЦФ

Примечания. 1. Размещение устройств очистки разработано при обеспечении степени осушки сжатого воздуха на компрессорной станции достаточной для всех участков и потребителей пневмосистемы. 2. Необходимость установки и тип УФ* и ФСт* зависит от конкретных требований потребителей к степени очистки от масла и стерилизации сжатого воздуха.

сжатого воздуха турбо- и безмасляными компрессорами, что позволяет исключить необходимость установки устройств очистки его от масла в ряде областей применения; с отклонением температуры сжатого воздуха и окружающей среды от значений, указанных изготовителем для нормального функционирования устройств очистки (например, если температура сжатого воздуха 50°C, а для нормальной работы установки осушки необходима температура на входе не выше 35°C, то перед ней, дополнительно к устройствам в таблицах 3.19 и 3.21, необходимо установить вторичный охладитель); локальных пневмосистем с индивидуальными компрессорными установками, оснащёнными фильтром для улавливания масляных и твёрдых частиц.

3.4.3.6. Примеры размещения устройств очистки у потребителей

В разделе 2.4. были приведены общие рекомендации по степени очистки сжатого воздуха от загрязнителей для основных областей его применения, разделы 3.2, 3.3 и 3.4 содержат основные сведения по устройствам очистки, а в таблицах 3.19 – 3.24 были даны примеры размещения устройств очистки для обеспечения классов чистоты по стандартам.

Используя конкретные требования к степени очистки сжатого воздуха и приведённые выше данные, приступают к выбору оптимальной по суммарным затратам схеме размещения устройств очистки для участков и потребителей пневмосистемы.

Приведём примеры и ряд рекомендаций, полезных для решения этой задачи.

Если требования к очистке сжатого воздуха заданы классами по ГОСТ 17433, то для выбора и размещения устройств очистки можно воспользоваться данными таблиц 3.19 и 3.24, но для пневмосистем с условиями, которые отличны от оговорённых для этих таблиц, размещение устройств очистки должно корректироваться.

Если требования заданы классами по ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005 и ДСТУ4169-2003, то сделать это сложнее, так как приходится анализировать гораздо больше альтернативных вариантов схем размещения устройств очистки. Для примера приведём возможные варианты размещения устройств очистки для шести групп участков и потребителей сжатого воздуха (таблицы 3.25 и 3.26) при подаче в сеть сжатого воздуха с температурой не выше 35°C, содержанием твёрдых и жидких загрязнителей не грубее 8 класса по твёрдым частицам, 9 класса – по воде в жидкой фазе и 4 класса по – маслам по ГОСТ Р ИСО 8573 - 1 - 2005 (системы без централизованной осушки сжатого воздуха).

В дополнение к приведённым в таблицах данным отметим следующее: каждая из групп в таблице 3.25 может быть дополнена другими областями применения сжатого воздуха с аналогичными требованиями к степени его очистки; варианты размещения устройств очистки в таблице 3.26 не являются догмой и могут уточняться для конкрет-

Таблица 3.25

Номер группы	Наименование групп участков и потребителей сжатого воздуха	Требования к классу чистоты по ГОСТ Р ИСО 8573 1 и ДСТУ 4169					
		А	В	С	Г	Б	К
1	Магистральные линии с встроенными в них устройствами (вентили, водосборники и др.)	8	9	5	1	1	1
2	Разводящие и коммутационные линии, простые-пневмоустройства* в машиностроении, горной и других отраслях промышленности, дутье в печи	7б – 7	7	4	1	1	1
3	Стоматологические и фотолaborатории, точные пневмоустройства** и пескоструйная обработка, пневмотранспорт гранул, зёрен и бумаги, покраска*	6а – 3	5 – 4	2 – 1	1	0 – 1	1
4	Пищевое, электронное, биоинженерное, фармацевтическое производства, обработка фотоплёнок, медицина, пневмотранспорт порошков, ответственные покрытия** и покраска**	5 – 1	4	1 – 0	1	0 – 1	0
5	Сжатый воздух с жёстким ограничением паров масла в пищевом, электронном, фармацевтическом и химическом производствах, для особо высокого качества покрытий и покраски, упаковки продуктов	3 – 1	3 – 1	0	1	0 – 1	0
6	Стерильный сжатый воздух с жёстким ограничением паров масла в пищевой, электронной, фармацевтической, химической промышленности и медицине	3 – 1	3 – 1	0	0	0	0

Примечания. 1. Приняты такие сокращённые обозначения классов чистоты сжатого воздуха по ГОСТ Р ИСО 8573-1 и ДСТУ 41690: А – по твёрдым частицам; В – по влажности и воде в жидкой фазе; С – по маслам; Г – по газам; Б – по микроорганизмам; К – по кислотам и щелочам. 2. * – невысокие требования к качеству или надёжности и безопасности. 3. ** – высокие требования к качеству или надёжности и безопасности (превышение содержания загрязнителей выше требуемого могут привести к большим экономическим потерям или аварии и травмам обслуживающего персонала).

Таблица 3.26

Номер группы	Последовательность установки и тип устройств очистки для обеспечения требуемой степени очистки сжатого воздуха
1*	ГФ ($k_{080} = 100\%$)
2*	ЦФ + СФ ($k_{025} = 100\%$)
3	ЦФ + ТФ ($k_{03} \geq 99,95\%$) + УОВ _р + [ТФ ($k_{01} \geq 99,95\%$) + УТФ ($k_{0001} \geq 99,99\%$)]**
4	ЦФ + ТФ ($k_{03} \geq 99,95\%$) + УОВ _р + ТФ ($k_{01} \geq 99,95\%$) + УТФ ($k_{0001} \geq 99,9999\%$) + УФ
5	ЦФ + ТФ ($k_{03} \geq 99,95\%$) + УОВ _А + ТФ ($k_{01} \geq 99,95\%$) + УТФ ($k_{0001} \geq 99,9999\%$) + УФ
6	ЦФ + ТФ ($k_{03} \geq 99,95\%$) + УОВ _А + ТФ ($k_{01} \geq 99,95\%$) + УТФ ($k_{0001} \geq 99,9999\%$) + УФ + СТУ**

Примечания. 1. Наименование участков и потребителей, обозначенных цифрами, полностью соответствует наименованиям с аналогичными цифровыми обозначениями в таблице 3.25. 2. Сокращённые обозначения устройств очистки приведены выше (см. страницы. 122 и 123). 3. * – в условиях минусовых температур сжатый воздух для этих групп пневмосистемы необходимо осушить. 5. ** – выбор типа устройства очистки зависит от требований потребителей.

ных требований, режимов работы и условий потребителей; из-за необходимости обеспечения классов чистоты по отдельным видам загрязнителей (например, по влажности или маслу), по другим видам загрязнителей (например, твёрдым частицам) класс

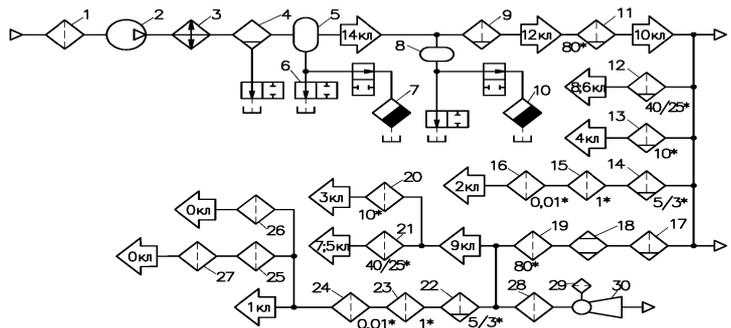


Рис. 3.25. Схема размещения устройств очистки сжатого воздуха в пневмосистеме без централизованной осушки

чистоты может быть даже выше того класса, который необходим для потребителя.

Пример возможного размещения устройств очистки в пневмосистеме предприятия без централизованной осушки сжатого воздуха на компрессорной станции для обеспечения классов сжатого воздуха по ГОСТ 17433 дан на рис. 3.25. Воздух через всасывающий фильтр 1 поступает в компрессор 2, который нагнетает его в магистраль предприятия через концевой холодильник 3, влагомаслоотделитель 4 и воздухохранилище 5. Часть конденсированной воды и масла улавливается во влагомаслоотделителе и воздухохранилище. Сброс влаги из воздухохранилища производится конденсатоотводчиком 7, а вентилем 6 обеспечивается периодическая продувка для удаления загрязнений из его нижней части. При высоком содержании влаги в атмосферном воздухе, большом выносе масла из компрессоров и плохом состоянии трубопроводов загрязнённость сжатого воздуха может быть (12 – 14) класса. Понижение температуры сжатого воздуха в магистрали из-за охлаждения воздухом окружающей среды с более низкой температурой приводит к дальнейшей конденсации паров влаги. Для удаления жидкой влаги в магистрали рекомендуется установка водосборников 8 и магистральных центробежных фильтров 9 без фильтроэлементов с устройствами сброса конденсата (в местах его большого скопления необходима установка автоматического конденсатоотводчика 10). Количество и места размещения водосборников и фильтров зависят от протяжённости участков магистрали, наличия теплоизоляции и впадин. При большой протяжённости магистрали для исключения её обводнения рекомендуется установка последовательно нескольких фильтров-влагоотделителей или водосборников с конденсатоотводчиками.

При входе магистральной линии в помещение необходимо устанавливать фильтр-влагоотделитель с конденсатоотводчиком. Места установки водосборников и фильтров должны исключать их обмерзание при минусовой температуре окружающей среды.

Отбор сжатого воздуха из разводящих линий к потребителям следует производить

из верхней точки трубопроводов, а непосредственно перед потребителями устанавли- вать индивидуальные фильтры для удаления загрязнителей, вносимых участками трубо- проводов до него. Для подачи потребителям сжатого воздуха 12 класса по ГОСТ 17433 достаточно установить центробежный фильтр 9 без фильтроэлемента, а 10, 8, 6 и 4 классов – необходима установка фильтров 11, 12 и 13 с фильтроэлементами требуемой тонкости фильтрации. Для гарантированного обеспечения 2 класса необходимо после- доовательно установить фильтры 14, 15 и 16. Наличие фильтров 14 и 15 необходимо для исключения быстрого засорения фильтроэлементов тонкого 15 и ультратонкого 16 фильтров.

Обеспечение подачи сжатого воздуха, не содержащего жидкой влаги (1, 3, 5, 7, 9 классы), достигается размещением фильтров необходимой тонкость фильтрации (19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26) после установки осушки 18, выбор которой производится в соответ- ствии с требованиями потребителей к точке росы сжатого воздуха и др. факторов. Для 11 и 13 классов установка фильтров после осушителя 18 обычно не требуется. На входе в устройства рефрижераторного типа следует устанавливать фильтр 17 для очистки от жидкого масла, а адсорбционного, мембранного и абсорбционного типов рекомендуется установка фильтров тонкой и ультратонкой (только для мембранных) очистки.

Для 0 класса, в зависимости от требований потребителей, может возникнуть необхо- димость дополнительной установки угольного, стерильного и ультратонкого фильтров (25, 26 и 27).

При высокой степени очистки сжатого воздуха от масел для электронного, пи- щевого, фармацевтического и других производств реко- мендуется установка фильтров тонкой и ультра- тонкой очистки, адсорбци- онных устройств осушки. Удаление из воздуха паров масла обеспечивается уста- новкой после ультратонкого фильтра угольного фильтра (или фильтров, см. выше), а других запахов и газов – специальных фильтров.

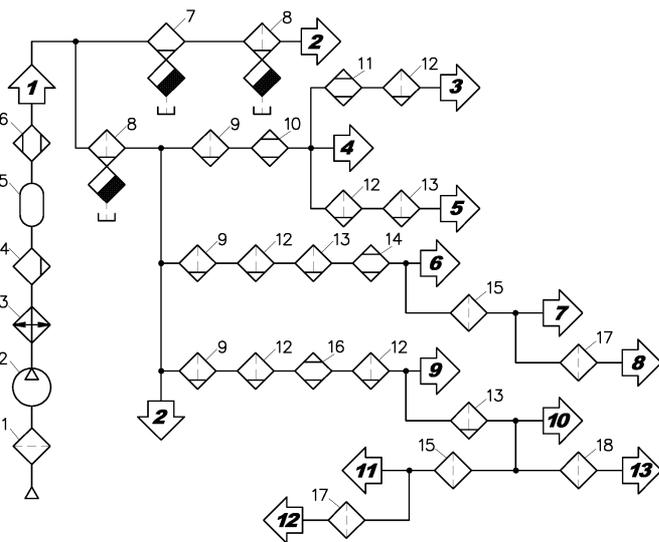


Рис. 3.26. Схема размещения устройств очистки в пневмосистеме с централизованной осушкой

Для устройств обдувки и сушки, систем перемешивания ряда продуктов и аэрации может быть установлен эжектор 30 с фильтром 28 на входе и фильтром 29 на всасывании воздуха с необходимой тонкостью фильтрации.

