

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

Д. М. МОРДАСОВ, Д. О. ЗАВРАЖИН

ОБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Допущено Научно-методическим советом
по материаловедению и технологии конструкционных материалов
в качестве учебного пособия для студентов бакалавриата, обучающихся
по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВО «ПГТУ»
2016

УДК 621.78
ББК 34.651
М79

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, и.о. Генерального директора
ООО «Инновационный информационный центр»
В. М. Тютюнник

Доктор технических наук, профессор кафедры
«Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»
В. А. Ванин

Мордасов Д. М.

М79 Оборудование и автоматизация процессов производства и обработки материалов : учебное пособие / Д. М. Мордасов, Д. О. Завражин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 96 с. – 80 экз.
ISBN 978-5-8265-1550-1.

Даны классификация и описание оборудования термических цехов. Рассмотрены специфические узлы и детали печей, а также материалы, используемые при создании оборудования. Освещены вопросы автоматизации технологических процессов, теории автоматического управления. Особое внимание уделено техническим средствам, применяемым при автоматизации процессов производства и обработки материалов.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Материаловедение и технологии материалов» при изучении ими дисциплин «Оборудование термических цехов» и «Автоматизация процессов производства и обработки новых материалов», а также может быть полезно инженерам-технологам при решении ими производственных задач.

УДК 621.78
ББК 34.651

ISBN 978-5-8265-1550-1

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2016

ВВЕДЕНИЕ

При производстве и обработке материалов на промышленных предприятиях используют различные технологические приёмы: литьё, обработка давлением и резанием, термическая обработка, сварка и т.д.

Непрерывное развитие всех технологий осуществляется по следующим основным направлениям:

- создание мощного высокопроизводительного оборудования;
- улучшение качества подготовки сырья;
- улучшение методов и средств управления технологическими процессами;
- повышение квалификации персонала, обслуживающего производственное оборудование.

Большинство технологических процессов так или иначе связано с температурными воздействиями на материал, деталь или изделие на различных стадиях технологического процесса их производства. В основе термической обработки лежат процессы нагрева и охлаждения. В связи с этим нагревательные, охлаждающие устройства и другое вспомогательное оборудование являются наиболее распространённым оборудованием цехов по производству и обработке материалов.

В создании конструкций нагревательных устройств приоритет принадлежит русским учёным и инженерам. Петров В. В. открыл световое и тепловое действие электрического тока (1802), положив начало изучению электрического нагрева. В 1906 – 1907 годах А. Н. Лодыгин разработал ряд конструкций электропечей для переплавки и термообработки металлов. В 1913 – 1914 годах на Путиловском заводе инженером А. Н. Королевым была построена промышленная электропечь для нагрева под закалку артиллерийских снарядов. В последнее время созданы новые методы нагрева лучами лазера, электронной пушкой, низкотемпературной плазмой [1, 2].

Повышение качества производимой продукции на современном этапе требует не только разработки нового высокопроизводительного оборудования, но и совершенствования существующего. Параллельно с обновлением конструкций нагревательных устройств совершенствуются закалочные баки, машины и вспомогательное оборудование для удаления окалины правки деталей, отрезки образцов. Широкое применение получают дробеструйные аппараты для очистки деталей от окалины и упрочнения их поверхности, агрегаты для обработки холодом и получения контролируемых атмосфер [5].

При проектировании оборудования термических цехов основное внимание должно уделяться внедрению технологии, повышающей качество выпускаемой продукции и ускоряющей цикл термической обработки,

в связи с чем необходимо систематически совершенствовать оборудование, механизировать и автоматизировать процессы, создавая поточные линии [5].

Автоматизированные системы управления процессами производства и обработки материалов являются высшим этапом комплексной автоматизации и призваны обеспечить существенное увеличение производительности труда, улучшение качества выпускаемой продукции и других технико-экономических показателей производства, а также защиту окружающей среды. Основными предпосылками для полной автоматизации участков, цехов являются повышение уровня механизации на участках, применение дистанционного управления механизмами, высокий уровень оснащения агрегатов контрольно-измерительными приборами.

Максимальный экономический эффект от автоматизации может быть получен, когда в процессе проектирования технологического агрегата предусматривается его механизация, создаются резервы ресурсов управления и технологический процесс строится с учётом использования достижений современной науки управления – кибернетики. Расчёты показывают, что капитальные затраты на автоматизацию объектов окупаются в 3–4 раза быстрее, чем капитальные затраты на строительство новых производственных агрегатов.

Характерной особенностью развития современных управляемых технических систем, применяемых в технологиях производства новых материалов, является широкое применение унифицированных приводов, датчиков, преобразующих блоков и других унифицированных устройств автоматике. Другой важной и, возможно, революционной особенностью современных технических систем является широкое применение в замкнутом контуре управления микропроцессорных устройств. Это позволило заменить в управляющих устройствах физическую реализацию требуемого закона управления на требуемый программируемый алгоритм управления, что придаёт такой технической системе универсальность и гибкость, недостижимую при традиционной физической реализации управляющего устройства.

Рыночная экономика требует постоянного обновления ассортимента продукции, а также средств её производства. При этом в конкурентной борьбе за соответствующий сектор рынка выживает тот, кто умеет делать быстро с минимальной себестоимостью и качественней чем другие. Причём последнее должно соответствовать международным стандартам качества. В связи с освоением прогрессивных режимов обработки материалов резко возросли скорости рабочих и холостых перемещений рабочих органов промышленного оборудования. Наблюдается тенденция перехода к интеллектуальному управлению с самообучением.

Сопровождение рассмотренных выше направлений требует различных форм участия практически всех групп технического персонала предприятия. Объектами профессиональной деятельности бакалавров направления «Материаловедение и технологии материалов» являются техноло-

гические процессы производства, обработки и модификации материалов, деталей и изделий; оборудование, технологическая оснастка и приспособления; системы управления технологическими процессами; организация рабочих мест, их техническое оснащение, обслуживание и диагностика технологического оборудования, контроль за соблюдением технологической дисциплины и экологической безопасности в производственном подразделении по обработке и переработке материалов, контроль качества выпускаемой продукции. Инженер-технолог по производству и обработке материалов должен владеть навыками использования традиционных и новых технологических процессов, операций, оборудования, нормативных и методических материалов по технологической подготовке производства, качеству, стандартизации и сертификации изделий и процессов; использования технических средств для измерения и контроля основных параметров технологических процессов, свойств материалов и изделий из них; использовать принципы механизации и автоматизации процессов производства, выбора и эксплуатации оборудования и оснастки, методы и приёмы организации труда, обеспечивающие эффективное, экологически и технически безопасное производство.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Материаловедение и технологии материалов» при изучении ими дисциплин «Оборудование термических цехов» и «Автоматизация процессов производства и обработки новых материалов». По окончании курсов студенты должны знать типовые элементарные звенья систем автоматического управления, принцип определения оптимальных настроек регулятора, понятия устойчивости линейных систем автоматического управления; основные типы измерительных преобразователей, используемых для измерения и контроля основных параметров технологических процессов; основные виды автоматизации производства, основные направления автоматизации контроля; принципы выбора основного, дополнительного и вспомогательного оборудования термических участков и цехов. Уметь осуществлять расчёт оптимальных настроек регуляторов, анализировать и синтезировать системы автоматического регулирования; выбирать технические средства для решения задач измерения и контроля технологических процессов, материалов и изделий; выбирать средства автоматизации для построения систем автоматического контроля и управления технологическими процессами; осуществлять выбор основного, дополнительного и вспомогательного оборудования термических участков и цехов. Владеть навыками составления и анализа структурных схем систем автоматического управления и схем автоматизации технологических процессов; расчёта и использования технических средств контроля и регулирования технологических процессов; составления схем автоматизации технологических процессов; выбора соответствующего технологическому процессу термической обработки основного, дополнительного и вспомогательного оборудования.

1. ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦЕХОВ

Термические печи – наиболее распространённое в настоящее время основное оборудование термической обработки. Печи предназначены для преобразования различных видов энергии (электроэнергии, газа, жидкого и твёрдого топлива, лазерного и СВЧ-излучения и др.) в тепловую и дальнейшей передачи полученного тепла нагреваемым изделиям, реже – для регламентированного отбора тепла от нагреваемого изделия (при ступенчатой и изотермической закалке, изотермическом отжиге изделий и т.п.). Термическая печь представляет собой теплоизолированную камеру определённой формы (прямоугольной, цилиндрической, кольцеобразной и др.), с окном (или окнами) для загрузки и выгрузки изделий, оснащённую: устройствами для трансформации различных источников энергии в тепло; контрольно-измерительными приборами; механизмами для загрузки и выгрузки изделий, транспортировки изделий по камере; другими устройствами в соответствии с функциональным назначением печи.

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Классификация термических печей осуществляется по нескольким наиболее характерным признакам [3].

1. По типу (конфигурации) и размещению камеры относительно уровня пола цеха:

1) камерные – с горизонтально расположенной камерой в виде параллелепипеда. Камеру печей, в зависимости от габаритов, размещают непосредственно на полу цеха (крупногабаритные печи) или на металлических подставках (малогабаритные печи). Загрузку и выгрузку изделий осуществляют через одно торцевое окно, закрываемое подъёмной заслонкой или поворотной дверцей (рис. 1.1);

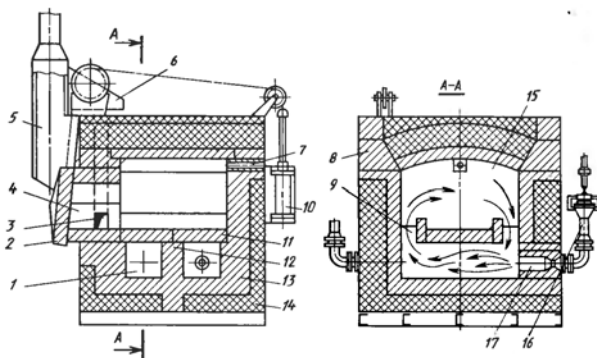


Рис. 1.1. Камерная печь с подподовыми топками

2) шахтные и колодезные – с вертикально расположенной камерой прямоугольной или цилиндрической формы (рис. 1.2). Такие печи, в зависимости от высоты (глубины) камеры, размещают непосредственно на полу цеха (малогабаритные печи) или в углублениях. Загрузку и выгрузку изделий осуществляют преимущественно через съёмный, отводной (поворотный) или раздвижной свод, или в некоторых шахтных печах – через раздвижной под, или загрузку сверху, разгрузку снизу;

3) ямные – с горизонтально расположенной прямоугольной камерой. Такие печи располагают обычно в углублениях (рис. 1.3). Загрузку и выгрузку изделий осуществляют через съёмный (цельный или секционный) свод, расположенный на уровне пола цеха, или несколько выше;

4) колпаковые – с переносной камерой в виде колпака цилиндрической или прямоугольной формы и тремя-четырьмя подинами, расположенными на уровне пола цеха. Загруженные на подину изделия накрывают колпаком или сначала муфелем, а затем колпаком;

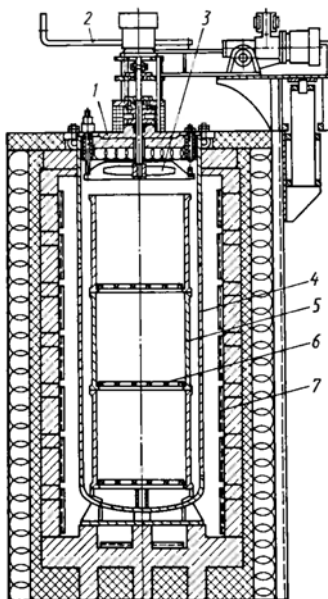


Рис. 1.2. Шахтная муфельная электропечь типа СШЦМ

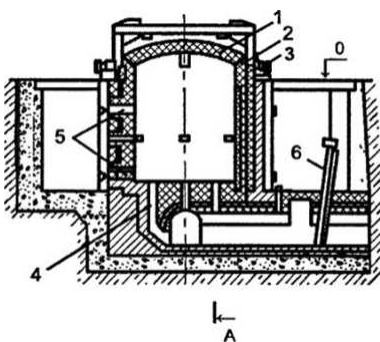
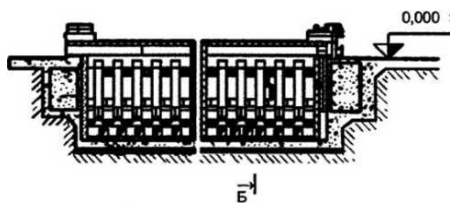


Рис. 1.3. Ямная печь типа ТЯО с непосредственным отоплением:

1 – раздвижной свод; 2 – песочный затвор; 3 – ролики;
4 – дымовые каналы; 5 – горелки; 6 – шибер

5) туннельные – с горизонтально расположенной на полу цеха или на металлической подставке длиной прямоугольной или цилиндрической камерой; загружают изделия с одного торца туннеля, разгружают – с противоположного;

6) кольцевые, камера которых представляет собой кольцевой туннель; загрузку и выгрузку изделий в таких печах осуществляют через одно или два рядом расположенных окна, закрываемых подъёмными заслонками или гибкими шторками;

7) башенные (обычно многокамерные) – с вертикально расположенными на полу цеха высокими камерами (башнями);

8) секционные, состоящие из нескольких непрерывно последовательно расположенных коротких камер (секций), соединённых между собой непосредственно или посредством тамбуров.

9) барабанные (ретортные), представляющие собой цилиндрическую горизонтально расположенную вращающуюся камеру (барабан) или камеру с вращающейся внутри неё цилиндрической ретортой. Обычно барабанные печи монтируют на металлических подставках или стеллажах.

10) комбинированные, представляющие собой комбинацию обычно двух типов камер.

2. По температурному режиму:

1) камерные – это печи, температура в пределах всей камеры которых примерно одинакова;

2) методические – это печи, температура по длине камеры которых монотонно повышается или понижается;

3) зонные – это печи, по длине камеры которых температура изменяется ступенчато;

4) комбинированные, т.е. такие, в которых непрерывно-последовательно реализуют два или три приведённых выше температурных режима.

3. По источнику тепла:

1) топливные;

2) электрические косвенного нагрева (посредством нагревательных элементов сопротивления);

3) электрические прямого нагрева (пропусканием тока через нагреваемое изделие);

4) электрические индукционные;

5) гелиопечи;

6) печи аэродинамического нагрева;

7) комбинированные.

4. По агрегатному состоянию нагревающей среды:

1) газовые;

2) вакуумные;

3) печи-ванны, т.е. печи с жидкой нагревающей средой, с псевдокипящим (псевдооживленным) слоем.

5. По взаимодействию нагревающей среды с нагреваемым металлом печи:

- 1) окислительные;
- 2) безокислительные, т.е. такие, в среде которых скорости реакций окисления металла и восстановления окислов соизмеримы;
- 3) нейтральные, т.е. такие, камера которых заполняется нейтральными по отношению к металлу газами (азотом, аргоном, гелием);
- 4) обезуглероживающие;
- 5) насыщающие;
- 6) реставрирующие (т.е. восстанавливающие) содержание углерода.

6. По технологическому признаку, т.е. по виду выполняемой в печи термической обработки:

- 1) закалочные, отпускные;
- 2) нормализационные;
- 3) отжигательные;
- 4) цементационные;
- 5) для азотирования и т.д.

7. По последовательности работы:

- 1) печи периодического действия (садочные);
- 2) печи непрерывного действия.

8. По траектории движения (транспортировки) нагреваемых изделий печи непрерывного действия:

- 1) прямоточные, с горизонтальным продвижением (транспортировкой) изделий;
- 2) с вертикальным продвижением изделий;
- 3) карусельные, т.е. с транспортировкой изделий по кругу;
- 4) с зигзагообразной транспортировкой изделий по вертикали (протяжные башенные) или горизонтали (протяжные горизонтальные или с подвесным конвейером).

9. По применяемым в печах транспортирующим механизмам:

- 1) толкательные;
- 2) конвейерные;
- 3) рольганговые;
- 4) с шагающими балками;
- 5) с вибрирующим транспортёром;
- 6) со шнековым транспортёром;
- 7) с винтовым транспортёром;
- 8) протяжные;
- 9) тележечные.

10. По месту загрузки изделий в нагревательную камеру печи:

- 1) с торцевой загрузкой;
- 2) с боковой загрузкой;
- 3) с верхней загрузкой;

- 4) с нижней загрузкой;
- 5) с загрузкой на открытую подину.

Для названий печей все классификационные признаки обычно не используют, так как в этом случае названия были бы очень длинными. Наиболее часто в названия печей включают два-три наиболее информационных классификационных признака: тип и расположение камеры, последовательность (периодичность) работы, способ механизации, т.е. применяемые в печи механизмы для перемещения нагреваемых изделий. По этим признакам термические печи подразделяют на пять групп (видов):

1. Печи периодического действия с горизонтальным расположением камеры:

- 1) с неподвижным подом без или с внешней механизацией (одно- и многокамерные);
- 2) с выкатным (выдвижным) подом;
- 3) с подъёмным подом (элеваторные);
- 4) с передвижной камерой (контейнерные);
- 5) с переносной или откатной камерой (колпаковые);
- 6) ямные (со съёмным сводом);
- 7) барабанные (ретортные);
- 8) комбинированные.

При необходимости применения контролируемой атмосферы в этих печах используют муфели (муфельирование садки), кроме ретортных печей. По температурному режиму печи этой группы преимущественно камерные, но могут быть и зонными (например, двухкамерные, ямные) и методическими – при посадке изделий в холодную или подогретую печь с последующим доведением температуры печи до заданной.

2. Печи периодического действия с вертикальным расположением нагревательной камеры:

- 1) шахтные с верхней или нижней загрузкой;
- 2) колодезные.

В шахтных печах высота камеры значительно больше, а в колодезных – примерно равна или незначительно больше поперечного сечения. В шахтных печах с верхней загрузкой свод (крыша) выполняется, в зависимости от диаметра и массы, подъёмно-поворотным, раздвижным или съёмным. В колодезных печах свод обычно съёмный или смещаемый. По температурному режиму печи этой группы преимущественно камерные.

3. Печи непрерывного действия с горизонтальным продвижением изделий (прямоточные):

- 1) с наклонным подом;
- 2) толкательные одно- и многорядные;
- 3) конвейерные одно- и многоэтажные;
- 4) с подвесным конвейером;

- 5) со встряхивателем (вибрирующим, пульсирующим механизмом);
- 6) барабанные (роторные);
- 7) с винтовым транспортёром;
- 8) туннельные: с тележечным подом, с подвесным конвейером;
- 9) протяжные;
- 10) секционные скоростного нагрева: с тамбурами, без тамбуров;
- 11) с ролганговым транспортёром;
- 12) с «шагающими» балками (подом).

Печи этой группы по температурному режиму могут быть камерными, зонными, методическими. Для возможности применения контролируемых атмосфер в топливных печах муфелируют или садку (муфельные печи), или пламя (печи с излучающими трубами), в электрических печах муфелируют элементы сопротивления.

4. Печи непрерывного действия с вертикальным расположением камеры и зигзагообразным продвижением изделий:

- 1) с вертикальным конвейером;
- 2) протяжные вертикальные (башенные).

По температурному режиму могут быть камерными (с вертикальным конвейером), зонными (башенные) или комбинированными.

5. Печи непрерывного действия с движением изделий по кругу (карусельные):

- 1) с вращающимся подом;
- 2) с вращающимся сводом;
- 3) с вращающейся каруселью.

В зависимости от диаметра под (свод) выполняется кольцевым или дисковым (тарельчатым). По температурному режиму печи могут быть камерными, методическими, зонными.

6. Отдельную группу составляют печи с жидкой или псевдожидкой нагревающей средой, называемые печами-ваннами:

- 1) с внешним обогревом;
- 2) с внутренним обогревом;
- 3) электродно-соляные;
- 4) с псевдокипящим слоем.

Могут быть периодического действия (при индивидуальном применении) и непрерывного действия (при использовании в составе механизированных агрегатов).

1.2. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПЕЧЕЙ

В общем случае основными конструктивными элементами, образующими камеру печи, являются: подина, боковые и торцевые стенки, свод, каркас, детали и узлы для поддержания и перемещения нагреваемых изделий.

Подина – часть камеры, ограничивающая рабочее пространство печи снизу, обычно повторяет форму камеры печи и у печей периодического действия и некоторых печей непрерывного действия, служит для загрузки на неё садки непосредственно или на специальных приспособлениях (поддонах, скобах, корзинах и т.п.). В зависимости от массы и типа, способа размещения и загрузки садки, способа обогрева печи подина выполняется плоской или желобчатой. Для предотвращения повреждений кладки подины, улучшения циркуляции газов, облегчения загрузки и выгрузки садки подина может оснащаться приспособлениями, подставками, брусками различной конструкции, например, желобчатыми с размещёнными в желобах шарами (шаровая подина) или катками, брусками с роликами (роликовая подина) и т.п. В случае размещения в подине элементов сопротивления, излучающих труб, подовых вентиляторов, конструкция подины значительно усложняется с учётом необходимости их размещения в подине и предохранения от повреждений садкой. Для защиты фундамента от теплового воздействия и повышения срока службы пода в печах большой тепловой мощности под выполняются вентилируемым, для чего под подом делают каналы, по которым циркулирует воздух.

В зависимости от габаритов печи, нагрузки на под, температуры нагрева и других факторов под печи делают одно- или многослойным. В многослойном поде нижний слой выполняют из теплоизоляционного или красного кирпича, верхний слой выкладывают из высокосортного огнеупорного кирпича, например, шамотного, в плотном или остеклованном состоянии, или из плит. Общая толщина пода обычно колеблется от 230 до 460 мм. В некоторых печах непрерывного действия, например, рольганговых, конвейерных, со встряхивателем и других, часто термин «подина» распространяется на транспортирующий механизм, говорят, печь с рольганговым подом, с конвейерным подом, с вибрирующим подом и т.д., что неправильно, так как и у этих печей подина остаётся подиной, а не транспортирующим механизмом. Поэтому правильнее такие печи называть по типу механизма – рольганговыми, конвейерными, со встряхивателем и т.п.

Рольганги, конвейеры и многие другие транспортирующие механизмы, применяемые в термических печах непрерывного действия, по определению не могут выполнять главную роль подины печи, т.е. ограничивать нагревательную камеру снизу и теплоизолировать её от окружающего пространства. Исключение составляют печи непрерывного действия с «шагающим» подом и туннельные печи с тележечным подом.

Стенки ограничивают рабочее пространство с торцов печи и боков и, кроме того, могут служить опорой для свода. В боковых стенках могут предусматриваться смотровые и рабочие окна для наблюдения за рабочим пространством и воздействия, при необходимости, на садку, проёмы

для горелок, форсунок, полуосей роликов в рольгановых печах, отверстия для контрольных термопар и т.д. С внутренней стороны электропечей в стенках выполняют каналы или снабжают стенки крючками, полочками и т.п. для размещения элементов сопротивления. Стены термических печей выкладывают не менее чем в один кирпич, в этом случае толщина кладки стены равна длине нормального огнеупорного кирпича, т.е. 230 мм. Обычно стены делают двухслойными: внутренний слой – огнеупорный, наружный – теплоизоляционный. Чтобы отверстия в стенах, например, рабочие и смотровые окна, не ослабляли кладку, их перекрывают специальными брусками или аркой, с наружной стороны окна армируют специальными рамами, которые при необходимости делают водоохлаждаемыми.

В зависимости от толщины швов кладку из кирпича подразделяют на особо тщательную, тщательную (толщина шва до 2 мм), обыкновенную и простую (толщина шва более 2 мм). В термических печах кладку стен и сводов выполняют на огнеупорном растворе по категории «тщательная» с предварительной подгонкой кирпичей. В настоящее время стены и своды выполняют преимущественно из специальных кирпичных блоков. Для повышения стойкости кладки её иногда покрывают изнутри тонким слоем огнеупорной обмазки. Либо вместо огнеупорной кладки футеруют их огнеупорными волокнистыми материалами в виде листов или рулонов.

Свод в зависимости от габаритов печи выполняют в форме арки, купола (при ширине печи до 5 м) или подвесным. Радиус кривизны арочных сводов принимают равным ширине печи (пролёт свода) или половине ширины печи (полуарочный свод). Арочный свод опирается на стенки печи или на внешний стальной каркас. Опорой пят свода служит подпятвовая балка. Наивысшая точка арки называется замком. Расстояние между замком и хордой, соединяющей пяты, называется вылетом свода. Распорные усилия, создаваемые арочным сводом, воспринимаются каркасом печи. В крупногабаритных печах своды делают подвесными, что значительно увеличивает срок их службы. При подвесных сводах стойки каркаса длиннее высоты печи, верхние концы их соединяют мощными профильными балками, к которым на подвесках крепится плоский подвесной свод. Чаще всего кладку термических печей выполняют из шамотного, шамотного легковесного, диатомового и глиняного (красного) кирпича.

