



Ю. В. Кузнецов
М. Ю. Кузнецов

СЖАТЫЙ ВОЗДУХ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Ю.В. Кузнецов, М.Ю. Кузнецов

СЖАТЫЙ ВОЗДУХ

ЕКАТЕРИНБУРГ
2008

УДК 621.542.622.012.2
М 57

Кузнецов Ю.В., Кузнецов М.Ю. **Сжатый воздух**. 2-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. ISBN 5-7691-1842-3.

Изложены вопросы обработки, распределения и потребления сжатого воздуха на промышленных предприятиях. Особое внимание уделено энергосбережению при производстве и потреблении сжатого воздуха. Приводятся методики и примеры расчета элементов систем воздухообеспечения.

Рекомендуется для инженерно-технических работников проектных институтов и предприятий, связанных с проектированием, модернизацией и эксплуатацией систем воздухообеспечения, а также для студентов и учащихся энергетических специальностей, изучающих дисциплину «Энергосбережение в промышленности».

Рецензенты

докт. техн. наук проф. **А.М. Дубинин**

докт. техн. наук проф. **Г.К. Смолин**

К $\frac{62(07)}{8П6(03)1998}$ БО

© Кузнецов Ю.В.,
Кузнецов М.Ю., 2008 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Часть первая	
Основные положения термодинамики и теплопередачи	
Глава 1. Термодинамика идеальных газов	4
1.1. Основные понятия	4
1.2. Основные термодинамические параметры состояния	5
1.3. Идеальный газ	7
Глава 2. Основные законы термодинамики и процессы идеальных газов	9
2.1. Первый закон термодинамики	9
2.2. Энтропия. Тепловая s, T -диаграмма	12
2.3. Термодинамические процессы в идеальных газах	14
2.4. Максимальная работоспособность потока. Эксергия	16
2.5. Уравнение первого закона термодинамики для потока	18
Глава 3. Основные закономерности истечения газов	19
3.1. Уравнение неразрывности потока	19
3.2. Скорость истечения из сопла	19
3.3. Истечение газа из сопла Лавалья	20
3.4. Действительный процесс истечения	21
3.5. Истечение газа из постоянной емкости через отверстие с постоянным сечением	24
Глава 4. Закономерности переноса теплоты	25
4.1. Основные понятия	25
4.2. Теплопроводность	26
4.3. Конвекция	27
4.4. Излучение	30
4.5. Теплопередача	31
Глава 5. Свойства сухого и влажного воздуха	34
5.1. Атмосферный воздух	34
5.2. Физические свойства сухого воздуха	34
5.3. Физические свойства влажного воздуха	37

Часть вторая

Выработка сжатого воздуха. Компрессорные установки

Глава 6. Основные термодинамические зависимости	43
6.1. Терминология и классификация компрессоров	43
6.2. Рабочие параметры компрессоров	44
6.3. Особенности термодинамических процессов в компрессоре	46
6.4. Изображение процессов сжатия в диаграммах состояния	47
6.5. Многоступенчатое сжатие	50
6.6. Коэффициент полезного действия компрессора	53
6.7. Эксергетический КПД компрессорной установки	55
Глава 7. Поршневые компрессоры	56
7.1. Рабочий процесс и параметры компрессора	56
7.2. Конструкция поршневых компрессоров	60
Глава 8. Роторные компрессоры	63
8.1. Винтовые компрессоры	64
8.2. Параметры винтового компрессора	71
8.3. Конструкции винтовых компрессоров	73
8.4. Спиральный компрессор	77
Глава 9. Центробежные компрессоры	78
9.1. Общие сведения	78
9.2. Основы теории центробежной машины	81
9.3. Многоступенчатые турбокомпрессоры	85
9.4. Характеристики турбокомпрессора	87
9.5. Конструкции центробежных компрессоров	89
Глава 10. Работа компрессора на сеть	92
10.1. Работа компрессора на сеть	92
10.2. Рабочее давление в сети	94
10.3. Влияние рабочего давления на характеристики компрессора	100
Глава 11. Регулирование давления сжатого воздуха	105
Глава 12. Сравнение экономичности современных способов изменения производительности воздушных компрессоров ..	113
12.1. Плавное изменение частоты вращения вала, $n_0 = \text{Var}$	113
12.2. Периодический пуск и остановка компрессора	115
12.3. Периодический перевод компрессора на холостой ход и номинальную нагрузку	116
12.4. Перепуск воздуха из полостей цилиндров во всасывающие полости поршневого компрессора	118
12.5. Дросселирование потока на всасывании	119
12.6. Закрутка потока входным направляющим аппаратом	120
12.7. Комбинированное регулирование	121
Глава 13. Системы автоматического регулирования давления и управления компрессорами	122