На схеме цифры внутри стрелок обозначают класс воздуха по ГОСТ 17433 на выходе фильтра, а обозначение под фильтрами через дробь – тонкость фильтрации в зависимости от установленного в нём фильтроэлемента (например, фильтр с обозначением 0,01* означает тонкость фильтрации 0,01 мкм, а с обозначением через дробь 40/25* означает его поставку с фильтроэлементом 40 или 25 мкм).

Размещение устройств очистки с централизованной осушкой воздуха при требованиях классов чистоты по ГОСТ 17433 можно сделать с использованием таблицы 3.24, а при требованиях по ГОСТ Р ИСО 8573 - 1 - 2005 и ДСТУ4169 - 2003 – таблиц 3.20 – 3.23.

Для примера на рис. 3.26 приведена схема размещения устройств очистки ООО «ЭНСИ», которая, как и таблица 3.26, может быть использована для обеспечения классов чистоты сжатого воздуха по ГОСТ Р ИСО 8573 - 1 - 2005 и ДСТУ4169 - 2003. В этой схеме с централизованной осушкой сжатого воздуха на компрессорной станции, воздух через всасывающий фильтр 1 поступает в компрессор 2 и нагнетается через концевой охладитель 3, масловодоотделитель 4, воздухосорбник 5, осушитель «воздух-воз-

Таблица 3.27

Значение номера в стрелке	Классы чистоты по видам загрязнителей ГОСТ Р ИСО 8573 и ДСТУ4169					
	А	В	С	Г	Б	К
1	7б – 8	4 – 6а	4	1	1	2
2	7а – 8	4 – 8	4 – 5	1	1	2
3	2 – 6б	< 4	2 – 3	1	1	1 – 2
4	4 – 6	4 – 6а	3 – 4	1	1	1 – 2
5	0 – 2	4 – 6а	1 – 2	1	0 – 1*	0 – 1
6	0 – 2	3 – 6	1 – 2	1	0 – 1*	0 – 1
7	0 – 2	3 – 6	0 – 1	1	0 – 1*	0 – 1
8	0 – 2	3 – 6	0 – 1	0 – 1*	0	0 – 1
9	2 – 6б	0 – 4	1 – 2	1	1	0 – 1
10	0 – 2	0 – 4	1	1	0 – 1*	0 – 1
11	0 – 2	0 – 4	0 – 1	1	0 – 1*	0 – 1
12	0 – 2	0 – 4	0 – 1	0 – 1	0	0 – 1
13	0 – 2	0 – 4	0 – 1	0	0 – 1	0 – 1

Примечания. 1. Необходимость установки фильтров на входе и выходе осушителей 10, 11, 14 и 16 отпадает при их наличии в поставляемых установках. 2. Предполагается что угольный фильтр 15 снабжён ультратонким фильтроэлементом (при его отсутствии на выходе следует устанавливать ультратонкий фильтр). 3. Значение классов чистоты из указанных в таблице 3.27 диапазонов следует уточнять по фактической эффективности устройств очистки (например, осушители могут быть настроены на разное значение точки росы, а эффективность фильтров зависит от ряда факторов и исполнения) и условий их функционирования (например, расхода и температуры сжатого воздуха, качества техобслуживания и др.). 4. Знак «<» перед значением класса 4 означает более глубокую осушку. 5. В целях упрощения на схеме не отражены байпасные линии для осушителей.

дух» 6 в магистраль. Удаление выпавшего конденсата в пневмолиниях из-за охлаждения сжатого воздуха обеспечивается устройствами сбора и слива конденсата 7 и магистральными фильтрами типа МВО 8 с конденсатоотводчиком. Более жёсткие требования к очистке сжатого воздуха на участках пневмосети обеспечивают соответствующими фильтрами (например, коалесцентным фильтром с тонкостью фильтрации 3 мкм) и устройствами осушки. Так, для обеспечения точки росы сжатого воздуха в диапазоне (3 – 15)°С рекомендуется рефрижераторный осушитель 10 с фильтром 9 на входе, а более высокая степень очистки от твёрдых частиц и масляных аэрозолей достигается коалесцентными фильтрами тонкой 12 (1, 0,3 и 0,1 мкм) и ультратонкой 13 (0,01 мкм) очистки. Осушку до точки росы минус 5°С для небольших эпизодических расходов воздуха (например, для лабораторных целей) можно обеспечить абсорбционным осушителем 11 с фильтром 12 на выходе. Более глубокую осушку обеспечивают установки осушки мембранного 14 и адсорбционного 16 типов. Удаление микробиологических загрязнителей достигается стерильными фильтрами 17. Отметим, что ультратонкий фильтр высокой эффективности задерживает и частицы микроорганизмов размером $\geq 0,01$ мкм. Высокая степень очистки от паров масел и газообразных углеводородных частиц достигается угольными фильтрами 15. Токсичные газы удаляют специальными фильтрами (например, каталитическими).

Сокращённые обозначения классов чистоты сжатого воздуха приведены в таблице 3.25. Значения классов чистоты на выходе устройств очистки в таблице 3.27 следует находить по номеру в стрелках на схеме рис. 3.26.

3.5. Основные требования к монтажу и эксплуатации пневмолиний и устройств очистки сжатого воздуха

Важным фактором в обеспечении необходимого потребителям качества очистки сжатого воздуха является организация и проведение работ по монтажу и техобслуживанию систем и устройств очистки в строгом соответствии с правилами, требованиями и рекомендациями нормативных документов и инструкций изготовителей.

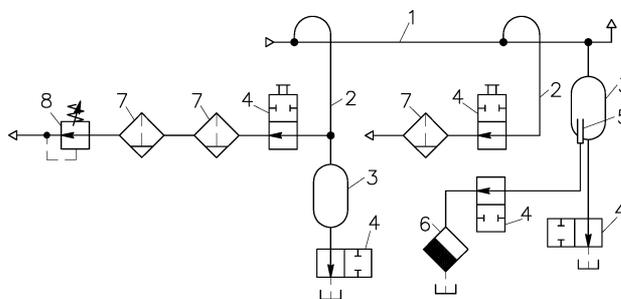


Рис. 3.27. Схема монтажа отводов устройств очистки у потребителей: 1 – разводящая и 2 отводящие линии; 3 – водосборники; 4 – вентили; 5 – трубка забора конденсата; 6 – конденсатоотводчик

Коротко рассмотрим наиболее важные из них, выполнение которых уменьшает содержание загрязнений в сжатом воздухе и снижает затраты на очистку.

3.5.1. Монтаж пневмолиний и устройств очистки

Монтаж пневмолиний и устройств очистки необходимо выполнять с учётом следующих основных требований и рекомендаций.

1. Линии подачи сжатого воздуха предприятия (цехам, участкам и крупным группам потребителей) рекомендуется выполнять по замкнутой схеме, что позволяет проводить их техобслуживание без отключения всей системы и значительно снизить энергопотери на гидравлическое сопротивление при подаче воздуха потребителям.

2. До монтажа все компоненты пневмолиний должны быть очищены (см. ниже).

3. Во избежание обводнения и засорения магистральные и разводящие линии необходимо монтировать с уклоном $(3 - 5)^\circ$ в сторону движения потока воздуха к нижней точке водосборников и фильтров с конденсатоотводчиками. Это составляет понижение уровня на $(6 - 9)$ мм на 1 м протяжённости трубопровода. Отводы 2 к потребителям сжатого воздуха от разводящей линии 1 (см. рис. 3.27) следует подсоединять сверху, что значительно снижает попадание в них конденсата и твёрдых частиц. Это требование рекомендуется выполнять даже для систем с централизованной осушкой воздуха, что повышает надёжность подачи потребителям менее загрязнённого сжатого воздуха.

4. При укладке пневмолиний следует исключать образование впадин, что позволит избежать скопления в них загрязнений. Например, пластмассовые трубопроводы при высокой температуре окружающей среды удлиняются, что приводит к образованию впадин. При невозможности исключения впадин, в наиболее низких местах необходимо установить устройства для сбора и удаления конденсата и твёрдых загрязнителей.

5. Пневмолинии с наличием жидкой влаги должны прокладываться ниже уровня промерзания грунта, а пневмолинии с осушенным воздухом могут быть расположены в зоне промерзания грунта, но не менее 0,8 м от верхней поверхности трубопровода до поверхности земли. Подземные линии с давлением сжатого воздуха до 1 МПа должны иметь уклон по рельефу местности не менее 3° по течению и не менее 5° – против течения, а линии отвода ответвления прокладывают с уклоном $(3 - 5)^\circ$ к магистрали.

6. При расположении пневмолиний в местах с минусовой температурой, их необходимо надёжно теплоизолировать или располагать в траншеях рядом с паропроводами.

7. Расположение компонентов пневмолиний должно обеспечивать удобный доступ к ним для монтажа, демонтажа и обслуживания.

8. В наиболее низких местах пневмолиний рекомендуется устанавливать водосборники (например, типа АУС, изготовитель ООО ЭНСИ). При покупке или изготовлении

водосборника следует учесть, что ёмкость должна иметь достаточный объём для сбора конденсата, присоединительные отверстия для поступления, отвода конденсата и продувки (см. рис. 3.27). Так как конденсатоотводчики чувствительны к наличию твёрдых загрязнений, вызывающих заклинивание подвижных деталей и засорение демпферных и отводящих отверстий, заборная трубка отвода 5 к нему должна быть расположена выше уровня возможного скопления твёрдых загрязнителей. На отводе перед конденсатоотводчиком 6 следует установить вентиль 4, что позволит отсоединять его для профилактики и ремонта без отключения сети. Подсоединение трубопровода с вентилем 4 для сброса давления и продувки должно быть расположено в нижней части водосборника.

9. Трубопроводы пневмолиний рекомендуется применять из антикоррозийных материалов или с антикоррозийным покрытием, особенно это относится к участкам коммутационных линий от устройства очистки до обслуживаемого объекта.

10. В пневмолиниях не допускается наличие глухих отводов и мест, способствующих скоплению и возможному самовоспламенению масляных отложений.

11. Фильтры-влагоотделители и конденсатоотводчики монтируются в вертикальном положении (отклонение от вертикали не должно быть более 5°), а направление потока воздуха и сброса конденсата должно соответствовать стрелке на корпусе или крышке.

12. При входе магистральной линии в помещение необходимо устанавливать фильтр-влагоотделитель с автоматическим сбросом конденсата, размещая его в месте, исключающем обмерзание при минусовых температурах.

13. Разводящие линии в отапливаемых и неотапливаемых помещениях не должны быть скрытыми, так как это значительно усложнит их обслуживание и осмотры.

14. Все устройства для удаления конденсата в пневмолиниях необходимо регулярно проверять. Отогревание этих устройств при замерзании производят паром, горячей водой или воздухом. Применение для этой цели открытого источника огня (например, горелок) не допускается.

15. При высоких температурах сжатого воздуха (обычно выше + 50°C) или возможности контакта поверхностей фильтров с агрессивными веществами (ацетоном, растворителями, синтетическими маслами и др.) их резервуары должны быть металлическими.

16. Неметаллические резервуары и корпуса фильтров и водосборников должны быть защищены от разрыва металлическим кожухом (требования безопасности).

17. Слив конденсата из устройств очистки и водосборников для последующей утилизации необходимо производить в устройства разделения загрязнителей или ёмкости для последующего отделения масла. Надо помнить, что слив конденсата не должен загрязнять окружающую среду. Например, слив в канализацию допускается только при условии содержания в воде масла, не превышающего санитарные нормы (5 – 20) мг/л.

18. При требованиях бесперебойной подачи воздуха потребителям рекомендуется установка байпасной линии для осушителей и устройств ультратонкой очистки.

3.5.2. Техническое обслуживание пневмолиний и устройств очистки

Коротко рассмотрим организацию, содержание и порядок проведения этих работ. Общие вопросы техобслуживания пневматических систем и устройств более подробно освещены в работе [9], а порядок и рекомендации по обслуживанию конкретных устройств очистки приводятся в инструкциях изготовителей.

Организация работ по техобслуживанию пневмолиний и устройств очистки. Работы по техобслуживанию должны проводиться специалистами служб главного механика или энергетика, в ряде случаев с привлечением сервисных организаций. Эти работы включают осмотры, техническое диагностирование, очистку и промывку пневмолиний и устройств от загрязнителей, замену и ремонт отдельных устройств и трубопроводов.

Ежедневные осмотры. Осмотры проводятся по специальной программе, в которой указаны содержание и методика проведения работ, причём почти все пункты предусматривают простой визуальный осмотр. Важно грамотно определить объём осмотров, в перечень которых рекомендуется вносить следующие: а) выявление бросающихся в глаза изменений (например, уровня конденсата, показаний манометров, датчиков содержания масла в линии, загрязнённости фильтроэлементов, утечек и т.д.); б) выявление чётко видимых признаков состояния (например, ослабления крепёжных элементов, деформации трубопроводов и элементов устройств очистки, приборов и др.); в) результаты осмотров и меры по устранению отклонений фиксируются и передаются в службы для разработки планов-графиков периодических осмотров (еженедельных, ежемесячных, ежеквартальных, полу-и годовых), ремонта, ведомостей запчастей и т. д.