В настоящее время на смену традиционным кладкам приходят кладки из волокнистых материалов с высокими огнеупорностью (до 1300 °С и более) и теплостойкостью (до 2000 теплосмен и более), с низкими плотностью (200...340 кг/м³) и коэффициентом теплопроводности (0,12...0,15 Вт/мК при 600 °С). Волокнистые огнеупорные и теплоизоляционные материалы для термических печей выпускаются в виде плит, которые монтируются в кладку с помощью металлических креплений или высокотемпературного клея. В печах с температурой до 500 °С используют элементы крепления из углеродистой стали, а выше 500 °С – из тепло-

стойкой стали. В качестве клея используют неорганические алюмосиликаты марки НС-1, НС-2 и другие с предельной температурой применения до 1300 °С. Расход клея составляет 300...350 г/м². Волокнистые огнеупоры позволяют значительно уменьшить массу печей, снизить тепловые потери в стационарном режиме до 20%, на нагрев кладки в каждом цикле в 4–5 раз, сократить продолжительность разогрева кладки до рабочей температуры, уменьшить расход топлива на 20...30%.

Каркас предназначен для восприятия нагрузок, возникающих в кладке и футеровке печи при нагревах и охлаждениях, а также для поддержки арматуры и оборудования печи, обеспечения газоплотности камеры. Конструкция каркаса зависит от габаритов печи, предельных температур нагрева, типа атмосферы в камере печи, способа соединения элементов каркаса и т.п. Обычно каркас термических печей выполняют сварным из фасонных сортовых профилей с обшивкой из листовой стали.

Для крупногабаритных печей применяют преимущественно стоечный каркас. Вертикальные стойки по бокам и торцам печи соединяют парно поперечными и продольными связками. Стойки и связки изготавливают из швеллеров, тавров, двутавров, уголков. Каркас может быть подвижным и жёстким (рис. 1.4). В первом случае связи изготавливают из мощных болтов, которые отпускаются при нагреве и подтягиваются при охлаждении, чем компенсируется температурное расширение.

Частые регулировки связей нежелательны, так как могут привести к перекосу каркаса и нарушению кладки и футеровки. Если связи выполняют жёстко (сваркой), что практикуется в каркасах крупногабаритных печей, кладку камеры выполняют с температурными швами для предотвращения

появления опасных термических напряжений, растрескивания или выпучивания кладки. При выполнении кладки температурные швы заполняют картонными или деревянными прокладками, которые при горячем опробовании печи выгорают. Весьма сложными и ответственными элементами каркаса являются подпятовые балки, соединяющие свод печи с каркасом. Их выполняют водоохлаждаемыми или неводоохлаждаемыми, соединяют со стойками каркаса болтами или сваркой. При расчёте металлических элементов каркаса учитывают не только механические усилия, но и усилия от напряжений, возникающих вследствие температурных расширений металла.

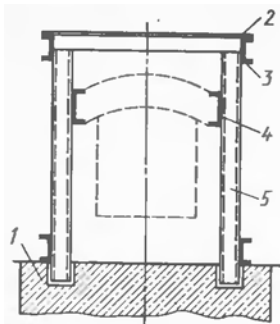


Рис. 1.4. Жёсткий каркас печи:

- 1 – фундамент;
- 2 – поперечная стяжка;
- 3 – продольная балка;
- 4 – подпятовая балка;
- 5 – стойка

К деталям и узлам для поддержания и перемещения нагреваемых изделий относятся: подовые плиты, поддоны, направляющие балки.

Подовые плиты обычно изготавливают из стали, чугуна или керамики. Для низкотемпературных печей плиты изготавливают из углеродистой стали, среднетемпературных – из жаропрочной стали или чугуна, высокотемпературных – керамическими. Подовые плиты рекомендуется выполнять сплошными с боковыми бортами. Плиты делают на 60...100 мм уже ширины рабочей камеры печи.

Поддоны служат для перемещения деталей в толкательных, рольганговых, иногда конвейерных печах, печах с шагающим подом, а также для загрузки садки в печах периодического действия. Поддоны для толкательных печей выполняются прочными, рассчитанными на усилие проталкивания, а для остальных печей – облегченными. Для температур до 1250 °С поддоны выполняют преимущественно металлическими, а выше 1250 °С – керамическими. Металлические поддоны выполняются литыми, сварными, решётчатыми или плетёными из проволоки.

Направляющие балки служат опорами подвижных и неподвижных садок и опорными частями подвижных элементов (поддонов, корзин, конвейеров, тележек). Их выполняют металлическими, а для высокотемпературных печей – из специальной керамики. Они должны обладать повышенной стойкостью против истирания и минимальным коэффициентом трения.

Муфели, реторты, контейнеры предназначены для муфелирования (изоляции) садки от атмосферы печи с целью обеспечения условия для обработки изделий в требуемой контролируемой атмосфере. Конструкции их обычно индивидуальны, зависят от назначения печи и поэтому описаны при изложении устройства конкретных конструкций печей.

В зависимости от особенностей конструкции и эксплуатации печей их монтируют на металлических конструкциях или на фундаментах. Если печи устанавливают на фундаменты, то во влажных грунтах фундаменты или защищают от воздействия грунтовых вод гидроизоляционными материалами, или ограничивают шпунтовыми балками, или осушают пространство вокруг них дренажами. Максимально допустимая температура нагрева фундаментов составляет обычно около 200 °С. Поэтому их защищают от воздействия высоких температур теплоизоляционными материалами или устройством вентилируемых подов.

1.3. ИНДЕКСАЦИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

В странах СНГ применяется единая словесно-буквенно-цифровая индексация серийно производимых термических печей, содержащая в закодированном виде большую смысловую информацию о данном типе печи.

Индексация термических печей включает: название печи (например, электропечь, агрегат электропечной и т.д.); условное обозначение (индекс), состоящий из трёх или четырёх основных заглавных букв, двух или трёх групп основных цифр, разделённых между собой точками и отделённых от букв тире, знака дроби (косой черты), одно- или двухзначной цифры; дополнительные буквы и цифры, например: «Электропечь СКЗ-12.80.2,5/11,5-Х160».

Первая буква индекса указывает вид нагрева. Для электрических печей приняты буквы: С – нагрев сопротивлением, косвенным методом; К – нагрев сопротивлением, прямым методом; И – нагрев индукционный. Для топливных печей приняты буквы: Т – термическая пламенная; Н – нагревательная.

Вторая буква индекса указывает основной классификационный (конструктивный) признак печи, тип камеры. Для топливных и электропечей приняты следующие буквы: А – карусельная печь (с вращающимся подом или сводом); Б – барабанная; В – печь-ванна; Г – колпаковая; Д – с выдвигаемым (выкатным) подом; Е – с подвесным конвейером; Ж – с вертикальным конвейером; З – для выращивания монокристаллов; И – с пульсирующим механизмом; К – конвейерная горизонтальная; Л – туннельная; Н – с неподвижным подом (в том числе с передвижной камерой – контейнерная); П – протяжная; Р – рольганговая; Т – толкательная; У – трубчатая; Ш – шахтная; Э – элеваторная (с подъёмным подом); Я – ручьевая. Для топливных печей приняты ещё буквы: Ю – с шагающим подом (шагающими балками); Щ – щелевая; Я – ямная.

Третья буква индекса указывает характер среды в рабочем пространстве электрической печи: А – азот; В – вакуум; З – защитная; К – компрессия; Н – водород; О – окислительная; П – перегретый пар; Ц – цементационная; Г – расплав металла (ов); С – расплав соли; Щ – расплав щёлочи; М – масло. Для топливных печей применяют только две буквы О, З, а для печей-ванн – буквы Г, С, М с теми же их обозначениями, что и у электропечей.

Четвёртая (вспомогательная) буква индекса обозначает характерные особенности печи: А – агрегат из нескольких печей; Л – лабораторная; Н – прецизионная; С – сушильная; Х – печь с камерой охлаждения; М – муфельная; Ж – под печи желобчатый; В – вертикальное расположение печи (в печах круглого сечения) или вертикальное перемещение изделий (в механизированных печах); К – колодцевая печь (для печей периодического действия) или кольцевой под (в карусельных печах); Т – тарельчатый под (в печах с вращающимся подом); И – непрерывного действия (для барабанных печей); П – периодического действия (для барабанных печей); Э – для эмалирования. Для вакуумных печей

четвёртая буква обозначает исполнение теплоизоляции: Г – графитовая; Ф – керамическая; Э – экранная.

Цифры, разделённые точками и стоящие через дефис за буквами, указывают размеры рабочего пространства печи (или размеры загрузочного окна, если оно меньше камеры, размеры муфеля, реторты) в дециметрах.

У печей с прямоугольной камерой цифры указывают соответственно ширину, длину и высоту камеры. У печей с цилиндрической камерой (шахтных, колодцевых, туннельных) соответственно диаметр камеры и длину (при горизонтальном расположении камеры) или высоту камеры при вертикальном её расположении. У печей с вращающимся кольцевым подом соответственно наружный и внутренний диаметры и ширину пода.

Цифра за косой чертой дроби указывает предельную температуру печи, а для агрегатов – максимальную температуру отпускной печи, в сотнях градусов Цельсия (размеры же камеры дают только закалочной печи).

После указанных основных и вспомогательных букв и цифр могут следовать *дополнительные буквы и цифры*, информирующие о дополнительных характерных признаках печи. Например, в индексе топливных печей после предельной температуры через дефис указывают вид топлива: Г – природный или другой газ; М – мазут или другое жидкое топливо. Для многокамерных печей после размера камеры через тире цифрой указывается количество камер (шт.). Для печей с выдвижным подом после предельной температуры через тире указывается максимальная масса загрузки в тоннах. Если печь имеет несколько исполнений, после предельной температуры через тире указывается номер исполнения И1, И2 и т.д. Например, обозначение: закалочно-отпускной агрегат СРЗА – 6.30.2/3,5-ИЗ читается так: закалочно-отпускной агрегат с закалочной рольганговой электрической печью сопротивления с защитной атмосферой и рабочим пространством шириной: 6 дм, длиной 30 дм, высотой 2 дм, отпускной электрической печью на максимальную температуру отпуска 350 °С, исполнение третье.

У *индукционных нагревательных печей* первая буква И – нагрев индукционный, вторая и третья буква, а также все цифры повторяют индексацию электропечей сопротивления. Четвёртая буква и обозначения дополнительных признаков у них не предусмотрены. При изучении индексации термических печей следует обратить внимание на то, что одна и та же буква, в зависимости от места её в индексе, обозначает совершенно разные понятия. Например, буква А на втором месте обозначает тип камеры печи (кольцевая, карусельная), на третьем месте – среду в рабочем пространстве печи (азот), на четвёртом месте – агрегат. Буква Н на первом

месте обозначает топливную нагревательную печь (т.е. печь, применяемую не только для термической обработки, но и для нагрева с другими целями, например, для нагрева заготовок для обработки давлением, для гибки и т.п.), на втором месте – среду в рабочем пространстве печи (водород), на четвёртом месте – дополнительный признак (прецизионная), т.е. с незначительным диапазоном колебаний температуры в печи.

1.4. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ТЕРМИЧЕСКИМ ПЕЧАМ

Несмотря на многообразие конструкций и типоразмеров термических печей, все они должны отвечать определённым общим требованиям, характерным именно для печей этого назначения. К таким требованиям относятся: обеспечение достаточной точности и равномерности нагрева; отсутствие или минимально возможное окисление и обезуглероживание (за исключением специальных случаев, когда эти процессы стимулируют целенаправленно); полная автоматизация управления процессами нагрева, горения топлива; высокий тепловой КПД; максимально возможная степень механизации (роботизации) процессов загрузки и выгрузки изделий; возможность изменять скорость нагрева в широких пределах; минимально достаточные размеры; возможность агрегирования с другими печами и другим оборудованием; соответствие требованиям дизайнера.

Сегодня одного технического совершенства термической печи и другого оборудования недостаточно. Оборудование должно быть не только технически совершенным, но и красивым, вызывать у работающего на нём положительные эмоции. Достигается это в том числе художественно-конструкторской деятельностью создателей оборудования, задача которых – найти оптимальную форму, структуру и окраску оборудования. Установлено, что дробная форма термической печи вызывает быструю зрительную утомляемость. Коммуникации вдоль боковых стенок (трубы, шланги, воронки и т.д.), арматура и тому подобное создают зрительную неуравновешенность. Путём изменения внешнего кожуха печи формы крышки и подвёмных заслонок можно исключить архитектурную разобщённость элементов печи, сделать её единообразной по форме.

Важной проблемой является рациональная окраска оборудования. При выборе цвета окраски, цветовой гаммы для окраски электропечей дизайнеры рекомендуют стремиться к цветовому объединению разобщённых элементов и деталей, к выделению печи (агрегата) из условий рабочей среды. Окрашиваемая поверхность нагревательной камеры должна обладать высокой отражающей способностью. Доказано, что только одной правильной окраской заводского оборудования можно снизить брак и травматизм почти на 50%, поднять производительность труда на 15...17%. Сегодня дизайнеры научились «закрашивать» производствен-

ный шум, «раздвигать» с помощью цвета стены рабочих помещений, «поднимать» потолки, предупреждать об опасности и т.д.

Термическое печестроение непрерывно развивается. В мировой практике наблюдаются следующие основные тенденции в этой области [4]:

1. Модульное исполнение камеры печи и обслуживающих узлов. Конструкция модуля печи обычно представляет собой жёсткую раму, в которой расположена лёгкая футеровка из керамических волокнистых материалов и вся необходимая арматура (нагреватели – в модулях электропечей, горелки (форсунки) – в модулях топливных печей и т.п.) и комплектующие. Изготовленные на печестроительном предприятии модули доставляют на место назначения, соединяют между собой и получают термическую печь. Использование модульного принципа сокращает время проектирования, повышает степень механизации печестроительного производства, сокращает время монтажа печи, упрощает погрузочно-разгрузочные работы, снижает массу материала печи и т.д.

2. Рекуперация и регенерация отработанного тепла для повышения теплового КПД печей.

3. Использование прогрессивных материалов.

4. Применение комбинированных методов нагрева, например, пламенного и электронагрева, индукционного и косвенного электронагрева и т.п., обеспечивающих суммарную экономию энергии, сокращение длительности нагрева и, как следствие, повышение производительности печей, более точное регулирование температуры на конечной стадии режима термической обработки.

5. Использование микропроцессоров для управления процессами горения и режимом нагрева (охлаждения) в печи.

6. Математическое моделирование режимов нагрева и охлаждения изделий.

7. Использование высококонцентрированных источников энергии.

8. Использование защитных атмосфер и вакуума. В настоящее время печи с защитными атмосферами значительно дешевле вакуумных, однако эксплуатационные расходы на вакуумные печи значительно ниже. Поэтому из года в год расширяется применение печей обоих типов.

Реализация этих тенденций позволяет создавать печи нового поколения, удовлетворяющие требованиям общества по экологической и экономической эффективности, качеству и себестоимости продукции, уровню механизации, автоматизации и роботизации, дизайну.

1.5. НАГРЕВ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В качестве *источника тепла* в термических печах можно использовать электроэнергию, различные виды топлива, эффект аэродинамического нагрева, низкотемпературную плазму, солнечную энергию (гелиопечи).

В настоящее время предпочтение отдаётся электропечам, количество которых составляет около 70% всех печей [5]. Обусловлено это тем, что:

1. Скорость роста и колебания цен на газообразное и жидкое топливо гораздо больше, чем на электроэнергию.

2. Электроэнергия более полно отвечает требованиям термической обработки как в обычной среде, так и в вакууме и контролируемых атмосферах, получающих всё более широкое распространение.

3. Некоторые виды термической и комбинированной обработки (азотирование в тлеющем разряде, поверхностное упрочнение конденсацией вещества и др.) просто неосуществимы без электроэнергии.

4. Электронагрев обеспечивает более высокое качество термической обработки, более низкую себестоимость, возможность регулирования в широких пределах процесса нагрева и осуществлять любые графики температурного режима.

5. Средства, затраченные на создание электропечей, даже сложных по конструкции, окупаются за короткое время.

6. Электронагрев – хорошо управляемый и автоматизируемый процесс.

7. При электронагреве не образуются продукты сгорания, не загрязняется окружающая среда, лучше условия труда.

8. Электроэнергия более транспортабельна и проста в подаче.

9. Электропечи, устройства и установки более компактны по конструкции.

К недостаткам электронагрева относятся:

1. Большая стоимость электроэнергии по сравнению со стоимостью эквивалентного количества угля, мазута и, особенно, газа.

2. Более высокие в ряде случаев капитальные затраты на изготовление и комплектацию оборудования и эксплуатационные затраты.

3. Большой расход в ряде случаев дорогих и дефицитных материалов и комплектующих изделий при изготовлении оборудования (сплавы высокого сопротивления, кабельная продукция, спецкерамика, трансформаторы, конденсаторы и др.).

В термических электропечах трансформация электрической энергии в тепловую осуществляется: или методом сопротивления косвенным, т.е. с помощью включаемых в электрическую цепь специальных элементов сопротивления, тепло от которых передаётся нагреваемому телу по законам теплопередачи; или прямым методом, когда тепло выделяется в самом нагреваемом теле, непосредственно включённом в электрическую цепь; или индукционным методом, когда тепло образуется за счёт протекания по нагреваемому телу, помещённому в переменное электромагнитное поле, индуцируемых в нём токов Фуко.

Для нагревательных элементов печей сопротивления в конце XIX века использовали железо и технически чистый никель, обеспечивавшие полу-

чение температуры до 500 °С, угольные стержни, манганин, платину, иридий и его сплавы при температурах до 1450 °С. В настоящее время для изготовления нагревательных элементов электрических печей применяют специальные жаростойкие сплавы, обладающие высокой жаростойкостью, достаточной жаропрочностью, высоким удельным электрическим сопротивлением, необходимой технологичностью при производстве заготовок и изготовлении нагревателей, низким температурным коэффициентом удельного электрического сопротивления, стабильностью свойств в процессе эксплуатации. Сплавы для нагревателей составляют особую группу в семействе жаростойких сплавов. Наиболее пригодны в качестве основы сплавов для нагревателей никель и железо, в качестве добавок – хром, алюминий; в качестве микродобавок – редкоземельные и щёлочно-земельные элементы, значительно повышающие термостойкость окалины и, как следствие, уровень эксплуатационных свойств сплавов.

Металлические сплавы для нагревателей традиционно разделяют на две группы: нихромы и ферронихромы (Ni-Cr и Fe-Ni-Cr – сплавы), имеющие аустенитную структуру; хромали и фехрали (Cr-Al и Fe-Cr-Al – сплавы), имеющие ферритную структуру. Области применения сплавов обеих групп в определённой степени совпадают, однако безникелевые сплавы заметно отличаются от никелевых по уровню свойств и поведению в эксплуатации. Хромали превосходят нихромы по жаростойкости в воздушной, углеродсодержащих, серосодержащих, водородной атмосферах и вакууме. Особенно важна их нечувствительность к наличию в атмосферах примесей серы и сернистых соединений, которые быстро разрушают нихромы вследствие образования низкоплавкой эвтектики. В то же время хромали и фехрали имеют, по сравнению с нихромами, ряд недостатков. У них низкое сопротивление ползучести, обусловленное ферритной структурой, приводящее при температурах выше 1100 °С к провисанию нагревателей под действием собственной массы. Сплавы эти охрупчиваются при работе в интервале температур 450...500 °С за счёт образования в структуре высокохромистых (до 75...80% Cr) выделений. Охрупчивание обратимо, устраняется закалкой в воде от температуры 750...800 °С.

После нагрева выше 1000 °С сплавы приобретают очень большую необратимую хрупкость в холодном состоянии. Сплавы имеют низкую пластичность при комнатной температуре, поэтому нагреватели с малым радиусомгиба следует деформировать при 200...350 °С. Сплавы склонны к химическому взаимодействию с некоторыми окислами и металлами. Поэтому футеровочные материалы печей с температурой 1100...1440 °С должны содержать не менее 70% глинозёма и минимальное количество (менее 1%) окислов железа. При отсутствии таких материалов, рекомендуется применять обмазку из 75% окиси алюминия, 25% огнеупорной глины.

Не допускается воздействие на нагреватели из этих сплавов паров и брызг меди, цинка, свинца, поваренной соли, шлаков, эмалей, железной окалины, а также наличие ржавчины (сплавы ржавеют) на проволоке, прутках, ленте перед изготовлением нагревателей.

Вообще нагреватели из железохромоалюминиевых сплавов имеют длительный срок службы только при условии высокой культуры их эксплуатации.

Все сплавы высокого электрического сопротивления могут работать как в воздушной, так и в нейтральных средах, а также в вакууме. В углеродсодержащих газах лучше работают железохромоалюминиевые сплавы, в вакууме – хромоникелевые, в низком и среднем вакууме удовлетворительно работают железохромоалюминиевые сплавы.

Агрессивными для всех сплавов сопротивления являются среды, содержащие фосфор, галоиды и серу, кроме железохромоалюминиевых сплавов, которые могут эксплуатироваться в серосодержащих газах.

В печах с температурами выше 1800 °С применяют элементы сопротивления из тугоплавких (температура плавления выше 2200 °С) металлов: вольфрама, молибдена, тантала, ниобия, имеющих температуры плавления соответственно 3380, 2610, 2996 и 2468 °С. Тантал и ниобий весьма пластичны при комнатной температуре, поэтому их обработка особых трудностей не представляет. Пластичность молибдена при 20 °С зависит от его чистоты, особенно содержания кислорода. Поэтому его деформируют при температурах 500...600 °С. Деформацию вольфрама производят при температурах 700...1300 °С в зависимости от толщины изделия, тонкостенные можно деформировать при 700 °С, с увеличением толщины изделия температуру деформации повышают. Допустимые температуры нагревателей из тугоплавких металлов зависят от состава керамики, с которой они контактируют. Лучше всего они работают в вакуумных печах в контакте с корундовой керамикой (Al_2O_3), не содержащей SiO_2 . С увеличением в корунде содержания SiO_2 допустимая температура значительно снижается.

При необходимости оградить металлические элементы сопротивления от агрессивной или жидкой среды, их изолируют надёжным электроизоляционным материалом, обладающим достаточной теплопроводностью, и помещают в трубы. Трубу подвергают холодному обжатию на 20...30% и придают ей требуемую форму.

Такие трубчатые электрические нагреватели (ТЭНы) применяют в печах-ваннах с внутренним обогревом, в печах для газовой цементации и т.п. С этой же целью применяют радиационные трубчатые нагреватели.

Наряду с металлическими, в электропечах применяют и *неметаллические элементы сопротивления*: силитовые, глобаровые, из дисилицида молибдена, тугоплавких карбидов, графита. Цельные или сборные стерж-

невые, трубчатые, U-образные с прямыми или отогнутыми выводами и другой формы нагреватели из карбидов кремния и тугоплавких металлов (ниобия, циркония, тантала, гафния), дисилицида молибдена изготавливают методами порошковой металлургии.

Нагреватели из карбида кремния SiC (карборундовые) можно применять в печах с предельной температурой 1400 °С, при более высоких температурах кремний окисляется. У нас в стране применяют два вида карборундовых нагревателей: силитовые (94,5% SiC, 3,5% SiO₂, 2% – другие примеси) и глобаровые (96% SiC, 1,5% SiO₂, 2,5% – другие примеси). *Силитовые* нагреватели выполняют преимущественно стержневыми. Концы стержней, находящиеся в кладке, имеют примерно в два раза больший диаметр, благодаря чему они не нагреваются выше 500...600 °С. Клеммная часть концов для улучшения контакта с клеммами никелируется или серебрится. *Глобаровые* стержни имеют заостренные концы, которые упираются в токовыводящие водоохлаждаемые контакты из жаростойкой стали. Карборундовые нагреватели изготавливают диаметром 8...30 мм, длиной рабочей части 150...1200 мм. Печь, оснащаемую карборундовыми нагревателями, необходимо комплектовать трансформатором, так как в процессе эксплуатации нагреватели стареют за счёт образования неэлектропроводного SiO₂, возрастает электросопротивление и падает мощность печи. Для поддержания номинальной мощности периодически необходимо повышать напряжение при помощи трансформатора.