13.1. Двухпозиционное регулирование давления	122
13.2. Объем емкостной аппаратуры после компрессора при двухпозиционном регулировании давления	124
13.3. Двухпозиционные регуляторы	126
13.4. Системы управления компрессорами	127
13.5. Микропроцессорные блоки управления	131

Часть третья

Потребление сжатого воздуха

Глава 14. Классификация пневмоприемников	134
14.1. Пневмораспределители	135
14.2. Пневмодвигатели	140
14.3. Мембранные пневмоцилиндры и пневматические моторы	145
Глава 15. Вспомогательное оборудование пневмосистем	147
15.1. Регулирующая пневмоаппаратура	147
15.2. Обслуживающие устройства	150
15.3. Устройства подготовки сжатого воздуха	154
Глава 16. Давление и расход сжатого воздуха пневмоприемниками	155
16.1. Рабочее давление	155
16.2. Расход сжатого воздуха пневмоприемником	156
16.3. Расходные характеристики пневматических устройств	161
16.4. Расход воздуха группой пневмоприемников	165
16.5. Мощность пневмодвигателей	169
Глава 17. Монтаж и эксплуатация пневматических устройств и систем	172
17.1. Монтаж пневмоустройств	172
17.2. Эксплуатация пневматических устройств и систем	174

Часть четвертая

Распределение сжатого воздуха

Глава 18. Магистральные и цеховые воздухопроводы	180
18.1. Сети сжатого воздуха	180
18.2. Материал и соединения воздухопроводов	186
Глава 19. Потери энергии в сетях сжатого воздуха	192
19.1. Гидравлические потери энергии	192
19.2. Коэффициент сопротивления трения по длине	193
19.3. Коэффициент местного сопротивления	195
19.4. Режим течения сжатого воздуха в сетях. Экономическая скорость	196
19.5. Тепловые потери энергии	197
19.6. Кпд сети сжатого воздуха	204
19.7. Диаметр воздухопровода	208
19.8. Гидравлический расчет воздухопровода	209
19.9. Порядок расчета воздухопроводов	212

Часть пятая

Обработка сжатого воздуха

Глава 20. Загрязнение сжатого воздуха и его воздействие на пневмосистему	215
20.1. Загрязнение сжатого воздуха	215
20.2. Воздействие загрязнений на пневмосистему	218
Глава 21. Нормирование качества сжатого воздуха	227
21.1. Классы загрязненности сжатого воздуха	227
21.2. Классы загрязненности сжатого воздуха для пневмосистем и технологических процессов	229
Глава 22. Очистка воздуха от твердых и жидких частиц	234
22.1. Гравитационное осаждение частиц	234
22.2. Инерционное осаждение частиц	235
22.3. Диффузия и фильтрация	237
22.4. Условие удержания частиц на поверхностях	238
Глава 23. Конструкции устройств для очистки воздуха	240
23.1. Классификация устройств очистки воздуха	240
23.2. Выбор фильтра для компрессорной установки	246
Глава 24. Методы и способы осушки воздуха	249
24.1. Методы осушки воздуха	249
24.2. Осушка воздуха адсорбцией	260
24.3. Осушители мембранного типа	266
Глава 25. Отделение и удаление капельной влаги, масла и твердых частиц из сжатого воздуха	266
25.1. Концевой влагомаслоотделитель	267
25.2. Фильтры систем распределения воздуха	268
25.3. Сравнительная оценка различных схем очистки сжатого воздуха	275

Часть шестая

Компрессорные станции общего назначения

Глава 26. Производительность компрессорной станции	279
Глава 27. Выбор компрессора общего назначения	282
27.1. Определение количества компрессоров, устанавливаемых на компрессорной станции	282
27.2. Основные факторы, определяющие выбор компрессора	286
27.3. Дополнительные факторы, влияющие на выбор компрессора ..	289
27.4. Отбор важнейших факторов, влияющих на выбор компрессора ..	306
Глава 28. Технико-экономическая оценка выбираемого компрессора ..	309
28.1. Капитальные затраты и годовые издержки производства	309