Еженедельные осмотры проводятся в объёме ежедневных методом визуальной проверки. Дополнительно может быть включена проверка функционирования устройств (например, устройств отвода конденсата, манометров и предохранительных клапанов).

Ежемесячные осмотры. Проверяются и исправляются все повреждения трубопроводов и соединений. Проводится контроль наличия утечек, загрязнённости фильтроэлементов (с их очисткой или заменой), надёжности функционирования конденсатоотводчиков, манометров, датчиков и приборов. Подтягиваются концевые соединения, заменяются вышедшие из строя уплотнительные элементы.

Ежеквартальные осмотры. Проверяется визуально или с приборами для обнаружения утечек все участки пневмолиний на герметичность, надёжность закрепления трубопроводов и работоспособность устройств очистки. Проводится контроль загрязнённости и очистка фильтроэлементов (или замена при необходимости), прозрачных резер-

Таблица 3.28

Неисправность	Вероятная причина	Способ устранения
1. Фильтры с ручным и полуавтоматическим сбросом конденсата		
1.1. Утечки в местах неподвижных соединений	Ослабление затяжки крепёжных элементов	Подтянуть крепёж
	Повреждение или не тот размер уплотнителей	Заменить уплотнители
	Повреждение поверхности соединений	Заменить или устранить
1.2. Потери давления выше нормативных	Загрязнение фильтроэлемента	Очистить или заменить фильтроэлемент
1.3. Утечки через дренажный клапан	Загрязнение дренажного клапана	Очистить и промыть
	Повреждение уплотнителей или поверхности дренажного клапана	Заменить уплотнители или устранить дефект
1.4. Эффективность очистки фильтра снизилась	Повреждение фильтроэлемента	Заменить его
	Плохое закрепление фильтроэлемента	Подтянуть крепления
	Повреждение уплотнителя или поверхности детали в месте уплотнения	Заменить уплотнители или дефектные детали
	Работа фильтра за пределами диапазона расхода или повреждение его элементов	Заменить фильтр или дефектные детали
	Переполнение резервуара конденсатом	Обеспечить надёжный слив
2. Фильтры с автоматическим сбросом конденсата		
2.1. См. пп. 1.1 – 1.4	То же, что в пп. 1.1 – 1.4	То же, что в пп. 1.1 – 1.4
2.2. При заполнении конденсатом резервуара клапан сброса не открывается	Загрязнение отверстия сброса воздуха из камеры управления сервопривода дренажного клапана	Очистить и продуть отверстия
	Повреждение или разрушение поплавка	Заменить поплавок
	Заклинивание поплавка на стержне в исполнении с сервоприводом дренажного клапана	Очистить поверхности поплавка и стержня
2.3. После сброса конденсата клапан сброса не обеспечивает герметичность	То же, что в п. 2.3	То же, что в п. 2.3
	Повреждены или загрязнены дроссельное отверстие, поверхности уплотнителей или дренажного клапана с сервоприводом	Очистить отверстие и поверхности деталей или заменить их

Таблица 3.29

Неисправность	Вероятная причина	Способ устранения
1. Наличие утечек в начале эксплуатации	Уплотнители другого размера, плохая затяжка, повреждение при монтаже уплотнителей и деталей (скручивание, срез, вмятины и др.).	Заменить повреждённые или не тех размеров уплотнители, устранить дефекты монтажа. Использовать при монтаже оправки и кольца.
2. Наличие утечек в процессе эксплуатации	См. п.1. Загрязнены, повреждены поверхности уплотнителей или они выдавлены в зазоры	См. рекомендации по п.1. Очистить и продуть детали. Заменить дефектные детали.
3. Уплотнитель не помещается в канавке или косых расточках	Канавки не по чертежам. Применение уплотнителей другого размера или их растяжение при монтаже.	Выполнить канавки по чертежам. Поставить уплотнители нужных размеров, исключить растяжение при монтаже.

вуаров фильтров и смотровых окон.

Полу- и годовые осмотры. Проверяется функционирование всех компонентов воздушноснабжения, исправность датчиков и приборов, электропроводки к устройствам, загрязнённость фильтроэлементов (как правило, после года эксплуатации их необходимо заменить или очистить) и резервуаров, наличие утечек, состояние адсорбентов в установках осушки и замена их при необходимости, надёжность закрепления всех устройств и др. Проводят замену изношенных и повреждённых элементов, очистку трубопроводов и полостей от отложений загрязнителей и другие работы по планам, разработанным по результатам предыдущих осмотров.

Техническое диагностирование пневмолиний и устройств очистки при осмотрах включает проверку их физического состояния и надёжной работоспособности. Время отыскания неисправности в системах и устройствах можно сократить путём использования определённых методов технической диагностики, позволяющих определять неисправности при минимальном количестве проверок, и применения различного вида приборов, датчиков, индицирующих и дублирующих устройств.

Из существующих способов поиска неисправностей сложных систем очистки можно рекомендовать следующие.

1. На основе анализа принципиальной схемы, например, системы управления устройством осушки, составляется таблица неисправности, в которой описывается последовательность проверки этой системы в зависимости от внешних проявлений неисправности [9]. Таблицу неисправностей часто дают изготовители устройств в руководстве по эксплуатации. 2. Поиск неисправности проводят с использованием перечня простых рекомендаций, разработанных на основе обобщения эксплуатации устройств очистки с учётом их функциональных и конструктивных особенностей. Для примера в таблицах 3.28 и 3.29 приведены наиболее характерные неисправности, их причины и способы устранения для отечественных фильтров и уплотнительных узлов.

Очистка внутренних полостей устройств на компрессорной станции. Очистку от масляных отложений промежуточных и концевых холодильников, масловодоотделителей, нагнетательных трубопроводов всех ступеней и воздухохраников производят по инструкции не реже одного раза за 5000 ч работы компрессора способом, не вызывающим коррозию металла. Эту очистку рекомендуется выполнять 3% раствором сульфанола с последующей продувкой сжатым воздухом не менее 30 мин.

Для станций с компрессорами без смазки полостей сжатия или при наличии установок с очисткой сжатого воздуха от масла в капельном виде, а также при температуре воздуха в воздухохранике и трубопроводах, не превышающей 50°C, осмотр и очистка воздухохраников и трубопроводов производятся обычно один раз в год.

Внимание! Не допускается проведение очистки воздухоборников и вспомогательного оборудования компрессорной горючими и легковоспламеняющимися жидкостями.

Очистка магистральных пневмолиний и её компонентов. Перед монтажом трубопроводов, соединений и встраиваемых устройств необходимо удалить загрязнения (ржавчину, окалину, песок, пыль, стружку, нагар и др.) в следующей последовательности: а) тщательно осмотреть и очистить внутренние поверхности трубопроводов и соединений, а также присоединительные отверстия запорной аппаратуры, расходомеров и др. устройств, после чего все отверстия для подсоединения закрыть заглушками для предохранения их от загрязнения до монтажа; б) фильтры до их установки в линию проверить и при необходимости очистить; в) провести сборку участков пневмолиний и продуть воздухом до встройки в них устройств; г) окончательно собранный участок пневмолинии проверяют на герметичность и продувают ещё раз для удаления оставшихся загрязнений.

Очистку трубопроводов от загрязнений производят следующими способами: при отсутствии масляных отложений, ржавчины и окалины — продувкой сжатым воздухом или промывкой водой со скоростью (15 – 20) м/с и 10-минутной продувкой воздухом; при наличии масляных и нагаромасляных отложений – промывкой растворами синтетических активных моющих средств (ОП-7, ОП-10, ДС, растворами сульфанола, азолят и др.) с последующей продувкой сжатым воздухом в течение 30 мин. Наибольшее применение в промышленности получил технический сульфанол, который имеет наилучшие показатели эмульгирующей способности, пенообразования и моющего действия. Очистку сульфанолом производят следующим образом. В струю сжатого воздуха через форсунку впрыскивают раствор сульфанола, пена которого эмульгирует с масляными отложениями, смывает их и выносятся воздухом через спускные вентили.

Жидкие масляные отложения удаляют впрыскиванием (1 – 2)% раствора сульфанола через форсунку диаметром (1,5 – 2,0) мм при расходе раствора (1,5 – 2) л/мин.

Гудронообразные отложения очищают аналогично промывкой 3% раствором сульфанола в течение (2 – 3) ч. При наличии отложений твёрдой фракции применяют слабый раствор щёлочи в комбинации с поверхностно-активным моющим веществом, содержащим (1 – 1,5)% тринатрийфосфата и (1 – 1,5)% сульфанола. После очистки этим раствором трубопровод необходимо тщательно промыть водой.

Промывка растворами сульфанола обеспечивает хорошее качество очистки трубопроводов практически любой конфигурации, безопасность и малый объём подготовительных работ по сравнению с промывкой другими моющими растворами (например, 5% раствором каустической соды).

Контроль качества очистки проводят визуально: просмотром на свет коротких

съёмных трубопроводов; по чистоте потоков воды или воздуха на выходе после продувки, определяемых по наличию следов загрязнителей на листе чистого картона или фильтровальной бумаги на фанере, размещаемой на пути выхода потока.

Периодичность проверки состояния и очистки компонентов пневмолиний при эксплуатации зависит от их физического состояния и типа компрессоров, эффективности устройств очистки в линии, требований к степени очистки и др. факторов. Так, периодичность проверки соответствия сжатого воздуха требованиям ГОСТ 17433 регламентирована ГОСТ 24484 (см. главу 4), а периодичность техобслуживания компонентов пневмолиний (включая очистку) обычно составляет от 6 до 18 месяцев.

Очистка компонентов пневмолиний от загрязнений при эксплуатации. Порядок и последовательность проведения очистки трубопроводов, соединений и встроенных устройств практически не отличаются от описанных выше при монтаже. На компрессорных станциях периодичность проверки и очистки регламентирована «Правилами устройства и безопасной эксплуатации стационарных компрессорных установок». Периодичность очистки пневмолиний на предприятиях за пределами компрессорной станции зависит от интенсивности образования масляных и других отложений загрязнителей. Контроль отложений загрязнителей в пневмолиниях осуществляется путём вскрытия контрольных участков, которые представляют собой монтируемые в пневмолинию на фланцах «катушки» длиной не менее 250 мм или встроенные в линию фланцевые соединения. Контрольные участки следует выбирать в наиболее вероятных местах скопления отложений загрязнителей и на трудно промываемых участках линий (например, вертикальных или с местным снижением скорости потока воздуха). Расстояния между контрольными участками в пневмолинии после воздухохороника для станций с «масляными» компрессорами рекомендуются следующие: первый – через (5 – 10) м; последующие – через (30 – 40) м; по мере удаления от станции, если на участках не находят масляных отложений, – через (150 – 300) м. Применение «безмасляных» и хорошее техническое обслуживание «масляных» компрессоров, оснащение компрессорных станций и магистралей высокоэффективными устройствами очистки позволяет значительно сократить объём контрольных проверок и очисток.

Удаление загрязнений и промывка внутренних полостей устройств очистки. На внутренних полостях устройств очистки оседают водомасляная эмульсия и твёрдые частицы, что может нарушить их работу или визуальный осмотр. Это приводит к необходимости периодической очистки и промывки их веществами, не оказывающими негативного воздействия на элементы. Необходимость промывки определяется визуальной проверкой при осмотрах. Растворы, применяемые для промывки трубопроводов, соединений и поверхностей водохоронников, были указаны выше. Для промывки прозрачных

резервуаров и смотровых окон рекомендуется тёплая вода с мылом (растворители, керосин и другие аналогичные вещества для промывки использовать нельзя).

Особое внимание при осмотрах следует уделять проверке надёжной работы автоматических конденсатоотводчиков, так как прекращение сброса конденсата может привести к обводнению пневмолиний, выходу из строя пневмоустройств и нарушению технологических процессов. Внешнее проявление, причины и способы устранения неисправности встроенных в фильтры конденсатоотводчиков приведены в таблице 3.28. В конденсатоотводчиках поплавкового типа с рычагом (см. рис. 3.18, б) причиной отказа часто является заклинивание оси поворота поплавка из-за загрязнения. Для устранения неисправности необходимо перекрыть вентиль, сообщающий конденсатоотводчик с резервуаром для сбора влаги (при отсутствии вентиля необходимо перекрыть кран, соединяющий водосборник с пневмолинией, и сбросить из него воздух), снять, разобрать и очистить заделку оси, поплавков, дренажное отверстие и внутреннюю полость конденсатоотводчика.

3.5.3. Замена и ремонт устройств очистки

Принудительная замена устройств и элементов очистки применяется для ответственных пневмосистем, где выход их из строя может привести к авариям или значительным экономическим потерям. Эту замену проводят в соответствии с графиком отработки определённого количества циклов, часов или степени загрязнённости. В перечень устройств и элементов систем очистки, подлежащих принудительной замене, обычно включают: элементы автоматики устройств осушки, датчики контроля содержания в сжатом воздухе загрязнителей (масла, воды, газов и др), автоматические конденсатоотводчики, адсорбенты и фильтроэлементы. Рекомендации по порядку и условиям проведения принудительной замены пневмоустройств освещены в работе [9].