Нагреватели из *дисилицида молибдена* MoSi₂ применяют в печах с окислительной и другими атмосферами. В вакууме силициды молибдена диссоциируют, поэтому их использование в вакуумных печах ограничено и зависит от парциального давления кислорода. Предельные температуры использования дисилицида молибдена составляют: в инертных газах (He, Ne, Ar) 1650 °С, в окислительной атмосфере 1700 °С, в атмосфере азота 1500 °С, окиси азота 1650 °С, окиси углерода 1500 °С, углекислого газа 1700 °С, влажного водорода (с точкой росы +10 °С) 1400 °С, сухого водорода 1350 °С.

Из *тугоплавких карбидов* изготавливают трубчатые, стержневые и U-образные нагреватели длиной до 600 мм, наружным диаметром до 18 мм, толщиной стенки 2–3 мм. Применяют их в вакуумных печах с температурой до 2500 °С и печах с инертными газами с температурой до 3000 °С.

Углеграфитовые нагреватели по конструкции аналогичны карборундовым. Изготавливают их из конструкционных углеграфитных материалов широкого назначения. Температура применения 1800...2100 °С.

При термической обработке металлопродукции в общепромышленных электрических печах сопротивления расход электроэнергии на нагрев изделий составляет 40...60% от общего расхода электроэнергии на их

изготовление в целом. Поэтому в мировой практике постоянно реализуются мероприятия по сокращению расхода электроэнергии в термических печах путём:

1) повышения загрузки печей до максимально возможной, но не менее 70% их номинальной производительности;

2) рациональной укладки термически обрабатываемых изделий, обеспечивающей максимальное использование теплопоглощаемой поверхности;

3) уменьшения веса и размеров загрузочной тары (поддонов, корзин, подставок и т.п.). Вес тары не должен превышать 10% от веса термически обрабатываемых изделий;

4) применения трёхсменного режима работы, обеспечивающего снижение расхода электроэнергии до 30% по сравнению с двухсменным режимом работы;

5) реализации принципа рекуперации тепла. Например, при режимах термической обработки, требующих замедленного охлаждения нагретых изделий, стремятся использовать выделяющееся от нагретых изделий тепло для подогрева последующих партий изделий и т.п.;

6) использования форсированных режимов нагрева изделий, особенно в начале процесса термической обработки. Это даёт снижение расхода электроэнергии на весь процесс 25%;

7) снижения температуры кожуха печей с 65 °С до 35...40 °С и соответственно тепловых потерь через наружную поверхность кожуха печей за счёт использования современных теплоизоляционных материалов с малой объёмной массой и оптимальных способов их крепления внутри печного пространства. Эти мероприятия снижают расход электроэнергии на 20...25%, позволяют сократить время нагрева электропечей до рабочей температуры на 25...30%;

8) нанесения на внутреннюю поверхность кожуха печи алюминиевой краски, снижающей потери тепла и, как следствие, расход электроэнергии до 3%;

9) повышения герметичности печей за счёт устранения неплотностей в загрузочном и разгрузочном проёмах и технологических отверстиях.

Второе место по распространённости занимают *топливные термические печи*, работающие на газовом или жидком топливе. Так как нефть и продукты её переработки являются ценным сырьём для химической промышленности, применение жидкого топлива для обогрева термических печей непрерывно сокращается и основным видом топлива пламенных термических печей становится газовое топливо. Топливные печи по конструкции могут выполняться с отдельной топкой или сжиганием топлива непосредственно в камере печи. Для возможности нагрева обрабаты-

мых изделий в контролируемых атмосферах прибегают к муфельированию садки (муфельные топливные печи) или муфельированию пламени в специальных трубах (топливные печи с излучающими трубами). Удобнее, экономичнее, ремонтпригоднее печи с муфельированием пламени. В печах с отдельной топкой последнюю, в зависимости от назначения печи и вида нагреваемых изделий, располагают под рабочей камерой (печи с рециркуляцией продуктов сгорания), над рабочей камерой (печи с движением продуктов сгорания сверху вниз), по бокам рабочей камеры (печи с боковыми точками). В низкотемпературных топливных печах (до 700 °С) топку выносят за пределы печи (печи с выносной топкой), продукты сгорания подают в рабочее пространство вентилятором по каналам или трубопроводам. Для повышения КПД одна топка может обслуживать несколько низкотемпературных печей.

При сжигании топлива непосредственно в камере печи горелки (форсунки) располагают вдоль боковых стенок в один ряд (у подины), или в два ряда (у подины и под сводом) в шахматном порядке, нагревательная камера служит одновременно и топочной камерой. В этом случае применяют различные конструкторские решения для предотвращения прямого воздействия факела на нагреваемые изделия во избежание местного перегрева.

В печах с муфельированием пламени трубчатыми нагревательными элементами последние располагают горизонтально в два ряда – над и под садкой или в один ряд под садкой, либо вертикально в два ряда вдоль боковых стен. Трубчатые элементы изготавливают из жаростойких сталей типа X18H25C2, X25H20C2.

2. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦЕХОВ

К дополнительному относят оборудование, предназначенное для выполнения дополнительных технологических операций: моечные машины; пескоструйные, дробеструйные и дробеметные установки; правильные прессы и машины; окалиноломатели; растяжные машины; установки для химического и электрохимического удаления окалины; контрольно-измерительные комплексы и т.п.

2.1. ТРАВИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Очистка деталей от окалины и ржавчины производится в травильных ваннах и дробеструйных аппаратах. Травление, кроме того, выявляет поверхностные дефекты на деталях (трещины, волосовины, закаты, плены и т.д.).

В кузнечных термических цехах поковки после термической обработки подвергают химическому травлению. Большое распространение получила специальная травильная машина с подъёмноповоротным краном (рис. 2.1). Эта машина имеет плунжер с поршнем, который движется в цилиндре с помощью пара или сжатого воздуха (давление 5–6 атм). На верхнем конце плунжера находятся четыре крестообразно расположенные балки-хоботы крана, на концах которых висят корзины с деталями. Плунжер может поднимать и опускать корзины. При подъёме корзин хоботы могут быть повернуты на 90°. Внизу против концов хоботов расположены три бака. В одном баке находится раствор кислоты, в другом – горячая вода и в третьем – холодная вода. На свободной загрузочно-разгрузочной площадке под четвёртым хоботом помещается тара с деталями, подлежащими травлению.

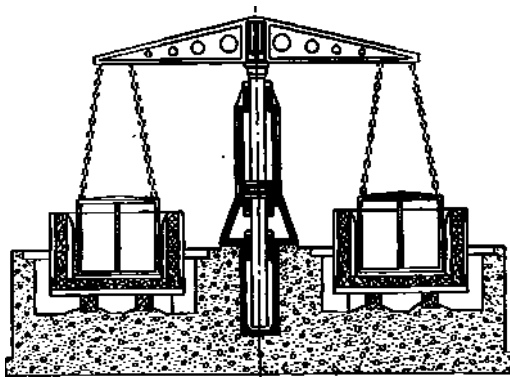


Рис. 2.1. Травильная машина с краном

Кислотные травильные баки изготавливают деревянными с внутренней облицовкой из кислотоупорного бетона со слоем резины: эти баки изготавливают также металлическими с кладкой из кислотоупорного кирпича, поверх которого наносится слой резины.

Травильные машины с краном имеют цилиндры различных диаметров: 300, 500 и 800 мм, соответственно в каждую корзину загружается 400, 900 и 1800 кг поковок; при длительности травления 30 мин производительность машин составляет 0,9; 1,8 и 3,6 т/ч соответственно.

Применение химического травления ограничено вследствие вредного его влияния. Предпочтительным методом очистки от окалины поковок является очистка во вращающихся барабанах и дробеметных установках.

В термических цехах и в инструментальных термических цехах применяют электролитическое травление. Этот способ травления полностью исключает возможность перетравливания и допускает очистку деталей с мелкой резьбой. Электролитическое травление заключается в обработке деталей в электролите определённого состава, причём детали являются одним из электродов (анодом или катодом). При анодном травлении, при несоблюдении режима, может получиться перетравливание, что исключается при катодном травлении.

Примерный состав ванны и режим работы катодного травления [6]:

Серная кислота, г/л	50
Соляная кислота, г/л	30
Хлористый натрий, г/л	22
Температура ванны, °С	60...70
Плотность тока, А/дм ²	7...10
Продолжительность процесса, мин	10...15

Этот способ травления основан на механическом снятии окалины водородом, выделяющимся на катоде. Процесс ведётся следующим образом. Детали, подвергаемые очистке, подвешивают на катоде ванны. В качестве анодов применяют пластины из свинца или из сплава свинца с 6...10% сурьмы, а также пластины из кремнистого чугуна с 20...24% кремния. При прохождении электрического тока через ванну на катоде выделяется водород, который механически снимает размягчённую кислотой окалину. Очищенный от окалины металл начинает покрываться свинцом, который предохраняет поверхность детали от действия кислоты. Выделение свинца на деталях указывает на окончание процесса. После этого детали тщательно промывают в двух ваннах с проточной водой, для того чтобы смыть остатки кислоты и отделить окалину. От осадка свинца детали освобождаются при обратном процессе. Детали подвешивают в ванну для травления в качестве анодов, и через 5...10 мин весь осадок свинца, образовавшийся на деталях, растворяется. После этого детали опять промыва-

ют и просушивают. Детали получают чистую поверхность, не имеющую следов разъедания и повреждения.

Основным оборудованием для электролитического травления, обезжиривания, холодной и горячей промывки являются ванны в виде баков прямоугольного сечения, сваренных из листовой стали толщиной 6...8 мм. Реже применяются керамические, деревянные, фарфоровые и эмалированные ванны. Ванны из листовой стали, предназначенные для отдельных операций, покрывают соответственно изнутри химически стойкими материалами (резиной, винилпластом, асбовинилом, неорганическими кислотопорами и др.). Для удаления вредных паров ванны снабжают вентиляцией с двусторонним отсосом. Кроме вентиляции к ваннам монтируют трубопроводы холодной и горячей воды и канализации.

Ванны имеют различные размеры в зависимости от масштаба производства: от 600×500×600 мм и до нескольких метров в длину при 1,2 м ширины и до 1,5 м высоты. Ванны электролитического травления и других операций группируют в агрегат и снабжают подвесными транспортными средствами.

В современных крупных цехах ванны для отдельных операций монтируют также по овалу или полуовалу. Ванны снабжаются подвесным конвейером для передвижения подвесок или корзин с деталями и для переноса из одной ванны в другую. Такие агрегаты используют в чистовых термических цехах для очистки деталей от окалины вместо дробеструйных аппаратов. Все гальванические ванны работают на постоянном токе. Источником тока являются низковольтные двигатель-генераторы.

Подводка тока к ваннам осуществляется с помощью медных шин и проводов.

У ванн монтируют щиты, на которых размещают пусковую, регулируемую и измерительную аппаратуру.

Иногда вместо двигатель-генераторов устанавливают выпрямители тока. Эти выпрямители монтируют вместе с трансформаторами, понижающими напряжение от 220/280 до 6...20 В. Наибольшее применение нашли меднозакисные выпрямители различной мощности.

2.2. ДРОБЕСТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ

Для очистки от окалины и для получения более светлого вида деталей после термической обработки в кузнечных, чистовых и инструментальных термических цехах применяют дробеструйные аппараты. Эти аппараты изготовляют в виде вращающихся герметически закрытых барабанов или в виде камер различных размеров с неподвижным или вращающимся, или проходным столом, а также с транспортёром. Для очистки отливок, поковок или штамповок чаще всего применяют вращающиеся барабаны. Детали, прошедшие механическую обработку, и детали, на кото-

рых нежелательно получение забоин, подвергают после термической обработки очистке металлическим песком или дробью в аппаратах камерного типа или с вращающимся столом. Чугунную дробь получают путём охлаждения в воде распыляемой воздухом тонкой струи чугуна. При охлаждении чугун затвердевает в виде дробинок, которые имеют структуру белого чугуна с твёрдостью HB 500. Дробь сортируют по размеру. В дробеструйных аппаратах для обдувки используют дробь диаметром 0,5...2 мм.

Часто также применяют вместо дроби мелконарубленные куски стальной проволоки. Ранее в термических цехах для очистки деталей применяли пескоструйные аппараты.

В настоящее время очистка сухим песком может быть эффективно заменена мокрой очисткой или гидроочисткой, позволяющей очищать детали, изготовленные с высокой точностью, в том числе и резьбовые. Для этого используют обычное пескоструйное оборудование с некоторыми дополнительными устройствами. В специальном баке находится смесь, воды со взвешенными частицами песка (например, 50% песка и 50% воды). Вода подаётся насосом по гибкому шлангу в камеру. Параллельно по другому шлангу подводится воздух высокого давления для распыливания смеси. Очистка производится вручную одновременно двумя шлангами путём направления струи смеси на деталь. Скорость подачи смеси 5...7 кг/мин. Отработавшая смесь засасывается насосом и вновь подаётся в бак. Смена смеси производится через двое суток непрерывной работы. При установлении режима работы аппаратов для гидроочистки следует учитывать размер зерен песка, весовое соотношение песка и воды в смеси, давление воздуха, угол падения смеси и расстояние, с которого производится обдувка.

Дробеструйные установки с вращающимся столом выпускаются трёх типов: ЧКА-16/1 (345), ЧКА-25/2 (347) и ЧКА-32/2 (353). Диаметр вращающегося стола этих установок 1600, 2800 и 3200 мм. Расход дроби 100, 130 и 140 кг/мин соответственно. В аппаратах могут очищаться детали весом до 300 кг.

Дробеструйные установки современных конструкций снабжают проходными столами на роликах. Столы имеют поступательное или возвратно-поступательное движение. В установке такого типа детали при поступательном движении обдуваются дробью с одной стороны, а затем, когда стол выходит из камеры, детали переворачиваются и при обратном ходе обдуваются с другой стороны. Сопла обычно вращаются или качаются в перпендикулярном к оси детали направлении. В некоторых конструкциях проходной стол заменяется транспортёром.

На конвейерной дробеструйной установке для очистки от окалины небольших автомобильных валов и других деталей подобного типа обдувка валов производится на цепном конвейере, который проходит через камеру со скоростью 0,2 м/мин. Дробь направляется на детали под углом

45° через турбинки, установленные попарно с каждой стороны камеры. Скорость выбрасывания дробы 70 м/с. Располагают турбинки в установке таким образом, что направление веера выбрасываемой дробы составляет угол в 90°. Отработанная дробь попадает в три бункера, находящиеся в нижней части установки. Отсюда дробь шнеками передвигается ковшowym элеватором и подаётся наверх. Далее через отводы дробь вновь поступает к воронкам турбинок. Подача дробы в турбинках регулируется оператором.

Вместо химического травления поковок используются дробемётные установки без транспортёра и с транспортёром. Из получивших распространение дробемётных установок можно назвать установки садового типа и непрерывного действия с индексами 323М, 317, 378Б-6, 378Б-9 и др.

При отсесе пыли от дробеструйных аппаратов применяют различные пылеуловительные устройства, в которых происходит очистка загрязнённого воздуха от твёрдых частиц. Для того чтобы не загрязнять воздух вокруг цеха, отсасываемую пыль от аппаратов направляют в неподвижный центробежный пылеотделитель – циклон. В нём более крупные частицы пыли осаживаются.

2.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРАВКИ ИЗДЕЛИЙ

Существует много изделий, при термической обработке которых, особенно с применением больших скоростей охлаждения, несмотря на всевозможные приёмы, не удаётся предотвратить их коробление, а иногда и нарушение геометрии. Обусловлено это тем, что при многих видах термической обработки практически невозможно обеспечить объёмную равномерность нагрева и охлаждения изделий и, как следствие, невозможно обеспечить одновременность структурных и фазовых превращений и связанных с ними объёмных эффектов, а значит, невозможно предотвратить поводки и коробления. Поэтому многие изделия после или в процессе термической обработки подвергают правке для доведения их конфигурации до требований нормативно-технической документации. Для этого применяют правильные прессы (рис. 2.2.) и машины различных конструкций, в которых правку изделий целиком или отдельных их участков осуществляют при нормальной температуре путём одно- или многократных перегибов, обкаткой, растяжением и другими способами пластической деформации. Следует помнить, что холодная правка – операция вынужденная, но нежелательная, так как приводит к: снижению сжимающих остаточных напряжений первого рода; наведению остаточных растягивающих напряжений; снижению усталостной прочности, пластичности и вязкости; протеканию процессов естественного и искусственного деформационного старения; оставлению на поверхности изделий следов деформирующих инструментов. Поэтому в практической деятельности всегда следует руководствоваться правилом: коробление лучше предотвращать, чем устранять.

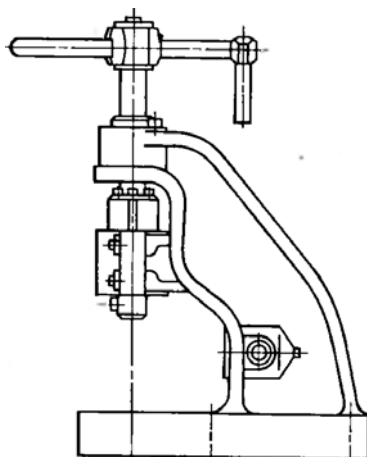


Рис. 2.2. Ручной правильный винтовой пресс

Применяют четыре разновидности прессов для правки изделий:

- 1) прессы механические винтовые и реечные с усилием прижима 50 кН, для правки перегибом тонкостенных изделий сечением до 10 мм;
- 2) прессы гидравлические с усилием прижима 100...3100 кН, для правки перегибом валов и других длинномерных изделий сечением до 200 мм;
- 3) прессы с плоскими плашками (утюгами), совершающими поступательно-возвратные движения для правки накаткой цилиндрических стержневых изделий (валиков, сверл, прутков и т.п.);
- 4) прессы с нагреваемыми штампами для одновременного отпуска и правки (терморихтовки) прижимом плоских тонкостенных изделий (дисков, пластин и т.п.).

В механических и гидравлических прессах унифицированы усилия прижима, в прессах накатных и терморихтовочных – предельные размеры (диаметр, толщина, длина) рихтуемых изделий, например «ППР-300».

В индексах этих прессов буквы и цифры означают следующее: первая буква П – правильный пресс; вторая буква – род привода: М – механический, Г – гидравлический, Н – накатный, П – пневматический; третья буква у механических прессов обозначает вид механизма: В – винтовой, Р – реечный; у терморихтовочных: Э – электронагревательный. Одна группа цифр, следующая за тире, указывает усилие прижима; две группы цифр, разделённых точкой, указывают предельные размеры обрабатываемых изделий – диаметр (толщину) и длину в мм.

Для правки термически обработанного металлопроката применяют роликоправильные и растяжные машины, штемпельные прессы, а для правки труб – обкатные машины.

Роликоправильные машины состоят из станины и расположенных в них в два ряда по высоте в шахматном порядке приводных (нижний ряд) и холостых (верхний ряд) роликов. Конфигурация поверхности роликов соответствует конфигурации рихтуемого металлопроката. Верхний ряд роликов снабжён винтовым нажимным устройством для перемещения их по вертикали. Наиболее распространены пяти-, семи- и девятивалковые правильные машины с 3 – 5 нижними и 2 – 4 верхними роликами соответственно. В машинах для правки листов ролики размещены между стойками станины из-за значительной ширины листов, а для правки сортовых профилей – консольно, за стойкой станины, что позволяет осуществлять быструю их замену при переходе на правку с одного профиля на другой. Некоторые виды термически упрочнённого металлопроката, например, железнодорожные рельсы, требуют правки в двух взаимно перпендикулярных плоскостях одновременно. В этих случаях применяют правильные многовалковые машины с горизонтально и вертикально расположенными роликами. Правку осуществляют многократными перегибами металлопроката в процессе его движения между роликами. Для принудительных перегибов металлопроката расстояние между касательными к поверхностям верхних и нижних рядов роликов задают несколько меньше толщины рихтуемого металлопроката. Чем больше число пар роликов, тем большему числу перегибов подвергается металлопрокат, тем выше качество правки.

Правильно-растяжные машины состоят из горизонтально расположенной массивной станины, на которой смонтированы две каретки с зажимами для захвата концов рихтуемых изделий. Зажимной захват одной каретки перемещается в горизонтальной плоскости электромеханическим винтовым приводом на значительные расстояния для возможности правки изделий различной длины. Второй захват соединён со штоком гидроцилиндра или винтом электромеханического привода, предназначенных для растяжения зажатого в каретках металлопроката на остаточное удлинение 1...3%. Правильно-растяжные машины выпускают усилиями 5...800 т с максимальным расстоянием между захватами до 20 м.

Штемпельные прессы применяют в основном для местной правки металлопроката, например, для правки концов железнодорожных рельсов с целью точной их стыковки в железнодорожной колее. Искривлённый участок помещают или консольно на одну опору, или между двумя опорами и давлением шпинделя прессы изгибают один или несколько раз до получения нужной остаточной деформации.

Обкатные машины для правки труб конструктивно отличаются от роликоправильных машин «косым» расположением роликов, т.е. под углом к продольной оси машины. Косо расположенные ролики сообщают трубе поступательно-вращательное движение и обеспечивают правку труб по длине и диаметру.

2.4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОМЫВКИ ИЗДЕЛИЙ

После закалки изделий в масле, эмульсиях, водных растворах полимеров, бишофита, расплавах солей и щёлочи на их поверхности остаётся плёнка перечисленных закалочных сред, а после травления в серной или соляной кислоте – осадок соответственно железного купороса или хлористого железа и плёнка травильного раствора. Кроме того, в процессе производства деталей и металлопроката их поверхность загрязняется твёрдыми частицами различного происхождения, смазочно-охлаждающими жидкостями, маслом и т.п. Поэтому перед закалкой некоторые детали, например, детали подшипников качения, после закалки перед отпуском или перед промежуточным контролем, после отпуска в масле, расплавах солей или щёлочи, после травления изделия подвергают мойке. В качестве моющих сред используют 3...10% водные растворы кальцинированной или каустической соды, горячую и холодную воду. Мойку производят или в баках, или в моечных машинах периодического и непрерывного действия. В зависимости от характера производства, технологии термической обработки и других факторов мойку выполняют или как самостоятельную технологическую операцию, или в составе агрегатов и поточных линий. При мелкосерийном и единичном характере производства мойку осуществляют в баках периодического действия, моющий раствор которых подогревают паром, или в тупиковых моечных машинах периодического действия. Мойку в баках осуществляют методом купания, а в моечных машинах – душированием. В зависимости от вида, габаритов и массы изделий их загружают в баки и машины или непосредственно, или в приспособлениях различных конструкций. Моющую среду в машинах подают струями или только сверху, или сверху и снизу, или с боков, или комбинированно. В зависимости от количества используемых моечных машин они имеют или централизованную, или, чаще, автономную систему питания моющей средой, включающую сливной бак с устройством для подогрева моющей среды, сетчатый фильтр и насос. Для интенсификации процесса и улучшения качества промывки в баках их оснащают магнитострикционными излучателями, излучающими ультразвук в моющую среду с частотой около 20 кГц. Под действием ультразвуковых волн в моющей жидкости возникают сильные гидравлические удары, удаляющие с поверхности жир, грязь, абразивные частицы, окалину. Питание магнитострикционные преобразователи получают от ультразвуковых генераторов.

На заводах крупносерийного и массового машиностроения применяют моечные машины непрерывного действия различных конструкций: конвейерные, рольганговые, толкательные, барабанные, с опускающимся столом и др. Наиболее распространены конвейерные моечные машины, состоящие из сливного бака, расположенного над ним горизонтально или наклонно пластинчатого или сетчатого конвейера, водонепроницаемой

камеры с вытяжными колпаками над входом и выходом, бачка с фильтром, насоса и системы струйных трубок, расположенных или только над конвейером, или в два ряда над и под верхней ветвью конвейера. Подогретый до 80...90 °С в фильтровальной бачке моющий раствор насосом подаётся в струйные трубки, из которых тонкими струями обильно поливает медленно движущиеся на конвейере изделия и смывает с них загрязнения. Мелкие детали промывают в корзинах. Использованный раствор стекает в сливной бак, из которого поступает в бачок, где подогревается паровым змеевиком или другими устройствами и через сетчатый фильтр вновь подаётся насосом на изделия. В зависимости от длины машины и скорости конвейера промывка длится 4...8 мин. Серийно выпускаемые машины имеют длину 2...4 м, ширину 0,4...1,2 м, скорость конвейера 0,5...1 м/мин. Аналогично устроены моечные машины непрерывного действия и с другими транспортёрами.