28.2. Техничко-экономическое обоснование варианта компоновки компрессорной станции	317
Глава 29. Оборудование компрессорных станций	319
29.1. Централизованный и автономный источник воздухоснабжения .	319
29.2. Технологические схемы воздушных компрессорных установок .	321
29.3. Расположение центральной компрессорной станции	323
29.4. Компоновка компрессорной станции	324
29.5. Трубопроводы и арматура компрессорной станции	329
Глава 30. Системы охлаждения компрессорных установок	333
30.1. Общие сведения	333
30.2. Открытые водооборотные системы охлаждения	334
30.3. Система воздушного охлаждения промежуточного теплоносителя в закрытом контуре	343
30.4. Системы непосредственного воздушного охлаждения	346
30.5. Система охлаждения маслозаполненных винтовых компрессоров	348
30.6. Промежуточные (межступенчатые) охладители	349
30.7. Компоновка охладителей с компрессором	354
Глава 31. Электропривод компрессоров общего назначения	355
Часть седьмая	
Энергосбережение при производстве, распределении и потреблении сжатого воздуха	
<i>7.1. Энергосбережение при производстве сжатого воздуха</i>	<i>361</i>
Глава 32. Техничко-экономические показатели компрессорной станции	361
32.1. Основные технико-экономические показатели	361
32.2. Методика нормирования расхода электроэнергии на выработку сжатого воздуха	361
Глава 33. Эффективность системы производства, распределения и потребления сжатого воздуха	363
33.1. Анализ эффективности системы «компрессор–сеть–пневмодвигатель» методом коэффициентов полезного действия	374
33.2. Анализ эффективности системы «компрессор–сеть–пневмодвигатель» эксергетическим методом	382
Глава 34. Охлаждение компрессорных установок	388
34.1. Общие положения	388
34.2. Промежуточные (межступенчатые) охладители	388
Глава 35. Рекуперация тепловой энергии, отводимой системой охлаждения компрессорной установки	393
Глава 36. Повышение эффективности производства сжатого воздуха	403
	509

36.1. Обоснование сроков эксплуатации оборудования	403
36.2. Повышение эффективности производства сжатого воздуха компрессорами К-250 и К-500	407
36.3. Повышение эффективности производства сжатого воздуха поршневыми компрессорами общего назначения	413
36.4. Измерение производительности компрессоров	415
36.5. Контроль экономичности работы компрессора	419
Глава 37. Особенности работы электропривода компрессоров ...	420
37.1. Недогрузка электропривода компрессоров	420
37.2. Компенсация реактивной мощности	423
37.3. Пуск высоковольтных электродвигателей	425
37.4. Частотное регулирование электроприводов	430
Глава 38. Когенерационная установка по производству сжатого воздуха (пневмоэнергии) и теплоты	432
<i>7.2. Энергосбережение при распределении сжатого воздуха</i>	441
Глава 39. Утечки и способы их определения	441
39.1. Утечки сжатого воздуха в распределительных сетях	441
39.2. Определение утечек	443
Глава 40. Влага в сетях и меры ее устранения	448
40.1. Выпадение влаги в сетях	448
40.2. Меры борьбы с влагой в воздухопроводах	453
<i>7.3. Энергосбережение при потреблении сжатого воздуха</i>	460
Глава 41. Подогрев сжатого воздуха	460
Глава 42. Децентрализованное воздуходобывание и редуцирование сжатого воздуха	469
42.1. Децентрализованное воздуходобывание	469
42.2. Редуцирование сжатого воздуха	472
42.3. Целесообразность редуцирования сжатого воздуха или децентрализованного воздуходобывания	475
Глава 43. Непроизводительные расходы сжатого воздуха	479
43.1. Струйные пневмоприемники	479
43.2. Объемные пневмодвигатели	486
Глава 44. Организационно-технические мероприятия по энергосбережению в пневмосистемах	490
44.1. Отдельные энергосберегающие решения	490
44.2. Отдельные организационные мероприятия	492
Список литературы	496
Приложение	499