Регенерация и замена фильтроэлементов. При функционировании каналы и поры фильтроэлементов

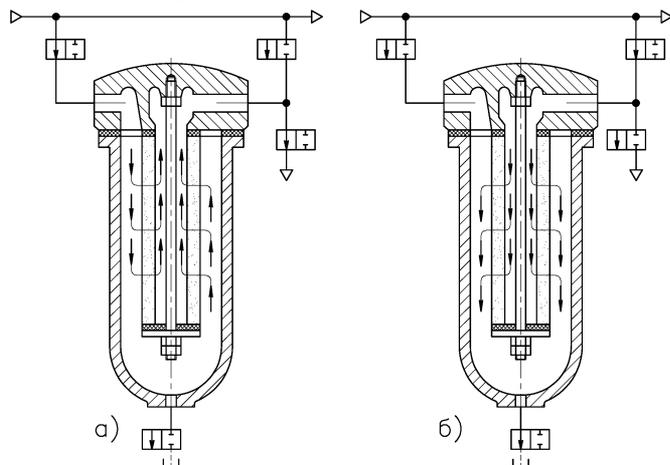


Рис. 3.28. Принципиальная схема регенерации фильтроэлемента противодавлением

забиваются частицами загрязнителей, что приводит к недопустимому возрастанию гидравлического сопротивления (например, при повышении сопротивления фильтроэлемента выше (0,04 – 0,05) МПа энергопотери могут превышать стоимость нового фильтроэлемента), а иногда и частичной потере эффективности очистки. В этом случае необходима замена фильтроэлемента или его регенерация путём очистки. Лучший вариант выбирают, сопоставляя стоимости нового и очистки использованного фильтроэлемента с учётом степени восстановления его пропускной способности. Обычно регенерации подвергают металлокерамические и керамические фильтроэлементы, пропускная способность которых в значительной мере восстанавливается. Бумажные, волокнистые и тканевые фильтроэлементы, за редким исключением, регенерировать нецелесообразно.

В практике используют следующие способы регенерации фильтроэлементов.

- *Очистка противодавлением.* Сжатый воздух пропускают через фильтроэлемент в направлении, противоположном рабочему. На рис. 3.28, а приведена схема включения распределителей при работе фильтра в режиме фильтрации, а на 3.28, б – в режиме регенерации.
- *Очистку химическими растворами* производят, подавая их через фильтроэлемент в направлении, противоположном потоку воздуха.
- *Очистку термообработкой* производят прокаливанием фильтроэлемента струёй горячего газа.
- *Очистка ультразвуком.* Фильтроэлемент погружают в моющую жидкость, в которой возбуждаются ультразвуковые колебания. Диапазон колебаний очень широк, от низкочастотных ~ 20 Гц до высокочастотных порядка (100 – 300) Гц. Силы, действующие на частицы загрязнителей, равномерно распределены по всему объёму жидкости и обеспечивают хорошую очистку даже мелких пор. Степень очистки зависит от продолжительности регенерации, расстояния до вибратора и интенсивности звука.

Выбор способа регенерации фильтроэлемента в основном определяется видом загрязнений и требованием к степени восстановления его пропускной способности. Для примера в таблице 3.30 приведено изменение пропускной способности металлокерамического и бумажного фильтроэлементов в зависимости от количества регенераций.

Таблица 3.30

Состояние фильтроэлемента	Пропускная способность фильтроэлемента, %	
	металлокерамического	бумажного
Новый	100	
После 1-й регенерации	95	85
После 2-й регенерации	89	65
После 3-й регенерации	84	50

Регенерация и замена адсорбентов и абсорбентов. В устройствах осушки сжатого

воздуха регенерация адсорбентов от влаги осуществляется автоматически. Периодичность замены невосстанавливаемых абсорбентов оговаривается поставщиками в технической документации. При использовании в устройствах осушки восстанавливаемых абсорбентов их регенерацию от загрязнителей (твёрдых, масел и др.) следует производить по технологии, приведённой в инструкции по эксплуатации изготовителя.

Ремонт устройств очистки: простых рекомендуется проводить на специализированных участках предприятия; сложных – в сервисных организациях и у изготовителя, что повышает качество ремонта благодаря высокой квалификации специалистов и применению прогрессивных технологических приёмов и оснастки. Целесообразность ремонта решается сопоставлением затрат на его проведение и покупку нового.

При демонтаже и монтаже устройств очистки в процессе проведения ремонта необходимо соблюдать следующее: уплотнительные кольца, прокладки на стыковых поверхностях и соединениях необходимо заменить; при отсоединении трубопроводов (даже одного конца) рекомендуется их маркировать, что позволит исключить ошибки при монтаже; принять меры по удалению и предотвращению попадания загрязнений во внутренние полости устройств. Если поставщик не обеспечивает замену повреждённых или изношенных деталей устройств, изготовление их следует проводить по рабочим чертежам изготовителя. Материал деталей, контактирующих со сжатым воздухом, должен быть коррозионно-стойким или иметь надёжное антикоррозионное покрытие. Последнее относится и к наружные поверхности. Нанесение лакокрасочных покрытий на монтажные и стыковые поверхности не допускается. Все виды уплотнителей должны быть изготовлены из маслобензостойких материалов. Элементы, изолирующие внутренние полости устройств от внешней среды, следует выполнять из материалов, не вносящих загрязнений. Перед сборкой после ремонта детали устройства необходимо промыть и продуть сжатым воздухом. Дополнительные сведения по наиболее сложным и распространённым операциям при проведении ремонта даны в работе [9] и рекомендациях изготовителей в инструкциях по техобслуживанию конкретных устройств.

3.6. Снижение энергопотерь при очистке сжатого воздуха

Коротко рассмотрим влияние ряда факторов на энергопотери при очистке воздуха.

Выполнение правил и требований монтажа и расположения пневмолиний (см. раздел 3.4.5) позволяет снизить энергопотери за счёт: а) возможности обойтись без осушки

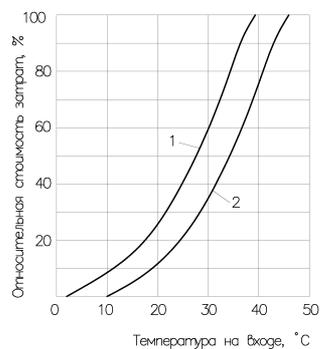


Рис. 3.29.

сжатого воздуха при прокладке пневмолиний, исключаяющей их обмерзание при минусовой температуре окружающей среды; б) исключения или снижения потерь сжатого воздуха на продувку при наличии уклона трубопроводов и водосборников с устройствами сброса конденсата; в) уменьшения потерь давления благодаря снижению интенсивности загрязнения фильтров при правильном отводе воздуха к потребителям от магистральных и разводящих линий.

Выбор класса чистоты воздуха. Установление неоправданно завышенных требований к очистке сжатого воздуха на один класс по ГОСТ 17433 приводит к увеличению потерь давления на фильтрующем элементе на (15 – 20)%, а завышение требований к осушке на 10°C повышает энергопотери на (25 – 35)%. Мощность, затрачиваемая на охлаждение сжатого воздуха до определённой точки росы в осушителях, зависит от температуры входного потока в осушитель. Для примера на рис. 3.29 приведена зависимость потребляемой мощности в процентах от температуры воздуха на входе и выходе осушителя рефрижераторного типа. Кривая 1 – при охлаждении его до точки росы 2°C, а кривая 2 – до точки росы 10°C. Из рисунка видно, что для достижения точки росы 2°C необходимо затратить энергии на (10 – 25)% больше, чем до точки росы 10°C. Примеры потерь сжатого воздуха в зависимости от точки росы адсорбционных и мембранных осушителей были приведены ранее.

Примерные значения относительной стоимости и эксплуатационных затрат от производительности установок осушки разных типов были приведены на рис. 3.21 и 3.22.

Снижение гидравлического сопротивления (потерь давления) систем и устройств очистки позволяет снизить удельные затраты на производство сжатого воздуха. Например, повышение потерь давления из-за загрязнения фильтроэлементов на 0,05 МПа увеличивает энергозатраты на очистку на ≈3%, а при загрязнении комплекса устройств очистки на 0,1 МПа – на (6 – 7)%. Следовательно, при выборе систем и устройств очистки предпочтение следует отдавать альтернативным вариантам с более низким гидравлическим сопротивлением. При повышении сопротивления фильтров выше (0,05 – 0,06) МПа из-за загрязнений, их фильтроэлементы рекомендуется регенерировать или заменять.

Обеспечение функционирования устройств очистки в заданных изготовителем параметрах (температуре и загрязнённости сжатого воздуха на входе, давлении, расходе и условиях окружающей среды). Влияние этих параметров на энергопотери и качество очистки было рассмотрено ранее. Приведём лишь один пример. Температура сжатого воздуха 50°C на входе в адсорбционную установку снижает её производительность на (40 – 45)%, что приводит к значительному повышению затрат на осушку. В этом слу-

чае на входе в адсорбционную осушку рекомендуется устанавливать вторичные охладители или теплообменные осушители («воздух-воздух» или рефрижераторные, см. варианты БГ и ВГ на рис. 3.23) в исполнении без подогрева сжатого воздуха на выходе. Это позволяет применять адсорбционные установки меньшей производительности, снижая первоначальные и энергетические затраты.

Оснащение устройств очистки приборами и системами контроля и регулирования параметров позволяет значительно снизить энергопотери. К этим устройствам и системам относятся: дифференциальные манометры и датчики контроля и сигнализации загрязнённости фильтроэлементов; системы автоматического переключения осушителей при изменении требований к точке росы сжатого воздуха; контроллеры стабильного поддержания точки росы на выходе осушителей и др.

Внимание! Особое внимание следует уделить регулярному контролю точки росы на выходе осушителей, так как часто её заданное значение не обеспечивается.

3.7. Выбор поставщика устройств очистки и сервисных организаций

Выбор поставщика устройств очистки рекомендуется проводить в три этапа.

Первый этап. Систематизация и формирование требований к устройствам очистки (параметрам, режимам и условиям эксплуатации, надёжности, взрыво- и пожаробезопасности, ограничениям по стоимости, габаритам, массе и др.)

Второй этап. Сбор и анализ данных о поставщиках и их продукции. При выполнении этого этапа необходимо обратить особое внимание на следующее:

- проверить соответствие параметров устройств очистки поставщиков предъявляемым требованиям по производительности, давлению, эффективности очистки, точке росы, энергопотерям, надёжности и др.;
- стоимость устройств очистки следует увязывать с качеством её изготовления и сервиса. Оценкой качества изготовления может служить наличие сертификата качества по ИСО 9001 и многолетнее прочное положение поставщика на рынке. Необходимо помнить, что устройства очистки высокого качества не могут быть дешёвыми. Значительная часть изготовителей, выпускающих устройства очистки, снижают себестоимость в ущерб рабочим параметрам (коэффициенту очистки, точке росы, энергопотерям, надёжности и др.). Их продукция часто не соответствует указанным в проспектах параметрам, что установлено независимой экспертизой за рубежом. Так как покупатель не в состоянии проверить реальные параметры приобретаемых устройств очистки, то это обстоятельство может привести к большим экономическим потерям из-за брака продукции в электронной, фармакологической, пищевой и др. отраслях промышленности;
- при выборе изготовителя предпочтение следует отдавать фирмам со стабильным

положением в России, продукция которых уже давно положительно зарекомендовала себя в зарубежной и отечественной промышленности, а кадры и склады запасных узлов и деталей их дилеров в состоянии обеспечить надлежащее сервисное обслуживание. К таким фирмам следует отнести – Remeza (Белоруссия), Бежецкий компрессорный завод АСО, Курганхиммаш и ООО ЭНСИ (Россия), Atlas Copco (Швеция), SMC (Япония), Festo, Kaeser, Kraftmann (ФРГ), Parker-Zander-Hiross (Италия) и ряд других;

- уточните у поставщика ремонтпригодность устройств очистки, наличие запасных узлов, деталей и расходных материалов в вашем регионе, их цены и сроки доставки;
- выясните у поставщика обязательства по гарантийному сроку обслуживания устройств, так как часто эти гарантии распространяются лишь на отдельные её узлы и за отдельную плату или же гарантийное обслуживание представляет собой капитальный ремонт, который оплачивает покупатель. В связи с этим, необходимо в договоре (контракте) на поставку чётко оговаривать гарантии поставщика;
- поставляемые устройства очистки должны иметь полный комплект технической документации на русском языке;
- выбирайте поставщика, который получает устройства очистки непосредственно от изготовителя, минуя посредников. Это требование относится и к их комплектующим;
- при выборе поставщиков следует принимать во внимание советы квалифицированных, независимых от поставщиков специалистов, имеющих опыт приобретения устройств очистки у разных фирм;
- при одинаковых параметрах (в т.ч. надёжности) устройств очистки разных изготовителей предпочтение следует отдавать продукции России и Белоруссии.

Третий этап. По результатам второго этапа принимается окончательное решение о выборе поставщика. Отметим, что участие в выполнении 1 и 2 этапов квалифицированных специалистов позволит избежать ошибок и принять рациональное решение с малой долей риска. Подробно методика выбора поставщиков приведена в работе [9].