Индексируются моечные баки и машины аналогично закалочным бакам периодического и непрерывного действия, например «БКМ – 10.25».

Первые буквы в индексе означают: Б – бак закалочный, М – моечная машина, Х – холодильник (камера охлаждения). Вторые буквы описывают конструкцию: Б – барабанная, К – конвейерная, Р – рольганговая, Т – толкательная. Третья буква указывает на используемую атмосферу или жидкость: В – вакуум; Д – газонаполненная; З – защитная атмосфера; М – масло; С – соль, селитра; Щ – щёлочь; О – окислительная атмосфера; П – пар водяной; В – вода. В обозначении баков используется четвёртая буква: Г – горячая среда. Цифровая часть индекса бака обозначает габаритные размеры в дециметрах, а в моечных машинах – размеры транспортёра в дециметрах.

3. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦЕХОВ

Вспомогательное оборудование – это оборудование, не участвующее непосредственно в изготовлении готовой продукции, но выполняющее работы по обслуживанию нужд основного производства предприятия.

Вспомогательное оборудование делится на оборудование для получения контролируемой атмосферы, средства механизации (подъемно-транспортное оборудование), вентиляторы и воздуходувки, маслоохладительные установки.

3.1. МАСЛООХЛАДИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Для охлаждения закалочной жидкости в немеханизированных закалочных баках применяют змеевики с холодной проточной водой, баки с двойными стенками и с мешалками и т.д.

В случае необходимости более быстрого охлаждения при большом количестве закалочных баков целесообразно применять маслоохладители. В промышленности применяют маслоохладители двух типов: барабанного (колончатого) и так называемого «труба в трубе». Маслоохладитель типа «труба в трубе» представляет собой двойной змеевик с расположением труб одной в другой. По внутренней трубе пропускается охлаждающая вода, а по наружной – охлаждаемое масло. Вода и масло двигаются в противоположных направлениях.

Наиболее распространенной конструкцией маслоохладителей (холодильников) являются цилиндрические барабаны (колонки) с двойными днищами и с продольными или поперечными перегородками (рис. 3.1). Вдоль барабанов в отверстия внутренних днищ вставлены латунные или медные тонкостенные трубки диаметром 10...15 мм для масла и стальные для раствора каустической соды. В этих маслоохладителях холодная вода и горячее масло циркулируют также по принципу проти-

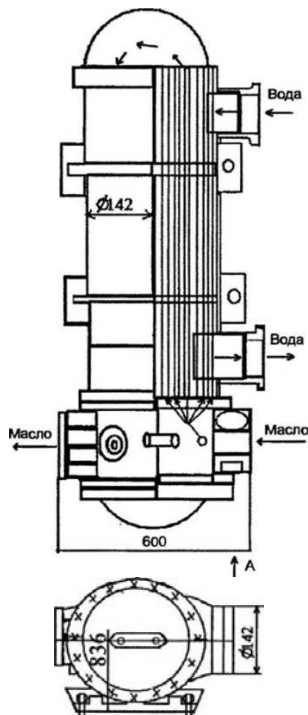


Рис. 3.1. Двухсекционный колончатый маслоохладитель

вотока, причём вода направляется прямолинейно внутрь трубок, а масло движется криволинейно, обходя поперечные перегородки между трубками с водой. Концы латунных трубок развальцованы в отверстиях днищ, и для чистки коллектор трубок с внутренними днищами может быть выдвинут из корпуса маслоохладителя после съёма одной из крайних коробок (головок).

Коллекторы маслоохладителей чистят при их загрязнении. Загрязнение коллекторов маслоохладителей ухудшает теплообмен между горячим маслом и трубами, охлаждаемыми водой, поэтому коллекторы маслоохладителей при загрязнении чистят. Для этого головку маслоохладителя снимают, коллектор вынимают и промывают в жидкостях типа толуола. Так как толуол является взрывоопасной жидкостью, промывку ведут за пределами цеха, на значительном расстоянии от заводских сооружений. Менее эффективными средствами для очистки коллектора являются острый пар, воздух давлением 5...6 атм или раствор каустической соды. Существует несколько типов колончато-трубчатых охладителей, имеющих индекс ТЛВ: ТЛВ-8, ТЛВ-15, ТЛВ-21, ТЛВ-37 и ТЛВ-65 (Т – теплообменник, Л – колончатый, В – вертикальный, цифра – поверхность охлаждения в квадратных метрах). Рабочее давление масла и воды 330 кПа. Наибольшая допустимая температура для воды 20 °С и для масла 55 °С, Маслоохладители дают перепад температур 10...15 °С, т.е. если подаётся горячее масло с температурой 60 °С, то после прохождения через маслоохладитель масло будет иметь 45...50 °С. Для облегчения чистки коллекторов маслоохладителей на некоторых заводах масло пропускают по трубкам, а воду – по межтрубному пространству. При таком способе прямолинейные трубки загрязняются только изнутри и их легче очистить, чем всю наружную поверхность плотно установленных трубок коллектора. В этом случае масло охлаждается хуже и перепад температур между горячим и охлаждённым маслом меньше, так как коэффициент теплопередачи масла к стенке трубы меньше, чем коэффициент теплопередачи воды. При охлаждении в холодильнике раствора каустической соды перепад температур равен также 10...15 °С.

Для маслоохлаждения можно также использовать пластинчатые теплообменники. Эти теплообменники изготавливают разборными на консольной раме или на двух опорах. Пластины толщиной 1...1,2 мм и размером 1370×500 или 960×315 мм изготавливают двух видов со штампованными гофрами «в ёлку» и горизонтальными гофрами. Материалом пластин может быть сталь 08КП или нержавеющая, а также железо, алюминий, медь и латунь. Пластины собирают, между ними по периметру и вокруг отверстий укладывают резиновую прокладку, после чего они стягиваются в пакет. По образованному между пластинами щелевидному каналу движется противотоком из соответствующих коллекторов жидкости. По одну сторону пластины находится горячее масло, а по другую – вода или дру-

гой охладитель. Гофрированная форма пластин способствует усиленной турбулизации жидкости. Это обеспечивает высокий коэффициент теплопередачи при сравнительно малом гидравлическом сопротивлении. Пластинчатые теплообменники требуют меньшей площади, легко и быстро разбираются для чистки. Поверхность теплообменников составляет от 3 до 160 м.

В централизованную маслоохладительную систему кроме маслоохладителя входят сборная цистерна для масла, фильтры, насосы и трубопроводы. Размеры сборной цистерны подбираются таким образом, чтобы во время работы установки после заполнения всей системы (закалочные баки и трубопроводы) в цистерне находилось масло, занимающее 30% её объёма. Цистерна должна иметь объём, обеспечивающий аварийный спуск в неё всего масла из системы (например, в случае пожара). Объём сливной цистерны должен быть больше объёма масла в системе на 30...40%. Обычно для удобства работы маслоохладительной установки сборную цистерну разделяют на два-три отсека, из которых в работе находится один отсек, а другие – на чистке. Путём переключения вентилей масло может быть направлено из одного отсека в другой или сразу поступать в два-три отсека. Сборную цистерну помещают в подвале под цехом или углубляют в землю вблизи цеха. Грязь и окалина из отсеков сборной цистерны периодически удаляют при чистке.

3.2. КОНТРОЛИРУЕМЫЕ АТМОСФЕРЫ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

Контролируемые атмосферыготавливаются в специальных установках и представляют собой смеси из газов. Установки для их получения бывают разных видов, каждая из которых подходит для определённой группы. Существует несколько групп контролируемых атмосфер: аммиачная, древесноугольная, экзотермическая, эндотермическая и др.

Контролируемые атмосферы подразделяют на следующие типы:

ДА – атмосфера, полученная из аммиака посредством его диссоциации;

ДА-С – атмосфера, полученная из аммиака посредством его диссоциации, частичного сжигания продуктов диссоциации и их осушкой;

ЭН – атмосфера, полученная путём сжигания природного (углеводородного) газа при коэффициенте расхода воздуха, равном 0,25...0,33;

ЭЖ – атмосфера, полученная при сжигании природного (углеводородного) газа при коэффициенте расхода воздуха, равном 0,6...0,95;

ВО – атмосфера, полученная из технического водорода;

АЗ – атмосфера, полученная из технического азота.

Условное обозначение газоприготовительной установки состоит из букв и цифр. Первые две буквы обозначают назначение (получаемую

атмосферу): ЭН – эндогаз, ЭК – экзогаз, ДА – диссоциированный аммиак, ВО – очистка водорода от кислорода, АЗ – очистка азота, ИО – очистка инертных газов.

После букв через тире даются цифры, показывающие производительность ($\text{м}^3/\text{ч}$). Буква после цифр показывает особенности: Г – газовый обогрев; О – очистка от двуокси углерода и глубокая степень осушки; С – частичное сжигание и осушка.

Для получения контролируемой атмосферы типа ДА системы $\text{H}_2\text{-N}_2$ проводят расщепление аммиака (NH_3) на азот и водород. Аммиак поступает в баллонах или при больших расходах контролируемой атмосферы в цистернах.

Схема установки для диссоциации аммиака показана на рис. 3.2. Из баллонов 1 жидкий аммиак через уровнемер 2 поступает в испаритель 3. Предохранительный клапан 4 предохраняет испаритель от чрезмерного давления. Необходимую теплоту для испарения аммиака в испаритель отдаёт при пуске установки электрический нагреватель 9 и во время работы установки теплообменник 5.

Газообразный аммиак из испарителя поступает в диссоциатор 7 с электрическим нагревом. Проходя через реторту 6 диссоциатора, аммиак нагревается до температуры, превышающей 600°C , и распадается на водород и азот. Реторта заполнена катализатором, ускоряющим протекание реакции диссоциации аммиака. Точка росы газа, выходящего из охладителя 5, находится в интервале температур $-40\dots-50^\circ\text{C}$.

Наиболее широкое распространение в машиностроении нашёл метод получения защитных атмосфер из природного газа. Природный газ состоит в основном из метана. При горении метана с недостатком воздуха образуются продукты неполного его горения, в состав которых входят водород и окись углерода.

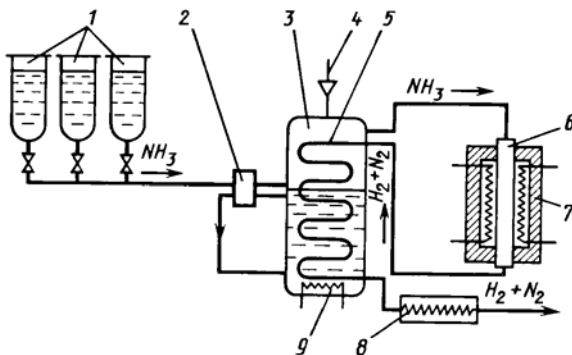


Рис. 3.2. Схема установки для получения контролируемой атмосферы из аммиака

Чем больше недостаток воздуха, т.е. чем меньше коэффициент расхода воздуха, тем больше в продуктах неполного горения метана будет водорода и окиси углерода.

Различают эндотермический и экзотермический методы получения защитных газов (в зависимости от протекающих химических реакций). Соответственно, для получения защитных атмосфер используются разные типы установок (рис. 3.3 – 3.5).

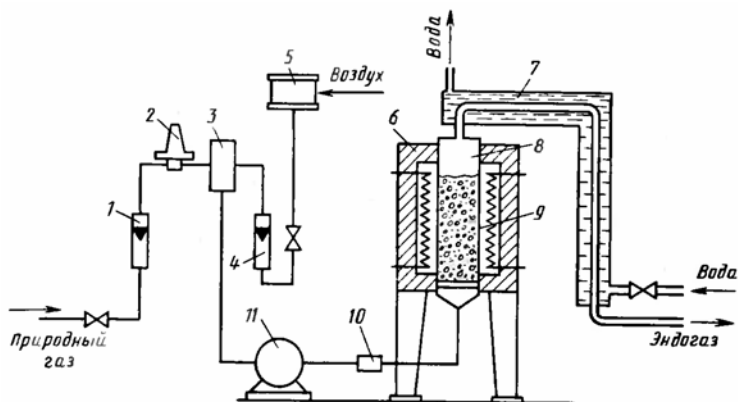


Рис. 3.3. Схема эндогазовой установки:

- 1 – расходомер; 2 – регулятор нулевого давления; 3 – смеситель; 4 – расходомер;
 5 – фильтр; 6 – генератор; 7 – холодильник; 8 – реторта; 9 – катализатор;
 10 – пламегасительный клапан; 11 – компрессор

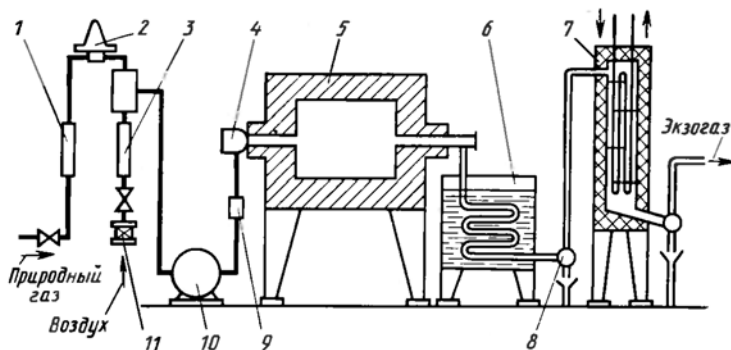


Рис. 3.4. Схема экзогазовой установки для получения богатого экзогаза:

- 1 – расходомер; 2 – регулятор давления; 3 – расходомер; 4 – горелка;
 5 – камера сгорания; 6 – охладитель; 7 – установка доохлаждения;
 8 – конденсатоотводчик; 9 – пламегаситель; 10 – компрессор; 11 – фильтр

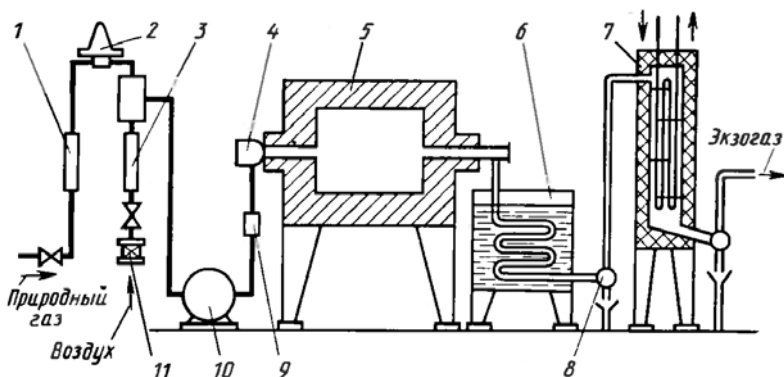


Рис. 3.5. Схема экзогазовой установки для получения бедного экзогаза:

- 1, 2 – расходомеры; 3 – регулятор давления; 4 – смеситель; 5 – горелка;
 6 – камера сгорания; 7 – блок тонкой очистки; 8 – конденсатоотводчик;
 9 – холодильник; 10 – газодувка; 11 – фильтр

При цементации используют атмосферы, приготовленные смешением газа-носителя с углеводородным газом. В качестве газа-носителя преимущественно используется эндогаз, а в качестве добавок к нему – природный газ, пропан или бутан.

Газ-носитель разбавляет углеводороды, уменьшая скорость их термической диссоциации в печи. Чем выше содержание в газе-носителе водорода, тем меньше степень диссоциации метана, тем меньше выделяется сажи в печи и тем стабильнее идёт процесс цементации.

На рисунке 3.6 показана схема автоматического регулирования углеродного потенциала атмосферы в камерной печи. По трубе 4 в рабочее пространство печи 5 подаётся смесь эндогаза и природного газа. Расход эндогаза контролируется по расходомеру 7, а природного газа – по расходомеру 8. Расход эндогаза устанавливают вручную краном 6 в соответствии с характеристикой печи. Расход природного газа регулируется автоматически клапаном 9, получающим команду от газоанализатора 1, который определяет содержание CO_a или точку росы в атмосфере печи. Отбор атмосферы из печи на анализ осуществляется по трубопроводу 3. Из газоанализатора атмосфера выходит через свечу 2, воспламеняется и сгорает. В пульте управления 10 кроме газоанализатора обычно размещают и приборы для регулирования температуры в печи.

Атмосферы для нитроцементации готовят, как правило, смешением эндогаза, природного газа и аммиака. Эндогаз выполняет роль газа-носителя. Природный газ необходим как источник углерода, а аммиак как источник азота.

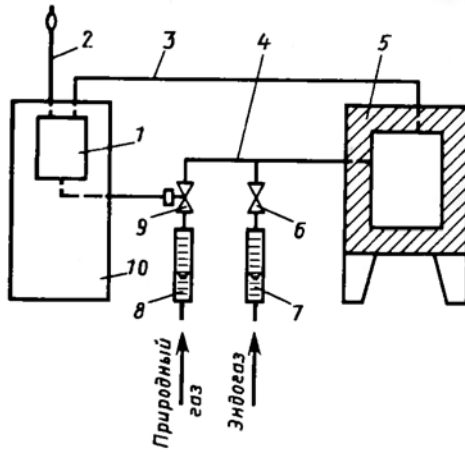


Рис. 3.6. Схема автоматического регулирования углеродного потенциала в печи

Общий расход нитроцементационной атмосферы и количество в ней природного газа и аммиака зависят от типа печи, интенсивности циркуляции атмосферы в печи, суммарной поверхности деталей и т.д.

Контроль состава атмосферы в печи при нитроцементации проводится аналогично регулированию атмосферы в цементационной печи.

На рисунке 3.7 показана схема установки регулирования углеродного потенциала атмосферы печи с помощью кислородного зонда.

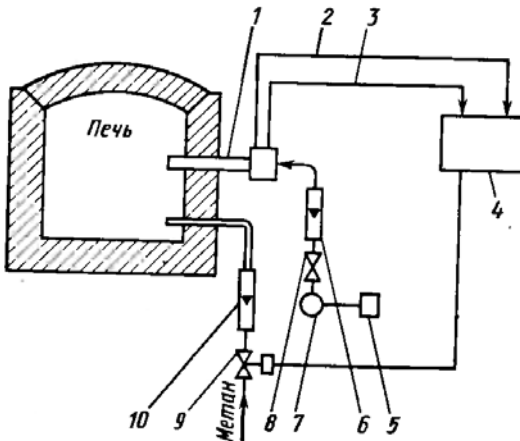


Рис. 3.7. Схема установки регулирования атмосферы печи

Кислородный зонд 1 соединён с регулирующим прибором 4 проводами 2, 3, по которым передаётся величина парциального давления кислорода в атмосфере печи и фактическая температура в печи. Воздух из цеха во внутреннее пространство кислородного зонда подаётся через фильтр 5 насосом 7. Расход воздуха регулируется краном 8 и контролируется по расходомеру 6.

При температуре 930 °С значение углеродного потенциала 0,7% С соответствует значению электродвижущей силы на электродах кислородного зонда около 1,13 В, а 1,3% С – около 1,155 В.

3.3. ПОДЪЁМНО-ТРАНСПОРТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦЕХОВ

В термических цехах широко применяют различные подъёмнотранспортные средства. Для загрузки и разгрузки шахтных печей газовой цементации и для отпуска применяют монорельсы с ручными или электрическими таями и электротельфрами, а также поворотные консольные краны. В кузнечных, штамповых, ремонтных и чистовых термических цехах при обработке крупных деталей применяют ручные и электрические мостовые краны. Для передачи поддонов от разгрузочного конца печи к загрузочному применяют роликовые конвейеры или рольганги. Для подъёма стола механизированных закалочных баков используют пневматические подъёмники. Передача деталей с одной операции на другую часто производится с помощью цепных конвейеров. В термических цехах находят также использование подъёмники, элеваторы, шнековые устройства и другое оборудование. В настоящее время получили применение наряду с широко распространённым электромеханическим приводом гидравлический, пневматический и электромагнитный.

Гидравлический привод удобно использовать при небольших скоростях движения. С помощью гидравлического привода можно легко менять скорость и нагрузки. Преимущество гидравлического привода перед электромеханическим заключается в том, что он может применяться во взрывоопасной среде, а также во влажной среде и при повышенных температурах.

Конструкция гидроприводов отличается простотой. Их использование в печах и агрегатах для термической обработки особенно экономично, когда от одной насосной установки действуют несколько гидравлических механизмов.

Пневматический привод не имеет такого плавного хода, как гидравлический. Перемещение поршня в цилиндре происходит с непостоянной

скоростью. Этот привод используют при малых нагрузках и небольших ходах, чаще для перемещения на заданном расстоянии в определённый промежуток времени. К механизмам пневматического привода относятся механизмы подъёма и опускания дверец печей, крышек шахтных печей, опускания и подъём стола механизированного закалочного бака и др. Этот привод также может быть использован во взрывоопасной среде. Устройство механизмов пневматического привода простое, они удобны в эксплуатации.

Электромагнитный привод используют в том случае, когда требуется быстрое тяговое усилие без постоянной скорости перемещения ведомого органа, главным образом для прямолинейного перемещения элементов управления. Эти устройства рекомендуется использовать в вибрационных дозирующих устройствах конвейерных агрегатов для светлой заправки, для печей с пульсирующим подом и др.

Достоинством электромагнитных приводов является возможность большого количества включений и отключений в единицу времени при продолжительной работе механизма.

4. ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Основная задача автоматизации производства – повысить производительность и улучшить условия труда, увеличить количество получаемой продукции и высвободить работников от тяжёлого физического труда, снизить себестоимость продукции.

Слово «автомат» произошло от древнегреческого термина *automatos* (*autos* – сам, *matos* – действие, усилие), под которым понимается самодействующий аппарат.

Первые дошедшие до нас сведения об автоматических устройствах относятся к началу нашей эры и связаны с именем Герона Александрийского, который описал механические и пневматические автоматы. Одним из первых в истории техники автоматического регулирования был регулятор Ползунова (1765) к его паровой машине для поддержания уровня воды в котле. В XIX–XX веках, в связи с потребностью промышленности, появляется много различных конструкций регуляторов, сначала механических, а затем электрических, электронных и др. Широкое внедрение средств автоматики в производство началось после первой мировой войны и продолжается до настоящего времени.

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ И ЭЛЕМЕНТАХ АВТОМАТИКИ

В соответствии с общими принципами управления технологическими процессами автоматическое управление осуществляется на основе информации при использовании комплекса технических средств автоматики и телемеханики. Автоматизацию производства осуществляют при помощи различных средств автоматики, которые состоят из большого числа отдельных элементов.

Автоматика – отрасль науки и техники, охватывающая теорию и принципы построения систем автоматического управления (САУ) производственными процессами.

Как наука автоматика возникла во второй половине XVIII века. Наибольших успехов она достигла во второй половине XX века, когда наряду со средствами автоматики стали использоваться и средства телемеханики.

Телемеханика (от греч. *tele* – далеко) – отрасль науки и техники, охватывающая теорию, способы и технические средства автоматической передачи на расстояние команд управления и информации о состоянии объекта управления.

Для того чтобы машина могла выполнять необходимые операции в технологическом процессе, её нужно управлять.

Если управление осуществляется человеком, оно называется *ручным*, если техническим средством – *автоматическим*.

Автоматическое управление – это осуществление совокупности воздействий, выбранных из множества возможных (на основании определённой информации) и направленных на поддержание или улучшение функционирования объекта управления (ОУ) в соответствии с целью его управления. Оно охватывает вопросы адаптации, самонастройки, формирования оптимальных управляющих воздействий, автоматического выбора наилучших режимов и т.д.

Автоматическое регулирование – поддержание постоянной или изменение по заданному закону некоторой выходной величины, характеризующей процесс.

Автоматический контроль – измерение различных величин в объекте и соотнесение их с ожидаемыми результатами.

Измерение – совокупность операций, выполняемых для определения значения величины.

По операциям, производимым с информационными сигналами в автоматических устройствах, можно выделить функциональные элементы.