Выбор сервисной организации. Для решения сложных задач по разработке и внедрению систем очистки, часто возникает необходимость привлечения квалифицированных специалистов изготовителей устройств очистки или специализированных сервисных организаций. Наряду с указанными выше требованиями к поставщикам, отметим основные критерии, которым должны удовлетворять сервисные организации:

- иметь лицензию и многолетний опыт работы в области очистки сжатого воздуха, включая изготовление и ввод в эксплуатацию устройств и систем очистки в СНГ;
- опыт и участие в разработке нормативных (в т.ч. международных и национальных стандартов) и других технических документов по очистке сжатого воздуха;
- опыт в проведении пневмоаудита систем воздухообеспечения; выбора оптимальных

по энергозатратам систем воздухообеспечения и очистки; расчёта и замера термодинамических параметров сжатого воздуха на участках пневмосистем предприятий; выбора компрессорного оборудования, рациональных устройств очистки сжатого воздуха и их расположения на компрессорной станции и участках пневмосистемы;

- опыт и возможность проведения подготовки специалистов предприятий по обслуживанию систем воздухообеспечения и очистки сжатого воздуха, включая обучение (в организации и на предприятиях), разработку, издание и снабжение справочной литературой, методическими и руководящими материалами в этой области.

Глава 4. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ СЖАТОГО ВОЗДУХА

В данной главе изложены методы определения загрязнённости сжатого воздуха (регламентированные ГОСТ 24484) на соответствие классам по ГОСТ 17433 и сведения о стандартах контроля чистоты сжатого воздуха на соответствие классам по ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005 и ДСТУ 4169.

4.1. Контроль загрязнителей по ГОСТ 24484

Приведём основные положения ГОСТ 24484 и ряд рекомендаций по контролю загрязнителей.

- * Контроль загрязнённости воздуха должен производиться после устройства очистки перед входом к потребителю на участке до внесения смазочного материала в сжатый воздух. Отбор проб следует производить на прямых участках трубопровода. Контрольная точка должна отстоять от местного сопротивления на расстояние не менее пяти диаметров трубопровода.
- Контроль загрязнённости сжатого воздуха должен производиться при работе данного участка пневмосистемы или при условиях, близких к рабочим.
- При определении расхода (объёма) воздух должен быть приведён к следующим нормальным условиям: температура 293,15 К (20°C), давление 1013,25 ГПа (760 мм рт. ст.).
- Погрешность измерения не должна превышать: $\pm 2\%$ – давления и массы; $\pm 5\%$ – расхода; $\pm 0,5^\circ\text{C}$ – температуры.
- Рекомендуемые сроки проверки качества сжатого воздуха: 1 раз в 3 месяца – для класса 0; 1 раз в 6 месяцев – для классов 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11 и 13; 1 раз в год – для классов 8, 10, 12 и 14.
- Внеочередная проверка загрязнителей в сжатом воздухе рекомендуется при выходе из строя устройств или брака продукции из-за наличия загрязнителей, а также после ремонта или замены компрессорного оборудования, пневмолиний и устройств очистки.
- Для систем, в которых превышение допустимого уровня загрязнённости сжатого воздуха может привести к большим экономическим потерям или авариям, рекомендуется установка датчиков постоянного или периодического контроля загрязнённости (см. раздел 3.3.4).
- * При отборе проб и измерении содержания загрязнителей сжатого воздуха необходимо исключить попадание загрязнителей извне.
 - Рекомендуемые приборы и оборудование для проведения контроля загрязнителей: показывающий манометр класса точности 1,5; стеклянный термометр на пределы измерения от 213 до 323 К; ротаметры по ГОСТ 13045; аналитические фильтры АФА для весового и дисперсного анализа; образцовые весы 1-го разряда повышенной точности по ГОСТ 24104-2001; фильтры-влагоотделители по нормативно-технической документации: фильтр ФВ6 по ОСТ 25 1295-88; фотоэлектрический счётчик с чувствительностью измерения от 0,25 до 10 мкм; кулонометрический измеритель влажности «Байкал» класса точности не ниже 10; микроскоп с увеличением не менее 200^х. Примечание. Допускается применение других сертифицированных приборов и оборудования, не уступающих указанным выше по точности измерений.

Определение содержания твёрдых частиц классов загрязнённости сжатого воздуха от 1 до 14 должно определяться весовым методом или при помощи аэрозольного счётчика, а 0-го класса за-

грязнённости сжатого воздуха должно определяться при помощи аэрозольного счётчика.

- *Содержание твёрдых частиц в сжатом воздухе C_T в $\text{мг}/\text{м}^3$ должно определяться по результатам не менее трёх измерений по формуле (4.1):

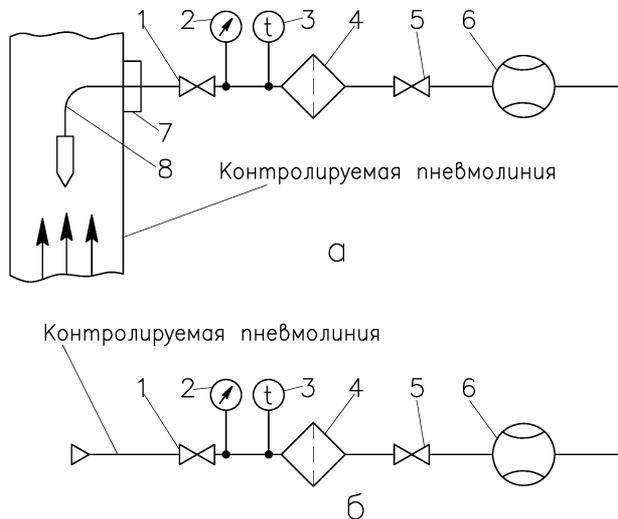


Рис. 4.1. Обозначения на схеме: а — схема изокINETического отбора пробы воздуха; б — схема пропускания через контрольный фильтр всего потока воздуха. Обозначение на схемах: 1 – кран; 2 – манометр; 3 – термометр; 4 – фильтр; 5 – кран; 6 – расходомер; 7 – штуцер для ввода заборной трубки; 8 – заборная трубка с наконечником

$$C_T = \frac{C_{T_1} \cdot \tau_1 + C_{T_2} \cdot \tau_2 + \dots + C_{T_n} \cdot \tau_n}{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n}, \quad (4.1)$$

где $C_{T_1}, C_{T_2}, \dots, C_{T_n}$ – содержание твёрдых частиц сжатого воздуха, $\text{мг}/\text{м}^3$,
 t_1, t_2, \dots, t_n , – время отбора проб воздуха, мин.

- Ориентировочную продолжительность измерения t следует вычислять по формуле (4.2):

$$\frac{b_{min}}{C_{T_d} \cdot Q} \leq \tau \leq \frac{b_{max}}{C_{T_d} \cdot Q}, \quad (4.2)$$

где b_{min} – минимально необходимое содержание твёрдых частиц на фильтре, мг;

b_{max} – максимально допустимое содержание твёрдых частиц на фильтре, мг;

C_{T_d} – предполагаемое или предельно допустимое содержание твёрдых частиц, $\text{мг}/\text{м}^3$;

Q – расход воздуха через контрольный аналитический фильтр, $\text{м}^3/\text{мин}$.

- Минимальное содержание твёрдых частиц на фильтре должно быть не менее 1 мг., а максимальное – не более 5 мг на 1 см^2 поверхности контрольных фильтров.

Измерение содержания твёрдых частиц весовым методом осуществляют путём пропускания определённых количеств воздуха через контрольный аналитический фильтр и взвешивания фильтра до и после отбора пробы воздуха.

- Аналитический фильтр должен обеспечивать очистку сжатого воздуха до размера частиц соответственно 0-му классу по ГОСТ 17433-80.
- Содержание твёрдых частиц в пробе воздуха C_{T_n} в мг/м³ вычисляться по формуле (4.3):

$$C_{T_n} = \frac{m_2 - m_1}{Q_{T_n}}, \quad (4.3)$$

где m_1 и m_2 – масса фильтра соответственно до и после отбора пробы воздуха, мг.

- * Из контрольного аналитического фильтра до и после отбора пробы необходимо удалить влагу и масло. При определении содержания твёрдых частиц для чётных классов загрязнённости сжатого воздуха, находящуюся в нём в жидкую влагу необходимо устранить путём повышения температуры воздуха, редуцированием или другим способом.
- * Измерение содержания твёрдых частиц для пневмолиний внутренним диаметром ≤ 32 мм должно производиться путём пропускания через контрольный аналитический фильтр всего потока воздуха, для пневмолиний внутренним диаметром > 32 мм – путём изокINETического отбора проб воздуха. Внутренний диаметр заборной трубки должен быть не менее 6 мм. Схемы установок для измерения содержания твёрдых частиц весовым методом должны соответствовать рис. 4.1.
- * При изокINETическом отборе проб скорость сжатого воздуха в заборной трубке должна быть не менее 15 м/с, а расход воздуха через контрольный аналитический фильтр Q в м³/мин должен быть определён по формуле (4.4):

$$Q = 1,33 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{d^2 \cdot v_{зт} \cdot p_{зт}}{T_{зт}}, \quad (4.4)$$

где d – внутренний диаметр заборной трубки, мм; $v_{зт}$ – скорость воздуха в заборной трубке, м/с; $p_{зт}$ – абсолютное давление в заборной трубке, определённое по манометру 2 (см. черт. 1а), МПа; $T_{зт}$ – температура воздуха в заборной трубке, К.

Измерение содержания твёрдых частиц (определение их количества и размеров) аэрозольным счётчиком производят путём пропускания через него проб воздуха.

- Концентрацию твёрдых частиц C , в мг/м³ определяют по формуле (4.5):

$$C_{T_n} = 5,23 \cdot 10^{-10} \cdot \rho \cdot \frac{z_1 d_1^3 + z_2 d_2^3 + \dots + z_n d_n^3}{V_n}, \quad (4.5)$$

где ρ – плотность твёрдых частиц, г/см³ (при неизвестной величине плотности необходимо принять $\rho = 2,5$ г/см³); d – размер частицы, мкм; z – число частиц определённого размера; V_n – объём пробы воздуха, м³.

Измерение максимального размера твёрдых частиц

- Максимальный размер частиц должен измеряться путём пропускания воздуха через аэрозольный счётчик или контрольный аналитический фильтр.
- После пропускания воздуха контрольный аналитический фильтр должен быть просветлён и высушен. Просветление производят раствором, состоящим из 94 % ксилола $C_6H_4(CH_3)_2$ и 6 % трикре-

зилортофосфата $(\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{O})_3\text{PO}$ или дибутилфталата $\text{C}_6\text{H}_4[\text{COO}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3]_2$.

- Размеры твёрдых частиц определяют путём исследования частиц под микроскопом.
- Отбор проб и обработка контрольного аналитического фильтра до и после отбора пробы должна производиться в соответствии с требованиями пунктов отмеченных «*»

Содержание воды и масел в жидком состоянии весовым методом определяют путём пропускания всего потока воздуха через тарированный фильтр-влагоотделитель по схеме изображённой на рис. 4.2.

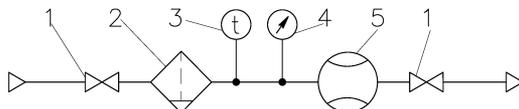


Рис. 4.2. Обозначения на схеме: 1 – кран; 2 – тарированный фильтр-влагоотделитель; 3 – термометр; 4 манометр; 5 – расходомер

- Перед определением содержания воды и масла в жидком состоянии необходимо убедиться в их наличии, для чего струю воздуха непосредственно из трубопровода направляют на лист чистой фильтровальной бумаги. Расстояние от конца трубки до листа бумаги устанавливают от 50 до 100 мм в зависимости от давления сжатого воздуха (чем выше давление, тем большее расстояние). Появление на бумаге в течение 5 мин пятен свидетельствует о наличии воды и масла в жидком состоянии.
- Расход воздуха через тарированный фильтр-влагоотделитель должен соответствовать номинальному режиму пневматической системы и расходной характеристике тарированного фильтра-влагоотделителя.
- Испытание должно продолжаться до появления в резервуаре фильтра-влагоотделителя $(0,1 - 0,2)$ дм^3 смеси воды и масла, после чего производят их разделение и взвешивание.
- Содержание воды в жидком состоянии C_B в $\text{мг}/\text{м}^3$ определяют по формуле (4.6):

$$C_B = \frac{m_B}{\eta_B \cdot V_{\Pi}} \quad , \quad (4.6)$$

где m_B – масса воды, мг; η_B – эффективность тарированного влагоотделителя для воды; V_{Π} – объём пробы воздуха, м^3 .

- Содержание масел в жидком состоянии C_M в $\text{мг}/\text{м}^3$ определяют по формуле (4.7):

$$C_M = \frac{m_M}{\eta_M \cdot V_{\Pi}} \quad , \quad (4.7)$$

где m_M - масса масла, мг; η_M - эффективность тарированного влагоотделителя для масла.

Примечание. Применение датчиков (анализаторов) содержания масла в режиме реального времени (например, «oilguard PRO» производства ФРГ) значительно снижает трудоёмкость и повышает точность контроля масла в сжатом воздухе.