Элемент – простейшее в функциональном отношении устройство (схема), предназначенное для выполнения одной из следующих операций:

- 1) преобразование контролируемого параметра в сигнал, однозначный с информацией об этом параметре;
- 2) преобразование сигнала одного рода энергии в сигнал другого рода энергии (электрической в неэлектрическую и т.п.);
- 3) преобразование сигнала по виду (аналого-цифровые, цифро-аналоговые);
- 4) преобразование сигнала по величине энергии;
- 5) преобразование сигнала по форме, т.е. сигнала постоянного тока в сигнал переменного тока и наоборот (модуляторы, демодуляторы);
- 6) функциональное преобразование сигналов;
- 7) сравнение сигналов и создание командно-управляющего сигнала;
- 8) выполнение логических операций с сигналами;
- 9) распределение сигналов по различным цепям;
- 10) хранение сигналов;
- 11) создание программных сигналов;
- 12) использование сигналов для воздействия на объект управления.

При соединении нескольких элементов получают основные функциональные автоматические устройства управления, которые в определённых сочетаниях образуют САУ.

На рисунке 4.1 представлена общая схема построения САУ, включающая следующие основные узлы и блоки:

ЗЭ – задающий элемент (формирует заданное воздействие $g(t)$ определяющее необходимое значение управляемой величины $y(t)$);

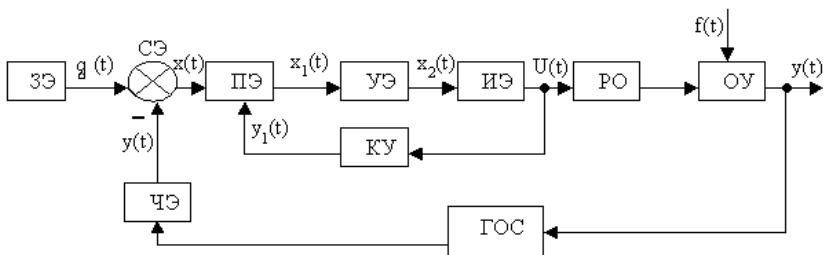


Рис. 4.1. Структурная схема системы автоматического управления

СЭ – сравнивающий элемент (формирует разность сигналов $x(t) = g(t) - y(t)$);

ПЭ – преобразующий элемент (служит для преобразования сигналов в удобный для дальнейшего использования вид);

УЭ – усилительный элемент (усиливает сигнал рассогласования $x(t)$ до величины, достаточной для приведения в действие исполнительного элемента);

РО – регулирующий орган;

ЧЭ – чувствительный (измерительный) элемент;

ИЭ – исполнительный элемент – вырабатывает и подаёт на регулирующий орган объекта управления управляющее воздействие $U(t)$;

ОУ – объект управления – это различные технические средства, энергетические и силовые установки, транспортные средства, отдельные механизмы этих устройств и т.д.;

КУ – корректирующий элемент или местная обратная связь – это специальные устройства, вводимые в систему для улучшения качества управления;

ГОС – главная обратная связь – осуществляет связь между выходом и входом системы, образуя замкнутый контур управления.

Необходимым условием функционирования любой системы автоматического регулирования или управления является наличие в их структуре отрицательной обратной связи. Обратной связью называют процесс передачи воздействия от одного из последующих элементов САУ на какой-либо предыдущий элемент направленного действия.

Понятие обратной связи широко используется не только в науке об управлении и в технике, но также и при объяснении многих общественных, биологических и других явлений.

По тому, как сказывается действие обратной связи на САУ, различают *отрицательную* и *положительную* обратные связи. Отрицательная обратная связь уменьшает, а положительная увеличивает выходной сигнал.

Обратная связь, образуемая регулятором по отношению к управляемому объекту, называется *главной*.

Обратные связи, которые могут быть в самом регуляторе, называются *местными*.

По степени автоматизации производственных процессов различают:

1) частичную (не освобождает человека от участия в производственном процессе);

2) комплексную (автоматическое выполнение всего комплекса операций по обработке материалов и их транспортировке. Функции человека сводятся к наблюдению за ходом процесса, его анализу и изменению режима работы устройств);

3) полную (все функции выполняются автоматически, за обслуживающим персоналом остаются функции периодического осмотра, профилактического ремонта).

В зависимости от степени автоматизации отдельных машин и агрегатов, а также их линий в машиностроительных производствах применяют автоматы, автоматические линии и автоматические цеха [7].

Автоматом называют рабочую машину, которая в ходе технологического процесса самостоятельно производит все рабочие и холостые ходы рабочего цикла и нуждается лишь в контроле и наладке.

Полуавтоматом называют машину, работающую с автоматическим циклом, для повторения которого требуется вмешательство рабочего.

Автоматической линией называют автоматически действующую систему машин, расположенных в технологической последовательности и объединенных общими средствами транспортировки, управления, накопления заделов, удаления отходов и др.

Автоматическим цехом называют цех, в котором основные производственные процессы осуществляются на автоматических линиях.

Создание и внедрение автоматических цехов создаёт предпосылки перехода к высшей форме организации производства – автоматическому заводу с комплексной автоматизацией всех производственных процессов выпуска самой сложной машиностроительной продукции.

4.2. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

К настоящему времени создано большое количество САУ различными процессами, отличающихся видом используемой энергии, элементной базой, качеством управления и т.д. Все САУ могут быть классифицированы в соответствии с рядом общих для них признаков.

1. По алгоритму функционирования:

1) стабилизирующие (алгоритм функционирования содержит предписание поддерживать управляемую величину постоянной);

2) программные (алгоритм функционирования содержит предписание изменять управляемую величину в соответствии с заранее заданной функцией);

3) следящие (целью алгоритма функционирования является изменение управляемой величины в зависимости от изменения заранее неизвестной переменной величины на входе);

4) адаптивные (самоприспосабливающиеся) – действуют не только в соответствии с заданным алгоритмом функционирования, но и могут в зависимости от конкретных условий самостоятельно изменять свою работу с целью достижения оптимального режима.

2. По принципу управления:

1) принцип управления по отклонению (принцип Ползунова, 1765). Регулятор, действующий по этому принципу, измеряет отклонение управляемой величины от заданного значения и через исполнительный блок воздействует на объект управления (рис. 4.2, *a*);

2) принцип управления по возмущению – принцип Понселе (Жан-Виктор Понселе – французский инженер, 1830).

Управление осуществляется по значению возникшего возмущающего воздействия. Например, при регулировании уровня жидкости (рис. 4.2, *б*), при незапланированном изменении расхода жидкости Q_1 сигнал с измерителя расхода (ИР) поступает на исполнительное устройство (ИУ), которое устанавливает требуемую величину расхода.

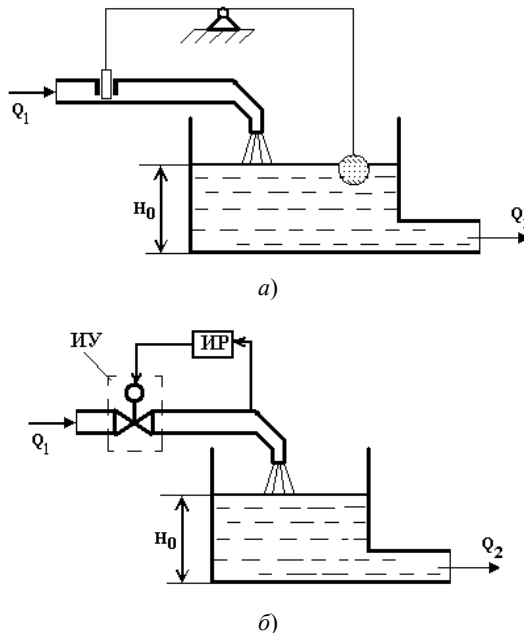


Рис. 4.2. Реализация принципов управления по отклонению (*a*) и управления по возмущению (*б*)

Цепь воздействия по возмущению обычно используется как дополнительная связь в системах управления по отклонению. Такие системы называют комбинированными;

3) комбинированные системы автоматического управления.

3. По характеру управления во времени:

1) система непрерывного управления характеризуется тем, что в процессе управления сигнал «у» на её выходе является непрерывной функцией времени и пропорционален воздействующей величине «х» на входе;

2) система импульсного управления характеризуется тем, что в процессе регулирования выходная величина «у» представляет собой последовательность импульсов, параметры которых (амплитуда, период) определённым образом связаны с входной величиной «х»;

3) система позиционного (релейного) управления характеризуется тем, что в процессе управления сигнал на её выходе принимает несколько определённых значений в зависимости от входной величины.

4. По принципу действия:

1) регулятор прямого действия – регулятор, у которого отдельные органы (исполнительный и регулирующий) питаются энергией, получаемой от датчика или непосредственно от управляемой среды. Такие регуляторы, благодаря простой конструкции, малой стоимости и высокой надёжности, широко используются в промышленности;

2) регулятор непрямого (косвенного) действия – регулятор, у которого отдельные органы получают питание от дополнительных источников энергии.

По виду энергии такие регуляторы разделяются на электрические, механические, гидравлические, пневматические и комбинированные, и характеризуются высокой точностью работы, более гибки в настройке и в управлении различными режимами.

5. По закону управления:

1) непрерывные САУ, в которых реализован

– П (пропорциональный) закон регулирования

$y = k_{\text{п}}(x - x_3)$, $k_{\text{п}}$ – коэффициент передачи; x_3 – заданное значение;

– И (интегральный) закон регулирования

$y = \frac{k_{\text{п}}}{T_{\text{И}}} \int_0^t (x - x_3) dt$, $T_{\text{И}}$ – постоянная интегрирования;

– Д (дифференциальный) закон регулирования

$y = k_{\text{п}} T_{\text{Д}} \frac{d(x - x_3)}{dt}$, $T_{\text{Д}}$ – постоянная дифференцирования;

– ПИ (пропорционально-интегральный) закон регулирования

$y = k_{\text{п}} \left(\varepsilon + \frac{1}{T_{\text{И}}} \int_0^t \varepsilon dt \right)$, где $\varepsilon = x - x_3$;

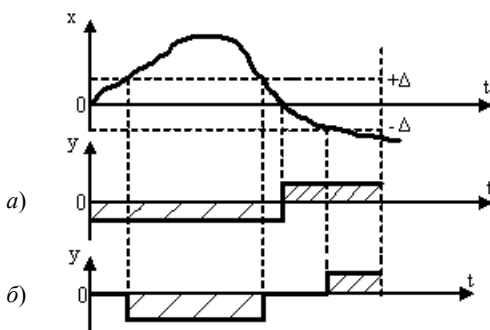


Рис. 4.3. Временные диаграммы позиционного управления:
а – двухпозиционное; *б* – трёхпозиционное

– ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный) закон регулирования

$$y = k_{\text{П}} \left(\varepsilon + \frac{1}{T_{\text{И}}} \int_0^t \varepsilon dt + T_{\text{Д}} \frac{d\varepsilon}{dt} \right), T_{\text{И}}, T_{\text{Д}} - \text{постоянные времени интегрирования и дифференцирования};$$

2) релейные САУ, к которым относятся позиционные регуляторы

(рис. 4.3), реализующие законы:

$$\begin{aligned} - \text{двухпозиционный } y &= \begin{cases} 1, & \text{при } x > x_3, \\ 0, & \text{при } x < x_3; \end{cases} \\ - \text{трёхпозиционный } y &= \begin{cases} -1, & \text{при } x > +\Delta, \\ 0, & \text{при } -\Delta \leq x \leq +\Delta, \\ 1, & \text{при } x < -\Delta. \end{cases} \end{aligned}$$

4.3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Теория автоматического управления (ТАУ) – наука, которая изучает процессы управления, методы их исследования и основы проектирования автоматических систем в любой отрасли техники.

К задачам ТАУ относятся:

1) изучение динамических свойств и характеристик различных типов звеньев;

2) формирование функциональных и структурных схем автоматического управления и регулирования;

3) построение динамических характеристик систем автоматического управления и регулирования;

- 4) определение ошибок и показателей точности САУ;
- 5) оценка качественных показателей процессов управления и регулирования;
- 6) изучение различных корректирующих устройств для повышения точности САУ;
- 7) исследование устойчивости САУ;
- 8) разработка методов анализа и синтеза различных САУ.

Математическое описание элементов и систем автоматики в статическом режиме представляет собой зависимость вида $y = f(x)$, где x , y – входной и выходной сигналы звена или системы.

В динамическом режиме зависимость выходных величин от входных имеет более сложный вид и записывается в виде дифференциальных уравнений, в которых дифференцирование ведётся по времени t .

Математическую модель элемента автоматики называют *звеном* системы автоматического управления.

Звено, описываемое дифференциальным уравнением не выше второго порядка, называется *элементарным*.

Запишем дифференциальное уравнение второго порядка (уравнение движения):

$$A_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + A_1 \frac{dy(t)}{dt} + A_0 y(t) = B_0 x(t). \quad (1)$$

Для упрощения записи операцию дифференцирования заменяют символом (оператором) $-p$, а операцию интегрирования $-\frac{1}{p}$. Такой подход даёт возможность выполнять над дифференциальным уравнением алгебраические операции. Таким образом, в операторной форме уравнение (1) примет вид

$$A_2 p^2 y(p) + A_1 p y(p) + A_0 y(p) = B_0 x(p).$$

Переход от дифференциальной формы к алгебраической основан на преобразовании Лапласа:

$$x(p) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-pt} dt, \quad x(t) = \frac{1}{j2\pi} \int_{-j\infty}^{+j\infty} x(p) e^{pt} dp,$$

где $x(t)$ – оригинал функции $x(p)$, $x(p)$ – изображение функции $x(t)$.

Переход от функции $x(t)$ к $x(p)$ называется *прямым преобразованием Лапласа*, а от $x(p)$ к $x(t)$ – *обратным преобразованием Лапласа*.

В инженерной практике преобразования выполняют не по формулам, а по специальным таблицам.

Отношение изображения выходной величины к изображению входной называется *передаточной функцией* $W(p)$ звена или системы:

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)}.$$

Для сравнительной оценки динамических свойств звеньев изменение выходной величины обычно рассматривается при строго заданном значении входной величины:

- в виде единичной функции скачка (ступенчатого или импульсного);
- в виде гармонически изменяющихся колебаний.

4.3.1. Типовые воздействия

1. Единичная ступенчатая функция – описывает мгновенное включение или отключение входного сигнала.

При мгновенной подаче входного сигнала (рис. 4.4, а) единичная ступенчатая функция определяется формулой

$$1(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \geq 0, \\ 0, & \text{при } t < 0; \end{cases}$$

при отключении (рис. 4.4, б)

$$1(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \geq 0, \\ 1, & \text{при } t < 0. \end{cases}$$

Реакция звена на единичную ступенчатую функцию называется *переходной функцией* $h(t)$ (рис. 4.4, в).

2. Единичная импульсная функция – предельно короткий импульс на входе, у которого длительность равна 0, амплитуда стремится к бесконечности (рис. 4.5, а):

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & \text{при } t = t_0, \\ 0, & \text{при } t \neq t_0. \end{cases}$$

Основным свойством δ -функции является равенство её площади единице, откуда следует, что

$$\delta(t) = \frac{d1(t)}{dt}.$$

Реакция звена на функцию $\delta(t)$ называется *импульсной переходной функцией* или *весовой функцией* $\omega(t)$ (рис. 4.5, б).

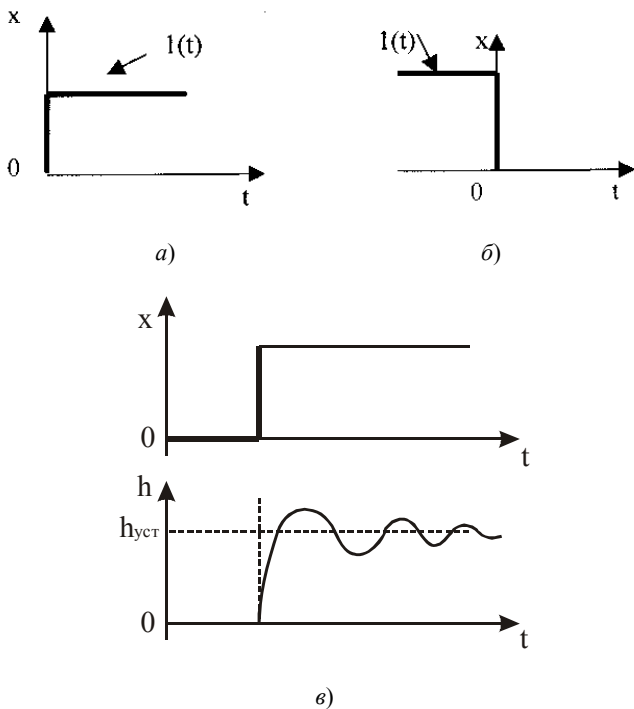
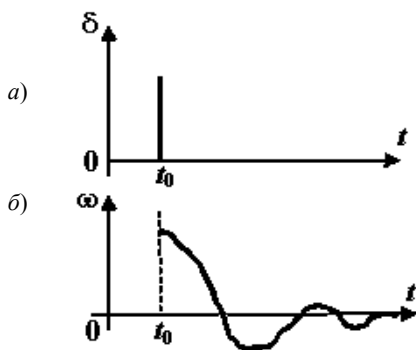


Рис. 4.4. Единичная ступенчатая функция:
a – включение; *б* – отключение и переходная функция (кривая разгона) *в*



**Рис. 4.5. Единичная импульсная функция (δ -функция) (а)
 и импульсная переходная функция (б)**

4.3.2. Частотные характеристики автоматической системы

Частотные характеристики отражают зависимость амплитуды и фазы от частоты синусоидальных колебаний при их прохождении через звено или систему. Пусть на входе звена действует сигнал $x(t) = a \sin \omega t$, тогда на его выходе устанавливаются колебания $y(t) = b \sin(\omega t + \varphi)$, где ω – угловая скорость. Сравнивая параметры колебаний $x(t)$ и $y(t)$, выделяют следующие частотные характеристики:

- 1) амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

$$A(\omega) = \frac{b}{a};$$

- 2) фазочастотная характеристика (ФЧХ)

$$\varphi(\omega) = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}};$$

- 3) амплитудно-фазовая характеристика (АФХ)

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}.$$

4.3.3. Типовые элементарные звенья САУ

При исследовании динамических свойств САУ их составные части заменяют элементарными звеньями.

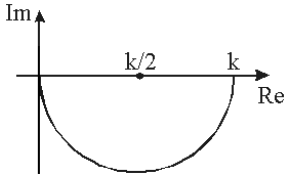
К элементарным звеньям относятся усилительное безынерционное, аperiodические 1 и 2 порядка, колебательное, интегрирующее, дифференцирующее, форсирующее, чистого запаздывания.

В таблице 1 представлены характеристики усилительного безынерционного, аperiodического звена I порядка и звена чистого запаздывания.

1. Характеристики элементарных звеньев

<i>Усилительное безынерционное звено</i>	
Уравнение звена	$y(t) = kx(t), y(p) = kx(p),$ k – коэффициент усиления
Передаточная функция	$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = k$
Переходная характеристика	$h(t) = k$
АЧХ	$A(\omega) = k$
ФЧХ	$\varphi(\omega) = 0$
АФХ	$W(j\omega) = k$

Апериодическое звено I порядка

Уравнение звена	$T \frac{dy}{dt} + y = kx$ T – постоянная времени
Передаточная функция	$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}$
Переходная характеристика	$h(t) = k \cdot 1(t) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$
АЧХ	$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{T^2 \omega^2 + 1}}$
ФЧХ	$\varphi(\omega) = -\arctg T\omega$
АФХ	

Звено чистого запаздывания

Уравнение звена	$y(t) = x(t - \tau)$
Передаточная функция	$W(p) = e^{-p\tau}$
Переходная характеристика	$h(t) = 1(t - \tau)$
АЧХ	$A(\omega) = 1$
ФЧХ	$\varphi(\omega) = -\omega\tau$
АФХ	

4.3.4. Соединение звеньев

Анализ и синтез систем автоматики осуществляется путём их декомпозиции с выделением элементарных звеньев, которые соединены между собой определённым образом. При этом возможно три вида соединения звеньев: последовательное, параллельное и встречно-параллельное.

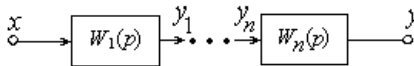
1. Последовательное соединение. Для нахождения передаточной функции последовательного соединения звеньев (рис. 4.6, а) введём промежуточные величины y_n и запишем систему

$$\begin{cases} W_1(p) = \frac{y_1}{x}, \\ W_2(p) = \frac{y_2}{y_1}, \\ \vdots \\ W_n(p) = \frac{y}{y_n}, \\ W(p) = \frac{y}{x}, \end{cases}$$

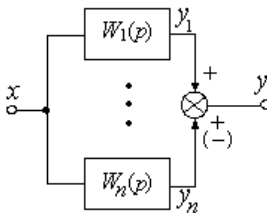
откуда

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p).$$

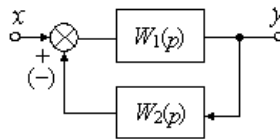
2. Параллельное соединение



а)



б)



в)

Рис. 4.6. Соединение звеньев:

а – последовательное; б – параллельное; в – с обратной связью

Для нахождения передаточной функции параллельного соединения звеньев (рис. 4.6, б) введём промежуточные величины y_n и запишем систему

$$\begin{cases} W_1(p) = \frac{y_1}{x}, \\ W_2(p) = \frac{y_2}{y_1}, \\ \vdots \\ W_n(p) = \frac{y}{y_n}, \\ y = y_1 + (-)y_2 \cdots + (-)y_n \\ W(p) = \frac{y}{x}, \end{cases}$$

откуда $W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p)$. При сложении необходимо учитывать знаки, зависящие от того, на какие входы сумматора (положительные или отрицательные) поступают выходные сигналы звеньев.

3. Соединение с обратной связью (встречно-параллельное) (рис. 4.6, в). Общая передаточная функция такого соединения имеет вид

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p)W_2(p)}.$$

4.3.5. Понятие устойчивости линейных САУ

В процессе функционирования САУ подвергается различного рода возмущающим воздействиям.

Система называется устойчивой (рис. 4.7, а), если после снятия возмущения она возвращается в исходное состояние. Система называется неустойчивой (рис. 4.7, б), если после снятия возмущения она не возвращается в исходное состояние. Система называется нейтральной (рис. 4.7, в), если после снятия возмущения она принимает новое установившееся состояние, отличное от первоначального.

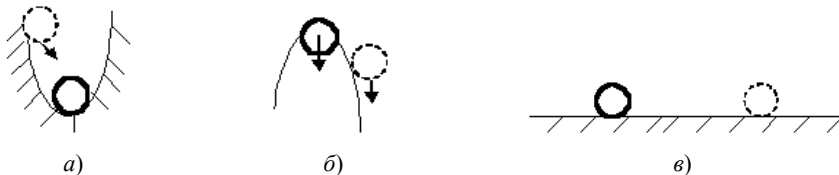


Рис. 4.7. Устойчивость САУ:

а – устойчивая; б – неустойчивая; в – нейтральная

Таким образом, под устойчивостью линейной системы понимают свойство затухания переходного процесса с течением времени.

Любые колебания (к числу которых относится и переходной процесс) представляют собой сумму вынужденных и собственных (свободных) колебаний

$$y(t) = y_{\text{соб}}(t) + y_{\text{вын}}(t).$$

Если $y_{\text{соб}}(t) \rightarrow 0$, при $t \rightarrow \infty$, то система устойчива (так как возмущение снято, то $y_{\text{вын}}(t) = 0$) (рис. 4.8).

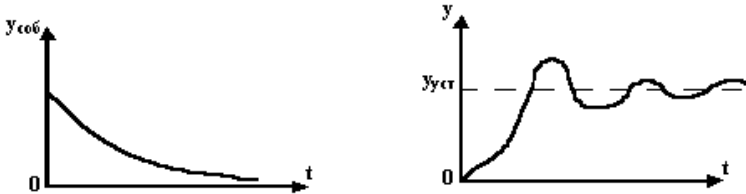


Рис. 4.8. Графики устойчивой системы

Если $y_{\text{соб}}(t) \rightarrow \infty$, при $t \rightarrow \infty$, то переходной процесс будет расходящимся, а система – неустойчива.