Содержание водяных паров (температуру точки росы) определяют приборами измерения влажности или весовым методом.

Определение содержания водяных паров при помощи конденсационных или кулонометрических приборов.

Конденсационный влагомер имеет смонтированное металлическое зеркало, омываемое и охлаждаемое сжатым воздухом, что приводит к появлению на нём росы. Температура зеркала в момент появления росы, фиксируемая термопарой или другим датчиком, соответствует точке росы.

Кулонометрический влагомер основан на принципе непрерывного поглощения влаги из потока воздуха плёнкой гидрофильного вещества с одновременным электролитическим разложением её на кислород и водород. При установившемся режиме сила тока электролиза является мерой абсолютного содержания влаги. Оснащение их показывающими и регистрирующими приборами позволяет наблюдать и непрерывно записывать значения влажности в объёмных единицах *ppm*.

Содержание водяных паров (температуру точки росы) весовым методом определяется путём пропускания пробы воздуха через U-образные трубки, снаряжённые силикагелем-индикатором, с расходом 0,025 дм³/с в течение 2 ч. Изменение цвета силикагеля в последней U-образной трубке не допускается.

- Схема установки должна соответствовать рис. 4.3.

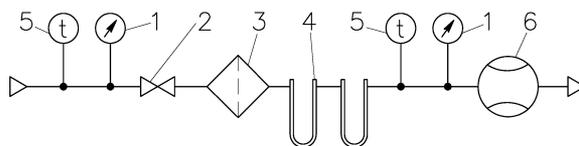


Рис. 4.3. Обозначения на схеме: 1 – манометр; 2 – кран; 3 – фильтр, обеспечивающий очистку воздуха до размеров частиц, соответствующих классу 0 по ГОСТ 17433-80; 4 – трубки, снаряжённые силикагелем-индикатором; 5 – термометр; 6 – расходомер

- Содержание водяных паров $C_{\text{вл}}$ в мг/кг определяют по формуле (4.8):

$$C_{\text{вл}} = \frac{m_1 - m_2}{m}, \quad (4.8)$$

где m_1 – общая масса снаряжённых индикаторных трубок после испытаний, мг; m_2 – общая масса снаряжённых индикаторных трубок до испытаний, мг; m – масса пробы воздуха после осушки, кг.

$$m = 3420 \cdot V \cdot \frac{p}{T},$$

где V – объём пробы воздуха при давлении p и температуре T , м³; p – абсолютное давление воздуха возле расходомера, МПа; T – абсолютная температура воздуха возле расходомера, К.

Температуру точки росы в зависимости от температуры и относительной влажности сжатого воздуха T_p в К определяют по формуле (4.9):

$$T_p = \frac{(1 + 0,14711 g \varphi^{-1})^{-2} (1,8T - 529,4) + [(2169 + 3191 g \varphi^{-1})^{-1} \cdot 10^6 - 391] - 32}{1,8} + 273, \quad (4.9)$$

где T – температура сжатого воздуха, К; φ – относительная влажность воздуха в долях единицы,

$$\varphi = \frac{C_{\text{вл}}}{622 \cdot 10^3 + C_{\text{вл}}} \cdot \frac{p_c}{p_n},$$

где p_n – парциальное давление насыщенного водяного пара, МПа, определяемое по таблицам свойств насыщенного водяного пара в зависимости от температуры; p_c – абсолютное давление

воздуха в системе, МПа.

- Температура точки росы в зависимости от содержания водяных паров для ряда давлений приведена в приложении 3.

Содержания газообразных кислот и щелочей определяется путём пропускания воздуха через соответствующие растворы: для кислот – смесь дистиллированной воды и метилового красного; для щелочей – смесь дистиллированной воды и фенолфталеина и сравнения с контрольной пробой. Для приготовления раствора необходимо в 100 см³ дистиллированной воды добавить (2 - 3) капли индикатора. Из этого количества раствора необходимо отобрать 10 см³ контрольной пробы.

Через остальной раствор необходимо пропускать 0,0063 дм³/с исследуемого воздуха в течение 5 мин, затем отобрать 10 см³ раствора и сравнить с контрольной пробой.

Отсутствие заметной разницы в окрашивании сравниваемых растворов свидетельствует об отсутствии или допустимом содержании кислот и щелочей.

4.2. Методы контроля загрязнителей по стандартам ИСО

Определения соответствия сжатого воздуха классам чистоты по ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005 и ДСТУ 4169 производится по следующим стандартам ИСО.

- ГОСТ Р ИСО 8573-2. Сжатый воздух. Часть 2: Методы контроля содержания масел в виде аэрозолей;
- ISO 8573-3. Сжатый воздух. Часть 3: Методы контроля влажности;
- ГОСТ Р ИСО 8573-4-2007. Сжатый воздух. Часть 4: Методы контроля содержания твёрд. частиц;
- ISO 8573-5. Сжатый воздух. Часть 5. Методы контроля содержания паров масел и органических растворителей;
- ГОСТ Р ИСО 8573-6. Сжатый воздух. Часть 6. Методы контроля загрязнения газами;
- ГОСТ Р ИСО 8573-7. Сжатый воздух. Часть 7. Метод контроля загрязнения жизнеспособными организмами;
- ISO 8573-8. Сжатый воздух. Часть 8. Контроль загрязнения твёрдыми частицами по массовой концентрации;
- ISO 8573-8. Сжатый воздух. Часть 8. Контроль содержания воды в жидкой фазе.

Литература

1. Амелин А.Г. Теоретические вопросы образования тумана при конденсации пара.-М.: Химия. 1972.
2. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. Изд. 2-е. -М.: Машиностроение, 1964.
3. Беннет К.О., Маер Д.Е. Гидродинамика, теплообмен и массообмен. -М.: Недра
4. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. -М.: Энергия, 1968.
5. Герц Е.В., Крейнин Г.В. Динамика пневматических приводов машин-автоматов.-М.: Машиностроение, 1969.
6. Герц Е.В., Кудрявцев А.И., Ложкин О.В. и др. Пневматические системы и устройства в машиностроении. М.: Машиностроение, 1981, 408 с.
7. Карабин А.И. Сжатый воздух. М.: Машиностроение, 1964. 343 с.
8. Калинин Н.В., Кабанова И.А., Гальковский В.А. и др. Системы воздухообеспечения промышленных предприятий. Учебное пособие. Смоленск.: Изд-во ГОУВПО «МЭИ (ТУ)», 2005. - 122 с.
9. Кудрявцев А.И., Кудрявцев А.А. Пневматические системы и устройства в промышленности. Справочник. -Харьков.: Изд-во «Формат», 2011. - 479 с.
10. Кудрявцев А.И., Кудрявцев А.А. Системы и компоненты воздухообеспечения. -Харьков.: Изд-во «Формат», 2014. -192 с.
11. Кудрявцев А.И., Пятидверный А.П., Шабалтас Н.Д. и др. Очистка сжатого воздуха для пневматических систем. -М.: НИИМАШ, 1973. 119 с.
12. Кудрявцев А.И., Гинзбург В.Л., Шабалтас Н.Д. Выбор и расчёт рациональных схем удаления влаги в пневмосистемах. -М.: ВНИИТЭРМ, 1986. 47 с.
13. Кудрявцев А.И., Пятидверный А.П. Шабалтас Н.Д. и др. Выбор и эксплуатация устройств осушки сжатого воздуха для пневматических систем и приводов. -М.:НИИМАШ, 1977.- 67 с
14. Кудрявцев А.И. Исследование процессов очистки сжатого воздуха в промышленных энергосистемах. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Харьковский политехнический институт. 1973.
15. Лишневецкий М.И. Воздухообеспечение пневматических систем автоматизации. Тематический обзор. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1973. 80 с.
16. Михеев М.А. Основы теплопередачи. -М.: Госэнергоиздат, 1949.
17. Портнов В.В. Воздухообеспечение промышленных предприятий. Учебное пособие. -Воронеж.: Изд-во ГОУ ВПО «ВГТУ», 2007. 228 с.
18. Сидорова И.И., Шумяцкий Ю.И. Адсорбционная осушка газов.- М.: МХТИ, 1972.
19. Хьюитт Д., Холл Туйлор Н. Кольцевые двухфазные течения. -М.: Энергия. 1974.
20. Черепенников А.А. Химия воздушной среды. -Л: Изд-во литературы по строит-тву, 1971. 128 с.
21. Шак А. Промышленная теплопередача. -М., Metallurgizdat, 1961.
22. Hennig H. Warum vereisen Pneumatikanlagen. Technischer information. Orsta-hudrvlik. 20 (1977).
23. Tettmar B., Wilson M/ Contamination of Compressed air by Lubrikating Oil. -"Engineer". Vol. 223.
24. Warring R.H. Filters and filtration. Morden, Surrey, Trade and Technical Press Ltd. 1969. 228 с.
25. Информационные материалы отечественных и зарубежных поставщиков устройств очистки.

К сведению специалистов! Издательством «Формат» выпущены книги.

1. «ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ». Справочник. (2011. –480 с., табл. 140, ил. 191. ISBN 978-966-2196-06-1). В 1 главе справочника приведены классификация и структура пневмосистем, единицы измерения, параметры и свойства воздуха, основные законы, термодинамические процессы и уравнения течения газов. Во 2 главе приведены: основные параметры устройств пневмосистем; краткие сведения о компрессорном оборудовании; сведения о пневмодвигателях, аппаратуре, устройствах кондиционирования сжатого воздуха; блоках и модулях управления, устройствах вакуумной техники; пневмолиниях и их компонентах; уплотнителях и электроизделиях пневмоустройств. В третьей главе рассмотрены вопросы монтажа, наладки и эксплуатации пневматических систем и устройств, техники безопасности. Очистка сжатого воздуха, подача смазочных материалов к трущимся поверхностям пневмоустройств, энергосбережение сжатого воздуха, снижение шума и загрязнения окружающей среды при работе пневмосистем приведены в 4 главе. В пятой главе освещены вопросы: рационального выбора вида привода; структурного синтеза, динамического синтеза и анализа, расчёта надёжности пневмоприводов. Структурные и типовые схемы пневмоприводов приведены в 6 главе.

В приложении даны адреса, телефоны, e-mail основных поставщиков компрессорного оборудования и пневмоустройств.

2. «СИСТЕМЫ И КОМПОНЕНТЫ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ». (2014.–190 с., табл. 38, ил. 66). Книга состоит из трёх глав. В 1 главе кратко изложены: общие сведения о воздухе и параметрах пневматических систем и устройств, области применения и классификация пневматических систем. Сведения о компонентах (нагнетательном и вспомогательном оборудовании, пневмолиниях, аппаратуре и других устройствах) систем воздухоснабжения освещены в 2 главе. Третья глава посвящена выбору вида систем воздухоснабжения, компрессоров, параметров пневмолиний и проведению пневмоаудита.

Указанные выше работы, и книги «ОЧИСТКА СЖАТОГО ВОЗДУХА» и «ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, *энергосбережение и оптимизация*», преследуют цель ознакомить читателей с основными аспектами эффективного использования сжатого воздуха в промышленности.

Научно-производственное предприятие ООО ЭНСИ – преемник и продолжатель работ по созданию энергосберегающих технологий и систем в бывшем Министерстве атомной промышленности. Предприятие имеет лицензию и многолетний опыт работы в области воздухообеспечения и очистки сжатого воздуха. Разработанная предприятием эффективная и простая в эксплуатации энергосберегающая система С-ОСВ, обеспечивает значительное снижение капитальных и эксплуатационных затрат на осушку и очистку сжатого воздуха, высокую надёжность при работе на открытых площадках в различных регионах России.

Система С-ОСВ успешно внедрена на более чем 300 промышленных предприятиях России, Белоруссии, Украины и Казахстана.

Область деятельности научно-производственного предприятия:

- ▶ проведение пневмоаудита предприятий;
- ▶ расчёты и замеры расхода и параметров сжатого воздуха в пневмосистемах;
- ▶ разработка энергосберегающих систем воздухообеспечения и систем очистки сжатого воздуха;
- ▶ выбор компрессорного оборудования и устройств очистки;
- ▶ изготовление, поставка, монтаж, наладка и сервисное обслуживание компрессорного оборудования и устройств очистки сжатого воздуха (концевых холодильников, осушителей, магистральных и индивидуальных фильтров, водосборников, узлов слива и конденсатоотводчиков, приборов и систем контроля и регулирования параметров сжатого воздуха) собственного производства и ведущих фирм;
- ▶ участие в разработке национальных и международных стандартов классов чистоты сжатого воздуха и методов проверки этих классов в пневмосистемах;
- ▶ консультации и подготовка специалистов предприятий по обслуживанию систем воздухообеспечения и очистке сжатого воздуха;
- ▶ разработка, издание и снабжение специалистов предприятий справочной литературой по пневматическим системам и устройствам (компрессорному оборудованию, фильтрам, осушителям, распределительной и регулирующей аппаратуре, цилиндрам и т. д.).

Реквизиты НПП ООО «ЭНСИ»:

Почтовый адрес – Россия, 143345, Московская обл., Наро-Фоминский р-н, п. Селятино, ул.