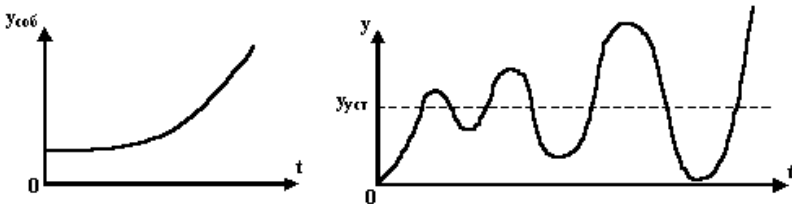


Рис. 4.8. Графики неустойчивой системы

Исследование устойчивости линейных САУ проводят с использованием *алгебраических* и *частотных* критериев устойчивости. Только устойчивая система является работоспособной.

4.3.6. Качество регулирования

Количественные оценки качества, так называемые прямые показатели качества, определяются по кривой переходного процесса (рис. 4.10).

Используются следующие прямые показатели качества:

- 1) величина перерегулирования σ

$$\sigma = \frac{x_{\text{max}} - x_{\text{уст}}}{x_{\text{уст}}} 100\% ,$$

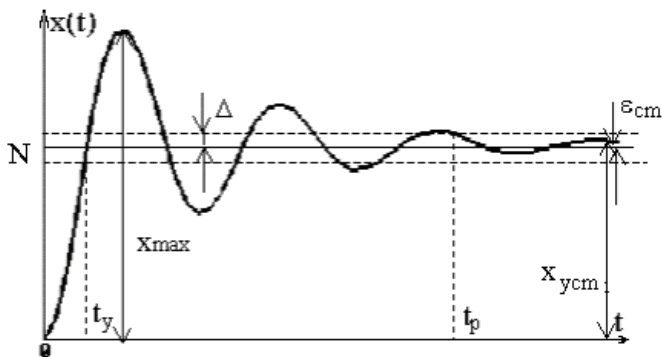


Рис. 4.10. Переходная функция и показатели качества

2) время переходного процесса или время регулирования t_p – наименьшее значение времени, после которого имеет место неравенство

$$|x(t) - x(\infty)| \leq \Delta,$$

где Δ – заданная величина, обычно лежащая в пределах 0,02...0,05;

3) статическая ошибка $\epsilon_{ст}$ – величина отклонения установившегося значения регулируемой величины $x(\infty)$ от требуемого значения N :

$$\epsilon_{ст} = N - x(\infty);$$

4) время установления t_y – промежуток времени, по истечении которого регулируемая величина первый раз достигает установившегося значения.

Для определения качества системы могут использоваться и другие показатели, соответствующие решаемой задаче, например, число колебаний регулируемой величины за время регулирования, частота и период колебаний и т.д.

5. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИКИ

5.1. ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ

Объект управления (ОУ) является основной частью системы автоматического управления. Его свойства влияют на качество управления и выбор типа регулятора.

К наиболее распространённым ОУ в литейных и термических цехах относятся тепловые устройства (плавильные, нагревательные и сушильные печи), в которых требуется регулировать температуру, расход воздуха, топлива или электроэнергии; установки по приготовлению формовых и стержневых смесей; установки для получения контролируемых атмосфер, где необходимо регулировать одновременно температуру, влажность, состав газовой фазы и т.д.

К основным параметрам, определяющим свойства ОУ, относятся: нагрузка, ёмкость, самовыравнивание, инерционность и запаздывание, время разгона и постоянная времени объекта [8].

Любой ОУ характеризуется *нагрузкой*, т.е. количеством энергии или вещества, которое расходуется в этом объекте для проведения заданного технологического процесса, например, количеством топлива, подаваемого к горелкам печей, количеством электроэнергии, подводимой к электродам дуговых плавильных печей и т.п. Нагрузка характеризует производительность или пропускную способность объекта при установившемся состоянии контролируемого процесса. Значительные колебания нагрузки вызывают изменения регулируемой величины. Однако для процесса регулирования имеет значение не абсолютное значение нагрузки, а диапазон и характер её изменения во времени. Чем медленнее изменяется нагрузка и чем меньше её диапазон, тем легче регулировать объект, и наоборот.

Ёмкостью ОУ называют запас накопленной энергии или вещества. Так, например, при регулировании температуры плавильной печи её ёмкость по отношению к регулируемой величине (температуре) будет характеризоваться количеством тепла, накопленном в кладке, в жидком металле и в газах, заполняющих рабочее пространство печи. Ёмкость объекта зависит от его размеров. Например, при регулировании уровня жидкости в закалочном баке, ёмкость объекта зависит от объёма бака – чем больше объём, тем медленнее будет изменяться уровень при нарушении баланса между притоком и оттоком жидкости. В ОУ с большей ёмкостью регулируемая величина при возмущении медленнее изменяет своё значение, и регулирование протекает более устойчиво.

Различают безёмкостные, одноёмкостные и многоёмкостные объекты. К безёмкостным ОУ относят объекты с очень малой вместимостью

(например, небольшие трубопроводы). Одноёмкостные объекты – объекты, у которых нарушение равновесия между подачей и потреблением вызывает одновременные и одинаковые изменения регулируемой величины во всех точках ёмкости. Многоёмкостные объекты – объекты, в которых имеются две или более ёмкостей, разделённых между собой термическими, гидравлическими или электрическими сопротивлениями. Примером двухёмкостного объекта может служить термическая печь, у которой одна ёмкость – рабочее пространство – отделена от второй (где находятся нагревательные элементы) термическим сопротивлением (металлическим муфелем). Другим примером такого объекта является тигельная плавильная печь.

Самовыравнивание. Большинство ОУ в литейных и термических цехах обладает свойством самовыравнивания: при внешних возмущениях самостоятельно (без участия регулятора) входит в новый статический режим работы. В объектах с самовыравниванием возникшее несоответствие между приходом и расходом энергии (вещества) стремится к нулю, а регулируемая величина – к новому установившемуся значению. Например, если к нагревательным элементам электрической печи будет подводится меньшее напряжение, то температура в ней будет понижаться и стремиться к новому установившемуся значению.

Объекты, обладающие свойством самовыравнивания, называются *статическими объектами*.

В ряде ОУ нарушение равновесия между подачей и потреблением энергии приводит к непрерывному изменению регулируемой величины в ту или иную сторону. Объекты регулирования, лишённые самовыравнивания, называют *астатическими объектами*. Примером такого объекта является закалочный бак, в который жидкость поступает из трубы, а отводится с помощью насоса. При увеличении подачи жидкости в бак количество отводимой жидкости останется прежним. В результате уровень жидкости будет повышаться, и бак через некоторое время переполнится. Только ручное и автоматическое изменение производительности насоса может привести к восстановлению равновесия и предотвратить переполнение бака.

Инерционность объекта характеризует его способность к замедленному накоплению и расходованию энергии (вещества) в результате наличия сопротивлений. В таком объекте в результате регулирующего воздействия и нарушения равновесия между приходом и расходом энергии (вещества) регулируемая величина изменяется не мгновенно. Отставание регулируемой величины во времени называется запаздыванием.

Время полного запаздывания складывается из двух составляющих: транспортного (чистого) и ёмкостного (инерционного) запаздывания.

Транспортное запаздывание – время, в течение которого регулируемая величина не изменяется, несмотря на произведённое регулирующее воздействие. Например, при изменении напряжения на нагревательных элементах электрической печи потребуется определённое время, пока установится новый тепловой поток, что повлияет в конечном итоге на время начала изменения температуры. Продолжительность транспортного запаздывания зависит от расстояния между регулирующим органом и чувствительным элементом первичного преобразователя, от нагрузки и ёмкости объекта. Например, транспортное запаздывание уменьшается при расположении термопары в непосредственной близости от нагревательных элементов. Чем больше нагрузка, тем меньше транспортное запаздывание, а чем больше ёмкость объекта, тем больше время транспортного запаздывания. Такое запаздывание затрудняет регулирование, и всегда следует стремиться к его уменьшению.

Ёмкостным запаздыванием называется запаздывание, зависящее от термических, гидравлических и других сопротивлений между ёмкостями объекта. Оно определяется как интервал времени, затраченный на преодоление межёмкостных сопротивлений. Например, в муфельной печи ёмкостным запаздыванием будет время с момента возникновения теплового потока от нагревательных элементов до момента изменения температуры муфеля.

5.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В основе любой системы автоматического контроля, регулирования и управления лежит информация о состоянии и ходе технологических процессов, о состоянии оборудования и т.д.

Эту информацию получают с помощью устройств называемых *измерительными преобразователями* (ИП).

Выходным сигналом измерительного преобразователя является любая физическая величина однозначно связанная с контролируемой величиной.

В зависимости от вида выходного сигнала ИП бывают с *естественным* выходным сигналом и с *унифицированным*.

Естественный выходной сигнал имеют термопары, термометры сопротивления, преобразователи давления и т.д.

Унифицированный сигнал – это сигнал определённой физической природы, изменяющийся в определённых фиксированных пределах независимо от вида измеряемой величины и метода измерения.

Унифицированные сигналы получают из естественных с помощью *нормирующих преобразователей*. В таблице 2 приведены существующие унифицированные сигналы и диапазоны их изменения.

2. Унифицированные сигналы

Вид сигнала	Диапазон изменения	
Электрический на постоянном токе	$0 \dots 5 \text{ мА}$ $0 \dots 20 \text{ мА}$ $-5 \dots 0 \dots +5 \text{ мА}$	
Электрический на постоянном напряжении	$0 \dots 10 \text{ мВ}$ $0 \dots 20 \text{ мВ}$ $-10 \dots 0 \dots +10 \text{ мВ}$	$0 \dots 10 \text{ В}$ $0 \dots 1 \text{ В}$ $-1 \dots 0 \dots +1 \text{ мВ}$
Электрический на переменном напряжении	$0 \dots 1 \text{ В}$ $0 \dots 2 \text{ В}$	
Электрические сигналы переменного тока на частоте	$2 \dots 4 \text{ кГц}$ $4 \dots 8 \text{ кГц}$	
Пневматические сигналы	$20 \dots 100 \text{ кПа}$ ($0,2 \dots 1,0 \text{ кгс/см}^2$)	

5.2.1. Механические преобразователи

Механические преобразователи преобразуют входные механические величины (давление, усилие, скорость, расход и др.) в механические выходные сигналы (перемещение, частоту вращения и др.)

Для нормальной работы топливных термических и плавильных печей необходимо контролировать давление топлива и воздуха как после регулирующих органов, так и перед горелками. Кроме того, необходимо поддерживать постоянное давление в рабочем пространстве печи и обеспечивать определённую тягу, создаваемую дымовой трубой или дымососом. При работе вакуумных печей контроль разрежения обеспечивает качество и стабильность процесса.

Вакуумметры в литейных и термических цехах в основном применяют для контроля давления в вакуумных плавильных и нагревательных печах.

Чувствительными элементами таких преобразователей являются упругие элементы (мембраны, пружины).

Для измерения уровня формовочных материалов в бункерах и уровня материалов в вагранках и других плавильных печах применяют механиче-

ские нестандартные уровнемеры, к числу которых относят флажковые, зондовые и поплавковые сигнализаторы уровня.

Для измерения расхода жидкостей широко применяют дроссельные устройства.

К механическим чувствительным элементам относятся также различные типы пружинных, маятниковых и осевых акселерометров.

Деформационные механические преобразователи являются аperiодическими звеньями первого порядка. Их постоянная времени определяется временем заполнения ёмкости сильфона или трубки Бурдона. Статические характеристики этих преобразователей – *линейные*, а переходная функция имеет вид экспоненты.

5.2.2. Электромеханические преобразователи

Электромеханические преобразователи преобразуют входные механические величины (давление, усилие, перемещение) в выходные электрические величины (напряжение, ток и т.п.).

Электромеханические преобразователи делятся на параметрические и генераторные.

В *параметрических* преобразователях выходная величина – параметр электрической цепи (сопротивление, индуктивность, ёмкость). Для получения выходного унифицированного сигнала в виде тока или напряжения такие преобразователи включают в мостовые или дифференциальные электрические схемы и питают от отдельных источников энергии.

Генераторные преобразователи имеют электрический выходной сигнал в виде тока или напряжения, значение которых зависит от значения механической контролируемой величины (пьезоэлектрические преобразователи).

По принципу действия электромеханические преобразователи разделяются на резистивные, электромагнитные, ёмкостные и пьезоэлектрические.

1. Резистивные преобразователи. На рисунке 5.1 представлена классификация резистивных преобразователей.

В литейном производстве электроконтактные преобразователи получили широкое применение в качестве сигнализаторов уровня в системах дозирования сыпучих материалов, потенциметрические – применяются на формовочных машинах для определения высоты встряхивания. Тензометрические преобразователи находят применение в машинах литья под давлением для определения давления металла в камере прессования, а также при контроле качества термической обработки. На рисунке 5.2 приведена их классификация.

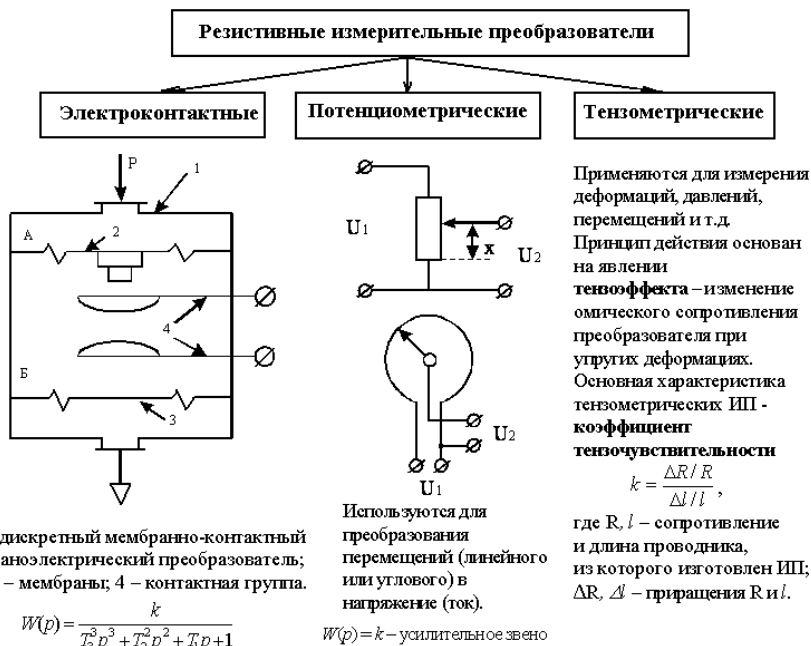


Рис. 5.1. Классификация резистивных ИП

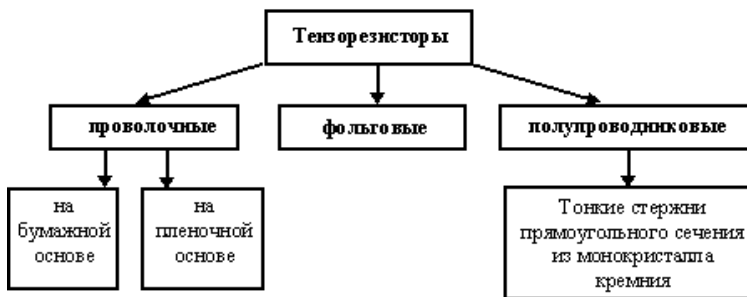


Рис. 5.2. Классификация тензометрических ИП

2. Электромагнитные измерительные преобразователи. Индуктивные ИП (рис. 5.3, а) используют для измерения усилий и линейных перемещений. Такие преобразователи позволяют измерить толщину фольги металлов, толщину гальванических покрытий, разностенность металлических труб и т.д. Принцип их действия основан на изменении индуктивности ИП под воздействием линейных перемещений подвижной части его магнитной системы.

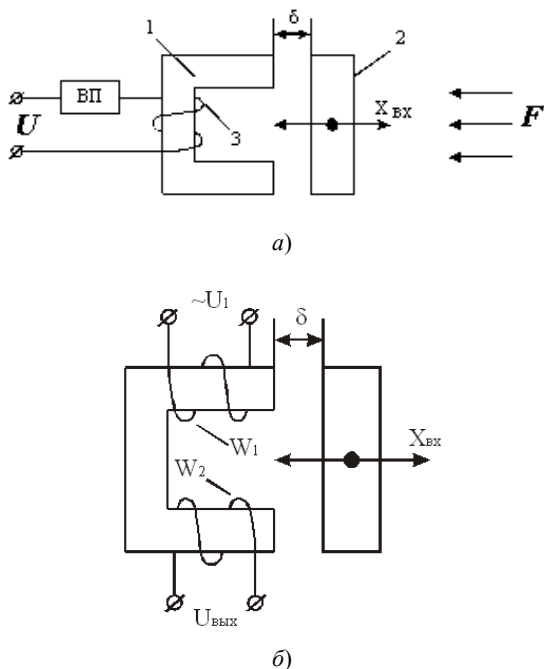


Рис. 5.3. Измерительные преобразователи:

a – индуктивный (*1* – ферромагнитный сердечник; *2* – подвижный якорь; *3* – обмотка; ВП – вторичный прибор); *б* – трансформаторный

Полное сопротивление переменному току в таком преобразователе определяется в виде

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2},$$

где R – активное сопротивление обмотки; X_L – индуктивное сопротивление обмотки; Z – полное сопротивление обмотки.

При изменении δ меняется L , а, следовательно, и Z . При $U = \text{const}$ $I = f(Z) = f(\delta)$.

Статическая характеристика такого преобразователя близка к линейной, поэтому $W(p) = k$.

Принцип действия *трансформаторных ИП* (рис. 5.3, *б*) основан на изменении взаимной индуктивности обмоток при перемещении одной относительно другой или при перемещении якоря.

Во вторичной обмотке W_2 индуцируется ЭДС E_2 , величина которой находится в определённой зависимости от величины зазора δ . Такой датчик основан на перераспределении напряжений.

Магнитоупругие ИП представляют собой магнитные сердечники с расположенными на них одной или несколькими обмотками.

В основу их работы положено свойство ферромагнитных материалов изменять магнитную проницаемость под воздействием упругих деформаций.

Подобно тензорезисторам для магнитоупругих датчиков определяют магнитоупругую чувствительность:

$$k = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l},$$

где $\Delta\mu/\mu$ – относительное изменение магнитной проницаемости; $\Delta l/l$ – относительная деформация.

Такие датчики применяются для измерения усилий, температуры и других физических величин, под действием которых изменяются геометрические размеры тел.

3. Ёмкостные преобразователи. В литейных цехах ёмкостные преобразователи находят применение для контроля уровня формовочной смеси в расходных бункерах при её автоматической раздаче, для дозирования воды при приготовлении формовочной смеси в бегунах и т.д.

Ёмкостные ИП представляют собой конденсаторы с изменяющимся зазором d между обкладками, площадью перекрытия пластин или диэлектрической проницаемостью ε .

Ёмкость конденсатора

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d},$$

ёмкостное сопротивление

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C},$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума (воздуха); ε – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками; f – частота питающей сети; S – действующая площадь пластин; d – толщина диэлектрика или зазора.

Ёмкостные ИП практически безынерционны и применяются для измерения давлений, ускорений, вибраций и уровней.

4. Пьезоэлектрические преобразователи. Используются для измерения параметров быстроменяющихся во времени величин: усилий, давлений, ориентации рабочих органов машин и т.д.

Принцип действия основан на явлении пьезоэлектрического эффекта, который заключается в том, что под действием приложенного усилия

на гранях некоторых кристаллов (кварца, турмалина, титана) появляются электрические заряды:

$$q_x = k_n F_x$$

где q_x – электрический заряд; k_n – пьезоэлектрический модуль; F_x – усилие, приложенное вдоль электрической оси.

Выходное напряжение преобразователя зависит от заряда и геометрических размеров пластинки кристалла, но в любом случае оно мало и для усиления используют специальные электрометрические усилители.

5.2.3. Тепловые преобразователи

Температура является одним из основных параметров, определяющих ход и продолжительность многих процессов в литейных и термических цехах. Точная оценка температуры определяет эффективность автоматического управления. Многообразие решаемых задач обусловило появление и развитие большого числа разнообразных методов и устройств измерения температуры.

Наиболее распространёнными среди тепловых измерительных преобразователей, применяемых во всех отраслях промышленности, являются жидкостные термометры, конструктивно представляющие собой прозрачный стеклянный резервуар с припаянным к нему капилляром. Термометрическая жидкость заполняет весь резервуар и часть капилляра. При изменении температуры столб жидкости внутри капилляра изменяет своё положение. Отсчёт производят по шкале, нанесённой на капилляре (либо расположенной рядом с ним).

Преимуществом жидкостных термометров являются простота их конструкции и низкая стоимость при относительно высокой точности показаний. К недостаткам относятся значительная тепловая инерция, невозможность автоматической регистрации и передачи на расстояние показаний без дополнительных преобразователей и низкая прочность. В цехах по получению и переработке материалов их используют только для измерения температуры воздуха цеха, температуры свободных концов термомпар, для проверки приборов в лабораторных условиях, для измерения температуры охлаждающей жидкости в закаточных баках, ваннах и т.п.

Среди тепловых преобразователей также различают:

- термоэлектрические (термопары) преобразователи;
- терморезистивные (термометры сопротивления) преобразователи;
- термомеханические преобразователи;
- манометрические преобразователи;
- пирометры излучения.

Принцип действия *термоэлектрических ИП* основан на возникновении термо-ЭДС на концах спаев двух разнородных материалов, находящихся в разных температурных режимах.

Конструктивно термопара состоит из двух разнородных проводников, одни концы которых сварены между собой, а другие подсоединены на вторичный прибор.

Рабочий (горячий) спай помещают в защитный кожух и устанавливают в месте контроля температуры.

Если температура свободных (холодных) спаев термопары отличается от температуры горячего спаев, то вследствие термоэлектрического эффекта на электродах возникает термо-ЭДС, пропорциональная разности температур.

Статическая характеристика термопар имеет вид $E = a + bT$, в динамическом режиме описывается передаточной функцией апериодического звена второго порядка – $W(p) = \frac{K}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}$.

Принцип действия *термометров сопротивления* основан на изменении сопротивления материалов от температуры.

Термометры сопротивления изготавливают из платины, меди, никеля и железа. Это металлы, обладающие *положительными* температурными коэффициентами сопротивления (ТКС).

Статическая характеристика таких преобразователей линейна – $R_t = R_0(1 + \alpha(t - t_0))$.

Термисторы (полупроводниковые терморезисторы) обладают большими отрицательными ТКС. Их изготавливают из порошкообразных смесей окислов марганца, меди, кобальта, спрессованных и спечённых при высокой температуре. Статическая характеристика – нелинейна:

$$R_t = R_0 e^{\frac{B}{t}}$$

где B – постоянный коэффициент, t – температура.

Позисторами называют полупроводниковые терморезисторы с положительными ТКС. Их изготавливают из титаната бария с примесями.

Особенностью позисторов является то, что их сопротивление при повышении температуры увеличивается только в диапазоне ограниченных значений температур.

Полупроводниковые термометры применяются в основном в научных исследованиях, так как они требуют индивидуальной градуировки.

Термомеханические ИП построены на использовании явления теплового расширения твёрдых тел, жидкостей и газов. К ним относятся биметаллические и dilatометрические ИП.

Биметаллические термометры находят применение в установках пылеулавливания и очистки технологических и вентиляционных газов в системах регулирования лабораторных термических печей, а также в системах защиты электродвигателей от перегрузок.

В *биметаллических* преобразователях в качестве термометрического тела используются пластинки или ленты, состоящие из двух слоев разнородных металлов, характеризующихся различными коэффициентами теплового расширения. При изменении температуры биметаллической пластинки она деформируется вследствие неодинакового расширения отдельных слоев пластинки. Если закрепить неподвижно один конец пластинки, то по перемещению другого конца, соединённого с указателем, судят об изменении температуры.

Дилатометрические преобразователи в качестве чувствительного элемента используют кварцевый или фарфоровый стержень, помещённый в металлическую оболочку. Разность расширения оболочки и стержня определяет измеряемую температуру.

Принцип действия *манометрических ИП* температуры основан на использовании зависимости давления вещества в замкнутом постоянном объёме от температуры. В качестве термометрического тела используется газ (обычно азот), жидкость (ртуть, метиловый спирт, ксилол). Зависимость давления газа от температуры выражается уравнением

$$P_t = P_0[1 + \beta(t - t_0)],$$

где $\beta = \frac{1}{273,15}$ град⁻¹ – термический коэффициент расширения газа;

t_0 и t – соответственно начальная и конечная температуры, °C; P_0 – давление рабочего вещества при t_0 .