Профессиональная, 7

Телефон – 74963421871

Факс – 74963421871

e-mail: office@ancy.ru

Сайт: <http://www.ancy>

Приложение 2

Давление $p_{\text{нп}}$ насыщенного водяного пара

°C	$p_{\text{нп}}$	°C	$p_{\text{нп}}$	°C	$p_{\text{нп}}$	°C	$p_{\text{нп}}$
-20	0,001260	6	0,009530	32	0,04847	58	0,1850
-19	0,001380	7	0,010210	33	0,05128	59	0,1939
-18	0,001517	8	0,010932	34	0,05423	60	0,2031
-17	0,001641	9	0,011699	35	0,05733	61	0,2127
-16	0,001778	10	0,012513	36	0,06057	62	0,2227
-15	0,001936	11	0,013376	37	0,06398	63	0,2330
-14	0,002106	12	0,014291	38	0,06755	64	0,2438
-13	0,002284	13	0,015261	39	0,07129	65	0,2550
-12	0,002489	14	0,016289	40	0,07520	66	0,2666
-11	0,002699	15	0,017376	41	0,07930	67	0,2787
-10	0,002910	16	0,018527	42	0,08360	68	0,2912
-9	0,003082	17	0,019745	43	0,08809	69	0,3042
-8	0,003337	18	0,02103	44	0,09279	70	0,3177
-7	0,003613	19	0,02239	45	0,09771	71	0,3317
-6	0,003910	20	0,02383	46	0,10284	72	0,3463
-5	0,004296	21	0,02534	47	0,10821	73	0,3613
-4	0,004579	22	0,02694	48	0,11382	74	0,3769
-3	0,004954	23	0,02863	49	0,11967	75	0,3931
-2	0,005358	24	0,03041	50	0,12578	76	0,4098
-1	0,005795	25	0,03229	51	0,13216	77	0,4272
0	0,006228	26	0,03426	52	0,13881	78	0,4451
1	0,006694	27	0,03634	53	0,14575	79	0,4637
2	0,007198	28	0,03853	54	0,15298	80	0,4829
3	0,007723	29	0,04083	55	0,16051		
4	0,008289	30	0,04325	56	0,16835		
5	0,008890	31	0,04580	57	0,17653		

Приложение 3

Предельное содержание паров воды в сжатом воздухе

Температура точки росы	Предельное содержание водяных паров, мг/кг, при избыточном давлении воздуха, МПа											
	0	0,14	0,25	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5
213K(-60°C)	11,2	4,8	3,3	2,3	1,9	1,6	1,3	1,0	0,9	0,7	0,5	0,4
214K(-59°C)	12,8	5,5	3,7	2,6	2,2	1,9	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5
215K(-58°C)	14,2	6,1	4,2	2,9	2,4	2,1	1,6	1,3	1,1	0,9	0,7	0,6
216K(-57°C)	16,5	7,1	4,9	3,4	2,8	2,5	1,9	1,5	1,3	1,0	0,8	0,6
217K(-56°C)	18,4	7,9	5,4	3,8	3,2	2,7	2,1	1,7	1,5	1,1	0,9	0,7
218K(-55°C)	20,9	9,0	6,2	4,3	3,6	3,1	2,4	1,9	1,6	1,2	1,0	0,8
219K(-54°C)	23,2	10,0	6,9	4,8	4,0	3,5	2,7	2,2	1,9	1,4	1,1	0,9
220K(-53°C)	25,6	11,1	7,7	5,3	4,4	3,8	3,0	2,4	2,0	1,5	1,2	1,0
221K(-52°C)	28,1	12,1	8,3	5,8	4,9	4,2	3,3	2,6	2,2	1,7	1,4	1,1
222K(-51°C)	31,4	13,5	9,2	6,5	5,4	4,6	3,6	2,9	2,4	1,9	1,5	1,2
223K(-50°C)	36,9	15,9	10,8	7,6	6,4	5,5	4,3	3,4	2,9	2,2	1,8	1,4

Температура точки росы	Предельное содержание водяных паров, мг/кг, при избыточном давлении воздуха, МПа											
	0	0,14	0,25	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5
224K(-49°C)	42,9	18,5	12,7	8,9	7,4	6,4	5,0	4,0	3,4	2,6	2,1	1,7
225K(-48°C)	49,3	21,2	14,5	10,1	8,5	7,3	5,7	4,5	3,8	2,9	2,4	1,9
226K(-47°C)	55,3	23,8	16,3	11,4	9,5	8,2	6,4	5,1	4,3	3,3	2,7	2,1
227K(-46°C)	61,3	26,4	18,1	12,7	10,6	9,1	7,1	5,7	4,8	3,7	3,0	2,4
228K(-45°C)	67,4	29,1	19,9	13,9	11,6	10,0	7,3	6,2	5,3	4,0	3,3	2,6
229K(-44°C)	74,1	31,9	21,9	15,3	12,8	11,0	8,6	6,8	5,7	4,4	3,6	2,9
230K(-43°C)	86,1	37,1	25,4	17,8	14,8	12,3	10,0	7,9	6,7	5,1	4,1	3,3
231K(-42°C)	92,1	39,7	27,2	19,0	15,9	13,8	10,7	8,4	7,2	5,5	4,4	3,6
232K(-41°C)	104,2	44,9	30,8	21,5	18,0	15,5	12,0	9,6	8,1	6,2	5,0	4,1
233K(-40°C)	110,8	47,9	32,7	22,9	19,1	16,5	12,8	10,2	8,6	6,6	5,3	4,3
234K(-39°C)	122,9	52,9	36,3	25,4	21,2	18,3	14,2	11,3	9,6	7,3	5,9	4,8
235K(-38°C)	135,5	58,4	40,0	28,0	23,4	20,2	15,7	12,4	10,5	8,0	6,5	5,3
236K(-37°C)	153,6	66,1	45,4	31,7	26,5	22,8	17,8	14,1	12,0	9,1	7,4	6,0
237K(-36°C)	166,2	71,6	49,1	34,3	28,7	24,7	19,2	15,3	13,0	9,9	8,0	6,5
238K(-35°C)	184,3	79,4	54,4	38,1	31,8	27,4	21,3	17,5	14,8	11,3	9,2	7,4
239K(-34°C)	202,9	87,4	59,9	41,9	35,0	30,2	23,5	19,2	16,3	12,4	10,0	8,1
240K(-33°C)	227,7	98,0	67,2	47,0	39,3	33,8	26,3	20,9	17,7	13,5	10,9	8,9
241K(-32°C)	243,9	105,8	72,6	50,8	42,4	36,5	28,4	22,6	19,1	14,6	11,8	9,6
242K(-31°C)	276,5	119,0	81,6	57,1	47,7	41,1	32,0	25,4	21,5	16,5	13,3	10,7
243K(-30°C)	301	129,7	83,9	62,2	51,9	44,8	34,8	30,0	25,3	19,4	15,7	12,7
244K(-29°C)	342	142,9	98,0	68,5	57,2	49,3	38,4	33,0	28,0	21,4	17,3	14,0
245K(-28°C)	368	158,8	108,9	76,1	63,6	54,8	42,5	36,1	30,6	23,4	18,9	15,3
246K(-27°C)	430	185,2	127,0	88,8	74,2	64,0	49,7	39,2	33,2	25,4	20,5	16,6
247K(-26°C)	461	198,6	136,3	95,3	79,6	69,6	53,4	43,0	36,4	27,8	22,5	18,2
248K(-25°C)	491	211,7	145,2	101,5	84,8	73,1	56,8	47,0	38,0	30,4	24,6	19,8
249K(-24°C)	553	238,1	163,3	114,2	95,4	82,2	64,0	51,5	43,5	33,3	27,0	21,8
250K(-23°C)	614	264,5	181,4	126,9	105,9	91,4	71,0	56,1	47,5	36,3	29,4	23,7
251K(-22°C)	681	293,1	201,0	140,6	117,4	101,2	78,7	61,6	52,2	40,0	32,3	26,1
252K(-21°C)	741	319,0	218,8	153,0	127,3	110,2	85,7	67,9	57,4	43,9	35,5	28,7
253K(-20°C)	801	345,0	236,6	165,5	138,2	119,1	92,7	73,5	62,2	47,6	38,5	31,1
254K(-19°C)	862	370,9	254,4	177,9	148,5	128,1	99,6	79,7	67,5	51,6	41,8	33,7
255K(-18°C)	922	396,8	272,2	190,3	158,9	137,0	106,6	87,7	74,2	56,7	45,9	37,1
256K(-17°C)	989	425,4	291,7	204,0	170,4	146,9	114,2	94,4	80,0	61,1	49,5	40,0
257K(-16°C)	1049	451,3	309,5	216,5	180,6	155,8	121,2	102,4	86,6	66,2	53,6	43,3
258K(-15°C)	1170	508,2	345,1	241,3	201,5	173,8	135,2	110,8	93,8	71,7	58,0	46,9
259K(-14°C)	1230	529,1	362,9	253,8	211,9	182,7	142,1	121,0	102,4	78,3	64,4	51,2
260K(-13°C)	1357	583,6	400,2	279,9	233,7	201,5	156,7	130,6	110,5	84,5	68,4	55,3
261K(-12°C)	1478	633,5	437,4	304,8	254,5	219,4	170,7	141,4	119,6	91,5	74,0	59,8
262Y(-11°C)	1653	689,9	473,2	330,9	276,3	238,2	185,3	153,8	130,2	99,5	80,6	65,1
263K(-10°C)	1725	741,8	503,8	355,8	297,1	256,2	199,2	162,3	140,7	107,6	87,1	70,3
264K(-9°C)	1907	820,0	560,0	393,0	327,0	280,0	218,0	179,9	152,2	116,4	94,2	76,0
265K(-8°C)	2071	890,0	609,0	425,0	355,0	302,0	236,0	194,0	164,2	125,5	101,6	82,0
266K(-7°C)	2225	956,0	655,0	460,0	382,0	328,0	255,0	210,0	177,0	136,0	110,0	89,0
267K(-6°C)	2397	1030,0	701,0	496,0	414,0	354,0	275,0	226,3	191,4	146,4	118,5	95,7

Температура точки росы	Предельное содержание водяных паров, мг/кг, при избыточном давлении воздуха, МПа											
	0	0,14	0,25	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5
268K(-5°C)	2607	1120,0	770,0	536,0	446,0	383,0	298,0	243,8	206,3	157,8	127,7	103,1
269K(-4°C)	2794	1200,0	825,0	576,0	480,0	412,0	320,0	263,0	222,6	170,2	137,8	111,2
270K(-3°C)	3016	1295,0	890,0	625,0	520,0	444,0	346,0	282,9	239,3	183,0	148,1	119,6
271K(-2°C)	3238	1390,0	960,0	671,0	559,0	479,0	373,0	304,4	257,5	197,0	159,4	128,7
272K(-1°C)	3472	1490,0	1030,0	710,0	592,0	506,0	399,0	328,1	277,3	212,3	171,6	138,8
273K(0°C)	3683	1580,0	1080,0	761,0	635,0	544,0	422,0	352,0	298,0	228,0	184,0	149,0
274K(1°C)	4056	1750,0	1185,0	839,0	696,0	595,0	463,0	379,0	320,0	245,0	198,0	160,0
275K(2°C)	4364	1879,0	1283,0	899,0	750,0	640,0	497,0	407,0	344,0	263,0	213,0	172,0
276K(3°C)	4685	2010,0	1380,0	965,0	805,0	687,0	534,0	437,0	370,0	283,0	229,0	185,0
277K(4°C)	5031	2160,0	1470,0	1030,0	861,0	723,0	562,0	469,0	397,0	303,0	246,0	198,0
278K(5°C)	5399	2320,0	1590,0	1110,0	925,0	791,0	615,0	503,0	426,0	325,0	263,0	213,0
279K(6°C)	5791	2482,0	1700,0	1190,0	990,0	847,0	659,0	539,0	456,0	349,0	282,0	228,0
280K(7°C)	6209	2600,0	1820,0	1270,0	1060,0	910,0	707,0	578,0	489,0	374,0	302,0	244,0
281K(8°C)	6652	2840,0	1950,0	1360,0	1130,0	974,0	757,0	622,0	523,0	400,0	324,0	262,0
282K(9°C)	7125	3040,0	2065,0	1445,0	1205,0	1040,0	811,0	660,0	560,0	428,0	347,0	280,0
283K(10°C)	7626	3260,0	2230,0	1562,0	1299,0	1115,0	877,0	708,0	599,0	458,0	371,0	299,0
284K(11°C)	8159	3495,0	2390,0	1670,0	1390,0	1190,0	926,0	757,0	641,0	490,0	396,0	320,0
285K(12°C)	8725	3715,0	2530,0	1785,0	1485,0	1232,0	990,0	809,0	685,0	523,0	424,0	342,0
286K(13°C)	9326	3920,0	2720,0	1908,0	1585,0	1355,0	1055,0	864,0	731,0	559,0	452,0	365,0
287K(14°C)	9965	4250	2900	2030	1690	1452	1129	922	780	597	483	390
288K(15°C)	10641	4540	3100	2162	1808	1549	1203	984	833	636	515	416
289K(16°C)	11359	4820	3310	2310	1920	1658	1285	1050	888	679	549	444
290K(17°C)	12120	5140	3520	2460	2040	1762	1369	1120	946	723	585	473
291K(18°C)	12925	5460	3750	2613	2180	1875	1457	1190	1000	770	624	504
292K(19°C)	13780	5840	4000	2800	2322	2000	1555	1270	1070	820	664	536
293K(20°C)	14687	6200	4250	2980	2478	2130	1655	1350	1140	873	707	571
294K(21°C)	15641	6500	4550	3170	2630	2260	1758	1440	1220	929	752	607
295K(22°C)	16655	7180	4815	3380	2790	2400	1869	1530	1290	988	799	645
296K(23°C)	17730	7500	5100	3580	2980	2560	1987	1620	1370	1050	849	686
297K(24°C)	18866	7960	5450	3820	3160	2720	2110	1720	1460	1110	902	728
298K(25°C)	20070	8360	5830	4050	3350	2880	2239	1830	1550	1180	958	773
299K(26°C)	21336	8920	6140	4280	3558	3060	2390	1940	1640	1260	1020	821
300K(27°C)	22679	9560	6520	4550	3770	3240	2520	2060	1740	1330	1080	871
301K(28°C)	24098	10180	6900	4900	4000	3440	2690	2190	1850	1410	1140	923
302K(29°C)	25596	10550	7350	5110	4240	3650	2840	2320	1960	1500	1210	978
303K(30°C)	27242	11400	7780	5420	4500	3870	3000	2460	2080	1590	1284	1040
304K(31°C)	288561	12180	8260	5770	4760	4100	3180	2600	2200	1680	1360	1100
305K(32°C)	30622	12800	8720	6100	5030	4330	3360	2750	2330	1780	1440	1160
306K(33°C)	32490	13520	9280	6450	5325	4600	3540	2910	2460	1880	1520	1230
307K(34°C)	34462	14310	9820	6820	5600	4860	3760	3080	2610	1990	1610	1300
308K(35°C)	36548	15220	10360	7200	5920	5140	3980	3260	2760	2100	1700	1370
309K(36°C)	38742	16100	10950	7660	6280	5450	4200	3440	2910	2220	1800	1450
310K(37°C)	41067	17040	11600	8040	6640	5740	4360	3640	3080	2350	1900	1530
311K(38°C)	43519	18150	12220	8560	7010	6080	4690	3840	3250	2480	2000	1620

Температура точки росы	Предельное содержание водяных паров, мг/кг, при избыточном давлении воздуха, МПа											
	0	0,14	0,25	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5
312K(39°C)	46107	19150	12890	9020	7400	6400	4960	4050	3430	2620	2120	1710
313K(40°C)	48835	20200	13600	9510	7910	6760	5220	4280	3620	2760	2230	1800
314K(41°C)	51719	21350	14350	10040	8320	7100	5530	4520	3820	2920	2360	1900
315K(42°C)	54770	22450	15130	10600	8790	7540	5840	4760	4030	3070	2480	2010
316K(43°C)	57986	23720	15950	11120	9350	8060	6249	5020	4240	3240	2620	2110
317K(44°C)	613851	25100	16800	11715	9750	8290	6437	5290	4470	3410	2760	2230
318K(45°C)	64980	26400	17700	12400	10550	8740	6760	5570	4710	3600	2910	2350
319K(46°C)	68769	27600	18680	12900	10800	9230	7150	5870	4960	3790	3060	2470
320K(47°C)	72780	29200	19650	13680	11320	9740	7550	6180	5220	3980	3220	2600
321K(48°C)	77020	30600	20370	14400	12000	10030	7960	6500	5490	4190	3900	2730
322K(49°C)	81498	32370	21700	15140	12500	10080	8360	6840	5780	4410	3560	2880
323K(50°C)	86236	34000	22700	15800	13200	11030	8800	7190	6080	4640	3750	3020

Приложение 4

Соотношения между единицами измерения влажности

Тем-ра точки росы, °C	Упругость вод. пара, $P_{\text{нп}} \times 10^{-3}$, кгс/см ²	Относит. влажность, %	Абсолютн. влажность, г/м ³	Объёмная концентрация, ppm	Тем-ра точки росы, °C	Упругость вод. пара, $P_{\text{нп}} \times 10^{-3}$, кгс/см ²	Относит. влажность, %	Абсолютн. влажность, г/м ³	Объёмная концентрация, ppm
-70	0,0026	0,011	0,0028	2,55	-12	2,17	9,27	1,84	2140
-68	0,0035	0,015	0,0037	3,44	-10	2,7	11,5	2,27	2560
-66	0,0046	0,0197	0,0048	4,6	-8	3,1	13,3	2,58	3060
-64	0,0062	0,0265	0,0065	6,1	-6	3,68	15,73	3,05	3640
-62	0,0082	0,035	0,00854	8,07	-4	4,38	18,72	3,6	4320
-60	0,0107	0,0457	0,011	10,6	-2	5,18	22,14	4,23	5100
-58	0,0141	0,0603	0,0144	14,0	0	6,11	26,0	4,8	6020
-56	0,0183	0,0782	0,0186	18,3	+2	7,05	30,13	5,6	6960
-54	0,0237	0,101	0,02367	23,4	+4	8,13	34,75	6,3	8028
-52	0,0306	0,131	0,031	31,1	+6	9,34	40,0	7,257	9230
-50	0,04	0,171	0,04	39,4	+8	10,72	45,8	8,2	10586
-48	0,05	0,21	0,05	49,7	+10	12,3	52,5	9,4	12117
-46	0,064	0,274	0,06253	63,2	+12	14,03	60,0	10,6	13842
-44	0,081	0,346	0,7866	80,0	+14	16,0	68	12,06	15776
-42	0,1	0,43	0,96	101	+16	18,17	77,65	13,6	17934
-40	0,13	0,56	0,123	127	+18	20,64	88,2	15,36	20368
-38	0,16	0,68	0,15	159	+20	23,38	100	17,3	23079
-36	0,2	0,86	0,186	198	+24	29,84		21,77	29447
-34	0,25	1,07	0,23	246	+30	42,43		30,4	41868
-32	0,31	1,33	0,284	340	+34	53,19		37,6	52500
-30	0,38	1,63	0,345	376	+40	73,73		51,15	72789
-28	0,46	1,97	0,42	462	+44	90,92		62,3	89737
-26	0,57	2,44	0,51	566	+50	123,32		83,06	121724
-24	0,7	3,0	0,622	691	+54	150		99,8	148026

-22	0,85	3,64	0,74	841	+56	165,05		109	162895
-20	1,03	4,41	0,8998	1020	+58	181,45		119	179079
-18	1,25	5,34	1,08	1230	+60	199,18		130,2	196579
-16	1,51	6,46	1,3	1490	+62	217,8		142	218158

Приложение 5

Таблица для сравнения и перевода к системе СИ наиболее важных внесистемных единиц

Наименование величин		Единицы измерения и их сокращённое обозначение	Р-р в един. СИ
Длина		метр (м)*	1 м
		миллиметр (мм)**	$1 \cdot 10^{-3}$ м
		микрон (мкм)**	$1 \cdot 10^{-6}$ м
Сила		ньютон, Н*	1 Н
		килограмм-сила (кгс)**	~9,81 Н
		тонна-сила (тс)**	~9810 Н
Масса		килограмм, (кг)*	1 кг
Время		секунда (с)*	1 с
		минута (мин)**	60 с
		час (ч)**	3600 с
Площадь		квадратный метр (м ²)**	1 м ²
		квадратный сантиметр (см ²)***	$1 \cdot 10^4$ м ²
		квадратный миллиметр (мм ²)***	$1 \cdot 10^6$ м ²
Объём, вместимость		кубический метр (м ³)*	1 м ³
		литр (л)**	$1 \cdot 10^{-3}$ м ³
Плотность		килограмм на кубический метр (кг/м ³)*	9,81 кг/м ³
Работа, энергия, количество теплоты		джоуль (Дж)**	1 Дж
		киловатт-час (кВт.ч)***	$3,6 \cdot 10^6$ Дж
		килограмм-сила-метр (кгс-м)***	9,81 Дж
Мощность		ватт (Вт)*	1 Вт
		киловатт (кВт)**	1000 Вт
Давление		паскаль (Па) — ньютон-сила на квадратный метр (Н/м ²)**	$1 \cdot 10^4$ Н/м ²
		мегапаскаль (МПа)**	$1 \cdot 10^6$ Н/м ²
		килограмм-сила на квадратный метр (кгс/м ²)***	$9,81 \cdot 10^4$ Н/м ²
Вязкость	динамическая	паскаль – секунда (Па·с)**	1 Па·с
		пуаз (пз)***	0,1 Н·с/м ²
	кинематическая	стокс (ст)**	$1 \cdot 10^{-4}$ м ² /с
		санти стокс (сс)***	$1 \cdot 10^{-6}$ м ² /с
Скорость		метр в секунду (м/с)*	1 м/с
Ускорение		метр в секунду в квадрате (м/с ²)	1 м/с ²
Угловая скорость		радиан в секунду (рад/с)*	1 рад/с
		обороты в минуту (об/мин)***	2π рад/с
Термодинамическая температура		кельвин, К*	1 К
Примечание. * – Основные единицы СИ; ** – производные единицы СИ;*** – внесистемные единицы.			

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОЗДУХЕ.....	4
1.1. Единицы измерения.....	4
1.2. Состав атмосферного воздуха.....	4
1.3. Основные свойства и параметры воздуха.....	4
Глава 2. ЗАГРЯЗНИТЕЛИ, КЛАССЫ ЧИСТОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ К ОЧИСТКЕ СЖАТОГО ВОЗДУХА.....	7
2.1. Загрязнители сжатого воздуха.....	7
2.2. Классы чистоты сжатого воздуха.....	16
2.3. Воздействие загрязнителей сжатого воздуха.....	19
2.4. Требования к очистке сжатого воздуха.....	21
2.5. Определение состояния и содержания влаги в пневмосистемах.....	26
2.5.1. Пневмолинии.....	27
2.5.2. Пневматическая проточная аппаратура.....	35
2.5.3. Пневмодвигатели.....	36
2.5.4. Устройства со смешением потоков воздуха.....	39
2.5.5. Устройства с замкнутыми полостями.....	40
2.5.6. Методика оценки возможности обмерзания пневмоустройств.....	41
Глава 3. СПОСОБЫ, УСТРОЙСТВА И СХЕМЫ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА.....	46
3.1. Параметры устройств очистки воздуха.....	46
3.2. Способы очистки воздуха от загрязнителей.....	50
3.2.1. Способы очистки воздуха от твёрдых и жидких частиц.....	50
3.2.2. Способы очистки от паров воды и масла.....	58
3.2.3. Очистка от микробиологических организмов, запахов и газов.....	64
3.3. Типовые конструкции и параметры устройств очистки воздуха.....	65
3.3.1. Устройства очистки на линии всасывания воздуха.....	65
3.3.2. Устройства очистки сжатого воздуха.....	69
3.3.2.1. Устройства очистки сжатого воздуха от твёрдых и жидких частиц.....	69
3.3.2.2. Устройства осушки сжатого воздуха.....	77
3.3.3. Устройства сбора, удаления и сепарации конденсата.....	89
3.3.4. Датчики, измерительные приборы и устройства автоматического управления очисткой.....	94
3.4. Выбор и размещение устройств очистки воздуха в пневмосистемах.....	96
3.4.1. Методика выбора систем и устройств сжатого очистки воздуха.....	97
3.4.2. Выбор устройств очистки всасываемого воздуха.....	101

3.4.3. Выбор и размещение устройств очистки сжатого воздуха.....	103
3.4.3.1. Выбор устройств очистки сжатого воздуха от твёрдых и жидких частиц.....	105
3.4.3.2. Выбор устройств осушки сжатого воздуха.....	106
3.4.3.3. Выбор производительности устройств очистки сжатого воздуха.....	111
3.4.3.4. Очистка сжатого воздуха на компрессорных станциях.....	116
3.4.3.5. Размещение устройств очистки сжатого воздуха для обеспечения классов чистоты по стандартам.....	121
3.4.3.6. Примеры размещения устройств очистки у потребителей.....	125
3.5. Основные требования к монтажу и эксплуатации пневмолиний и устройств очистки сжатого воздуха.....	130
3.5.1. Монтаж пневмолиний и устройств очистки.....	131
3.5.2. Техническое обслуживание пневмолиний и устройств очистки.....	133
3.5.3. Замена и ремонт устройств очистки.....	138
3.6. Снижение энергопотерь при очистке сжатого воздуха.....	140
3.7. Выбор поставщика устройств очистки и сервисных организаций.....	142
Глава 4. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ СЖАТОГО ВОЗДУХА.....	145
4.1. Контроль загрязнителей по ГОСТ 24484.....	145
4.2. Методы контроля загрязнителей по стандартам ИСО.....	150
Литература.....	151
Приложения.....	152