Измеряя изменение давление в замкнутой системе, заполненной газом, судят об изменении температуры. Газ для заполнения манометрических термометров должен быть химически инертным, обладать незначительной вязкостью, малой теплоёмкостью, легко получаться в чистом виде. Всем этим требованиям наиболее полно удовлетворяет азот.

Изменение давления от температуры для жидкости можно представить в виде

$$\Delta P = \frac{\beta_t}{\mu} \Delta t,$$

где ΔP – изменение давления; β_t – коэффициент объёмного расширения жидкости; μ – коэффициент сжимаемости жидкости; Δt – изменение температуры.

Манометрические термометры применяют для контроля температуры охлаждающей жидкости в установках для обработки холодом; температу-

ры воздуха, жидкого и газообразного топлива в установках для получения защитных атмосфер, используемых в термических печах и т.п.

Пирометры излучения широко применяются в металлургической и других отраслях промышленности, а также при проведении научных исследований для измерения температуры тел от 300 до 6000 °С и выше. Принцип действия пирометров основан на измерении энергии излучения нагретого тела. В зависимости от способа измерения параметров излучения различают оптические, радиационные и цветковые пирометры.

В *оптических пирометрах* (пирометры с «исчезающей» нитью) измерение яркостных температур основано на сравнении яркости тела, температура которого измеряется с яркостью нити пирометрической лампы. Когда пирометр сфокусирован на контролируемый объект, являющийся источником излучения, в поле зрения наблюдателя на фоне источника видна верхняя часть дуги нити лампы. Если при этом яркость нити меньше, чем яркость фона изображения источника, то нить представится чёрной; если наоборот, то нить будет выглядеть как светлая дуга на более тёмном фоне. Меняя сопротивление реостата, можно установить такую силу тока, при которой равенство яркостей нити и фона создаёт эффект исчезновения нити. Такие пирометры применяются для измерения температур от 800 до 5000 °С. Пределы допускаемой основной погрешности составляют $\pm 1,5\%$ от верхнего предела измерения.

Для измерения радиационных температур нагретых тел применяют *радиационные пирометры*. В качестве чувствительного элемента в таких пирометрах используются термобатареи из термопар. Температура излучателя определяется по степени нагрева рабочих спаев термопар. Радиационные пирометры используются для измерения температур в диапазоне от 30 до 2500 °С с пределами допускаемой основной погрешности $\pm 1,0$; $\pm 1,5$ и $2,0\%$ от верхнего предела измерения. В зависимости от принципа действия первичные пирометрические преобразователи подразделяются на пирометры полного излучения термоэлектрические (ППТ) и пирометры частичного излучения фотодиодные (ПЧД).

Приёмником излучения в преобразователях ППТ служит термобатарея из хромель-копелевой фольги, в преобразователях ПЧД – германиевые или кремниевые фотодиоды.

Принцип действия *цветковых пирометров* (спектрального отношения) основан на измерении отношения интенсивностей излучения нагретого тела в двух участках спектра с определёнными значениями длин волн. Это отношение однозначно определяет цветовую температуру тела. Цветовой температурой реального тела называется такая температура абсолютно чёрного тела, при которой отношение интенсивности излучений его в двух длинах волн равно отношению интенсивностей излучения

реального нагретого тела, обладающего температурой, в тех же длинах волн. Цветовая температура серых тел равна их действительной температуре. При температурах выше 1000 °С излучение большого количества окислов и карбидов металлов практически серое. Например, серый характер имеет излучение оксидных плёнок (ванадия, хрома, кремния и т.п.) на поверхности стальной ванны. Это подтверждает преимущество цветового метода поскольку, как указывалось выше, яркостная и радиационная температуры всегда (в отличие от цветовой) ниже истинной.

Пирометры спектрального отношения применяются для контроля температуры при производстве чугуна, проката, при непрерывной разливке стали и т.п.

5.2.4. Электрохимические измерительные преобразователи

В литейных и термических цехах контролируют состав самых разнообразных газов: горючих газов и продуктов их сгорания, защитных атмосфер и газов в воздухе помещений цехов. Контроль состава газа позволяет судить о правильности протекания технологического процесса. Например, по составу защитных атмосфер в термических печах определяют качество процесса химико-термической обработки; по составу колошниковых газов в доменной печи ведут процесс плавки и т.д. Важным параметром, определяющим процесс производства отливок, является влажность формовочных материалов, влияющая на качество форм, и влажность шихтовых материалов, определяющая ход процесса плавки в вагранках. В процессах сушки формовочных материалов, при приготовлении контролируемых атмосфер термических печей, а также в устройствах кондиционирования большую роль играет влажность воздуха. Влажность во многом определяет санитарно-гигиенические условия труда.

Для анализа состава твёрдых, жидких и газообразных сред (в том числе и для измерения влажности) используются электрохимические ИП, принцип действия которых основан на изменении параметров среды в результате химических преобразований.

Среди электрохимических ИП различают: *кондуктометрические* (принцип действия основан на зависимости сопротивления ИП от состава и концентрации раствора, через который проходит электрический ток); *потенциометрические* (принцип действия основан на зависимости ЭДС, возникающей на электродах от концентрации ионов электролита); *полярографические* (основаны на способности растворённых веществ восстанавливаться или окисляться на инертном электроде при наложении определённого потенциала).

В практике термической обработки используют способы прямого и косвенного измерения *углеродного потенциала контролируемых атмос-*

сфер. Прямой метод основан на определении электрического сопротивления преобразователя (узкая проволока (фольга) из технически чистого железа) при его науглероживании в результате химико-термической обработки. Косвенные методы основаны на измерении точки росы (температуры, при которой происходит конденсация влаги, содержащейся в анализируемом газе). ИП представляет собой кварцевую трубку, покрытую слоем стеклоткани, пропитанной хлористым литием. Поверх стеклоткани расположены два изолированных один от другого электрода из платиновой проволоочки, к которым подведено переменное напряжение. При контакте датчика с газом, содержащим водяные пары, хлористый литий вследствие собственной гигроскопичности поглощает воду, образуя электролит. При этом между электродами проходит электрический ток, что приводит к увеличению температуры датчика и испарению воды из электролита. Когда содержание воды в датчике становится меньше, чем в окружающем газе, опять начинается процесс поглощения водяных паров и нагрев датчика. Поглощение и испарение воды датчиком длится до того времени, пока между влажностью газа и концентрацией воды в хлористом литии не установится динамическое равновесие. Температура равновесия (точки росы) измеряется датчиком температуры.

5.2.5. Оптические измерительные преобразователи

Оптические (фотоэлектрические) преобразователи широко применяются в системах автоматики в литейных и термических цехах для автоматического управления освещением цехов, для измерения температуры жидкого металла и нагретых деталей, определения прозрачности жидкостей или газов, подсчёта форм и изделий, проходящих по конвейеру, для контроля пламени в топках топливных печей, в системах блокировки для защиты обслуживающего персонала от травм.

В оптических ИП используются свойства контролируемых величин влиять на характеристики светового потока, пропускаемого через анализируемую среду. Их первичным преобразователем является фотоэлемент, преобразующий световой поток в выходной электрический сигнал.

Промышленностью выпускаются три вида таких преобразователей: с внешним фотоэффектом (вакуумные или газонаполненные), с внутренним фотоэффектом (фоторезисторы), вентильные (полупроводниковые).

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом представляют собой вакуумную или газонаполненную лампу, на внутреннюю стенку которой нанесён фоточувствительный слой, служащий катодом. Под действием светового потока, падающего на катод, в последнем возникают свободные электроны, которые под действием электрического поля перемещаются к аноду, создавая внутри фотоэлемента ток (фототок).

Принцип действия фотоэлементов с внутренним фотоэффектом состоит в том, что свободные электроны, образующиеся под действием светового потока в слое светочувствительного проводника, остаются (перераспределяются) в веществе, резко изменяя его сопротивление.

В полупроводниковых преобразователях при облучении светом p - n -перехода возникающая разность потенциалов (фото-ЭДС) инициирует ток во внешней цепи от электрода p к электроду n , величина которого зависит от светового потока.

5.3. ЗАДАЮЩИЕ И СРАВНИВАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

При автоматизации технологических процессов для выработки команд управления используют задающие и сравнивающие устройства.

Задающее устройство (задатчик) предназначено для установки заданного значения управляемой величины или требуемого закона её изменения.

Сравнивающее устройство – сравнивает фактические значения управляемых величин с заданными значениями и при их рассогласовании выдаёт первичный сигнал в систему управления с целью устранения возникшего рассогласования.

Задающие и сравнивающие устройства классифицируются в основном по энергетически признакам.

К сравнивающим *механическим* устройствам относятся рычаги и дифференциалы. Примером механического задающего устройства может служить копир. В металлообработке копир задаёт инструменту траекторию движения в соответствии с шаблоном, для формирования аналогичного профиля на обрабатываемой детали.

Простейшими *электрическими* задающими устройствами являются реостаты (переменные резисторы), служащие для изменения тока или напряжения в цепи путём перемещения движка вручную или с помощью программных устройств. В качестве сравнивающих электрических устройств используют мостовые схемы (рис. 5.4).

Если $U_{AB} = 0$, $i = 0$, то мост находится в равновесии. Так как $U_{AB} = 0$ при равенстве потенциалов в узлах A и B , то $U_{AC} = U_{CB}$ и $U_{DA} = U_{DB}$, откуда $I_1 R_X = I_2 R_2$ и $I_3 R_{\text{обр}} = I_4 R_4$.

Так как $i = 0$, то по правилу Кирхгофа $I_1 = I_3$ и $I_2 = I_4$. После решения получим $R_X = R_{\text{обр}} \frac{R_2}{R_4}$.

Таким образом, мост находится в равновесии при условии равенства произведений сопротивлений противоположных плечей.

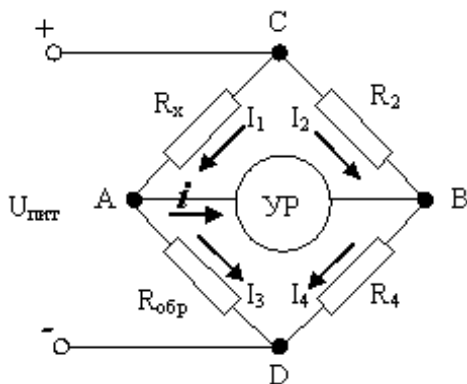


Рис. 5.4. Одинарный мост постоянного тока:
AB – измерительная диагональ; *CD* – питающая диагональ
R_x, *R₂*, *R_{обр}*, *R₄* – плечи моста; *VP* – указатель равновесия

В *пневматических* и *гидравлических* задающих элементах заданную величину устанавливают путём изменения усилий противодействующих пружин, изменением положения заслонок и задвижек, изменением проходных сечений управляющих сопел, золотников и т.д.

В системе УСЭППА (унифицированная система элементов промышленной пневмоавтоматики) используются задатчики давления, схемы которых представлены на рис. 5.5.

Для схемы, изображённой на рис. 5.6, *а*,

$$P_{\text{вых}} = \begin{cases} P_{\text{пит}}, & P_1 > P_2, \\ 0, & P_2 > P_1, \end{cases}$$

а для схемы, изображённой на рис. 5.6, *б*,

$$P_{\text{вых}} = \begin{cases} P_{\text{пит}}, & P_1 + P_3 > P_2 + P_4, \\ 0, & P_2 + P_4 > P_1 + P_3. \end{cases}$$

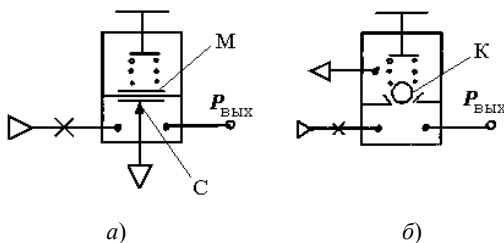


Рис. 5.5. Задатчики давления

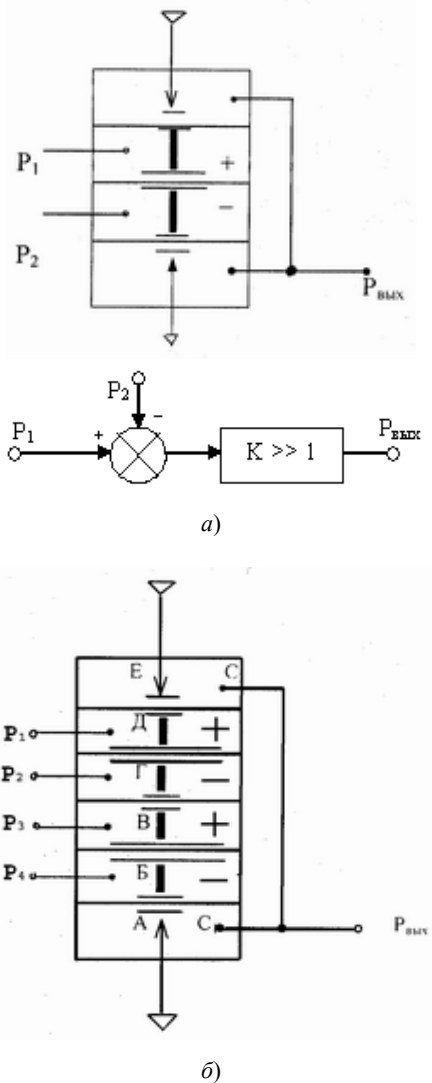


Рис. 5.6. Пневматические элементы сравнения:
а – трёхмембранный и его структурная схема; *б* – пятимембранный

При введении отрицательной обратной связи элемент сравнения работает в режиме вычислительного устройства. При этом могут быть реализованы операции сложения, вычитания, умножения на коэффициенты больше и меньше единицы.

5.4. РЕЛЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

Реле – устройство, в котором при достижении входной величиной определённого значения, происходит скачкообразное изменение выходной величины.

По виду физических величин, на которые реагируют реле, их подразделяют на электрические, магнитные, тепловые, оптические, акустические и др.

В процессах термической обработки материалов широко применяют тепловые реле. В литейном производстве применяют фотореле для включения исполнительных механизмов систем автоматизации формовочных машин и выбивных устройств. Для управления электрическими устройствами применяют электромагнитные реле.

Обычно реле состоит из трёх элементов:

- 1) воспринимающий – воспринимает контролируемую величину и преобразует её в другую физическую величину;
- 2) промежуточный – сравнивает значение преобразованной величины с заданным значением и передаёт воздействие на исполнительный элемент;
- 3) исполнительный – воздействует непосредственно на управляемую цепь, замыкая или размыкая свои контакты.

Иногда бывает четвёртый элемент – создающий выдержку времени.

Все реле характеризуются рядом общих параметров:

- 1) *срабатывание* (характеризует чувствительность реле) – минимальное значение входного сигнала, при котором происходит переключение контактов реле;
- 2) *отпускание* – максимальное значение входного сигнала, при котором происходит возврат реле в исходное состояние;
- 3) *коэффициент возврата* – отношение параметра отпускания к параметру срабатывания (у электромагнитных реле $k_v = 0,4...0,9$; у электронных $k_v = 0,98...0,99$);
- 4) *время срабатывания и отпускания* – объясняется тем, что, например, у электромагнитных реле вследствие большой индуктивности обмоток ток возрастает и спадает постепенно. По времени срабатывания реле подразделяются на: безынерционные ($t_{cp} < 1$ мс), быстродействующие ($t_{cp} = 1...50$ мс), нормальнодействующие ($t_{cp} = 50...150$ мс), медленнодействующие ($t_{cp} = 150...1000$ мс), реле выдержки времени ($t_{cp} > 1$ с);
- 5) *время трогания* – время, в течение которого подвижные части реле находятся в покое, а ток возрастает до тока срабатывания.

Для создания определённой временной задержки при передаче сигнала от одного элемента автоматики к другому применяют *реле выдержки времени*. В них используются электрические, механические, пневматические и гидравлические устройства замедления.

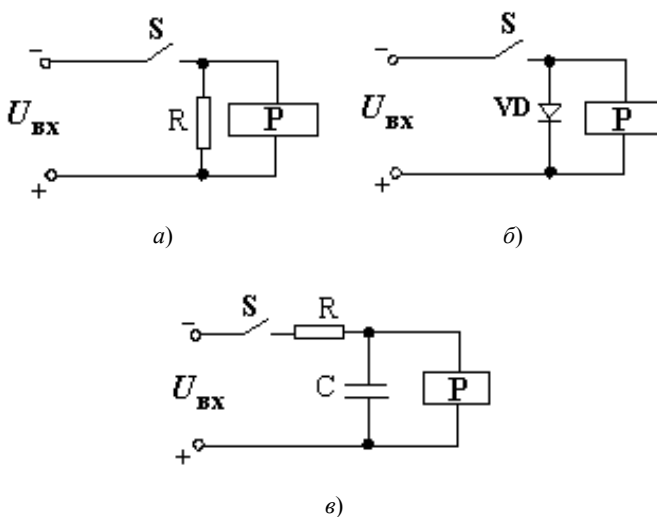


Рис. 5.7. Шунтирование обмотки реле активным сопротивлением (а), диодом (б), конденсатором (в)

На рисунке 5.7 схемные решения для создания электрических реле выдержки времени.

При шунтировании обмотки реле активным сопротивлением (рис. 5.7, а) после отключения ключом S входного напряжения ток медленно убывает через R . Недостатком такого устройства является то, что резистор вызывает дополнительный расход мощности. В схеме, представленной на рис. 5.7, б, ЭДС самоиндукции гасится на активном сопротивлении обмотки реле. При шунтировании обмотки реле конденсатором (рис. 5.7, в) при замкнутом ключе конденсатор заряжается до напряжения срабатывания, после размыкания он разряжается на сопротивление реле до напряжения отпускания. Время выдержки в этом случае будет определяться параметрами R и C .

5.5. ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

Логические элементы служат для построения схем сигнализации, блокировки, защиты и т.д. *Логическим элементом* называется устройство, реализующее определённую логическую операцию с входными сигналами.

Построение логических элементов возможно при помощи релейных устройств, использующих самые разнообразные физические принципы: механические, гидравлические, пневматические, электромагнитные, электромеханические, электронные и т.п.

Теория логических устройств базируется на алгебре логики (алгебре Буля). *Логические сигналы* могут принимать два значения 1 и 0 и могут иметь любую физическую величину. Существует четыре основных логических операции:

ДА – повторение, $y = x$;

НЕ – отрицание (инверсия), $y = \bar{x}$;

ИЛИ – сложение (дизъюнкция), $y = x_1 + x_2, y = x_1 \vee x_2$;

И – умножение (конъюнкция), $y = x_1 * x_2, y = x_1 \wedge x_2$.

Другие функции строятся на базе приведённых элементарных функций, например:

импликация – $y = x_1 \rightarrow x_2, y = \bar{x}_1 + x_2$;

запрет – $y = x_1 \leftarrow x_2, y = \bar{x}_1 * x_2$;

стрелка Пирса – $y = x_1 \downarrow x_2 = \overline{x_1 + x_2}$ – отрицание ИЛИ;

штрих Шеффера – $y = x_1 / x_2 = \overline{x_1 * x_2}$ – отрицание И.

5.6. УСИЛИТЕЛИ

Для управления исполнительными механизмами требуется мощность, значительно превышающая мощность сигналов, поступающих от измерительных преобразователей. Для увеличения сигнала до необходимого уровня применяют различные типы усилителей.

Усилитель – устройство, усиливающее мощность сигнала за счёт энергии дополнительного источника.

К усилителям предъявляются следующие требования:

- 1) усилитель должен иметь требуемый коэффициент передачи (усиления) по мощности и другим параметрам;
- 2) быстродействие усилителя должно превышать быстродействие других элементов системы;
- 3) статическая характеристика усилителя в рабочей зоне изменения выходной и входной величин должна быть линейной;
- 4) порог чувствительности усилителя должен быть минимальным и не превышать допустимого значения.

Для усиления механических величин применяют *механические усилители*. Наиболее распространёнными среди таких усилителей являются муфты, предназначенные для соединения друг с другом концов валов и передачи крутящего момента. Муфта передаёт механическую энергию от дополнительного источника без изменения её величины.

Усиление маломощных электрических сигналов в системах управления мощными энергетическими объектами осуществляется с помощью *электронных тиристорных усилителей* (рис. 5.8, а).

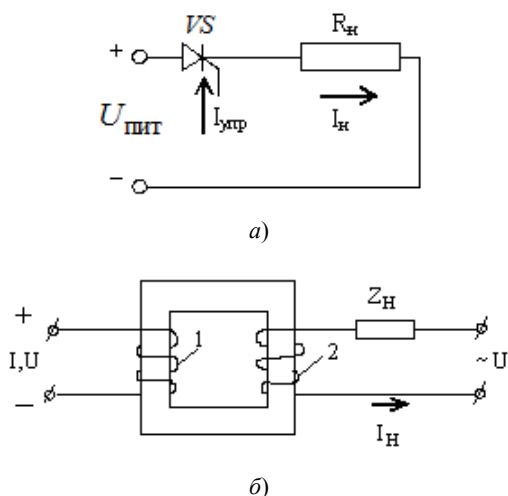


Рис. 5.8. Усилители:

a – электронный тиристорный; *б* – магнитный

При подаче на управляющий электрод тиристора импульса управления $I_{упр}$ (входная величина усилителя) тиристор VS открывается и в нагрузке R_n от источника $U_{пит}$ протекает ток $I_n \gg I_{упр}$, являющийся выходной величиной.

Для управления большой мощностью переменного тока посредством малой мощности постоянного тока применяют *магнитные усилители* (рис. 5.8, б).

При подаче в обмотку управления 1 тока I происходит подмагничивание магнитопровода. С увеличением подмагничивания магнитная проницаемость $\mu_{абс}$, а следовательно, и индуктивность силовой обмотки 2 – уменьшается

$$L_2 = \frac{W_2^2 S \mu_{абс}}{l},$$

где W_2 – количество витков в силовой обмотке; S, l – сечение и длина провода. Уменьшение L_2 ведёт к уменьшению индуктивного сопротивления $X_L = \omega L$ и увеличению тока нагрузки

$$I_n = \frac{U \sim}{\sqrt{(R_n + R_2)^2 + (X_n + X_L)^2}},$$

где R_n, X_n – активное и реактивное сопротивления нагрузки; R_2 – активное сопротивление силовой обмотки.

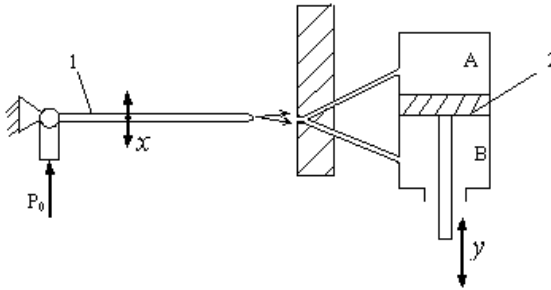


Рис. 5.9. Гидравлический усилитель со струйной трубкой

Гидравлические и пневматические усилители в большинстве случаев сходны по конструкции и принципу действия. В основу их работы положены принципы управления с помощью механического перемещения каких-либо элементов потоками жидкости или газа. По принципу действия усилители делятся на дроссельные и струйные.

К достоинствам гидравлических и пневматических усилителей относятся большой коэффициент усиления по мощности, высокое быстродействие, малые габариты, высокая надёжность. Единственным недостатком является необходимость использования специализированных источников питания (гидравлические насосы, компрессоры).

На рисунке 5.9 приведена схема гидравлического усилителя со струйной трубкой.

При $x = 0$ поршень 2 находится в равновесии и $y = 0$. При перемещении струйной трубки 1 вверх давление в полости A становится больше, чем в полости B, поршень 2 перемещается вниз. Усилие необходимое для перемещения трубки 1 на 1...2 мм – невелико, при этом шток поршня 2 развивает значительные усилия. Коэффициент усиления гидроусилителя составляет 10^4 .

5.7. АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Автоматический регулятор – подключаемое к объекту устройство, предназначенное для поддержания управляемой величины на заданном уровне или изменения её в соответствии с требуемым законом регулирования.

Автоматические регуляторы классифицируют:

1. *По виду регулируемого параметра* (T, P, L , комбинированные).
2. *По энергетическим признакам* (прямого и непрямого действия).
3. *По конструктивным признакам:*

1) аппаратного типа (применяются как автономные средства автоматизации);

2) приборного типа (работают в комплекте со вторичным измерительным прибором);

3) агрегатного типа (состоят из отдельных унифицированных блоков, что позволяет проектировать на их основе различные регуляторы);

4) модульного типа (состоят из отдельных элементов, выполняющих простейшие операции);

5) по воздействию на объект (позиционные (релейные), непрерывные и импульсные).

Регулятор температуры ТРМ-1. Микропроцессорный программируемый измеритель-регулятор типа ТРМ-1 совместно с входным датчиком предназначен для контроля и управления различными технологическими производственными процессами. Регулятор позволяет осуществлять следующие функции:



1) измерение температуры и других физических величин с помощью стандартных датчиков в зависимости от модификации прибора;

2) двухпозиционное (релейное) регулирование измеряемой величины;

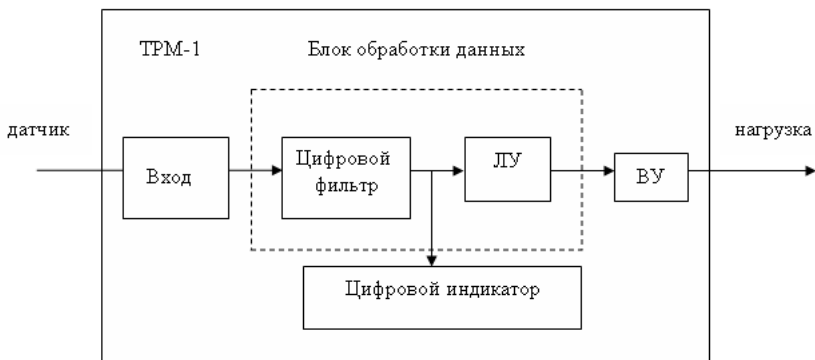
3) отображение текущего измерения на встроенном светодиодном цифровом индикаторе;

4) формирование выходного сигнала 4...20 мА для регистрации или управления исполнительными механизмами по П-закону регулирования.

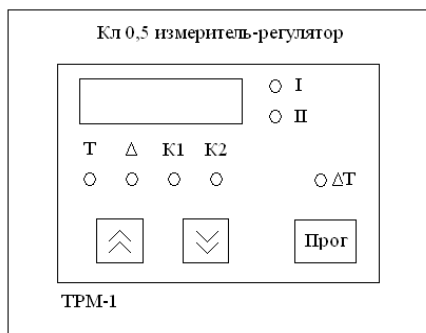
Функциональная схема прибора приведена на рис. 5.10, а. Прибор имеет вход для подключения датчиков, блок обработки данных, состоящий из измерителя физических величин, цифрового фильтра и логического устройства (ЛУ). ЛУ в соответствии с запрограммированными пользователем функциональными параметрами формирует сигналы управления выходным устройством (ВУ), которое в зависимости от модификации прибора может быть дискретного или аналогового типа.

На лицевой панели ТРМ-1 расположены элементы управления и индикации (рис. 5.10, б). Четырёхрядный цифровой индикатор предназначен для отображения значений измеряемых величин и функциональных параметров прибора, четыре светодиода красного свечения сигнализируют о различных режимах работы («К» – включение ВУ, «Т» и «Δ» – в режиме «установка параметра» сигнализируют о том какой параметр выбран для установки: Т – значение установки, Δ – значение гистерезиса, «I» сигнализирует о выводе на индикацию текущего измерения (непрерывная засветка) и об аварии по входу (мигающая засветка)). Кнопка «ПРОГ» предназначена для входа в режим просмотра и установки рабочих параметров, а также для записи новых значений в энергонезависимую память прибора, кнопки  и  предназначены для уменьшения или увеличения значения параметра.

На рисунке 5.11 приведена схема системы регулирования температуры печи.



а)



б)

Рис. 5.10. Регулятор TRM-1:
а – функциональная схема; б – лицевая панель

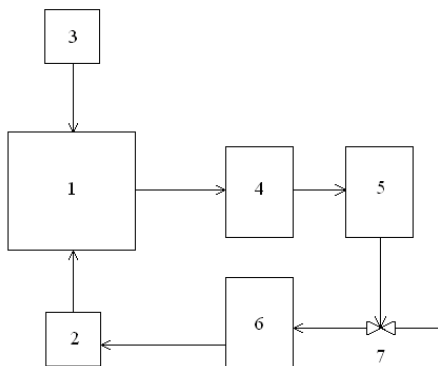


Рис. 5.11. Структурная схема регулирования температуры в печи

Температура в печи 6 регулируется изменением положения регулирующего органа 7 на линии подачи топлива (электроэнергии). Сигнал с преобразователя температуры второго типа ТСМ поступает на вход регулятора ТРМ-1 (поз. 1, рис. 5.11). Регулятор 1 сравнивает сигналы от датчика 2 и внутреннего задатчика 3 и формирует сигнал рассогласования, обрабатываемый по закону П-регулирования. Выходной сигнал регулятора воздействует на пусковое устройство 4. Пусковое устройство усиливает сигнал регулятора и управляет работой исполнительного механизма 5 и, соответственно, изменяет положение регулирующего органа 7. При изменении положения регулирующего органа в ту или другую сторону изменяется расход сжигаемого топлива (электроэнергии), что приводит к изменению температуры в печи и стабилизации её на заданном уровне.

5.8. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ САУ

Регулирующий орган (РО) – устройство, предназначенное для изменения количества энергии или рабочего вещества, подаваемого на объект управления, с целью обеспечения заданного режима его работы.

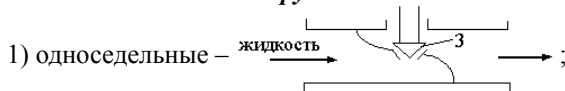
Исполнительный механизм (ИМ) – устройство, осуществляющее перемещение РО в соответствии с поступающими от управляющего устройства сигналами.

ИМ и РО составляют исполнительное устройство (ИУ). ИУ является связующим блоком между объектом регулирования и регулятором.

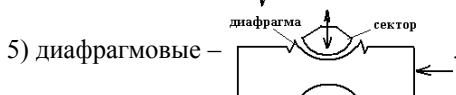
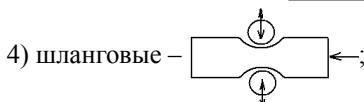
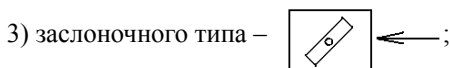
Исполнительные устройства классифицируются по следующим признакам:

1. *По виду потребляемой энергии* (электрические, пневматические, гидравлические, прочие ИУ (использующие энергию сжатой пружины, энергию взрыва и т.п.)).

2. *В зависимости от конструктивных особенностей РО:*



2) двухседельные;



3. **По характеру движения выходного вала:** поворотные (однооборотные – заслонки, краны; многооборотные – вентили, задвижки), прямые (мембраны, поршни, сильфоны).

4. **По виду используемого двигателя** (электродвигательные, электромагнитные, поршневые и мембранные).

5. **В зависимости от скорости движения выходного вала** (с постоянной скоростью; со скоростью, пропорциональной входному сигналу).

6. **По положению затвора РО при прекращении подвода энергии** (нормально открытое (НО) и нормально закрытое (НЗ) ИУ).

Для автоматизации стационарных машин и процессов применяют в основном электрические ИУ, на мобильных машинах – гидравлические ИУ.

Электрические ИУ делятся на электродвигательные и электромагнитные. Электродвигательные ИУ состоят из электродвигателя, редуктора и конечных выключателей. Электромагнитные (электросоленоидные) ИУ (рис. 5.12, а) преобразуют электрический сигнал в двухпозиционное перемещение регулирующего органа. Они отличаются большим быстродействием, простой конструкцией и высокой надёжностью.

При подаче напряжения U в катушку 2, якорь 1 перемещается под действием электромагнитной силы и перемещает связанный с ним регулирующий орган 3.

Гидравлические и пневматические ИУ имеют одинаковый принцип действия, основанный на перемещении регулирующего органа под действием давления жидкости или газа. Схема пневматического ИУ представлена на рис. 5.12, б.

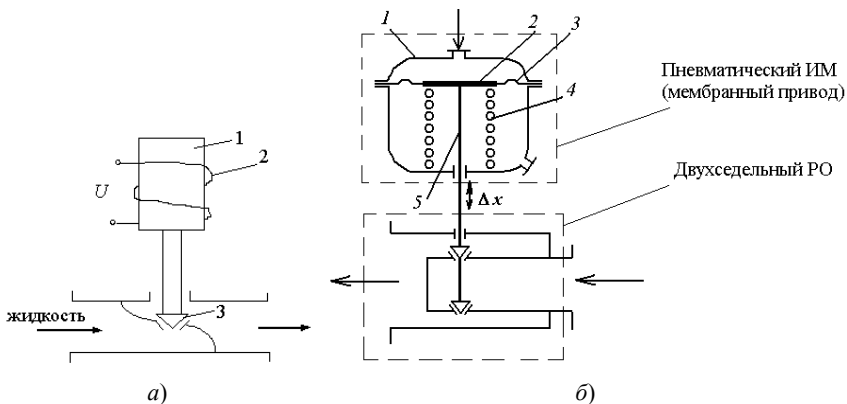


Рис. 5.12. Исполнительные устройства:

а – электромагнитное, б – пневматическое (1 – корпус; 2 – жёсткий центр; 3 – мембрана; 4 – пружина; 5 – шток)

К монтажу и эксплуатации ИУ предъявляются следующие общие требования:

1) принцип действия и конструкция ИУ должны обеспечивать выполнение поставленной задачи автоматизации (непрерывное регулирование, позиционное регулирование, защитное ИУ), при этом необходимо проверить исходное положение затвора;

2) ИУ должно соответствовать категории производственного помещения, где предполагается его установка;

3) ИУ должно быть обеспечено бесперебойным снабжением энергии требуемой кондиции;

4) технические параметры ИУ должны соответствовать свойствам и значениям регулируемой среды;

5) ИУ должно обеспечивать требуемую надёжность работы;

6) место установки ИУ должно отвечать удобству монтажа, демонтажа и обслуживания;

7) участок трубопровода, на котором устанавливается ИУ и его байпасный узел (рис. 5.13) должен иметь такое крепление, при котором оно не испытывало бы избыточных механических напряжений, изгибов, вибраций и т.п. (*байпас* – обвод, параллельный прямому участку трубопровода с запорной или регулирующей арматурой или приборами, служащий для управления технологическими процессами при неисправности ИУ или его срочной замены без остановки процесса);

8) трубопровод должен иметь прямолинейные участки до и после ИУ;

9) при установке ИУ на трубопроводах с диаметром большим или меньшим, чем диаметр ИУ, следует предусматривать плавные конусные переходы.

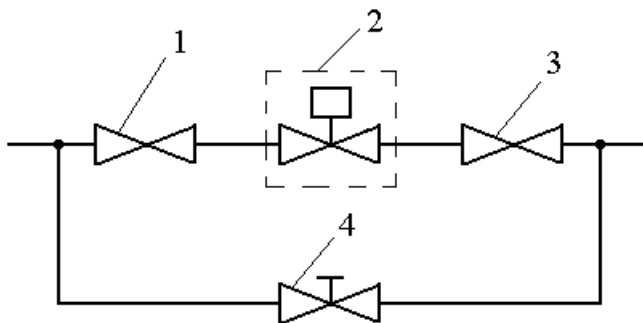


Рис. 5.13. Байпасная линия:

1, 3 – запорные вентили; 2 – исполнительное устройство;

4 – вспомогательный (байпасный) вентиль

3. Области применения ИМ

ИМ	Область применения
Пневматический мембранный пружинный	Когда требуется перестановочное усилие до 3000 кгс (30 000 Н) и если регламентируется положение затвора РО при аварийном отключении питания
Пневматический мембранный беспружинный	Когда требуется перестановочное усилие до 4000 кгс (40 000 Н) и не регламентируется положение затвора РО
Пневматический поршневой пружинный	Когда требуется перестановочное усилие до 6000 кгс (60 000 Н) и если регламентируется положение затвора РО при аварийном отключении питания
Пневматический поршневой беспружинный	Когда требуется перестановочное усилие до 10 000 кгс (100 000 Н) и не регламентируется положение затвора РО
Пневматический сильфонный	При малых перестановочных усилиях и ходе штока до 15 мм
Гидравлический поршневой пружинный	Когда требуется перестановочное усилие до 10 000 кгс и если регламентируется положение затвора РО при аварийном отключении питания + высокое быстродействие
Гидравлический поршневой беспружинный	Когда требуется перестановочное усилие до 20 000 кгс, не регламентируется положение затвора РО + высокое быстродействие
Электродвигательный, электромагнитный	Широко применяются при отсутствии ограничений на вид используемой энергии

В таблице 3 показаны области применения пневматических, гидравлических и электрических ИМ.

6. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) вырабатывают и реализуют управляющие воздействия на технологическом объекте управления в соответствии с принятым критерием управления [9, 10].

АСУ ТП свойственны следующие признаки, общие для всех АСУ:

1) АСУ ТП – это человек-машинная система, в которой человек играет важнейшую роль, принимая в большинстве случаев содержательное участие в выработке решений по управлению;

2) существенное место в АСУ ТП занимают автоматические устройства (в том числе средства вычислительной техники), выполняющие трудоемкие операции по сбору, обработке и переработке информации;

3) целью функционирования АСУ ТП является оптимизация работы объекта путём соответствующего выбора управляющих воздействий.

Назначение любой автоматизированной системы управления, её необходимые функциональные возможности, желаемые технические характеристики и другие особенности в решающей степени определяются тем объектом, для которого создаётся данная система. Для АСУ ТП управляемым объектом является совокупность технологического оборудования и реализованный на нём технологический процесс производства целевого продукта.

Чтобы добиться оптимального хода технологического процесса, в системах управления современными литейными и термическими цехами необходимо выполнять множество взаимосвязанных различных действий: собирать и анализировать информацию о состоянии процесса, регистрировать значения одних переменных и стабилизировать другие, принимать и реализовывать соответствующие решения по управлению и т.д.

Перечисленные действия (функции) АСУ ТП относят к основным и разделяют на информационные и управляющие.

Целью информационных функций является сбор, преобразование, хранение информации о состоянии объекта управления, представление этой информации оперативному персоналу или передача её для последующей переработки. Источниками информации в АСУ ТП служат измерительные преобразователи, установленные на самом объекте управления и на вспомогательных участках производства, а также датчики ручного ввода информации.

При создании АСУ ТП решающее значение приобретают математические модели объектов управления. В настоящее время математические описания металлургических объектов уже достигли такой глубины и сложности, что реализация их возможна только с применением средств вычислительной техники. Поэтому в АСУ ТП центральное место занимают управляющие вычислительные комплексы (УВК).

Современные АСУ ТП очень разнообразны и могут отличаться друг от друга по функциональному составу, структуре (централизованные, децентрализованные), степени автоматизации управления объектом, применяемым техническим средствам и многим другим признакам и характеристикам. Однако имеются характерные разновидности таких систем, различающихся способами выполнения основных информационных и управляющих функций [9]:

АСУ ТП, функционирующие без вычислительного комплекса;

АСУ ТП с вычислительным комплексом, выполняющим информационные функции;

АСУ ТП с вычислительным комплексом, выполняющим управляющие функции в режиме «советчика»;

АСУ ТП с вычислительным комплексом, выполняющим функции центрального управляющего устройства (супервизорное управление);

АСУ ТП с вычислительным комплексом, выполняющим функции непосредственного (прямого) цифрового управления.

7. ПРОМЫШЛЕННЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ И РОБОТЫ

Автоматизация производственных операций, связанных со сложными пространственными перемещениями объектов – порций металлошихты в бадью для последующей загрузки в плавильную печь, элементов литейной формы в процессе её сборки, заливочного ковша для подачи расплава в машину литья под давлением и прочими базируется на использовании специальных устройств, имитирующих действия человека, называемых манипуляторами и роботами.

Манипулятор является многозвенным механизмом с числом степеней подвижности от трёх до девяти. Управление манипулятором может производиться как вручную, так и автоматически – по заданной программе движений, определяемой конструкцией манипулятора [11].

Выходным звеном манипулятора служит захватное устройство (рабочий орган) для схватывания и удержания переносимого объекта, включая и сменный технологический инструмент.

Каждая степень подвижности оснащается электрическим, гидравлическим, пневматическим или комбинированным приводом.

Пневмопривод, как правило, обеспечивает наиболее высокое быстродействие манипулятора.

Промышленный робот принципиально отличается от манипулятора возможностью гибкого изменения программы движений в соответствии с технологическими потребностями производства. Промышленный робот определён как автоматическая машина, представляющая собой совокупность манипулятора и перепрограммируемого устройства управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций, заменяющих аналогичные функции человека при перемещении предметов производства и оснастки [11].

Роботы первого поколения известны под названием «механическая рука». Они явились переходной ступенью между манипуляторами и собственно роботами. Роботы второго поколения получили наименование «глаз – рука», причём функции технического зрения выполняют фотоэлементы или телевизионные камеры. Современные роботы третьего поколения характеризуются как «глаз – мозг – рука», в составе которых роль технического мозга возложена на микропроцессорную систему или компьютер, управляющие роботом.

Несмотря на то, что современные промышленные роботы значительно уступают человеку по числу степеней подвижности (у руки человека их 27), роботы могут заменить человека при выполнении широкого спектра работ. Роботизация обеспечивает значительную экономию людских и

материальных ресурсов, повышает производительность труда и сменность работы оборудования. Объединение прогрессивных форм оборудования, систем автоматизации и робото-технологических линий ведёт к созданию *гибких автоматизированных производств* (ГАП) [11].

К настоящему времени для автоматизации отдельных литейных процессов могут быть использованы универсальные роботы общепромышленного назначения с числом степеней подвижности не менее шести, способные переместить объект по любой траектории с любой его переориентацией в пространстве, и роботы, которые разработаны с учётом конкретной специфики литейного производства.

Освоена роботизация таких процессов, как литьё под давлением (с объёмным дозированием заливаемого металла, съёмом отливок и подачей их в пресс для обрубки литников), литьё в кокиль, литьё по выплавляемым моделям, дробеструйная очистка отливок, вспомогательные работы, транспортные операции. Кроме того, возможно и в ряде случаев практически осуществлено применение достаточно совершенных роботов для автоматизации операций окраски форм и стержней, установки стержней в формы, извлечения отливок из сырых песчано-глинистых форм, снятия горячих отливок с конвейера и манипулирования ими в процессе рентгеновской или гамма-дефектоскопии, сортировки и разбраковки отливок, осторожной (без боя) укладки отливок в тару и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены вопросы выбора оборудования и автоматизации термических цехов металлообрабатывающих предприятий. Даны классификация и описание оборудования, рассмотрены специфические узлы и детали печей, а также материалы, используемые при создании оборудования. Освещены вопросы автоматизации технологических процессов и теории автоматического управления. Особое внимание уделено техническим средствам, применяемым при автоматизации процессов производства и обработки материалов.

Данное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Материаловедение и технологии материалов» при изучении ими дисциплин «Оборудование термических цехов» и «Автоматизация процессов производства и обработки новых материалов», а также может быть полезно инженерам-технологам при решении ими производственных задач.

По окончании указанных курсов студенты будут знать типовые элементарные звенья систем автоматического управления, принцип определения оптимальных настроек регуляторов, понятия устойчивости линейных систем автоматического управления; основные типы измерительных преобразователей, используемых для измерения и контроля основных параметров технологических процессов; основные виды автоматизации производства, основные направления автоматизации контроля; принципы выбора основного, дополнительного и вспомогательного оборудования термических участков и цехов. Уметь осуществлять расчёт оптимальных настроек регуляторов, анализировать и синтезировать системы автоматического регулирования; выбирать технические средства для решения задач измерения и контроля технологических процессов, материалов и изделий; выбирать средства автоматизации для построения систем автоматического контроля и управления технологическими процессами; осуществлять выбор основного, дополнительного и вспомогательного оборудования термических участков и цехов. Владеть навыками составления и анализа структурных схем систем автоматического управления и схем автоматизации технологических процессов; расчёта и использования технических средств контроля и регулирования технологических процессов; составления схем автоматизации технологических процессов; выбора соответствующего технологическому процессу термической обработки основного, дополнительного и вспомогательного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ксенофонтов, А. Г.** Расчёт и конструирование нагревательных устройств : учебник для вузов / А. Г. Ксенофонтов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 503 с.
2. **Рустем, С. Л.** Оборудование термических цехов / С. Л. Рустем. – М. : Машиностроение, 1971. – 288 с.
3. **Большаков, В. И.** Оборудование термических цехов, технологии термической и комбинированной обработки металлопродукции / В. И. Большаков, И. Е. Долженков, А. В. Зайцев. – Днепропетровск : «РИАДнепр-VAL», 2010. – 619 с.
4. **Гуковский, В. Л.** Современные нагревательные и термические печи / В. Л. Гуковский, М. Г. Ладычичев, А. Б. Усачев. – М. : Машиностроение, 2001. – 656 с.
5. **Соколов, К. Н.** Оборудование термических цехов : учебное пособие / К. Н. Соколов. – Киев, Донецк : Вища школа, 1984. – 328 с.
6. **Долотов, Г. П.** Оборудование термических цехов и лабораторий испытания металлов / Г. П. Долотов, Е. А. Кондаков. – М. : Машиностроение, 1988. – 336 с.
7. **Волчкевич, Л. И.** Автоматы и автоматические линии : учеб. пособие для машиностроит. Вузов : в 2 ч. Ч. 1. Основы проектирования / Л. И. Волчкевич, М. М. Кузнецов, Б. А. Усов ; под ред. проф. Г. А. Шаумяна. – М. : Высшая школа, 1976. – 230 с.
8. **Староверов, А. Г.** Основы автоматизации производства / А. Г. Староверов. – М. : Машиностроение, 1989. – 312 с.
9. **Автоматизация** металлургических производств. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. А. Осипова, Т. В. Астахова, А. А. Дружинина, И. И. Лапаев. – Электрон. дан. (2 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008.
10. **Глишков, Г. М.** АСУ ТП в чёрной металлургии / Г. М. Глишков, В. А. Маковский. – М. : Металлургия, 1999. – 310 с.
11. **Дембовский, В. В.** Автоматизация управления производством / В. В. Дембовский. – СПб. : СЗТУ, 2004. – 82 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦЕХОВ	6
1.1. Классификация термических печей	6
1.2. Основные конструктивные элементы печей	11
1.3. Индексация термических печей	15
1.4. Основные требования, предъявляемые к термическим печам ...	18
1.5. Нагрев и нагревательные элементы	19
2. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦЕХОВ	26
2.1. Травильные установки	26
2.2. Дробеструйные аппараты	28
2.3. Оборудование для правки изделий	30
2.4. Оборудование для промывки изделий	33
3. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦЕХОВ	35
3.1. Маслоохладительные установки	35
3.2. Контролируемые атмосферы и установки для их получения ...	37
3.3. Подъёмно-транспортное оборудование и средства механизации термических цехов	42
4. ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	44
4.1. Общие сведения о системах и элементах автоматики	44
4.2. Классификация систем автоматического управления	47
4.3. Основы теории автоматического управления	50
4.3.1. Типовые воздействия	52
4.3.2. Частотные характеристики автоматической системы	54
4.3.3. Типовые элементарные звенья САУ	54
4.3.4. Соединение звеньев	56
4.3.5. Понятие устойчивости линейных САУ	57
4.3.6. Качество регулирования	58

5. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИКИ	60
5.1. Объекты управления	60
5.2. Измерительные преобразователи	62
5.2.1. Механические преобразователи	63
5.2.2. Электромеханические преобразователи	64
5.2.3. Тепловые преобразователи	68
5.2.4. Электрохимические измерительные преобразователи	72
5.2.5. Оптические измерительные преобразователи	73
5.3. Задающие и сравнивающие элементы	74
5.4. Релейные элементы автоматики	77
5.5. Логические элементы автоматики	78
5.6. Усилители	79
5.7. Автоматические регуляторы	81
5.8. Исполнительные механизмы и регулирующие органы САУ	84
6. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	88
7. ПРОМЫШЛЕННЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ И РОБОТЫ	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	93

Учебное издание

МОРДАСОВ Денис Михайлович
ЗАВРАЖИН Дмитрий Олегович

ОБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие

Редактор З. Г. Чернова
Инженер по компьютерному макетированию Т. Ю. Зотова

ISBN 978-5-8265-1550-1



Подписано в печать 04.03.2016.
Формат 60×84 /16. 5,58 усл. печ. л.
Тираж 80 экз. Заказ № 152

Издательско-полиграфический центр
ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел. 8(4752) 63-81-08;
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru