Библиотека СОК

А.С.НУЖДИН, В.С.УЖАНСКИЙ

ИЗМЕРЕНИЯ В ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

А.С.НУЖДИН, В.С.УЖАНСКИЙ

ИЗМЕРЕНИЯ
В ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

• Справочное руководство •

Москва
Агропромиздат
1986

ББК 31.392
Н88
УДК 621.56/.59(031)

Рецензенты: канд. техн. наук *Ю. Д. Видинеев* и канд. техн. наук *К. Д. Кан*

Нуждин А. С., Ужанский В. С.

Н 88 Измерения в холодильной технике: Справочное руководство.— М.: Агропромиздат, 1986.—368 с.: ил.

Рассмотрены организация измерений, а также методы и средства измерений, используемые при исследованиях, испытаниях и эксплуатации холодильного оборудования.

Описаны средства измерений тепловых, механических и электрических величин.

Приведены необходимые сведения об измерении быстроменяющихся величин, а также об автоматизации измерений на базе электронной и вычислительной техники.

Для специалистов холодильной промышленности.

Н $\frac{2303050000-327}{035(01)-86}$ 318—86 ББК 31.392

Анатолий Сергеевич Нуждин
Владимир Савельевич Ужанский

ИЗМЕРЕНИЯ В ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Зав. редакцией Л. В. Корбут. Редактор Г. А. Гусева.
Художественный редактор Т. И. Мельникова. Художник С. Н. Орлов.
Технический редактор Т. С. Прончснкова.
Корректоры В. А. Лебедева, А. В. Немировская.

ИБ № 4555

Сдано в набор 16.01.86. Подписано в печать 22.05.86. Т-02462. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага кн.-журнальная. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. п. л. 19,32. Усл. кр.-отт. 19,32. Уч.-изд. л. 25,08. Изд. № 434. Тираж 9000 экз. Заказ № 1399. Цена 1 р. 70 к.

Орлена Трудового Красного Знамени ВО «Агропромиздат», 107807, ГСП, Москва, Б-53, ул. Садовая-Спасская, д. 18.

Областная ордена «Знак Почета» типография им. Смирнова Смоленского облуправления издательств, полиграфии и книжной торговли, 214000, г. Смоленск, проспект им. Ю. Гагарина, 2

© ВО «Агропромиздат», 1986

ПРЕДИСЛОВИЕ

Холодильная техника за период своего развития немногим более века (первая установка получения искусственного холода для замораживания мяса была построена в г. Сиднее в 1861 г.) прочно вошла в наш быт.

Сегодня трудно найти отрасль народного хозяйства, в которой холодильная техника не только не нашла применения, но и не определяла бы в той или иной степени перспективу дальнейшего развития.

Количество и мощность холодильных установок, работающих в народном хозяйстве, постоянно растет. Они стали одним из крупных потребителей энергии, металла и трудовых ресурсов, необходимых для обеспечения их производства и эксплуатации. Естественно поэтому большое значение придается энергетическому совершенству, снижению металлоемкости и повышению надежности и автоматизации холодильных установок. Повышается точность поддержания технологических режимов, которые должны обеспечиваться холодильной установкой. Таким образом, требования к потребительским свойствам холодильной техники постоянно растут. Определить же, насколько каждое конкретное изделие холодильного машиностроения соответствует предъявляемым требованиям, можно только с помощью измерения параметров, характеризующих его потребительские свойства. Без измерений нельзя получить достоверные результаты при научных исследованиях холодильного оборудования.

Измерения в холодильной технике проводятся на основе измерений физических величин, которые несут информацию о работе испытуемого объекта и позволяют рассчитать все необходимые показатели. Они базируются на научных и технических достижениях измерительной техники в целом. В последние годы создана стройная система организации и проведения измерений, обеспечивающих требуемую точность и достоверность результатов.

Основой современных измерений является метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности [34]. В числе основных научно-технических проблем метрологии должны быть упомянуты следующие:

1. Создание и внедрение Международной системы единиц физических величин. Длительное время в науке и технике применялись различные системы единиц физических величин, что отрицательно влияло на унификацию методов и средств измерений. В результате большой работы, проведенной учеными многих стран, разработана и введена в действие Международная система единиц СИ [29]. К настоящему моменту в СССР завершается пе-

реход на эту систему во всех областях науки, техники и промышленности.

2. Разработка методов и средств измерений. Это один из основных вопросов метрологии. Методы и средства измерений тесно взаимосвязаны между собой: средства измерений создаются на основе разработанных и апробированных методов, в свою очередь методы измерений могут существовать, опираясь на реальные средства измерений. Общие методы измерений разрабатываются специализированными метрологическими организациями, методы некоторых узкоспециальных измерений — самими организациями-потребителями [23].

Средства измерений создаются приборостроительными организациями и предприятиями. Каждое вновь созданное средство измерений проходит государственные испытания [20] и вносится в государственный реестр. Средства измерений, создаваемые для собственных нужд (нестандартизованные средства измерений), подвергаются ведомственной аттестации [28].

3. Определение точности измерений. Проблема определения точности измерений сводится к созданию методов измерений и расчетов, позволяющих определить погрешность измерений с заданной вероятностью [24].

4. Обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений. Данная проблема состоит в создании и непрерывном функционировании общегосударственной системы организационно-технических мероприятий, включающих:

создание и хранение эталонов и образцовых средств измерений;

разработку и внедрение методов передачи размеров единиц от эталонов и образцовых средств измерений к рабочим средствам измерений;

создание системы поверок и ремонта средств измерений, надзор за ее функционированием [21].

Наряду с научно-техническими проблемами метрология решает законодательные вопросы, регулируя с помощью общих правил, требований и норм отношения между отдельными участниками измерений.

Современное состояние метрологии и техники измерений характеризуется интенсивным развитием методов измерений, быстрым ростом номенклатуры средств измерений, внедрением в их конструкцию последних достижений фундаментальных и прикладных наук. Наряду с простыми измерительными приборами в практику все шире входят сложные электронные цифровые приборы и комплексные информационно-измерительные и вычислительные системы [41, 79, 91]. Все это создает трудности в правильном ориентировании специалистов, особенно занятых в определенной области техники.

Вместе с тем имеются и специфические особенности измерений в холодильной технике. Прежде всего специфичны методы измерения показателей, характеризующих качество холодильного оборудования, таких, как холодопроизводительность машины или компрессора, тепловой поток в испарителе или конденсаторе и др. Для получения достоверных результатов при определении этих величин должны соблюдаться свойственные холодильной технике правила создания стенда, подбора и установки приборов, соблюдения режимов работы, обработки результатов измерений.

Кроме того, можно отметить весьма высокие требования к точности измерений. В частности, при измерениях перепадов температуры для вычисления холодопроизводительности допустимая погрешность не должна превышать 0,05—0,1 °С [48, 81] при разностях температур 3—7 °С. Такую же точность должны иметь точечные измерители, позволяющие определить поле и градиенты температуры на теплопередающих поверхностях. Высокие требования к точности измерений давлений (погрешность не более ±1% измеряемой величины) обусловливают применение манометров абсолютного давления. Ряд особенностей имеют и измерения расходов холодильных агентов, относительной влажности воздуха и других величин.

Общие и специальные вопросы измерений различных величин, представляющие интерес для холодильной техники, опубликованы в многочисленных изданиях по теплотехническим, электрическим и метеорологическим измерениям. Некоторые методические вопросы изложены в ГОСТах и международных стандартах и рекомендациях. В то же время ряд важных специфических вопросов не нашел отражения в печати, ответ на некоторые из них можно найти только в отраслевых стандартах и стандартах предприятий.

Настоящая работа является первой попыткой свести вопросы измерений, относящихся к холодильной технике, в одну книгу. Она имеет цель помочь специалистам, работающим в области исследования, создания и эксплуатации холодильного оборудования, в выборе средств и методов измерений, обеспечивающих необходимую точность.

В книге изложены вопросы измерений, проводимых для оценки качества различного холодильного оборудования, в том числе методы измерения, требования к точности измерительных приборов, правила проведения испытаний.

В книгу вошли главы, посвященные основным видам измерений: температуры, давления, расхода, влажности воздуха и электрических величин (силы тока, напряжения, мощности и сопротивления).

В этих главах рассматриваются общие вопросы измерений каждой из величин, их единицы, физические основы измерений и принципы построения первичных преобразователей. В необходимых случаях приводятся указания по методам измерений. Каждая из этих глав содержит справочные сведения о средствах измерений в основном отечественного производства. Приводимые сведения позволяют подобрать необходимое средство измерения и получить данные о его основных технических характеристиках. В тех случаях, когда эти данные оказываются недостаточными, читателю рекомендуется обращаться к соответствующей документации. Следует также иметь в виду, что приводимые справочные данные отражают состояние на время издания книги. Технический прогресс в области средств измерений идет достаточно быстро. Поэтому рекомендуется дополнительно пользоваться соответствующими номенклатурными справочниками.

Специальная глава книги посвящена вопросам измерений быстроменяющихся величин. Эта область измерений в большой степени специфична для исследований и испытаний холодильных компрессоров. В этой главе в основном освещаются измерения быстроменяющихся давлений и температур.

Значительное внимание уделено вопросам автоматизации измерений с применением средств вычислительной техники. Рассмотрены принципы построения измерительно-вычислительных комплексов и приведены технические данные современных отечественных средств сбора и обработки экспериментальных данных.

Материал, изложенный в книге, в значительной степени базируется на более чем 20-летнем опыте измерений в холодильной технике, накопленном во Всесоюзном ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательском, проектно-конструкторском и технологическом институте холодильного машиностроения (ВНИИхолодмаш) при исследовании и испытании различного холодильного оборудования, предназначенного для получения искусственного холода в диапазоне от температур комфортного кондиционирования до —70 °С. Наряду с этим использованы материалы информационных изданий и работы других организаций, что отражено в списке использованной литературы. Основные обозначения физических величин соответствуют стандарту СЭВ 1052—78.

Главы II и III написаны канд. техн. наук **А. С. Нуждиным**, главы I и IV—IX — канд. техн. наук. **В. С. Ужанским**, введение и п. 4 главы I — ими совместно, глава X — инж. **К. Б. Куликовым** и канд. техн. наук **В. С. Ужанским**.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ВНИИхолодмаша, оказавшим помощь в подготовке материала для книги и высказавшим критические замечания по содержанию книги.

Авторы также благодарны кандидатам технических наук **К. Д. Кану** и **Ю. Д. Видинееву** за весьма полезные замечания, высказанные при рецензировании рукописи.

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ

I.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения могут быть разделены по ряду признаков: виду измеряемой величины, способу получения результатов, характеру изменений измеряемой величины.

По виду измеряемой величины различают следующие измерения:

механические, охватывающие измерения массы, силы, скорости (линейной и угловой), частоты вращения, ускорения, момента вращения, давления, механического напряжения, расхода протекающего вещества, уровня раздела сред и т. д.;

тепловые, включающие измерения температуры, ее градиентов, тепловых потоков и т. д.;

линейно-угловые, включающие измерения линейных размеров профилей, углов, дуг и т. п.;

электрические, охватывающие измерения силы тока, напряжения, мощности, энергии, сдвига фаз, сопротивления и т. п.; разновидностью электрических являются радиотехнические измерения, относящиеся к области высоких частот;

виброакустические, включающие в себя измерения уровней виброускорений и воздушного шума;

физико-химические измерения состава и свойств веществ и смесей веществ; сюда относятся определение содержания газов в смесях, анализ жидких растворов, содержание влаги в газах и жидкостях и т. п.

В данную классификацию не вошли многие другие измерения, редко встречающиеся на практике либо не встречающиеся в холодильной технике. Приведенная классификация по виду измеряемых величин достаточно строга. Однако ее часто заменяют более условной, но отражающей содержание испытаний и исследований.

Величины, измеряемые в ходе теплотехнических испытаний холодильного оборудования, в приведенной классификации сводят в одну расширенную группу. В эту группу входят тепловые измерения и часть механических, такие, как измерения давления, расхода и количества протекающих сред, уровня раздела сред. В данной работе будут изложены лишь те виды измерений, которые находят применение при испытаниях, наладке и эксплуатации холодильного оборудования. Группы линейно-угловых и виброакустических измерений не включены в материал книги, так как этот обширный материал может быть изучен по специальным пособиям.

По способу получения результатов различают измерения прямые и косвенные (существуют и другие типы измерений, например совместные и совокупные, которые практически в холодильной технике не встречаются).

Прямыми называют измерения, результаты которых получают непосредственно из наблюдений за показаниями приборов. Так, измерения температуры термометрами, давления — манометрами, расхода — ротаметрами являются прямыми.

Косвенными называют измерения, результаты которых получают расчетным путем на основании двух или нескольких прямых измерений. Так, величина холодопроизводительности машины является косвенно измеренной.

Пусть, например, холодопроизводительность определяют по формуле

$$Q = m_{\text{тн}} c_{\text{тн}} (t_{\text{тн1}} - t_{\text{тн2}}),$$

где Q — искомая холодопроизводительность, Вт; $m_{\text{тн}}$ — массовый расход теплоносителя, кг/с; $c_{\text{тн}}$ — удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°С); $t_{\text{тн1}}$ и $t_{\text{тн2}}$ — температуры на входе в испаритель и на выходе из него, °С.

Величины $m_{\text{тн}}$, $t_{\text{тн1}}$ и $t_{\text{тн2}}$ являются результатами прямых измерений расхода и температур.

По характеру изменений измеряемой величины различают измерения медленноменяющихся и быстроменяющихся величин.

Такое разделение в большой степени условное и имеет смысл для конкретных условий и задач. В холодильной технике, которая в основном имеет дело с объектами, обладающими значительной тепловой емкостью, а следовательно, и инерцией, основной объем измерений падает на установившиеся режимы с длительностью несколько минут и даже часов. Величины, которые могут находиться в установившемся состоянии столь длительное время и изменения которых от режима к режиму происходят за время тех же порядков, относят к медленноменяющимся.

Вместе с тем в холодильной технике существуют величины, изменения которых происходят периодически или непериодически за относительно малые промежутки времени, исчисляемые сотыми и тысячными долями секунды. К таким быстроменяющимся величинам относятся давление и температура в полостях сжатия компрессоров, пульсации давления в полостях и трубопроводах машин, перемещение элементов компрессоров (например, клапанных пластин), значения периодически изменяющегося момента вращения на валу компрессора, изменение частоты вращения и тока в цепи двигателя компрессора при его запуске и т. д. Значение измерений указанных быстроменяющихся величин достаточно велико.

При дальнейшем изложении материала под измерением будем понимать измерение медленноменяющейся величины, если быстрый характер изменений специально не оговорен.

1.2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Средство измерения — это техническое устройство, предназначенное для выполнения измерений и имеющее нормированные метрологические характеристики [34].

Средства измерений подразделяются на меры, приборы и преобразователи. В практике находят применение также измерительные системы.

Мера — это средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. К мерам относят такие средства, как гири (меры массы), резисторы (меры электрического сопротивления), сосуды (меры вместимости) и др. Учитывая ограниченное применение мер в практике измерений, ниже они специально не рассматриваются.

Измерительный прибор — это средство измерений, предназначенное для выработки измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительные приборы, которые непосредственно воспринимают измеряемую величину, называются приборами прямого, или непосредственного, отсчета. Измерительные приборы, воспринимающие измеряемую величину, предварительно преобразованную в другую величину, называются вторичными.

Различают измерительные приборы аналоговые и цифровые. В аналоговом приборе отсчет показаний производят по шкале, отражающей непрерывную зависимость между измеряемой величиной и перемещением отсчетного устройства. В цифровом приборе измерительная информация выдается с помощью цифрового отсчетного устройства.

Измерительные приборы могут быть показывающими, регистрирующими и комбинированными (показывающими и регистрирующими). Регистрация показаний может выполняться с помощью самопишущих или печатающих приборов.

Измерительный преобразователь — это средство измерений, предназначенное для выработки измерительной информации в форме, удобной для передачи и обработки. Разделяются измерительные преобразователи на первичные, промежуточные и передающие.

Первичным называют преобразователь, к которому подведена измеряемая величина. Иногда эти преобразователи называют датчиками.

Промежуточные и передающие преобразователи соответственно воспринимают сигналы, выработанные первичным преобразователем, и обеспечивают дистанционную передачу их.

Преобразователи бывают аналоговыми, если входной и выходной сигналы воспроизводятся в аналоговой форме, цифровыми (дискретными), если входной и выходной сигналы представляют собой последовательности импульсов (коды), а также аналого-цифровыми (вход аналоговый, выход цифровой) и цифроаналоговыми (вход цифровой, выход аналоговый).

Действующая в СССР государственная система приборов (ГСП) предусматривает стандартизованные электрические и пневматические сигналы.

В частности, аналоговые электрические сигналы встречаются в следующих основных формах:

в виде изменения взаимной индукции в пределах 0—10 мГ или 10—0—10 мГ;

в виде сигнала постоянного тока с пределами 0—5; 0—20 и 4—20 мА;

в виде сигнала напряжения постоянного тока с пределами 0—10 и 0—20 В.

Наиболее распространенным стандартным пневматическим сигналом является изменение давления в пределах от 0,02 до 0,1 МПа.

Измерительная система — это совокупность средств измерений, вспомогательных устройств и каналов связи, предназначенная для выработки, передачи и обработки измерительной информации. К таким системам относятся, в частности, измерительно-вычислительные комплексы, осуществляющие автоматический сбор и обработку экспериментальных данных.

Ниже перечисляются основные метрологические характеристики средств измерений.

Градуировочная характеристика, или статическая функция преобразования,— зависимость между значениями величин на выходе и входе средства измерения в установившемся состоянии, представляемая в табличной, графической или аналитической форме.

Начальное и конечное значения отсчетного устройства (шкалы или цифрового отсчетного устройства)— наименьшее и наибольшее значения измеряемой величины, указанные на шкале или воспроизводимые цифровым устройством.

Диапазон показаний — область, ограниченная начальным и конечным значениями отсчетного устройства.

Диапазон измерений (преобразований) — область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности.

Пределы (верхний и нижний) измерений — наибольшее и наименьшее значения диапазона измерений.

Абсолютная погрешность — разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины либо разность между значением измеряемой величины, полученной на выходе преобразователя с помощью градуировочной характеристики, и действительным ее значением на входе.

Относительная погрешность — отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины. Может выражаться дробью или в процентах.

Приведенная погрешность — отношение абсолютной погрешности к нормированному значению, например диапазону показаний или измерений.

Статическая погрешность — погрешность (абсолютная или относительная) при постоянной во времени входной величине.

Динамическая погрешность — составляющая погрешности, равная разности между погрешностью в динамическом режиме (при переменной входной величине) и статической погрешностью, соответствующей значению величины в данный момент времени.

Основная погрешность — погрешность при условиях работы, принятых за нормальные.

Дополнительная погрешность — изменение погрешности, вызванное отклонением одной или нескольких влияющих величин от значений, принятых за нормальные.

Предел допускаемой погрешности — наибольшая погрешность, при которой средство измерений может быть признано годным (понятие применимо для основной и дополнительной погрешностей).

Класс точности — обобщенная характеристика, определяемая пределами допускаемых погрешностей. В общем случае понятие класса точности устанавливается для каждого конкретного средства измерения его технической документацией. Однако в целом ряде случаев класс точности принимают численно равным пределу допускаемой приведенной погрешности относительно диапазона измерений.

Кроме приведенной классификации средства измерений разделяются по следующим основным признакам: назначению, виду измеряемой величины, числу пределов измерений.

По назначению средства измерений делятся на рабочие, образцовые и индикаторы.

Рабочие средства измерений в свою очередь разделяются на технические и лабораторные. Первые предназначаются для измерений в условиях эксплуатации холодильного оборудования, для контроля за ходом технологических процессов, работой систем автоматики, переналадки оборудования и средств автоматизации. Такие средства измерений имеют, как правило, невысокие точностные характеристики. По конструкции технические средства измерений приспособлены для установки на щитах, в шкафах и непосредственно на оборудовании.

Лабораторные средства измерений предназначаются для использования в научно-исследовательской практике, при испытаниях оборудования в стендовых условиях. Отличаются более высокими точностными характеристиками. Конструктивно выполняются обычно в переносном исполнении в основном для установки на лабораторных столах и стойках.

Образцовые средства измерений предназначаются для поверки рабочих средств или других менее точных образцовых в условиях специализированных измерительных лабораторий. По конструкции — это переносные приборы или стационарные установки.

По точностным характеристикам они выше остальных средств измерений. В некоторых случаях возникает необходимость использования в научно-исследовательских работах образцовых (по назначению) средств в качестве рабочих. Такая практика допускается. Однако при этом средство измерений считается не образцовым, а рабочим с соответствующей точностной характеристикой.

Индикаторами называют средства измерения, не имеющие нормированных точностных характеристик и служащие для ориентировочной оценки измеряемой величины.

По виду измеряемой величины средства измерений делятся в соответствии с классификацией измеряемых величин (см. выше).

Название они получают по наименованию измеряемой величины (например, манометр, расходомер, частотомер и т. п.), единицы физической величины (амперметр, вольтметр) либо по характерному признаку своего устройства (например, измерительный мост, термоанемометр).

Широко распространены комбинированные средства измерений, предназначенные для измерения разных величин. Так, в электротехнике применяют ампервольтметры, вольтомметры и др.

По числу пределов измерений различают одно-, двух- и многопредельные средства измерений. Однопредельные средства позволяют измерить величину, лежащую в интервале между верхним и нижним пределами измерений. В двух- и многопредельных средствах предусматриваются специальные устройства для переключения пределов, в результате чего расширяется диапазон измерений.

I.3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

I.3.1. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ

Любое средство измерения, как и совокупность этих средств, могут рассматриваться как некая измерительная цепь, состоящая из ряда соединенных между собой элементарных звеньев. В этом легко убедиться на примере простейшего измерительного прибора — манометра (рис. I—1, *а*). Чувствительным элементом манометра является пружина Бурдона *П*, свободный конец которой совершает перемещение x, зависящее от измеряемого давления p. Перемещение x через механизм передачи *М*, состоящий из тяги, сектора и трибки, сообщается стрелке *С*, которая, поворачиваясь на угол α, указывает по шкале значение измеряемой величины.

Работа средства измерения характеризуется функцией преобразования, общий вид которой $\alpha = f(p)$. Для анализа работы манометр можно представить в виде измерительной цепи, состоящей из двух звеньев: пружины *П* и механизма передачи *М* (рис. I—1, *б*).

Функцию преобразования звеньев можно представить в виде

$$l = f_{\text{п}}(p) \text{ и } \alpha = f_{\text{м}}(l),$$

а всего средства измерения — в виде

$$\alpha = f_{\text{м}}[f_{\text{п}}(p)].$$

Разделение на звенья может быть и иным, но, во всяком случае, таким, чтобы облегчить анализ сложной измерительной цепи. Упомянутая выше функция преобразования является обобщенной характеристикой измерительной цепи или ее элементов, так как связывает между собой входную и выходную величины. Статическая функция преобразования и ее параметры определяют свойства измерительной цепи или ее элемента в установившемся состоянии, т. е. при неизменном значении входной величины.

В условиях меняющейся входной величины проявляются динамические свойства средства измерения, которые определяют поведение цепи или ее элементов в переходных режимах, а также при воздействии на вход переменных, в частном случае периодических воздействий. Эти свойства описываются динамическими характеристиками.

I.3.2. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

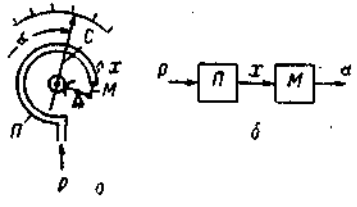


Рис. I—1. Измерительная цепь:
а — схема манометра; *б* — схема измерительной цепи

В настоящее время нет общепринятого перечня статических характеристик. Различные авторы [19, 53, 86, 90] рекомендуют разные характеристики. Приводимые ниже соображения приняты, исходя из специфических требований к измерениям в холодильной технике с учетом упомянутых рекомендаций. Целесообразно рассматривать идеальную статическую функцию преобразования и ее

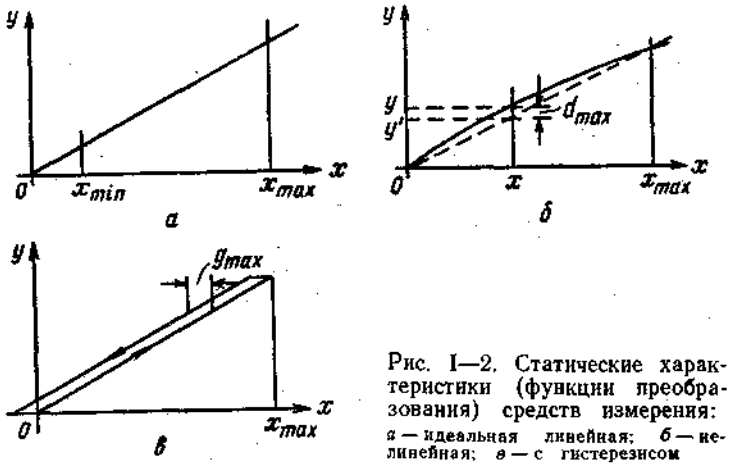


Рис. I—2. Статические характеристики (функции преобразования) средств измерения:
а — идеальная линейная; *б* — нелинейная; *в* — с гистерезисом

параметры, а также дефекты этой функции, вызывающие отклонения от идеальной.

В качестве идеальной рассмотрим **линейную функцию преобразования**

$$y = kx, \qquad \text{(I—1)}$$

график которой показан на рис. I—2, *а*. Здесь x — входная величина, y — выходная. Эту функцию характеризуют чувствительность и диапазон преобразования.

Чувствительность, или коэффициент преобразования k, показывает, какое изменение выходного сигнала вызывается изменением входного на одну единицу. Для линейной функции (I—1)

$$k = \Delta y / \Delta x.$$

Диапазон преобразования — это область входных величин, в пределах которой элемент или измерительная цепь обеспечивают реализацию функции преобразования. Диапазон ограничен верхним и нижним пределами преобразования $x_{\max}$ и $x_{\min}$. В частном случае $x_{\min}$ может быть равен нулю. Если в отличие от изображенной на рис. I—2, *а* функция преобразования заходит и в отрицательную область, то $x_{\min}$ может стать меньше нуля. Применительно к измерительным приборам величины $x_{\min}$ и $x_{\max}$ называют нижним и верхним пределами измерений, а область между ними — диапазон измерений.

В общем случае функция преобразования необязательно проходит через нулевую точку, и тогда ее уравнение имеет вид

$$y = kx + a. \qquad \text{(I—2)}$$

Из этого уравнения следует, что при нулевом значении входного сигнала $x=0$ выходной сигнал $y_0=a$, а нулевому выходному сигналу $y=0$ соответствует входной $x_0=a/k$.

Дефекты статической функции преобразования являются источниками погрешностей средств измерений. К ним относят нелиней-

ность функции преобразования, гистерезис, порог чувствительности, дрейф нуля.

Нелинейность функции преобразования, или отклонение функции от линейной, характеризует несоответствие фактической функции преобразования и идеальной модели. На рис. I—2, *б* сплошной линией показана функция преобразования, а пунктирной — ее идеальная (заданная) модель. Каждому значению входной величины соответствует разность между ними. Чем больше эта разность, тем больше нелинейность функции преобразования.

Принято нелинейность оценивать приведенным значением, т. е. отношением максимальной разности к диапазону преобразования. На графике максимальная разность имеет место при входном сигнале x: $d_{max}=y-y'$. Относительная приведенная нелинейность для случая $x_{min}=0$

$$n_d = (d_{max}/x_{max})\,100\%.$$

Гистерезис — это явление, вызывающее неоднозначность функции преобразования при увеличении и уменьшении входной величины. График (рис. I—2, *в*) иллюстрирует функцию преобразования с гистерезисом. Она имеет две ветви: восходящую и нисходящую, которые образуют замкнутую петлю. При увеличении x процесс идет по правой ветви, а при снижении — по левой. Переход с одной ветви на другую происходит при постоянном значении выходной величины. В пределах зоны, ограниченной ветвями характеристики, средство измерения теряет чувствительность ($k=0$), в связи с чем эта зона называется зоной нечувствительности.

Относительное приведенное значение гистерезиса определяется по максимальной ширине зоны:

$$n_g = (g_{max}/x_{max})\,100\%.$$

Применительно к измерительным приборам гистерезис выражается через вариацию показаний, которая определяется тем же способом.

Порог чувствительности в отличие от гистерезиса проявляется при изменении входного сигнала в одну сторону и выражается в том, что плавному изменению входной величины соответствуют ступенчатые изменения выходной. Минимальный прирост входной величины, вызывающий изменение выходной величины, называется порогом чувствительности и может выражаться в абсолютных значениях входной величины, а также в относительной форме:

$$n_s = (s/x_{max})\,100\%,$$

где s — абсолютное значение порога чувствительности.

Дрейф, или смещение нуля, приводит к соответствующему смещению функции преобразователя. Дрейф нуля задается в абсолютных или относительных единицах, отнесенных к контрольному промежутку времени (час, сутки и т. д.).

I.3.3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Задача средств измерений в условиях переменного входного сигнала состоит в воспроизведении сигнала с наименьшими искажениями [86]. В этом смысле функция преобразования линейного элемента (I—1)

$$y = k\,x$$

может рассматриваться как идеальная динамическая характеристика. Действительно, в нее не входят как аргументы время или частота. Следовательно, такой элемент или цепь в целом воспроизведут на выходе изменяющийся во времени входной сигнал без всяких искажений, какую бы форму он ни имел. Изменится лишь в k раз масштаб входного сигнала.

Динамический элемент, имеющий характеристику вида (I—1), называется усилительным или пропорциональным элементом.

Реальные средства измерений, измерительные цепи и их элементы вносят в измеряемую величину динамические искажения. В холодильной технике непосредственно с динамическими характеристиками измерительных цепей связаны измерения быстроменяющихся давлений и температур в полостях сжатия компрессоров, пульсаций давлений в полостях и трубопроводах.

I.3.3.1. Способы представления динамических характеристик

Динамические характеристики могут представляться в виде переходных характеристик, частотных характеристик и передаточных функций [14, 55].

***Переходная характеристика** — это аналитическое или графическое изображение поведения выходной величины во времени при изменении входной величины по заранее известному закону (чаще всего — в виде ступенчатой функции). В общем виде переходная характеристика имеет вид*

$$y = f_1(\tau) \text{ при } x = f_2(\tau),$$

где f_1 — искомая функция; f_2 — известная функция.

Переходную характеристику получают путем решения дифференциального уравнения или экспериментально.

Частотные характеристики — это зависимость амплитуды и фазы выходной величины от частоты входного гармонического сигнала.

Если на вход подавать гармонический сигнал

$$x(\tau) = X \sin\omega\tau, \qquad (I—3)$$

то на выходе будет иметь место сигнал

$$y(\tau) = Y \sin(\omega\tau + \varphi), \qquad (I—4)$$

частота которого ω останется той же, а амплитуда и фаза изменятся.

В векторной форме выражения (I—3) и (I—4) записываются в виде:

$$\bar{x}(\tau) = Xe^{j\omega\tau};$$
$$\bar{y}(\tau) = Y(\omega)e^{j[\omega\tau+\varphi(\omega)]},$$

где X и $Y(\omega)$ — модули векторов $\bar{x}(\tau)$ и $\bar{y}(\tau)$; ω — угловая частота сигналов; $\varphi(\omega)$ — угол сдвига фаз между векторами $\bar{x}(\tau)$ и $\bar{y}(\tau)$.

Векторы входного и выходного сигналов вращаются с одинаковой угловой частотой ω, но выходной вектор отстает от входного на угол $\varphi(\omega)$, зависящий от частоты. Кроме того, вектор $\bar{y}(\tau)$ имеет модуль $Y(\omega)$, зависящий от частоты.

Введем в рассмотрение отношение

$$W(j\omega) = \frac{\bar{y}(\tau)}{\bar{x}(\tau)} = \frac{Y(\omega)\, e^{j[\omega\tau+\varphi(\omega)]}}{Xe^{j\omega\tau}} = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)}. \qquad (1—5)$$

Выражение $W(j\omega)$ называется комплексной частотной характеристикой (КЧХ)*, а функции $K(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ — соответственно амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристиками.

Величина $W(j\omega)$ может быть представлена в полярных координатах в виде вектора с модулем $K(\omega)$, повернутого от начала отсчета на угол $\varphi(\omega)$. С изменением частоты конец вектора описывает кривую, называемую годографом. Годограф получают, рассчитывая $W(j\omega)$ для частот $\omega=0$, ω_1, ω_2, ω_3 и т. д. и соединяя полученные точки плавной кривой.

Для анализа удобно пользоваться характеристиками $K(\omega)$ и $\varphi(\omega)$, заданными отдельно. Эти характеристики могут рассчитываться или определяться экспериментально и задаваться в виде аналитических функций или графиков. Частотные характеристики идеального средства измерения представляют собой прямые параллельные оси $\omega[K(\omega)=\text{const},\ \varphi(\omega)=0]$.

Значительные удобства представляют в ряде случаев логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ):

$$b(\omega) = 20\lg K(\omega).$$

Величина b, называемая затуханием, выражается в децибелах (дБ).

Одной из важных особенностей частотных характеристик является возможность их экспериментального определения, что широко используется в измерительной технике. Для того чтобы найти АЧХ и ФЧХ какого-либо элемента, необходимо определить диапазон рабочих частот и выбрать некоторое число фиксированных частот в этом диапазоне. На каждой из частот проводят опыт, подавая на вход синусоидальный сигнал с амплитудой X и регистрируя выходную амплитуду Y и разность фаз φ между этими сигналами. Полученные значения позволяют построить зависимости $K(\omega)$ и $\varphi(\omega)$.

Частотные характеристики относятся только к условиям установившихся колебаний.

Передаточные функции — наиболее обобщенный вид динамической характеристики, представляющий собой отношение преобразованных, по Лапласу, выходного и входного сигналов:

$$W(p) = Y(p)/X(p).$$

Формально передаточная функция получается из комплексной частотной характеристики заменой мнимого аргумента $j\omega$ на комплексный $\alpha+j\omega$. Такая характеристика относится ко всем режимам, в том числе и к неустановившимся процессам.

* В литературе по автоматическому управлению и регулированию эту величину часто называют амплитудно-фазовой характеристикой (АФХ).

В отличие от переходной и частотной характеристик передаточная функция не может быть получена прямым экспериментом. Ее определяют путем анализа дифференциальных уравнений, а также по таблицам типовых функций.

Удобство анализа с помощью передаточных функций состоит в том, что при этом оперируют достаточно простыми алгебраическими уравнениями.

Выбор динамической характеристики зависит от поставленных задач, а также от вида сигналов, поступающих на вход средства измерения. При измерениях, встречающихся в холодильной технике, приходится иметь дело с периодическими и непериодическими сигналами. Поэтому удобными оказываются частотные и переходные характеристики.

I.3.3.2. Типовые динамические характеристики

Анализ динамических характеристик средств измерений целесообразно производить, расчленяя эти средства на отдельные элементы и находя те из них, которые являются определяющими.

Для удобства пользуются типовыми динамическими характеристиками. Ниже рассматриваются некоторые элементы, обладающие типовыми характеристиками: апериодический, колебательный, дифференцирующий и элемент чистого запаздывания.

Апериодический элемент 1-го порядка. Примером апериодического элемента 1-го порядка может служить термопреобразователь сопротивления TC (термометр сопротивления), упрощенная схема которого показана на рис. I—3, *а*. Как известно, сопротивление

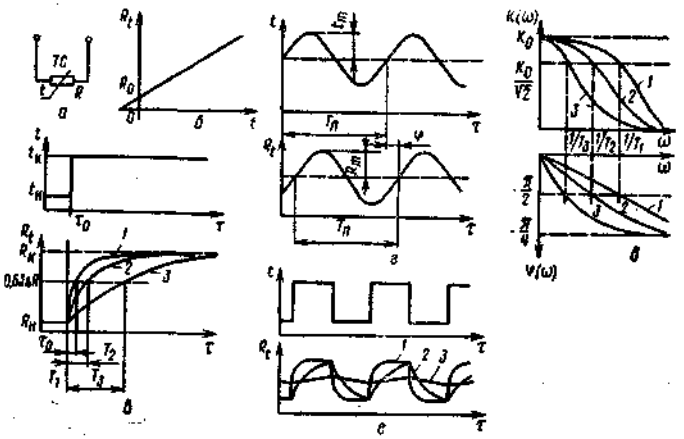


Рис. I—3. Динамические характеристики апериодического элемента 1-го порядка (термопреобразователь сопротивления):

а — схема преобразователя; *б* — статическая характеристика; *в* — переходные характеристики; *г* — воспроизведение синусоидального сигнала; *д* — частотные характеристики; *е* — воспроизведение периодических прямоугольных импульсов

такого преобразователя зависит от окружающей температуры t и вычисляется по формуле

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \qquad (I-6)$$

где R_t — сопротивление при температуре t; R_0 — сопротивление при 0 °С; α — термический коэффициент сопротивления материала преобразователя.

Уравнение (I—6) представляет собой статическую функцию преобразования вида (I—2), причем коэффициент преобразования

$$k_0 = \alpha R_0.$$

Статическая характеристика (I—6) представляет собой прямую в координатах R_t, t, проходящую через точку (R_0, O), график которой показан на рис. I—3, *б*.

Проведем следующий опыт. Установим некоторое начальное значение температуры $t_н$ и выдержим его до полного установления начального сопротивления $R_н$ (рис. I—3, *в*). Установившийся процесс изображен в виде прямых, параллельных оси времени на нижнем и верхнем графиках. В момент времени τ_0 скачкообразно повысим температуру до значения $t_к$ (это можно осуществить, если быстро перенести TC из одного термостата с $t = t_н$ в другой — с $t = t_к$).

Из-за конечного значения коэффициента теплопередачи от среды к TC и его внутренней тепловой емкости температура, а следовательно, и сопротивление не могут изменяться скачкообразно.

Приближенно процесс изменения сопротивления R_t (Ом) во времени в таком элементе описывается уравнением

$$R_t = R_н + \Delta R\left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right), \qquad (I-7)$$

где τ — время, отсчитываемое от момента скачка τ_0, с; T — постоянная времени, характеризующая скорость протекания процесса, с;

$$T = C/kA.$$

Здесь C — теплоемкость преобразователя, Дж/°С; kA — произведение коэффициента теплопередачи на площадь поверхности, Вт/(м²·°С); $\Delta R = R_к - R_н$, Ом; $R_к$ — конечное значение сопротивления по формуле (I—6).

На нижнем графике (см. рис. I—3, *в*) показан ход изменения сопротивления для трех значений постоянной времени. Численно эта постоянная равна отрезку времени от момента скачка до момента, когда величина R_t пройдет 63% разности ΔR.

Один и тот же преобразователь может иметь различные постоянные времени, если помещать его в среды с разными коэффициентами теплоотдачи. Кривая *1* с постоянной времени T_1 соответствует среде с наибольшей теплоотдачей. Изменение сопротивления, характеризуемое кривыми *2* и *3* (T_2 и T_3), при меньших коэффициентах теплоотдачи происходит значительно медленнее.

Величина R_t [см. формулу (I—7)] приближается асимптотически к конечному значению $R_к$. Поэтому время полного установления процесса стремится к бесконечности. Часто пользуются временем 99%-ного приближения (недоход на 1%). Подставляя соответствующие значения в (I—7), нетрудно вычислить постоянную времени: $T \approx \tau_{99}/4{,}6$. Здесь ($\tau_{99}$ — время 99%-ного приближения).

График (см. рис. I—3, *в*) и выражение (I—7) представляют собой переходную характеристику термопреобразователя сопротивления при скачкообразном изменении температуры.

Динамические свойства рассматриваемого термопреобразователя сопротивления можно выразить через частотные характеристики.

Для экспериментального получения частотных характеристик входную величину — в нашем случае температуру — надо изменять по синусоидальному закону. Технически это достаточно сложно, поэтому ограничимся лишь физической картиной эксперимента.

Пусть температура изменяется периодически по синусоидальному закону (рис. I—3, *г*):

$$t = t_m \sin\omega\tau. \qquad (I-8)$$

Это вызовет вынужденные колебания сопротивления преобразователя:

$$R_t = R_m \sin(\omega\tau - \varphi). \qquad (I-9)$$

В формулах (I—8) и (I—9) ω — угловая частота колебаний, рад/с. При этом $\omega = 2\pi f = 2\pi/T_п$; f — частота колебаний, Гц; φ — угол сдвига фаз между колебаниями температуры и сопротивления, рад; $T_п$ — период колебаний, с; R_m и t_m — амплитудные значения сопротивления и температуры.

Из графиков и формул видно, что выходная величина $R(t)$ изменяется синхронно с входной t, однако имеет место отставание выходной величины по фазе на угол φ.

Если при неизменной амплитуде t_m изменять угловую частоту ω (или период $T_п$), то окажется, что амплитуда R_m и фазовый угол φ выходного сигнала будут изменяться. Как говорилось выше, зависимости этих величин от частоты называются частотными характеристиками. Воспользуемся принятыми в (I—5) обозначениями и запишем выражение для амплитудно-частотной характеристики

$$K(\omega) = R_m(\omega)/t_m.$$

Фазочастотную характеристику обозначим $\varphi(\omega)$. На графиках (рис. I—3, *д*) показаны АЧХ и ФЧХ для преобразователя с тремя постоянными времени: T_1, T_2 и T_3.

Видно, что с ростом частоты $K(\omega)$ плавно уменьшается от K_0 *до нуля, а* $\varphi(\omega)$ увеличивается от 0 до $-\frac{\pi}{2}$ (здесь K_0 — коэффициент передачи при нулевой частоте). При этом чем меньше постоянная времени, тем более широкую полосу частот охватывает характеристика. Частота, при которой $K(\omega) = K_0\sqrt{2}$, а $\varphi(\omega) = -\pi/4$, называется граничной.

В данном случае

$$\omega_{г1} = \frac{1}{T_1}, \qquad \omega_{г2} = \frac{1}{T_2}, \qquad \omega_{г3} = \frac{1}{T_3}.$$

Амплитудно-фазочастотные характеристики могут быть найдены аналитически:

$$\left.\begin{aligned} K(\omega) &= \frac{K_0}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}; \\ \varphi(\omega) &= -\operatorname{arctg}\omega T. \end{aligned}\right\} \qquad (I-10)$$

Формулы (I—10) позволяют найти частотные характеристики, используя для этого параметры переходных характеристик.

В некоторых случаях, например при измерениях быстроменяющихся температур в цилиндрах компрессоров, преобразователь оказывается под воздействием периодически меняющейся температуры. Можно ожидать, что в силу своих инерционных свойств преобразователь будет вносить искажения, которые тем больше, чем более круто изменяется температура во времени. Предельным случаем является последовательность прямоугольных импульсов (рис. I—3, *е*). График показывает, что наименьшие искажения вызывает преобразователь с малой постоянной времени (кривая *1*). При больших T имеют место очень сильные искажения (линия *3*).

В заключение запишем передаточную функцию апериодического элемента 1-го порядка:

$$W(p) = K_0/(Tp + 1),$$

здесь символ p — оператор Лапласа.

Частотная характеристика колебательного элемента приведена на рис. I—4.

Пример 1. Термометром (Тм) измеряют температуры t_1 и t_2 жидкостей в двух сосудах, перенося термометр из одного сосуда в другой. Необходимо рассчитать время, в течение которого показание термометра приблизится к измеряемой температуре и будет отличаться от нее не более чем на 0,1 °С.

Пусть $t_1 = 0$ °С, $t_2 = 20$ °С, постоянная времени $T = 20$ с. Примем, что время переноса термометра и изменения его температуры в процессе переноса малы и ими можно пренебречь.

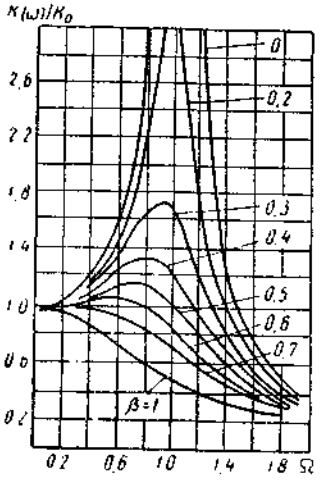


Рис. I—4. Частотные характеристики колебательного элемента

По аналогии с (I—7)

$$t_{тм} = t_1 + (t_2 - t_1)(1 - e^{-\tau/T}).$$

По условию $t_2 - t_м \leqslant 0{,}1$ °С; $t_2 - t_1 = 20$ °С.

После несложных преобразований получаем

$$(t_2 - t_{тм})(1/20) = e^{-\tau/T}, \text{ или}$$
$$0{,}1/20 = 0{,}05 = e^{-\tau/T}.$$

Воспользовавшись таблицами показательных функций, или путем логарифмированная находим $\tau/T = 5{,}3$, откуда $\tau = 5{,}3T = 106$ с. Условие задачи будет выполнено, если отсчет температуры будет произведен не ранее чем через 106 с после переноса термометра.

Пример 2. Малоинерционным термопреобразователем температуры с постоянной времени $T = 10^{-2}$ с измеряют колебания температуры. Необходимо определить, при какой частоте синусоидальные колебания будут воспроизводиться с амплитудой, уменьшенной на 10% по сравнению с нулевой частотой.

Воспользуемся формулой (I—10), подставив в нее $K(\omega) = 0{,}9K_0$ и $T = 10^{-2}$ с:

$$0{,}9 = \frac{1}{\sqrt{1 + 10^{-4}\omega^2}},$$

откуда $\omega \sim 0{,}5 \cdot 10^2$ рад/с, а частота $f = \omega/2\pi = 0{,}5 \cdot 10^2/2\pi = 8$ Гц Следовательно, условие уменьшения амплитуды будет выполнено при частоте не выше 8 Гц.

Колебательный элемент 2-го порядка. Примером колебательного элемента может служить металлическая мембрана, жестко закрепленная по периметру. Отличительным свойством такого элемента являются свободные колебания: если приложить к мембране кратковременную возмущающую силу, то в ней возникают свободные затухающие колебания с определенной частотой, называемой собственной. При вынужденных колебаниях, например при воздействии периодически изменяющегося давления, амплитуда зависит от частоты.

Амплитудно-частотная характеристика колебательного элемента записывается в виде

$$K(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\Omega^2}}, \qquad (I—11)$$

где $K(\omega)$ — коэффициент передачи при угловой частоте ω (или при частоте f); K_0 — коэффициент передачи при нулевой частоте; Ω — относительная частота,

$$\Omega = \omega/\omega_0 = f/f_0.$$

Здесь $\omega_0 = 2\pi f_0$ — собственная угловая частота свободных колебаний; β — степень успокоения, или относительное затухание.

Характерным режимом колебательного элемента является резонанс, при котором $\Omega \approx 1$ ($\omega \approx \omega_0$), а $K(\omega) \approx K_0/2\beta$. При резонансе амплитуда колебаний может резко возрастать. На графике (рис. I—4) показаны амплитудно-частотные характеристики колебательного элемента при различных значениях затухания. При резонансе наблюдается подъем характеристики, тем более резкий, чем меньше величина β.

При использовании колебательных элементов для измерения сигналов с широким спектром частот и во избежание искажений стремятся работать при частотах, меньших, чем резонансная частота. Если обозначить $\gamma = K(\omega)/K_0$, то, воспользовавшись формулой (I—11), можно определить максимальную частоту сигнала, при которой повышение амплитуды будет не больше заданной. Приближенно выражение имеет вид

$$f = f_0\sqrt{(1 - 1/\gamma^2)/2(1 - 2\beta^2)}. \qquad (I—12)$$

Из теории известно, что при $\beta = 0{,}707$ амплитудно-частотная характеристика не имеет резонансного подъема и с точки зрения воспроизведения сигнала является наиболее благоприятной.

Пример. Собственная частота свободных колебаний мембраны $f_0 = 10$ кГц. Относительное затухание $\beta = 0{,}3$. Определить предельную частоту синусоидальных колебаний давления, при которой ре-

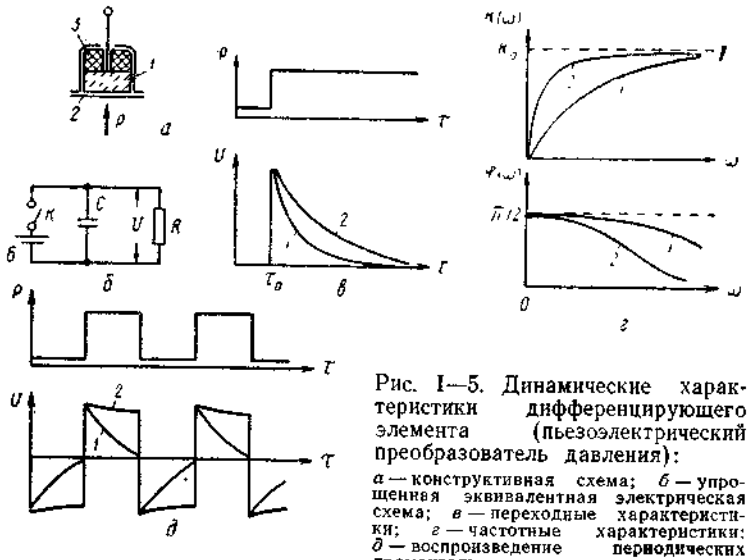


Рис. I—5. Динамические характеристики дифференцирующего элемента (пьезоэлектрический преобразователь давления):

а — конструктивная схема; *б* — упрощенная эквивалентная электрическая схема; *в* — переходные характеристики; *г* — частотные характеристики; *д* — воспроизведение периодических прямоугольных импульсов

зонансный подъем превышает коэффициент передачи при нулевой частоте не более чем на 10%, т. е. $\gamma = 1{,}1$.

По формуле (I—12) найдем

$$f = 10 \cdot 10^3 \sqrt{(1-1/1{,}1^2)/2(1-2\cdot 0{,}3^2)} = 3{,}2 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

Следовательно, мембрана передает колебания давления с заданными условиями в диапазоне частот от 0 до 3,2 кГц.

Дифференцирующий элемент. Типичным представителем измерительного устройства с дифференцирующими свойствами является преобразователь (датчик) давления с пьезоэлектрическим чувствительным элементом (рис. I—5, *а*). Такие элементы изготовляют из кристаллического кварца или пьезокерамики.

Чувствительный элемент *1* (кварц или пьезокерамика) помещается между разделительной мембраной *2* и изолирующим упором *3*. Если сжимать чувствительный элемент, то между его гранями (в данном случае — верхней и нижней) возникает электрический заряд, пропорциональный приложенной силе.

В идеальном дифференцирующем элементе скачкообразное входное воздействие вызывает появление на выходе импульса напряжения бесконечно большой высоты и бесконечно малой длительности.

Пьезоэлектрический элемент не является идеальным. Как следует из упрощенной эквивалентной схемы (рис. I—5, *б*), создаваемый пьезоэлементом заряд накапливается в емкости C. Величина заряда имитируется определенным временем замыкания ключа K, через который ток от источника $Б$ течет в конденсатор, заряжая его до напряжения $U = q/C$, $q = \int i d\tau$. Поскольку зарядка емкости происходит через малое (в данном случае — нулевое) сопротивле-

ние, временем нарастания напряжения можно пренебречь. После передачи в емкость заряда ключ размыкается и начинается разряд емкости через сопротивление утечки $R_у$ (это сопротивление включает параллельно соединенные внутренние утечки, входные сопротивления воспринимающей аппаратуры и т. д.). Чем меньше величина $R_у$, а следовательно, и постоянная времени $T = R_у C$, тем быстрее происходит разряд.

Процесс воспроизведения ступенчатого изменения давления показан на рис. I—5, *в*. Кривая *1* соответствует случаю малого сопротивления утечки (малой постоянной времени T), кривая *2* — большому сопротивлению (большой постоянной времени). Эти кривые, представляющие собой переходные характеристики, свидетельствуют о том, что, варьируя параметры преобразователя, можно существенно изменить динамические характеристики преобразователя. Вместе с тем принципиальную особенность его, а именно невозможность передать постоянную составляющую, устранить невозможно. Это иллюстрируется частотными характеристиками (рис. I—5, *г*). Амплитудно-частотная характеристика показывает, что при частоте $\omega = 0$ коэффициент преобразования $K(\omega) = 0$.

Графики (рис. I—5, *д*) иллюстрируют воспроизведение периодических прямоугольных импульсов преобразователем с малой (*1*) и большой (*2*) постоянной времени цепи утечки. Видно, что при относительно малой T имеют место очень сильные искажения сигнала. При больших T искажения заметно уменьшаются.

Другими словами, рассмотренный преобразователь хорошо воспроизводит сигналы достаточно высокой частоты, при снижении частоты коэффициент преобразования падает вплоть до нуля при постоянном сигнале.

Передаточная функция рассмотренного элемента имеет вид

$$W(p) = K_0 p/(T_p + 1),$$

а амплитудно-частотная характеристика

$$K(\omega) = \frac{K_0 \omega \sqrt{1+\omega^2 T^2}}{1+\omega^2 T^2}.$$

Элемент чистого запаздывания. Примером элемента чистого запаздывания может служить соединительный канал K между источником давления и входом преобразователя $П$ (рис. I—6, *а*). Если давление на входе в канал обозначить p_1, а на выходе — p_2, то любое изменение давления на входе будет воспроизведено на выходе через определенный промежуток времени, называемый чистым, или транспортным, запаздыванием. При этом предполагается, что сама измеряемая величина передается без всяких искажений.

График (рис. I—6, *б*), представляющий собой переходную характеристику, иллюстрирует действие элемента запаздывания. В момент времени τ_0 давление p_1 на входе скачкообразно изменяется от $p_н$ до $p_к$. Через время чистого запаздывания $\tau_д$ аналогичный скачок произойдет на выходном конце.

На рис. I—6, *в* показано прохождение периодических прямоугольных импульсов через элемент запаздывания. Форма и высота импульсов не изменяются. Происходит лишь сдвиг по времени на величину $\tau_д$.

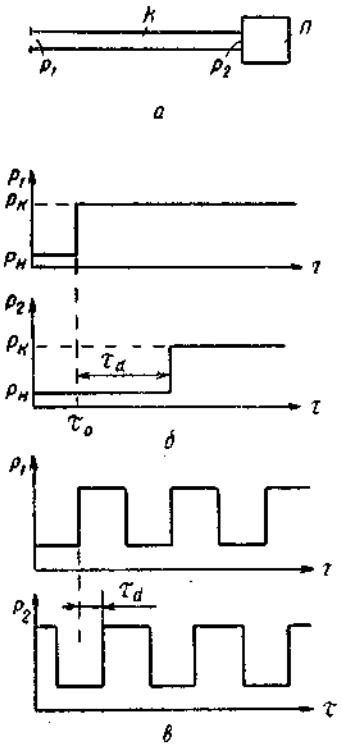


Рис. I—6. Динамические характеристики элемента запаздывания:

а — схема; *б* — переходная характеристика; *в* — воспроизведение периодических прямоугольных импульсов

Передаточная функция элемента запаздывания имеет вид

$$W(p) = e^{-p\tau d}.$$

I.3.3.3. Динамические характеристики измерительных цепей

На основании динамических характеристик отдельных элементов можно составить динамическую характеристику всей измерительной цепи.

Для этого удобно воспользоваться передаточными функциями, применяя простые правила. Если элементы соединены последовательно, их общая передаточная функция равна произведению передаточных функций элементов:

$$W(p) = W_1(p)\,W_2(p) \ldots W_N(p).$$

Передаточная функция параллельно включенных элементов равна сумме передаточных функций элементов:

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) + \ldots + W_N(p).$$

Пример. Измерительная цепь составлена из трех последовательных элементов:

пьезоэлектрического датчика давления с передаточной функцией

$$W_1(p) = K_1 p/(T_1 p + 1);$$

усилителя

$$W_2(p) = K_2;$$

магнитоэлектрического гальванометра (шлейфа) осциллографа

$$W_3(p) = K_3/(T_3 p + 1).$$

Пользуясь указанным правилом, находим общую передаточную функцию

$$W(p) = \frac{K_1 K_2 K_3 p}{(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)}.$$

Для получения частотных характеристик необходимо заменить оператор p на $j\omega$ и далее, пользуясь правилами преобразования, найти амплитудно- и фазочастотные характеристики (см., например, [14]).

I.4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение считается завершенным, если определен его результат и произведена оценка точности [24]. В связи с этим процесс измерения можно условно расчленить на следующие этапы:

проведение наблюдений и определение их результатов; на этом этапе отсчитывают показания средств измерений, производят их первичную оценку и обработку, находят результат наблюдений;

определение результата измерений путем обработки результатов наблюдений;

оценка точности выполненного измерения путем вычисления погрешностей.

В некоторых случаях этапы могут совмещаться и видоизменяться.

I.4.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Основой измерений являются наблюдения, которые осуществляются персоналом или автоматическими устройствами.

Если для проведения одного измерения производят одно наблюдение, то такой метод измерений называется методом однократных наблюдений. При однократных наблюдениях результат измерения равен результату наблюдения, т. е. $X = x_н$.

Измерение дополняется оценкой точности, которая должна быть не хуже, чем определено требованиями.

В практике испытаний и исследований, где требуется более высокая точность, прибегают к нескольким наблюдениям для проведения одного измерения. Такой метод называется методом многократных наблюдений. С помощью этого метода удается учесть влияние некоторых случайных факторов. При многократных наблюдениях результат наблюдений, результат измерения, а также оценку точности получают методами статистической обработки случайных величин.

Существует также промежуточный метод, когда для исключения грубых ошибок и повышения надежности измерений выполняют несколько наблюдений, однако дальнейшую обработку проводят без применения статистических методов.

Мерой оценки точности измерения является погрешность. Погрешность характеризует отклонение измеренного значения некоторой величины от ее истинного (действительного) значения. Следует различать погрешность измерений, получаемую как результат обработки экспериментальных наблюдений, и нормированную погрешность средства измерения, являющуюся его технической характеристикой [22]. Эти погрешности могут совпадать только в отдельных, частных случаях.

Абсолютной погрешностью называется разность

$$\Delta x = x - X,$$

где x — истинное значение; X — результат измерения.

Абсолютная погрешность выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина.

Относительной погрешностью измерения называется отношение

$$\delta_x = \Delta x/x, \qquad (I—13)$$

или в процентах

$$\delta_x = (\Delta x/x)\cdot 100\%. \qquad (I—14)$$

В соответствии с делением измерений погрешности подразделяют на статические и динамические. Ниже под термином «погрешность» будет подразумеваться статическая погрешность. В тех случаях, когда под термином «погрешность» подразумевается динамическая погрешность, это будет специально оговариваться.

По своей природе погрешности бывают систематическими и случайными.

Систематическими называют погрешности, которые могут быть заранее обнаружены или предсказаны и которые принципиально могут быть исключены или уменьшены специальными мерами. Систематические погрешности, которые действуют в процессе измерения, называются неисключенными.

Случайными называют непредвиденные погрешности, которые могут быть выявлены только статистической обработкой многократных наблюдений. Частным случаем случайных погрешностей являются грубые ошибки наблюдений, которые выявляются при первичной обработке данных и затем отбрасываются.

Поскольку точное значение погрешности обычно не известно, пользуются понятием границы погрешности, т. е. предельной величиной, больше которой (без учета знака) погрешность быть не может.

Если погрешность определяется методом статистической обработки, то пользуются понятием доверительной границы погрешности, которая обозначает, что погрешность не выйдет за границу с доверительной вероятностью, равной заданной.

I.4.2. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

I.4.2.1. Классификация систематических погрешностей

В зависимости от **источника** возникновения систематические погрешности подразделяются на следующие основные группы:

инструментальные, которые свойственны средствам измерений и являются следствием дефектов их статических характеристик;

методические, возникающие из-за несовершенства методики измерения либо из-за несоответствия методики поставленной задаче;

субъективные, вызванные ошибками наблюдателя при отсчете показаний (небрежность, параллакс, ошибка при интерполяции).

В данном параграфе будут рассмотрены в основном инструментальные погрешности. Методические погрешности и методы их устранения рассматриваются в соответствующих главах, посвященных конкретным видам измерений.

Субъективные погрешности устраняются точным выполнением инструкций и методических указаний и потому в особых пояснениях не нуждаются.

В зависимости от характера систематические погрешности подразделяются на обнаруживаемые и необнаруживаемые.

Обнаруживаемые систематические погрешности в свою очередь подразделяются на постоянные и переменные.

К постоянным относят погрешности, возникающие из-за неточностей в градуировке средства измерения, т. е. из-за отклонения фактической функции преобразования от номинальной. К постоянным также относят некоторые методические погрешности, величина которых не зависит от условий выполнения измерений.

К переменным относятся погрешности, возникающие из-за изменения внешних условий (нестабильность источников электропитания, изменения окружающей температуры, атмосферного давления, влажности, действия внешних полей и т. д.).

Необнаруживаемые систематические погрешности могут быть предсказаны либо выявлены при обработке результатов измерений. Появление необнаруживаемых заранее погрешностей может быть связано с недостаточной информацией о характеристиках средств измерений, с неучтенными методическими погрешностями, а также с субъективными ошибками наблюдений.

I.4.2.2. Методы определения и уменьшения систематических погрешностей

Определение постоянных погрешностей. В основном этот вопрос касается инструментальных погрешностей средств измерений, которые характеризуются функцией преобразования, или градуировочной характеристикой с нормированными погрешностями. Нормированная погрешность является паспортной характеристикой средства измерения и может быть задана в виде абсолютной, относительной или приведенной погрешности. Если средство измерения исправно, соответствует предъявляемым к нему требованиям и эксплуатируется в нормальных условиях, его погрешность не должна выходить за установленные границы. Для поддержания средства измерения в рабочем состоянии и контроля за его фактическими погрешностями оно подвергается периодическим поверкам.

Средства измерений, поверка которых подтвердила, что фактические погрешности не превышают граничных значений, признаются годными для эксплуатации. Средства, имеющие погрешности выше заданных, из эксплуатации выводятся как непригодные и направляются в ремонт либо списываются.

В некоторых случаях, например при изготовлении нестандартизованных средств или при желании сузить пределы допустимой систематической погрешности, их подвергают индивидуальным градуировкам. Градуировки выполняют в соответствии с принятыми методиками и с применением соответствующих образцовых приборов.

Индивидуальная градуировка оформляется в виде градуировочных таблиц, графиков или аналитических функций либо в виде таблиц или графиков поправок к действующей градуировке. Средство измерения с индивидуальной градуировкой имеет собственную нормированную погрешность, зависящую от точности образцового средства, метода градуировки и рассчитываемую по соответствующим правилам.

Пределы допустимых погрешностей средств измерений (паспортные или индивидуальные) должны рассматриваться как границы основной неисключенной систематической погрешности.

Определение и уменьшение переменных погрешностей. Эти погрешности, как было показано выше, возникают из-за изменений условий эксплуатации средств измерений.

Для определения всех составляющих переменных погрешностей проводят специальные эксперименты, в которых поочередно меняют каждую из влияющих величин в заданных пределах. Эти погрешности задаются в абсолютной или относительной форме; обычно их относят к определенному диапазону изменения влияющей величины (например, дополнительная приведенная погрешность не превышает 0,2% на каждые 10 °С изменения окружающей температуры от 20 °С).

Уменьшить переменные погрешности можно, устраняя или уменьшая изменения внешних условий. Для этой цели используют стабилизацию питающего напряжения, термостабилизацию, экранирование от внешних полей, амортизацию и другие меры. Пределы неустраненных переменных погрешностей должны рассматриваться как границы дополнительной неисключенной погрешности.

Выявление и уменьшение влияния необнаруживаемых погрешностей. Единственным путем выявления необнаруживаемых систематических погрешностей является проведение измерений двумя или несколькими независимыми методами, обладающими приблизительно одинаковыми постоянными и переменными систематическими погрешностями. При нескольких методах измерений сравнивают их результаты, отбрасывают тот из них, который грубо отличается от остальных. По оставшимся определяют среднее арифметическое, которое принимают за окончательный результат измерения. Вероятная погрешность измерения может быть определена методом, применяемым для расчета случайных погрешностей. Если используются два независимых метода (этот способ наиболее распространен в холодильной технике), то грубое расхождение между результатами указывает на наличие в одном из каналов измерений недопустимой систематической погрешности. Измерительные каналы должны быть исправлены и измерения повторены.

Если грубых расхождений нет, то за окончательный результат измерения следует принять среднее арифметическое результатов двух независимых измерений. Бывают случаи, когда рассчитанные заблаговременно систематические погрешности принятых двух методов неравноценны, тогда сравнение результатов позволяет выявить лишь грубые погрешности, а результатом измерения следует считать (при отсутствии грубых расхождений) результат, полученный более точным методом.

I.4.3. СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Случайные погрешности могут быть определены, если результаты получаются на основании многократных наблюдений величины, значение которой не изменяется в течение всего процесса измерений. Данное условие является важным, так как при его несоблюдении случайными окажутся не только результаты измерений, но и сама измеряемая величина. С достаточным основанием можно принять [8, 19, 90], что при числе наблюдений 20 и более распределение случайных величин происходит по нормальному закону, а при числе наблюдений меньше 20 — по распределению Стьюдента.

I.4.3.1. Определение грубых ошибок

Грубые ошибки определяют на основании обработки результатов наблюдений. Пусть выполнено n наблюдений.

Среднее арифметическое значение результатов наблюдения находят по формуле

$$\bar{X}_n = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \qquad (I—15)$$

где x_i — результаты наблюдений.

Среднее квадратическое отклонение результата наблюдений определяют по формуле

$$\sigma(\bar{X}_n) = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\bar{X}_n - x_i)^2}. \qquad (I—16)$$

Принято считать, что результаты наблюдений, для которых выполняется условие

$$\bar{X}_n - x_i \geqslant 3\sigma, \qquad (I—17)$$

считаются грубыми ошибками и из дальнейших расчетов исключаются.

Результатом измерения при многократных наблюдениях является среднее арифметическое результатов наблюдений, за исключением грубых ошибок [26]:

$$\bar{X}_m = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} \bar{x}_i, \qquad (I—18)$$

где m — число наблюдений после исключения грубых ошибок.

I.4.3.2. Определение доверительных границ случайных погрешностей измерения

В соответствии с [26] для определения доверительных границ погрешности измерения доверительную вероятность принимают равной 0,95.

Доверительная граница абсолютной случайной погрешности находится по формуле

$$\Delta x_{сл} = t\sigma(\bar{X}_m), \qquad (I—19)$$

где t — коэффициент Стьюдента, который для вероятности 0,95 приведен в табл. I—1; $\sigma(\bar{X}_m)$ — среднее квадратическое отклонение результата измерения.

Таблица I—1. ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА t ДЛЯ $P=0{,}95$

m	t	m	t	m	t
2	12,71	9	2,31	17	2,12
4	3,18	10	2,26	19	2,10
5	2,78	11	2,23	21	2,09
6	2,57	13	2,18		
7	2,45	15	2,14		
8	2,36				

Среднее квадратическое отклонение результата измерения находят из выражения

$$\sigma(\bar{X}_m) = \sqrt{\frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^{m} (\bar{X}_m - x_i)^2}. \qquad (I—20)$$

Значения коэффициентов t для нормального распределения и для других значений доверительной вероятности можно найти в соответствующей литературе (см., например, [65]).

I.4.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И СУММАРНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ

Измеряемая величина может быть представлена в виде суммы

$$x = X \pm \Delta x_\Sigma = X(1 \pm \delta_\Sigma), \qquad (I—21)$$

где X — результат измерения; Δx_Σ — граница суммарной абсолютной погрешности; δ_Σ — граница суммарной относительной погрешности.

Задача состоит в том, чтобы уметь найти результат измерения и границы суммарных погрешностей для любого случая измерения.

I.4.4.1. Нахождение результатов измерений

Рассмотрим методы нахождения результатов прямых и косвенных измерений при одно- и многократных наблюдениях.

Простейший случай — **прямое измерение с однократным наблюдением** — иллюстрируется схемой (рис. I—7, *а*). Измеряемая величина воспроизводится средством измерения СИ и выдается в виде наблюдаемого значения $x_н$. В данном случае это значение и есть результат измерения ($X = x_н$).

Если производится **прямое измерение с многократными наблюдениями** (рис. I—7, *б*), то в расчет принимают n наблюдений на выходе средства измерения *СИ*. Вначале над ними производится операция *I* выделения грубых ошибок по вышеприведенным формулам (I—15), (I—16), (I—17). Грубые ошибки $x_{гр}$ отбрасываются. Для оставшихся m наблюдений находят среднее арифметическое $\bar{X}_m$ (операция *II*) по формуле (I—18), которое является результатом измерения.

Для малого числа наблюдений (до 3—5) операцию *I* выполняют без анализа среднего квадратического отклонения путем простой сравнительной оценки результатов наблюдений. Критерии оценки задают в каждой конкретной методике измерений.

Косвенное измерение состоит в том, что измеряемую величину находят расчетом по определенным формулам, в которые входят результаты прямых измерений двух или нескольких величин (например, для измерения холодопроизводительности компрессора необходимо измерить температуру, расход, давление, которые затем подставляются в соответствующую формулу).

Для выполнения измерения необходимо знать статическую связь между конечной косвенно измеряемой величиной x и входящими в нее величинами $x_1, x_2, \ldots, x_N$, измеряемыми при помощи $СИ_1, СИ_2, \ldots, СИ_N$.

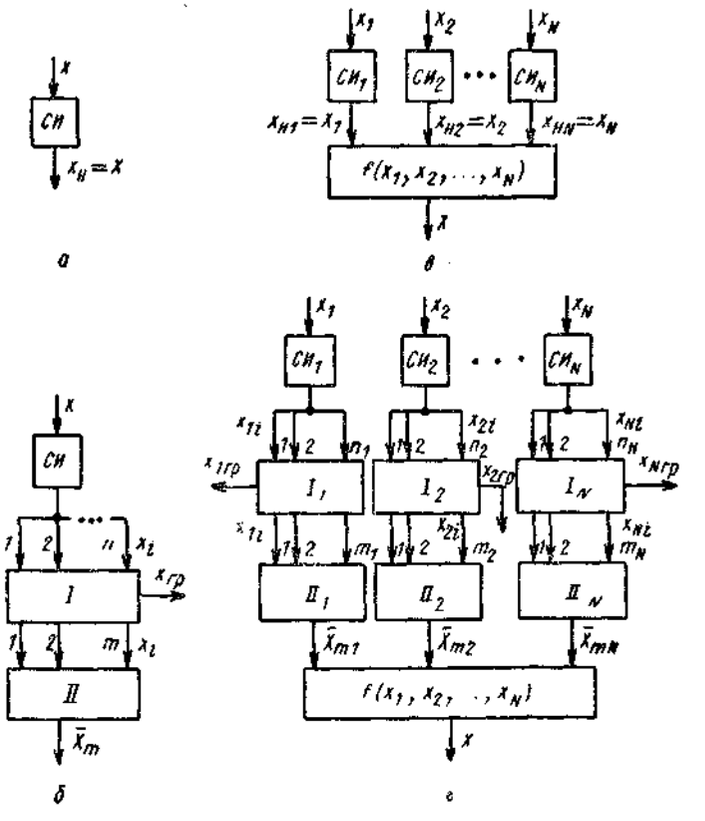


Рис. I—7. Схема определения результатов измерений:
а, б — прямые измерения соответственно с однократным и многократным наблюдениями; *в, г* — косвенные измерения с однократным и многократным наблюдениями

Пусть эта связь представляет собой функцию

$$x = f(x_1, x_2, \ldots, x_N). \qquad (I—22)$$

При однократных наблюдениях каждой величины (рис. I—7, *в*) результаты измерений совпадают с результатами наблюдений:

$$X_1 = x_{н_1}, X_2 = x_{н_2}, \ldots, X_N = x_{н_N}.$$

Эти величины подставляются в функцию (I—22). Результат вычисления является результатом косвенного измерения.

Схема проведения **косвенного измерения с многократными наблюдениями** показана на рис. I—7, *г*. В расчет принимают n_1 наблюдений величины x_1; n_2 — величины x_2 и т. д.; n_N — величины

x_N. Операциями I_1, I_2, ..., I_N отфильтровывают результаты наблюдения с грубыми ошибками $x_{1гр}$, $x_{2гр}$, ..., $x_{Nгр}$, после чего остаются m_1 наблюдений величины x_1; m_2 — величины x_2 и т. д.; m_N — величины x_N. Эти результаты наблюдений проходят операции II_1, II_2, ..., II_N по нахождению средних арифметических значений $\bar{X}_{m_1}, \bar{X}_{m_2}, \ldots, \bar{X}_{m_N}$ по формуле (I—18), которые являются результатами измерений исходных величин.

Полученные результаты вводятся в функцию (I—22), после вычисления которой получают результат косвенного измерения.

I.4.4.2. Вычисление суммарных погрешностей

Составляющие суммарных погрешностей. В зависимости от числа проводимых наблюдений и методики их обработки в расчет суммарной погрешности могут вводиться следующие составляющие.

При однократных наблюдениях, а также при небольшом числе наблюдений, не подвергающихся статистической обработке, в расчет вводят неисключенную систематическую погрешность, которая включает в себя инструментальную, методическую и субъективную составляющие.

Инструментальная погрешность определяется через пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений, которые указываются в технических характеристиках или в данных индивидуальной градуировки. Методическая погрешность выявляется анализом методики измерения или соответствующим экспериментом. Субъективная погрешность может быть учтена лишь условно. Например, при отсчете показаний стрелочных приборов субъективную погрешность можно принимать в размере половины минимального деления шкалы.

При многократных наблюдениях в расчет вводят неисключенную систематическую погрешность (см. выше) и доверительные границы случайной погрешности, найденные на основании статистической обработки результатов наблюдений (см. п. I.4.3).

Вычисление суммарных погрешностей при однократных наблюдениях. При нахождении суммарной погрешности все составляющие рассматриваются как случайные величины с равномерным распределением [26]. Границы суммарной погрешности (без знака), которые в данном случае совпадают с границами неисключенной систематической погрешности, т. е. $\Delta x_\Sigma = \Delta x_0$ и $\delta_\Sigma = \delta_0$, рекомендуется вычислять по приводимым формулам:

в относительной форме

$$\delta_0 = b \sqrt{\sum_{i=1}^{l} \delta_i^2}, \qquad (I—23)$$

в абсолютной

$$\Delta x_0 = b \sqrt{\sum_{i=1}^{l} \Delta x_i^2}, \qquad (I—23а)$$

где b — коэффициент, который при доверительной вероятности 0,95 принимают равным 1,1; δ_i — граница i-й неисключенной систематической погрешности (в относительной форме); Δx_i — граница i-й неисключенной систематической погрешности (в абсолютной форме); l — количество учитываемых составляющих.

Прямое измерение. Если прямое измерение выполняется одним средством измерения, границу суммарной относительной погрешности измерения вычисляют по формуле (I—23), которая приобретает вид

$$\delta_0 = b \sqrt{\delta_{ин}^2 + \delta_{мт}^2 + \delta_{сб}^2}, \qquad (I—24)$$

где $\delta_{ин}$, $\delta_{мт}$, $\delta_{сб}$ — границы относительных погрешностей: инструментальной, методической и субъективной.

Если паспортная инструментальная погрешность средств измерений задана в виде абсолютной погрешности, то величина $\delta_{ин}$ должна быть определена по формуле, аналогичной (I—13):

$$\delta_{ин} = \Delta x / X, \qquad (I—25)$$

где X — результат измерений, при нескольких наблюдениях вычисляется так же, как при вычислении случайных погрешностей [см. формулу (I—15)].

Если паспортная инструментальная погрешность средства измерения задана в виде приведенной относительной погрешности (или класса точности), то величину $\delta_{ин}$ определяют по формуле

$$\delta_{ин} = \delta_{пр} (D/X), \qquad (I—26)$$

где $\delta_{пр}$ — приведенная относительная погрешность; D — нормированная величина (обычно диапазон измерений).

В случаях, когда методическая и субъективная составляющие заданы в абсолютном или приведенном относительном виде, значения $\delta_{мт}$ и $\delta_{сб}$ для формулы (I—24) должны вычисляться аналогично инструментальной погрешности по формулам (I—25) и (I—26).

Задача определения суммарной погрешности может быть решена непосредственно в абсолютной форме. В этом случае граница суммарной погрешности будет иметь вид, аналогичный (I—24):

$$\Delta x_0 = b \sqrt{\Delta x_{ин}^2 + \Delta x_{мт}^2 + \Delta x_{сб}^2},$$

где $\Delta x_{ин}$, $\Delta x_{мт}$, $\Delta x_{сб}$ — абсолютные погрешности: инструментальная, методическая и субъективная.

Часто измерение производится не одним, а несколькими средствами, соединенными последовательно в измерительную цепь (например, измерение температуры с помощью последовательно соединенных термопреобразователя сопротивления, передающего нормирующего преобразователя и показывающего миллиамперметра). При этом каждое из средств измерений характеризуется собственной паспортной инструментальной погрешностью. Каждая из границ инструментальной погрешности должна быть приведена к общему виду по формулам (I—25) или (I—26), причем в качестве результата измерений следует принимать соответствующее значение выходной величины каждого средства измерения. Например, для термопреобразователя сопротивления выходной величиной является величина его электрического сопротивления, для нормирующего преобразователя — выходной ток и т. д. После указанной операции находится величина

$$\delta_{ин} = b \sqrt{\delta_{ин_1}^2 + \delta_{ин2}^2 + \ldots + \delta_{инN}^2},$$

Заказ № 1399

где $\delta_{ин_1}$, $\delta_{ин_2}$, $\delta_{ин_N}$ — границы относительной инструментальной погрешности средств измерений от 1-го до N-го, входящих в измерительную цепь.

Расчет границы суммарной погрешности производят по формуле (I—24) с подстановкой в нее значения $\delta_{ин}$ из формулы (I—27). Методическая и субъективная составляющие при этом остаются теми же, что и в случае измерения одним средством измерения.

Определение суммарной погрешности измерительной цепи через абсолютные погрешности отдельных средств измерений в данном случае невозможно, так как каждая из этих величин может выражаться в различных единицах.

Косвенное измерение. Выше было показано, что косвенное измерение предполагает наличие расчетной формулы, связывающей результаты прямых измерений отдельных составляющих величин с косвенно измеряемой величиной.

Рассмотрим основные случаи расчетных формул.

а) Формула имеет вид произведения

$$x = f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \cdot \ldots \cdot f_N(x_N). \qquad (I—28)$$

По правилам, изложенным выше, найдем границы неисключенных систематических погрешностей измерений величин x_1, x_2, ..., x_N по формуле (I—24), обозначив их соответственно δ_{0_1}, δ_{0_2}, ..., δ_{0_N}.

Пользуясь теми же предположениями, которые были высказаны выше, найдем границу неисключенной погрешности косвенного измерения:

$$\delta_0 = b\sqrt{\delta_{0_1}^2 + \delta_{0_2}^2 + \ldots + \delta_{0_N}^2} \qquad (I—29)$$

Значение искомой величины имеет вид (I—21).

По той же формуле (I—29) определяется суммарная погрешность, если расчетная формула имеет вид дроби:

$$x = \frac{f_1(x_1) f_2(x_2) \ldots f_N(x_N)}{f_{N-1}(x_{N-1})}.$$

б) Формула имеет вид многочлена

$$x = f_1(x_1) + f_2(x_2) + \ldots + f_N(x_N). \qquad (I—30)$$

В этом случае необходимо найти границы абсолютных погрешностей измерения каждой из составляющих величин x_1, x_2, ..., x_N в виде Δx_{0_1}, Δx_{0_2}, ..., Δx_{0_N}, воспользовавшись для этого формулами (I—14) и (I—23 а); далее найти границу суммарной абсолютной погрешности:

$$\Delta x_0 = b\sqrt{\Delta x_{0_1}^2 + \Delta x_{0_2}^2 + \ldots + \Delta x_{0_N}^2}. \qquad (I—31)$$

По формуле (I—14) определяют границу суммарной относительной погрешности δ_0, после чего искомую косвенно измеренную величину можно представить в виде (I—21), принимая $\Delta x_\Sigma = \Delta x_0$.

Нетрудно видеть, что большинство встречающихся расчетных формул может быть проанализировано указанными способами.

Рассмотренный способ применим лишь к простейшим зависимостям. В более сложных случаях рекомендуется обратиться к специальной литературе [12, 90].

Вычисление суммарных погрешностей при многократных наблюдениях. Прямые измерения. При многократных наблюдениях и статистической обработке их результатов [26] вычисление границы суммарной погрешности измерения производят по формуле

$$\Delta x_\Sigma = k\sigma_\Sigma, \qquad (I—32)$$

где k — коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной систематической погрешностей; σ_Σ — оценка суммарного среднего квадратического отклонения результата измерения:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{l} \frac{\Delta x_i^2}{3} + \sigma^2(\bar{x}_m)}; \qquad (I—33)$$

$$k = \frac{\Delta x_{сл} + \Delta x_0}{\sigma(\bar{X}_m) + \sqrt{\sum_{i=1}^{l} \frac{\Delta x_i^2}{3}}}. \qquad (I—34)$$

В формулах (I—33) и (I—34):
Δx_i — границы i-й неисключенной систематической погрешности; $\sigma(\bar{X}_m)$ — среднее квадратическое отклонение по формуле (I—20); $\Delta x_{сл}$ — доверительная граница случайной погрешности по формуле (I—19); Δx_0 — граница суммарной неисключенной систематической погрешности по формуле (I—23).

Расчет суммарной погрешности упрощается, если допустить неточность ее вычисления до 15% от значения Δx_Σ. В этом случае рекомендуется при $\frac{\Delta x_0}{\sigma(\bar{X}_m)} < 0{,}8$ пренебречь систематическими погрешностями и считать, что $\Delta x_\Sigma = \Delta \bar{x}_{сл}$, а при $\frac{\Delta x_0}{\sigma(\bar{X}_m)} > 0{,}8$ пренебречь случайными погрешностями и считать $\Delta x_\Sigma = \Delta x_0$.

Косвенные измерения. При косвенном измерении, когда искомая величина может быть представлена выражениями (I—28) или (I—30), находят суммарные погрешности измерений каждой из входящих в них величин x_1, x_2, ..., x_N по формулам (I—32), (I—33) и (I—34):

$$\Delta x_{1\Sigma} = k\sigma_{1\Sigma}, \quad \Delta x_{2\Sigma} = k_2\sigma_{2\Sigma}, \ldots, \Delta x_{N\Sigma} = k_N\sigma_{N\Sigma}. \qquad (I—35)$$

Общую суммарную границу погрешности для функции вида (I—28) можно определить, переводя суммарные абсолютные погрешности (I—35) в относительную форму:

$$\delta_{1\Sigma} = \frac{\Delta x_{1\Sigma}}{\bar{X}_{m1}}; \quad \delta_{2\Sigma} = \frac{\Delta x_{2\Sigma}}{\bar{X}_{m_2}}; \ \ldots; \ \delta_{N\Sigma} = \frac{\Delta x_{N\Sigma}}{\bar{X}_{m_N}}$$

и подставив их в формулу, аналогичную (I—29):

$$\delta_{\Sigma} = b\sqrt{\delta_{1\Sigma}^2 + \delta_{2\Sigma}^2 + \ldots + \delta_{N\Sigma}^2}.$$

Для функции вида (I—30) общая суммарная погрешность получается подстановкой суммарных погрешностей составляющих величин в абсолютной форме (I—35) в формулу, аналогичную (I—34):

$$\Delta x_{\Sigma} = b\sqrt{\Delta x_{1\Sigma}^2 + \Delta x_{2\Sigma}^2 + \ldots + \Delta x_{N\Sigma}^2}.$$

По величине Δx_{Σ} можно найти и границу общей погрешности в относительной форме

$$\delta_{\Sigma} = \Delta x_{\Sigma}/X,$$

где X — результат косвенного измерения, полученный по формуле (I—30).

I.4.4.3. Примеры вычисления суммарных погрешностей

Пример 1. Прямое измерение без статистической обработки

а) Исходные данные

Измеряемая величина	Избыточное давление
Условие проведения измерения	Выполняются четыре наблюдения; режим и наблюдения принимаются удовлетворительными, если отклонения не превышают ±0,005 МПа; обработка данных и вычисление погрешностей, как для однократных измерений. Методическая погрешность отсутствует
Характеристика средства измерения	Манометр (верхний предел измерения 0,25 МПа, класс точности 0,6; число делений шкалы 100); дополнительные погрешности и вариации показаний малы и могут не приниматься в расчет

б) Результаты наблюдений и измерения

Получены следующие значения давления: 0,045; 0,047; 0,052; 0,051 МПа. Находим среднее арифметическое результатов наблюдений $\bar{X}_{\text{н}}=0{,}048$ МПа и отклонения результатов наблюдений от среднего арифметического: —0,0032; —0,0012; +0,0038; +0,0028 МПа.

Полученные отклонения меньше допустимой величины ±0,005 МПа, поэтому грубых ошибок нет и за результат измерения принимаем среднюю величину 0,048 МПа.

в) Определение суммарной погрешности

Поскольку класс точности манометра 0,6, то предел допустимой основной погрешности (приведенной) составляет ±0,6%, или в абсолютной форме ±0,0015 МПа.

Так как по условию методическая погрешность отсутствует, при определении неисключенной систематической погрешности учтем

только субъективную погрешность в размере $^1/_2$ минимального деления манометра, что составляет в абсолютной форме ±0,0012 МПа.

Границу суммарной неисключенной систематической погрешности найдем по формуле (I—23а)

$$\Delta x_0 = 1{,}1\sqrt{0{,}0015^2 + 0{,}0012^2} = 0{,}0021 \text{ МПа}.$$

В относительной форме $\delta_0=4\%$.

Окончательный результат запишем в виде

$$p = 0{,}048 \pm 0{,}0021 \text{ МПа}.$$

Пример 2. Косвенное измерение без статистической обработки

а) Исходные данные

Измеряемая величина	Холодопроизводительность машины по формуле $Q=m_{\text{тн}}c_{\text{тн}}(t_{\text{тн1}}-t_{\text{тн2}})$, где $m_{\text{тн}}$ — массовый расход теплоносителя (кг/с), получаемый прямым измерением; $c_{\text{тн}}$ — удельная теплоемкость теплоносителя [Дж/(кг·К)], получаемая из соответствующих таблиц; $t_{\text{тн1}}$ и $t_{\text{тн2}}$ — температура теплоносителя соответственно на входе в испаритель и выходе из него (°С), получаемая прямыми измерениями
Условия проведения измерения	Каждая составляющая величина определяется по четырем наблюдениям; режим и наблюдения считаются удовлетворительными, если отклонение от средней величины не превышает допустимой основной погрешности средства измерения; методическую и субъективную погрешность не учитывать. Обработку данных и вычисление погрешностей произвести, как для однократных измерений; погрешность нахождения величины $c_{\text{тн}}$ принять ±5% ($\delta_c=0{,}005$)
Характеристика средств измерений	1. Расходомер с верхним пределом измерений 6,3 т/ч, класс точности 1,5. 2. Термометры с ценой деления 0,1 °С и допустимой погрешностью ±0,2 °С

б) Результаты наблюдений и измерения

1. Получены следующие значения массового расхода (в т/ч): 5; 5,2; 5,1; 5,1. Среднее арифметическое значение равно 5,1 т/ч. Максимальное отклонение от средней величины составляет 0,1 т/ч. Классу 1,5 и верхнему пределу 6,3 т/ч соответствует допустимый предел абсолютной погрешности 0,1 т/ч.

Следовательно, отклонение от средней величины не превышает допустимой погрешности расходомера, и в расчет принимаются все наблюдения. Результат измерения расхода равен средней арифметической результатов наблюдений: 5,1 т/ч=5100 кг/ч=1,41 кг/с.

2. Получены следующие значения температуры $t_{тв1}$ (°С): 11,8; 12,3; 12,4; 12,3. Среднее значение составляет 12,2 °С. Наблюдение 11,8 °С отбрасывается, так как превосходит предел допустимой погрешности температур (0,2 °С). Результат измерения температуры $t_{тв1}$ определяется как среднее арифметическое оставшихся трех значений и равен 12,35 °С.

3. Получены следующие значения температуры $t_{тв2}$ (°С): 5,1; 5,1; 4,9; 4,9. Среднее арифметическое значение 4,95 °С. Поскольку отклонений больше 0,2 °С нет, величина 4,95 °С принимается за результат измерения.

4. Находим искомую холодопроизводительность

$$Q = 1{,}41 \cdot 4{,}2\ (12{,}35 \div 4{,}95) = 43{,}8\ \text{кВт}$$

[величина $c_{тв}$ принята равной 4,2 кДж/(кг·°С)].

в) Определение суммарной погрешности

1. Находим границу абсолютной погрешности измерения разности температур (I—31):

$$\Delta(\Delta t) = 1{,}1\sqrt{2(0{,}2)^2} = 0{,}31°\text{С},$$

или в относительной форме

$$\delta_{\Delta t} = 0{,}31/(12{,}35 - 4{,}95) = 0{,}042\ (4{,}2\%).$$

2. Находим границу относительной погрешности измерения расхода

$$\delta_m = (6{,}3/5{,}1)\ 0{,}015 = \sim 0{,}018.$$

3. Находим границу относительной погрешности измерения холодопроизводительности (I—29):

$$\delta_{mQ} = 1{,}1\sqrt{\delta_m^2 + \delta_{\Delta t}^2 + \delta_c^2} = 1{,}1\sqrt{0{,}018^2 + 0{,}042^2 + 0{,}005^2} = 1{,}1 \cdot 0{,}046 = 0{,}051\ (5{,}1\%).$$

4. Граница абсолютной погрешности измерения холодопроизводительности:

$$\Delta Q = 43{,}8 \cdot 0{,}051 = 2{,}23\ \text{кВт}.$$

5. Окончательный результат:

$$Q = 43{,}8 \pm 2{,}23\ \text{кВт}.$$

Пример 3. Прямое измерение при многократных наблюдениях со статистической обработкой.

а) Исходные данные

Измеряемая величина	Избыточное давление
Условия проведения измерения	Выполняется 10 наблюдений; обработка статистическая с доверительной вероятностью 0,95; в качестве неисключенной систематической погрешности принимается предел допустимой основной погрешности средства измерения
Характеристика средства измерения	Манометр, верхний предел измерения 1,0 МПа, класс точности 0,4

б) Результаты наблюдений и измерения

1. Получены следующие результаты наблюдений:

№ наблюдения	1	2	3	4	5
Значение давления, МПа	0,710	0,705	0,607	0,700	0,705
№ наблюдения	6	7	8	9	10
Значение давления, МПа	0,705	0,710	0,700	0,700	0,690

2. Находим среднее арифметическое значение результатов наблюдений (I—15): $\bar{X}_n = 0{,}698$ МПа ($n = 10$).

3. Находим и отбрасываем грубые ошибки в наблюдениях. Для этого вычисляем отклонения значений наблюдений от среднего арифметического значения:

№ наблюдения	1	2	3	4	5
Отклонения от среднего арифметического $\bar{X}_n - x_i$, МПа	—0,012	—0,007	—0,028	—0,002	—0,002
№ наблюдения	6	7	8	9	10
Отклонения от среднего арифметического $\bar{X}_n - x_i$, МПа	—0,007	—0,0012	—0,002	—0,002	—0,008

По формуле (I—33) определяем среднее квадратическое отклонение результатов наблюдений

$$\sigma(\bar{X}_n) = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\bar{X}_n - x_i)^2} = 0{,}009\ \text{МПа}.$$

По условию результат, для которого выполняется неравенство (I—17), является грубой ошибкой:

$$\bar{X}_n - x_i \geqslant 3\sigma(\bar{X}_n) = 0{,}027\ \text{МПа}.$$

Этому условию удовлетворяет наблюдение № 3, которое, как грубая ошибка, отбрасывается.

4. Определяем результат измерения как среднее арифметическое оставшихся результатов наблюдений (I—18) при $m = 9$:

$$\bar{X}_m = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} x_i = 0{,}701\ \text{МПа}.$$

в) Определение доверительной границы случайной погрешности

1. Находим отклонения оставшихся наблюдений от величины $\bar{X}_m$:

№ наблюдения	1	2	4	5	6
Отклонения от среднего значения $\bar{X}_m - x$, МПа	—0,009	—0,004	+0,001	—0,004	—0,004
№ наблюдения	7	8	9	10	
Отклонения от среднего значения $\bar{X}_m - x$, МПа	—0,009	+0,001	+0,001	+0,011	

2. Находим среднее квадратическое отклонение результатов наблюдений при $m=9$ (I—20):

$$\sigma(\bar{X}_m) = \sqrt{\frac{1}{m(m-1)}\sum_{i=1}^{m}(\bar{X}_m - x_i)^2} = 0{,}0022 \text{ МПа}.$$

3. Учитывая, что число наблюдений меньше 20, применяем распределение Стьюдента. Для $m=9$ по приведенным выше данным (см. табл. I—1) находим $t=2{,}31$. По формуле (I—19) определяем доверительную границу абсолютной случайной погрешности: $\Delta x_{сл} = t\delta(\bar{X}_m) = 2{,}31 \cdot 0{,}0022 = 0{,}0051$ МПа, *или в относительной форме*

$$\delta_{сл} = \frac{\Delta x_{сл}}{\bar{X}_m} = \frac{0{,}0051}{0{,}701} = 0{,}0073\,(0{,}73\,\%).$$

г) Определение границы суммарной погрешности

1. Неисключенная абсолютная систематическая погрешность манометра (инструментальная погрешность) по условию равна пределу допустимой основной погрешности:

$$\Delta x_{ин} = 1 \cdot 0{,}004 = 0{,}004 \text{ МПа}.$$

2. Определяем границу суммарной погрешности, для чего по формулам (I—33) и (I—34) определяем величины:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\frac{\Delta x_{ин}^2}{3} + \sigma^2\bar{X}_m} = \sqrt{\frac{(0{,}004)^2}{3} + 0{,}0022^2} = 0{,}0032 \text{ МПа};$$

$$k\,\frac{\Delta x_{сл} + \Delta x_{ин}}{\sigma(\bar{X}_m) + \sqrt{\frac{\Delta x_{ин}^2}{3}}} = \frac{0{,}0051 + 0{,}004}{0{,}0022 + \frac{0{,}004}{1{,}73}} = 2.$$

В эти формулы подставлено $\Delta\bar{x}_0 = \Delta\bar{x}_{ин}$.

Граница суммарной погрешности по формуле (I—32):

$$\Delta x_\Sigma = k\sigma_\Sigma = 0{,}0032 \cdot 2 = 0{,}0064;$$

$$\delta_\Sigma = \frac{\Delta x_\Sigma}{\bar{X}_m} = \left(\frac{0{,}0064}{0{,}701}\right) = 0{,}0091(0{,}91\,\%).$$

3. Окончательная величина измеренного давления

$$p = 0{,}701 \pm 0{,}0064 \text{ МПа}.$$

I.4.5. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЯХ

Как было указано в предыдущей главе, измерение быстроменяющихся величин связано с динамическими погрешностями. Только идеальная динамическая характеристика вида (I—1) обеспечивает воспроизводство входного сигнала на выходе средства измерения или его элемента без искажений. Если регистрируется периодически изменяющаяся величина (именно этот случай встреча-

ется, например, при индицировании компрессоров), то возможны искажения как по форме, так и по фазе.

Искажения могут быть предсказаны, если известны форма входного сигнала и динамические характеристики измерительной цепи [7, 55]. При отсутствии аналитических выражений динамических характеристик прибегают к экспериментальным исследованиям [85].

При любом способе анализа динамических свойств цепей или элементов необходимо принять один из двух методов оценки динамических погрешностей.

Первый метод состоит в определении относительной погрешности измерения, т. е. погрешности относительно текущего (мгновенного) значения измеряемой величины. Недостаток этого метода в том, что при знакопеременных величинах или при уменьшении измеряемой величины до малых значений (в пределе — до нуля) относительная погрешность возрастает и в пределе становится равной бесконечности.

Второй метод предусматривает определение приведенной погрешности, т. е. погрешности, отнесенной к некоторому нормирующему значению (например, к максимальному).

Погрешности динамических измерений могут быть использованы для оценки их влияния на конечный результат и для восстановления неискаженной измеряемой величины.

В первом случае зарегистрированный процесс принимается за конечный результат измерения, а ожидаемые погрешности используют при определении суммарных погрешностей косвенных измерений. Например, при осциллографировании давления в цилиндре компрессора ожидаемые погрешности позволяют оценить общую погрешность при вычислении индикаторной мощности, величин депрессий и т. д.

Второй случай касается результатов измерений, которые нецелесообразно использовать непосредственно. Так, если известно, что измерительная цепь вносит заметные фазовые искажения (запаздывание), то стремятся ввести соответствующую поправку в результат измерения, например перестроение осциллограммы, исключив погрешность и восстановив измеряемую величину.

В целом процедура учета динамических погрешностей достаточно трудоемка и громоздка. Поэтому основное направление создания аппаратуры и методик для динамических измерений состоит в том, чтобы характеристики аппаратуры и других элементов измерительных цепей не достигали тех граничных значений, которые могут вызвать заметные динамические погрешности. Так, принимают заведомо более широкие частотные полосы, чем это вытекает из приближенных расчетов, исключают элементы запаздывания (например, подводящие каналы к датчикам давления). Эти меры, естественно, вызывают определенное усложнение и удорожание измерительной техники. Но во многих случаях это оказывается более эффективно, чем поиски и исключение погрешностей.

Указанные меры не всегда могут быть реализованы. При измерении быстроменяющихся температур, например, остается проблема учета инерционности первичного преобразователя. В таких случаях разрабатываются специальные методы расчета погрешностей и внесения поправок.

Более подробно этот вопрос освещается в главе IX при описании конкретных методик.

I.5. СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Поддержание единства измерений в масштабе всей страны — главная задача действующей системы метрологического обеспечения [13, 16, 59]. Эта задача сводится к решению следующих подчиненных задач:

осуществление государственных испытаний и аттестаций средств измерений [20];

организация и проведение первичных и периодических поверок [21];

осуществление учета и надзора за средствами измерений;

разработка методов измерений и обработки экспериментальных данных [23].

Решение этих задач возложено на государственную и ведомственную метрологические службы. Государственная метрологическая служба находится в ведении Государственного комитета СССР по стандартам (Госстандарта). Ведомственные метрологические службы находятся в подчинении соответствующих министерств и ведомств.

I.5.1. СТРУКТУРА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ СЛУЖБ

I.5.1.1. Государственная служба

Государственная метрологическая служба состоит из центральных и территориальных органов.

К центральным органам относятся:

Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС), являющийся главным центром государственной метрологической службы; этот институт осуществляет общее научно-методическое руководство в области обеспечения единства измерений;

научно-исследовательские институты Госстандарта, являющиеся главными центрами государственных эталонов; к ним относятся НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», Всесоюзный НИИ физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), Казанский филиал ВНИИФТРИ, Сибирский государственный НИИ метрологии (СНИИМ), Харьковский государственный НИИ метрологии (ХГНИИМ);

Всесоюзный научно-исследовательский центр (ВНИЦГСССД), являющийся центральным органом Государственной службы стандартных справочных данных (ГСССД); в его задачу входят сбор, обработка и выдача информации о свойствах веществ и материалов;

Свердловский филиал ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, выполняющий функции главного центра государственной системы стандартных образцов; на него возложено научно-методическое руководство работами по созданию и воспроизведению стандартных образцов, свойств веществ и материалов;

Всесоюзное объединение «Эталон», являющееся производственной базой государственной метрологической службы; оно включает предприятия и конструкторские бюро, создающие рабочие эталоны

и образцовые средства измерений, а также ремонтирующие высокоточные средства измерений.

К территориальным органам относятся:

республиканские центры стандартизации и метрологии, осуществляющие функции государственной метрологической службы на территории союзных республик;

региональные (межобластные) центры стандартизации и метрологии (существуют только в РСФСР и УССР), на которые возложено осуществление функций государственной метрологической службы на территории нескольких областей;

областные лаборатории государственного надзора за стандартами и измерительной техникой (ЛГН).

Основные направления деятельности территориальных органов следующие:

государственные испытания, поверки и аттестации новых средств измерений;

государственный надзор за состоянием и применением средств измерений в ведомственных метрологических службах;

проведение периодической государственной проверки;

контроль и анализ деятельности ведомственных метрологических служб, согласование графиков ведомственной поверки.

I.5.1.2. Ведомственная служба

Ведомственная служба министерств (ведомства) возглавляется главным метрологом, имеющим в своем подчинении соответствующее подразделение. Служба находится в подчинении руководства министерства (ведомства). В своей деятельности служба руководствуется требованиями Госстандарта.

В состав ведомственной метрологической службы входят:

головная организация метрологической службы, функционирующая под руководством службы главного метролога министерства (ведомства); она осуществляет научно-техническое и организационно-методическое руководство работами прикрепленных базовых служб;

базовые организации метрологической службы, работающие под руководством головной организации и осуществляющие техническое руководство и контроль деятельности метрологических служб прикрепленных предприятий и организаций;

метрологические службы предприятий и организаций, которые проводят непосредственную работу по метрологическому обеспечению основной деятельности.

Метрологические службы головной и базовых организаций наряду с указанными направлениями деятельности осуществляют функции метрологических служб организаций, в состав которых они входят.

Основные задачи ведомственных метрологических служб в свете обеспечения измерений следующие:

организация учета, хранения, ремонта и надлежащего использования рабочих и образцовых средств измерений;

организация и проведение государственной и ведомственной поверки средств измерения;

разработка, аттестация и периодическая поверка нестандартизованных средств измерений.

Ниже кратко рассматриваются вопросы, относящиеся к поверке средств измерений. По остальным аспектам деятельности метрологических служб читатель может почерпнуть сведения из специальной литературы [16, 59].

I.5.2. ОРГАНИЗАЦИЯ ПОВЕРОК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Поверка — одна из форм метрологического надзора и служит для определения фактических точностных показателей средств измерений. Последние допускаются к эксплуатации только при положительных результатах поверки. Организация и порядок проведения поверки регламентируются ГОСТом [21]. В зависимости от назначения различают поверки:

первичные, осуществляемые при выпуске средств измерений из производства и ремонта;

периодические, которые проводятся при эксплуатации через определенные интервалы времени, обеспечивающие поддержание средств измерений в исправном состоянии;

внеочередные, выполняемые в особых случаях, например перед ответственными измерениями, после длительного хранения или транспортировки и т. д.

Если поверку осуществляют центральные или территориальные органы Госстандарта или их представители, то такая поверка называется государственной. Если поверку проводят метрологические службы предприятий или организаций, эксплуатирующих средства измерений, то такая поверка называется ведомственной. Право на проведение ведомственной поверки предоставляется территориальными органами Госстандарта, которые оформляют соответствующие регистрационные удостоверения.

Обязательной государственной поверке подлежат средства измерений:

применяемые ведомственными метрологическими службами в качестве исходных образцовых средств;

применяемые в качестве образцовых средств при выпуске средств измерений из ремонта, выполняемого для сторонних организаций;

принадлежащие ведомственным метрологическим службам и используемые в качестве образцовых средств органами государственной метрологической службы;

выпускаемые прибороремонтными предприятиями после ремонта, выполненного для сторонних организаций;

применяемые для измерений, связанных с учетом материальных ценностей, взаимными расчетами, охраной здоровья трудящихся, обеспечением безопасности труда (устанавливаются перечнем Госстандарта).

Все остальные средства измерений подлежат ведомственной поверке.

Если ведомственная метрологическая служба не обеспечена поверочным оборудованием, соответствующие средства измерений проходят поверку в органах государственной службы по графикам, согласованным с этими органами. Данная поверка должна рассматриваться как ведомственная, выполняемая сторонней организацией.

К проведению ведомственной поверки допускаются лица, прошедшие специальное обучение и сдавшие экзамены в учебных заведениях Госстандарта. В отдельных случаях допускается сдача экзаменов экстерном.

Периодичность обязательной государственной поверки (межповерочные интервалы) средств измерений устанавливается органами Госстандарта.

Периодичность ведомственной поверки устанавливается руководителями метрологических служб предприятий и организаций, эксплуатирующих средств измерений.

Поверке не подлежат средства измерений, применяемые для наблюдения за изменениями величин без оценки их значений в единицах физических величин с нормированной точностью. Контроль за их исправностью осуществляют ведомственные метрологические службы. На приборах должно быть нанесено отчетливо видимое обозначение «и» (индикатор).

I.5.3. СХЕМА И МЕТОДЫ ПОВЕРКИ

Поверка средств измерений осуществляется путем передачи размера единицы физической величины от эталона или образцового средства к рабочим средствам измерений.

Основным документом, регламентирующим средства, методы и точность передачи величины, является поверочная схема. Поверочные схемы подразделяются на общесоюзные и локальные [25].

Общесоюзные поверочные схемы составляются центральными органами Государственной метрологической службы и охватывают все этапы передачи физической единицы, начиная от эталона.

Пример общесоюзной поверочной схемы приведен на рис. I—8. Схема определяет передачу единицы от государственного эталона *1* к рабочим средствам измерения *10*. Схема включает в себя эталоны (в данном случае — вторичный *3*, эталон-копию *4* и рабочий *5*), образцовые средства измерений и методики поверок *2*. Видно, что схемы поверки различных по точности рабочих средств измерений отличаются друг от друга. Рабочие средства наивысшей точности поверяют по рабочему эталону *5*, а остальные — по образцовым средствам соответствующего разряда (*6*, *7*, *8* и *9*). Практическая поверочная деятельность осуществляется по локальным схемам, которые являются частью общесоюзной.

Ведомственные метрологические службы также пользуются локальными поверочными схемами, которые осуществляются ими и охватывают лишь этапы, выполняемые этими службами.

Локальные поверочные схемы составляются при наличии трех и более ступеней передачи разме-

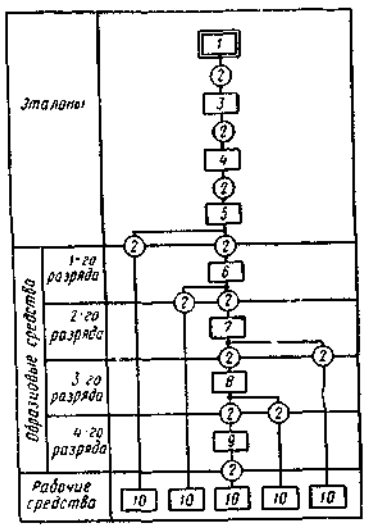


Рис. I—8. Общесоюзная поверочная схема

ра единиц и должны соответствовать общесоюзной схеме. В локальной схеме должны быть указаны местонахождение и наименование эталона или образцового средства, по которому поверяются исходные образцовые средства данной схемы.

Методы поверки, входящие как составные части в поверочные схемы, составляются применительно к каждому виду измерений.

Следующие общие методы могут быть положены в основу конкретных методов поверки:

непосредственное сличение поверяемого средства с образцовым средством измерения того же вида;

сличение поверяемого средства измерения с образцовым средством того же вида при помощи компаратора;

прямое измерение поверяемым средством измерения величины, воспроизводимой образцовой мерой;

косвенное измерение образцовыми средствами величины, воспроизводимой поверяемым средством.

Образцовые средства измерений, их точность и деление на разряды определяются конкретными общесоюзными поверочными схемами отдельно по каждому виду измерений.

Так, в поверочной схеме для средств измерений давления в диапазоне от 0,025 до 60 МПа предусматриваются образцовые ртутные мановакуумметры 2-го разряда и образцовые пружинные вакуумметры и манометры 4-го разряда. В поверочной схеме средств измерений температуры предусмотрены образцовые термопреобразователи сопротивления (термометры сопротивления) и термоэлектрические преобразователи (термопары) 1, 2 и 3-го разрядов. На основании поверочных схем в необходимых случаях создаются поверочные установки, в состав которых наряду с образцовыми средствами измерений входят различные вспомогательные устройства (термостаты, резервуары, испытательные камеры и др.). Такие установки подлежат метрологической аттестации органами государственной или ведомственной метрологической службы.

Глава II

ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

II.1. РОЛЬ ИЗМЕРЕНИЙ В ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

При современном развитии науки и техники измерениям отводится важнейшая роль в процессе постоянного совершенствования всей машиностроительной продукции, в том числе и холодильного оборудования.

Одной из главных целей научно-технического прогресса в холодильном машиностроении является постоянное повышение эффективности применения холодильной техники в народном хозяйстве, т. е. непрерывное снижение приведенных затрат на выработку искусственного холода. Эта цель обычно достигается с помощью комплекса разнообразных мер: конструктивного совершенствования элементов машины, повышения качества и снижения трудоемкости изготовления путем внедрения новых технологических процессов и рациональной организации производства, применения научно обоснованной системы обслуживания и планово-предупредительного ремонта. Определить же эффективность всех проведенных мер можно только с помощью измерения параметров машины, характеризующих ее потребительские свойства. Причем, чем точнее будут выполнены измерения, тем достовернее может быть определена эффективность.

Очевидно, что любое нарушение нормальной работы машины должно вызвать изменение какого-либо потребительского параметра. Для обеспечения в период эксплуатации постоянства показателей эффективности, свойственных данному изделию, необходимо следить за показаниями приборов и сопоставлять их со значениями, соответствующими нормальной работе исправного оборудования. Поэтому процессы измерения и анализ изменения параметров работы холодильной машины проводятся в течение всего жизненного цикла каждой машины — от первых минут работы на испытательном стенде завода-изготовителя до снятия с эксплуатации.

Измерение параметров, характеризующих свойства холодильного оборудования, позволяет определить соответствие изделия требованиям технического задания, стандартов, технических условий и всей технической документации; оценить технический уровень, готовность производства к серийному выпуску продукции, стабильность показателей качества в процессе выпуска и тем самым осуществить объективный контроль за состоянием технического уровня и качества холодильной техники. Поэтому измерения долж-

ны сопровождать весь жизненный цикл каждого типоразмера холодильного оборудования — от испытания опытного образца до снятия с производства — и повторяться периодически в соответствии с действующими нормативными документами.

В настоящее время в соответствии с ГОСТом [30] изделия холодильного машиностроения, выпускаемые серийно или подготовляемые для серийного выпуска, проходят несколько видов испытаний с обязательным измерением параметров, позволяющих получить объективную оценку изделия и ответить на вопросы, обусловленные целью проведения испытаний.

Опытный образец или опытная партия новой продукции подвергаются вначале предварительным испытаниям, организуемым предприятием-разработчиком с привлечением предприятия-изготовителя и предприятий-соисполнителей, а затем, после доработки образца и корректировки технической документации по результатам предварительных испытаний,— приемочным испытаниям, организуемым предприятием-разработчиком при участии предприятия-изготовителя, заказчика, а также представителей головной организации, технической инспекции труда ЦК профсоюзов и органов Госстандарта.

Предварительные испытания опытного образца или опытной партии проводят для определения соответствия продукции техническому заданию, требованиям стандартов и технической документации и для решения вопроса о возможности представления ее на приемочные испытания. По результатам предварительных испытаний может быть проведена доработка опытного образца.

Приемочные испытания опытного образца или опытной партии проводят для определения соответствия продукции техническому заданию, требованиям стандартов и технической документации, оценки технического уровня и определения возможности постановки продукции на производство.

Холодильная техника, выпускаемая серийно, подвергается приемо-сдаточным и периодическим испытаниям.

Приемо-сдаточные испытания проводят для определения соответствия стандартам и техническим условиям каждого образца продукции, выпущенного предприятием-изготовителем. Перечень измеряемых при испытании параметров и допустимые значения их указываются в стандартах или технических условиях. Количество измеряемых параметров должно быть минимальным, но по своей сути они должны быть такими, которые в максимальной степени позволяют выявить брак и дефекты при изготовлении. Например, у поршневых компрессоров холодопроизводительностью от 3,5 до 100 кВт проверяют объемную производительность и герметичность [33]. Контроль за соответствием измеренных параметров допустимым осуществляют службы технического контроля предприятия-изготовителя.

Периодические испытания проводят с целью оценки соответствия продукции требованиям стандартов и технических условий, а также стабильности показателей качества, подтверждающих присвоенную категорию качества продукции, выпущенной за определенный период. Проводимые при испытании измерения должны обеспечить проверку соблюдения в процессе производства требований стандартов и технических условий. Продолжительность периодических испытаний компрессоров [33] должна быть не менее 500 ч, машин — 300 ч [56]. Испытания проводит предприятие-

изготовитель с приглашением при необходимости представителей предприятия-разработчика и заказчика.

Важнейшую роль играют измерения при экспериментальных исследованиях в процессе проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Они позволяют не только ответить на вопрос о соответствии испытуемой модели предъявляемым требованиям или ожидаемым результатам, но и вскрыть причины отклонений от них, понять физическую сущность протекающих в модели процессов, влияющих на значения анализируемых параметров.

Таким образом, на всех стадиях создания и в течение всего жизненного цикла машин и агрегатов холодильной техники измерения обеспечивают постоянный контроль за интересующими нас параметрами и позволяют дать объективную оценку как состоянию холодильной техники, так и качеству проведенной работы.

Достоверность полученных данных зависит от точности измерений, которая определяется рядом условий, обеспечиваемых при проведении измерений.

II.2. УСЛОВИЯ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ И СОПОСТАВИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ СРАВНЕНИИ ИЗДЕЛИЙ

Для обеспечения высокой точности измерений необходимо соблюдать требования, продиктованные специфическими особенностями холодильной техники, не только в процессе самого измерения, но и на всех предыдущих этапах подготовки испытания, начиная с разработки испытательного стенда, и далее на всех этапах подготовки и проведения испытаний. С развитием измерительной техники и накоплением опыта испытаний изделий холодильной техники эти требования могут и будут дополняться и уточняться, но и сегодня их соблюдение обеспечивает измерение основных параметров, характеризующих качество холодильных машин и агрегатов, с высокой точностью, удовлетворяющее современным желаниям создателей и потребителей. Приведенные ниже рекомендации по повышению точности измерений и обеспечению условий сопоставимости при сравнении характеристик изделий излагаются на основе многолетнего опыта ВНИИхолодмаша, накопленного в результате разносторонних исследований и испытаний холодильных машин и их элементов.

II.2.1. УСЛОВИЯ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Точность измерений зависит от ряда условий, таких, как точность измерительных приборов, соблюдение правил установки датчиков, конструкция испытательного стенда и др. При измерении имеет значение точность всех приборов, включенных в измерительную цепь,— от датчика до показывающего или записывающего прибора. В последующих главах приведены сведения о точности применяемых сегодня средств измерений температуры, давлений, расхода, влажности и электрических величин. Выбор приборов по точности должен осуществляться из условия, чтобы погрешность измерения не превышала допустимого значения, обусловленного целью и методикой проводимого испытания.

Соблюдение правил установки датчика. Одним из главных условий, обеспечивающих измерение в соответствии с классом точности прибора, является соблюдение правил установки датчика. Рекомендации по установке датчиков даются в инструкции по эксплуатации приборов.

Особое внимание надо уделять подбору и установке датчиков, а также месту и организации отбора проб при измерении параметров движущегося пара в трубопроводах и проточной части машин и аппаратов. Датчики должны размещаться в установившемся потоке вдали от мест возмущения и не должны вызывать заметного увеличения скорости потока, т. е. поперечное сечение датчика должно быть, по крайней мере, на порядок меньше поперечного сечения потока. Следует иметь в виду, что чувствительный элемент обычного лабораторного термометра, установленного в потоке, показывает температуру $T_т$, большую ее термодинамического значения T, но меньшую, чем температура торможения T^*. Истинное значение термодинамического значения температуры определяется с помощью коэффициента восстановления температуры β:

$$T = T_m - \beta \frac{w^2}{2c_p},$$

где ω — скорость, а c_p — теплоемкость движущего пара или газа при постоянном давлении.

Для получения надежных результатов при измерении статического давления пара в движущемся потоке следует соблюдать следующие условия: диаметр высверленного в стенке отверстия не должен превышать 1,5 мм, кромки отверстия не должны иметь выступов и заусенцев, ось измерительного отверстия должна быть нормальна к поверхности стенки, должна быть обеспечена герметичность импульсной линии от отверстия до измерительного прибора [62].

Дублирование измерений. Целесообразно для достоверности измерения устанавливать при испытании два прибора, измеряющих один и тот же параметр. Если отличие в показаниях невелико и не возникает сомнения в достоверности одного из них, то среднее значение измеренной величины в этом случае может быть определено как среднее арифметическое. При измерении величин, точность которых зависит от точности измерения нескольких параметров, например массового расхода циркулирующего холодильного агента по тепловому балансу конденсатора или испарителя, дублирование измерений должно быть обязательным. В частности, при испытании холодильных поршневых компрессоров ГОСТом предписывается определение массовой производительности не менее чем двумя измерениями, не зависящими одно от другого [33].

Установившийся тепловой режим. Испытания с измерением параметров проводят только при установившемся тепловом режиме, при котором все рабочие параметры остаются неизменными или изменяются в допустимых пределах. Для установления режима необходимо поддерживать его длительно и снимать показания приборов несколько раз через 10—15 мин. За время испытаний холодильных поршневых компрессоров, машин, агрегатов и их элементов со снятием показаний приборов допускаются следующие отклонения от среднеарифметических значений измеряемых параметров [33]:

Температура насыщения при конденсации и кипении, °С, не более:	
аммиака	±1
фреонов	±0,5
Температура теплоносителей (вода, рассолы, раствор этиленгликоля и др.), °С, не более	±0,2
Температура перегретого пара холодильного агента на всасывании в компрессор, °С, не более	±3
Разности температур теплоносителей, по которым рассчитывается холодопроизводительность, °С, не более	0,2
Расход теплоносителей и холодильного агента, %, не более	2
Напряжение в сети, %, не более	±10

Конструкция испытательного стенда. Конструкция стенда должна обеспечить максимальное приближение условий работы испытуемой машины или агрегата на стенде к условиям работы в эксплуатации, а условий работы испытуемых элементов — к условиям работы их в составе машины.

Стенд комплектуется всеми приборами, позволяющими на основе измерений определить с заданной точностью все количественные значения параметров, предусмотренных программой испытаний. Расположение регулирующих устройств, обеспечивающих заданный режим работы, и приборов, показывающих результаты измерений, должно быть доступно и удобно для обслуживания и снятия показаний без визуальной погрешности. Крепление показывающих приборов осуществляется в местах, не имеющих вибрации; при подводе к прибору импульса, переменного по времени, необходимо установить гасители пульсаций.

Кроме того, при выборе конструкции стенда необходимо учитывать регламентируемые условия проведения измерений: дублирование измерений; правильная установка датчиков (в местах минимального возмущения потока и с соблюдением требуемой протяженности прямых участков перед измерительными устройствами и после них, особенно при измерении расхода); надежный контроль за состоянием холодильного агента, в частности, при испытании по полному циклу холодильной машины — контроль за отсутствием пара в жидкостной линии перед регулирующими вентилями и за отсутствием капель жидкости в паровой линии перед компрессором; сокращение до минимума (не более 3%) теплообмена с окружающей средой холодильного агента, протекающего в аппаратах.

II.2.2. УСЛОВИЯ СОПОСТАВИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ СРАВНЕНИИ ИЗДЕЛИЙ

Наиболее часто результаты измерения используются для оценки качества изделия путем сравнения с ранее известными. Непременным и важнейшим условием корректной сопоставимости результатов измерений является одинаковость критериев не только по физической сути и методам определения, но и по математическому выражению. Кроме того, для сопоставимости результатов измерений должен быть выдержан ряд условий проведения испытаний.

Одинаковость значений режимных параметров. Испытания необходимо проводить при одинаковых значениях режимных параметров: температур кипения, конденсации, переохлаждения перед

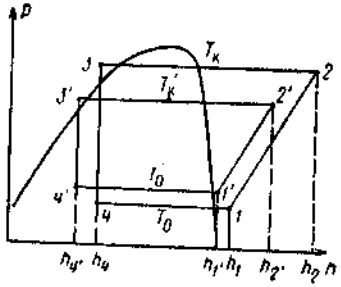


Рис. II—1. Влияние режимных параметров на характеристики холодильной машины

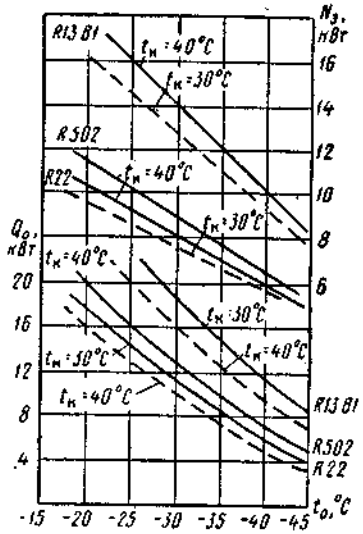


Рис. II—2. Влияние свойств холодильных агентов на холодопроизводительность и потребляемую мощность компрессора при различных температурах кипения t_0 и конденсации $t_к$

регулирующим вентилем, на всасывании в компрессор; температур теплоносителя на выходе из испарителя, воды или воздуха на входе в конденсатор; расходов теплоносителя через испаритель и воды или воздуха через конденсатор. Для пояснения существенного влияния указанных выше температур холодильного агента на количественные значения измеряемых параметров на рис. II—1 представлены два режима работы одной и той же холодильной машины, работающей по простейшему холодильному циклу одноступенчатого сжатия. Как видно из рис. II—1, удельные значения (приходящиеся на 1 кг циркулирующего холодильного агента) основных параметров существенно изменились. В цикле с меньшей температурой кипения и большей температурой конденсации удельная холодопроизводительность меньше, а удельная работа компрессора и нагрузка на конденсатор больше:

$$h_1 - h_4 < h_{1'} - h_{4'};\ h_2 - h_1 > h_{2'} - h_{1'};$$

$$h_2 - h_4 > h_{2'} - h_{4'}.$$

Номенклатура параметров, которые необходимо поддерживать одинаковыми при испытании различных изделий холодильной техники для сопоставимости результатов измерений, дана в табл. II—1. Сравнительные режимы для каждого испытуемого изделия указаны в главе III.

Проведение испытаний на одном и том же холодильном агенте. Часто машина или агрегат приспособлены для работы на нескольких холодильных агентах. Тем не менее для сопоставимости результатов измерений необходимо испытания проводить на одном и том же холодильном агенте. Влияние свойств холодильного агента на основные характеристики компрессора и аппаратов очень существенно. На рис. II—2 для примера показано, как меняются холодопроизводительность и мощность компрессора 2ФУБС-12 в зависимости от холодильного агента. При одинаковых режимных параметрах (t_0=—35 °С, $t_к$=+30 °С) холодопроизводительность компрессора при работе на R22 примерно в 1,7 раза меньше, чем при работе на R13B1. Аналогично изменяется и потребляемая мощность.

Во время испытаний необходимо обеспечить чистоту холодильного агента, удалив влагу и неконденсирующиеся газы. Перед зарядкой холодильным агентом вся испытуемая система должна быть вакуумирована до остаточного давления не выше 3,3 кПа (25 мм рт. ст.) при работе с температурой кипения до —40 °С и не выше 1,34 кПа (10 мм рт. ст.) с температурой кипения ниже

Таблица II-1. НОМЕНКЛАТУРА ПАРАМЕТРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Группы оборудования	Холодильный агент: Температура: кипения	Холодильный агент: Температура: конденсации	Холодильный агент: Температура: на всасывании в компрессор	Холодильный агент: Температура: переохлаждения	Холодильный агент: Температура: на входе в теплообменник	Теплоноситель: Температура на выходе из испарителя	Теплоноситель: Расход	Вода или воздух, охлаждающий конденсатор: Температура на входе в конденсатор	Вода или воздух, охлаждающий конденсатор: Расход
1. Компрессоры и агрегаты компрессорные	x	x	x	x					
2. Агрегаты компрессорно-конденсаторные	x		x		x			x	x
3. Агрегаты компрессорно-испарительные		x		x		x	x		
4. Машины для охлаждения жидкостей						x	x	x	x
5. Машины для охлаждения воздуха и газовых сред						x	x	x	x
6. Испарители				x		x	x		
7. Конденсаторы				x				x	x

Таблица II—2. КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ИСПАРИТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯХ В РЕЖИМЕ: t_0=0 °С; $t_{тн.ср}$=6 °С; $W_{тн.ср}$=1 м/с

Теплоноситель	Массовая доля растворенного вещества, %	Температура замерзания, °С	Коэффициент теплоотдачи α, Вт/(м²·К)	Коэффициент теплопередачи К, Вт/(м²·К)
Вода	—	0	4387	2193
Водный раствор $CaCl_2$	9,4	—5,2	4141	2075
	18,9	—15,7	3776	1888
	25,7	—31,2	3489	1744
Водный раствор этиленгликоля	12,2	—5,0	3139	1569
	27,4	—15,0	2670	1335
	42,6	—29,0	2175	1087

—40 °С. Остатки неконденсирующихся газов (воздуха) из системы удаляют продувкой холодильным агентом.

Одинаковость свойств теплоносителя. Для сопоставимости результатов измерений необходимо испытание испарителей и холодильных машин проводить на одном и том же теплоносителе. В табл. II—2 показано влияние свойств теплоносителя на характеристики испарителя. Даже изменение концентрации компонентов в составе теплоносителя сказывается на количественных значениях результатов измерений.

Проведение испытаний при одинаковых свойствах масла и его содержании в холодильном агенте. Наличие масла в холодильном агенте, циркулирующем в испытательном стенде, влияет на коли-

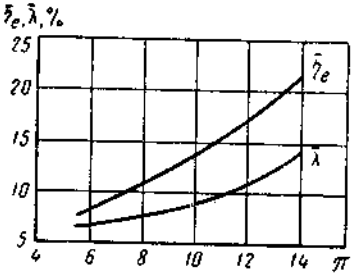


Рис. II—3. Зависимость приращения эффективного КПД $\bar{\eta}_e$ и коэффициента подачи $\bar{\lambda}$ при использовании масла ХС40 вместо ХА30 от степени повышения давления π

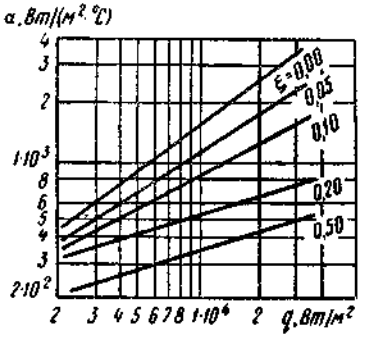


Рис. II—4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока при кипении R22 с различным содержанием масла ХФ22с-16

чественные результаты испытаний компрессоров и аппаратов. Существенное влияние на характеристики компрессоров и аппаратов оказывает взаимная растворимость масла с холодильными агентами. Растворенное в жидком холодильном агенте масло снижает холодопроизводительность холодильной машины. Это связано с тем, что давление раствора холодильного агента с маслом в испарителе ниже давления чистого холодильного агента, поэтому при заданной температуре кипения давление паров и холодопроизводительность компрессора оказываются ниже, чем при работе на чистом холодильном агенте.

Существенное влияние оказывает взаимная растворимость масла и холодильного агента на эффективный КПД η_e и коэффициент подачи λ маслозаполненного винтового компрессора. Растворенный во впрыскиваемом масле холодильный агент заполняет часть рабочего объема компрессора и тем самым уменьшает его производительность. Поэтому применение масел, хуже растворяющих в себе холодильный агент, приводит к значительному улучшению характеристик винтового компрессора (рис. II—3) [89].

Заметно снижаются коэффициенты теплоотдачи при конденсации и кипении из-за наличия масляной пленки на поверхностях труб кожухотрубных теплообменных аппаратов. Для примера на рис. II—4 показано изменение коэффициента теплоотдачи в зависимости от содержания масла ХФ22с-16 при кипении R22.

Устранение теплоотдачи в окружающую среду. Для получения достоверных и сопоставимых результатов необходимо, чтобы на измеряемом участке стенда или элемента холодильной машины отсутствовал теплообмен с окружающей средой. Например, холодопроизводительность испарителя холодильной машины определяется из условия, что она равна количеству теплоты, отданной теплоносителем. Это условие справедливо только при отсутствии теплопритоков из окружающей среды как к холодильному агенту, так и к теплоносителю. Поэтому испаритель и участки трубопроводов теплоносителя, примыкающие к испарителю, на которых установлены средства измерения, должны быть покрыты эффективной изоляцией.

В условиях, когда по каким-либо соображениям невозможно устранить теплопритоки, величина их должна быть известна при испытании. Для этого проводятся предварительные измерения, позволяющие достаточно точно оценить теплообмен с окружающей средой в зависимости от определяющих ее параметров, изменяемых в процессе испытаний.

Обеспечение условий сопоставимости. Изложенные в настоящей главе условия сопоставимости при сравнении характеристик изделий холодильной техники многогранны и сложны для реализации в процессе измерений, если они не выполнены заблаговременно в период подготовки испытаний. Для обеспечения их должны быть приняты необходимые меры уже при проектировании испытательного стенда и разработки методики испытания. Иногда допускается без соблюдения одного или двух условий сопоставимости осуществить пересчет полученных измерением параметров на другие условия, но это только в тех случаях, когда количественная зависимость этих параметров от несоблюденных условий сопоставимости известна из результатов ранее проведенного эксперимента.

Глава III

ОСНОВНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, ПРОВОДИМЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Эффективность изделий холодильной техники определяется по количественным значениям ряда показателей, характеризующих потребительские свойства изделий. Истинные значения этих показателей могут быть получены только в результате измерений при испытаниях в процессе изготовления или эксплуатации. Точность полученных при измерении показателей зависит не только от точности используемых для этой цели приборов, но и от выбранной методики проведения испытаний.

В настоящей главе представлены методы измерений, с помощью которых определяют основные параметры холодильных машин и агрегатов, позволяющие оценить их качество и потребительские свойства. Для этой цели с помощью измерений при установившемся режиме работы изделия определяют усредненные по времени значения ограниченного числа параметров: температуры, давления, расхода, мощности.

При исследовании, создании и доводке холодильного оборудования приходится проводить и ряд других измерений, которые позволяют выяснить причины несоответствия полученных при испытании характеристик выдвинутым техническим требованиям. Например, измерения мгновенных значений давления в цилиндре поршневого компрессора дают возможность судить о качестве работы клапанов. Методы измерения и приборы, применяемые при таких измерениях, чрезвычайно разнообразны и в каждом конкретном случае зависят от поставленной перед исследователем задачи. При этом используют как стандартизованные средства измерения, так и нестандартизованные, изготовленные и тарированные неспециализированными организациями. Описание таких методов измерений и применяемых средств измерений из-за своей специфичности, обусловленной многообразием видов холодильного оборудования (поршневой компрессор, центробежный компрессор, маслоотделитель и т. п.) и связанным с этим большим объемом материала, не могло быть включено в настоящий справочник. Авторы ограничились описанием стандартизированных средств измерений, применяемых для этих целей.

III.1. ХОЛОДИЛЬНЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Качество компрессора и его потребительские свойства оцениваются с помощью следующих основных показателей: холодопроизводительность Q_0 (кВт), потребляемая мощность N (кВт) на валу

компрессора при внешнем приводе или на клеммах при встроенном электродвигателе, удельная холодопроизводительность ε, коэффициент подачи λ, эффективный КПД η_e при внешнем приводе и электрический КПД $\eta_э$. Эффективность регулирования производительности компрессора определяется по изменению удельной холодопроизводительности ε при уменьшении производительности с помощью регулирующих органов компрессора.

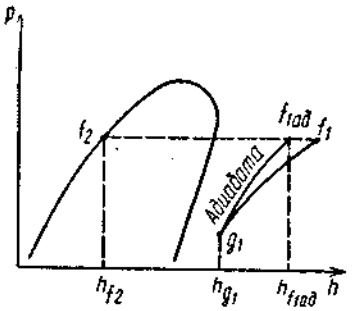


Рис. III—1. Определение в диаграмме h—P разности значений удельной энтальпии h_{g1} и h_{f2} при расчете холодопроизводительности компрессора

Под холодопроизводительностью компрессора Q_0 понимается произведение массового расхода холодильного агента, определенного при испытании, и разности значений удельной энтальпии паров холодильного агента в точке измерения на входе в компрессор h_{g1} и удельной энтальпии насыщенного жидкого холодильного агента h_{f2} при температуре, соответствующей давлению нагнетания в точке измерения на выходе из компрессора (рис. III—1). Рекомендуемая точность измерения холодопроизводительности составляет $\pm 2\%$.

Потребляемая мощность N — отношение энергии, затраченной в компрессоре, к интервалу времени, в течение которого она затрачена. Потребляемая мощность, замеренная на валу компрессора N_e, называется эффективной потребляемой мощностью, замеренная на клеммах электродвигателя $N_э$,— электрической потребляемой мощностью. Рекомендуемая точность измерения составляет $\pm 1\%$.

Удельная холодопроизводительность компрессора — отношение холодопроизводительности к потребляемой мощности. Для компрессора с внешним приводом $\varepsilon = Q_0/N_e$, для компрессора со встроенным электродвигателем $\varepsilon = Q_0/N_э$.

КПД компрессора — отношение мощности, необходимой для сжатия по адиабате измеренного массового расхода холодильного агента, к потребляемой мощности при одинаковых параметрах холодильного агента на входе в компрессор и давлении нагнетания. Для компрессора с внешним приводом

$$\eta_e = m_a \Delta h_{ад}/N_e,$$

где $\Delta h_{ад} = h_{f1ад} - h_{g1}$ — разность энтальпий при адиабатном сжатии в компрессоре (см. рис. III—1); m_a — измеренный массовый расход холодильного агента.

Для компрессора со встроенным электродвигателем

$$\eta_э = m_a \Delta h_{ад}/N_э.$$

Коэффициент подачи — отношение действительного объемного расхода холодильного агента при условии всасывания в компрессор к теоретической объемной производительности V_0.

$$\lambda = \frac{m_a v_{g1}}{V_0},$$

где v_{g1} — удельный объем пара холодильного агента на входе в компрессор.

Количественные значения всех этих показателей зависят от режима работы (температуры конденсации, температуры кипения и др.), поэтому обязательно надо оговорить, каким параметрам, определяющим режим работы, соответствуют количественные значения показателей. Для сопоставимости основных параметров компрессора установлены сравнительные температурные режимы, при которых проводятся испытания [82]. Обычно значения основных показателей определяют во всем диапазоне режимов работы компрессора, разрешенном техническими условиями на изготовление, поэтому количество режимов определяется диапазоном работы компрессора по температурам кипения, конденсации и всасывания. Сравнительные температурные режимы приведены в табл. III—1.

Для определения перечисленных ранее основных показателей, характеризующих качество компрессора и его потребительские свойства, необходимо измерить холодопроизводительность Q_0 и потребляемую мощность N, остальные показатели определяются расчетным путем.

III.1.1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Существуют различные методы определения холодопроизводительности компрессора [33, 48, 81], основанные на измерении объемного расхода холодильного агента или теплоты, подведенной или отведенной к холодильному агенту, классификация которых приведена в табл. III—2.

Метод А. Метод предусматривает использование калориметра со вторичным холодильным агентом. Калориметр со вторичным холодильным агентом представляет собой термоизолированный сосуд, в верхней части которого расположен змеевик или пучок труб, служащий испарителем первичного агента (рис. III—2). В нижней части сосуда, под уровнем вторичного холодильного агента, размещен нагреватель. Теплота Q_i, подводимая к нагревателю калориметра, вызывает испарение вторичного холодильного агента, который, конденсируясь на поверхности змеевика, отдает эту теплоту на испарение холодильного агента, поступающего в компрессор. Количество подведенной теплоты регулируется изменением напряжения, подаваемого на электронагреватели, а также числом включенных нагревателей. Установившееся постоянное давление пара вторичного холодильного агента в калориметре свидетельствует о равенстве между подведенной теплотой Q_i и теплотой, затраченной на испарение и подогрев пара первичного холодильного агента, а также теплотой, отведенной в окружающую среду Q_h.

Изоляция калориметра должна быть выполнена так, чтобы потери теплоты не превышали 5% от холодопроизводительности компрессора. С помощью измерений определяют удельную потерю теплоты в окружающую среду q_h:

$$q_h = Q_h/(t_н - t_{о.с}),$$

где $t_н$ — температура насыщения, соответствующая давлению пара вторичного холодильного агента; $t_{о.с}$ — температура окружающей среды.

Таблица III—1. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ

Группа температурного режима	Холодильный агент	Тип компрессора	Температура, °С: кипения	всасывания	конденсации
I	R12 R22	Высокотемпературный	5	20	45
II	NH_3			15	35
III	R12 R22			32	55
IV	R12 R22 R502	Среднетемпературный	—15		
V				20	40(30)
VI	NH_3			0	35
				(—10)	(30)
VII			—25	—10	35
VIII	R12 R22 R502			20 —10	40
IX				32	55
X	R12 R22 R502 R13B1	Низкотемпературный	—35(—40)	0	40(30)
XI	R502				55
XII	NH_3		—40	—20	—15(—10)
XIII	R22 R502 R13B1	Бустерный	—70	—30	—35

Примечания: 1. Значения, указанные в скобках, непредпочтительны.

2. Группа VIII: 20 °С — для работы с регенеративным теплообменником; минус 10 °С — для работы без регенеративного теплообменника.

3. Группы XII, XIII: вместо температуры конденсации указана промежуточная температура насыщения, соответствующая давлению пара нагнетания бустерного компрессора.

Таблица III—2. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПРЕССОРА

Условия испытания компрессора на холодильном агенте в замкнутом контуре	Способ определения массового расхода холодильного агента	Метод определения холодопроизводительности компрессора
С конденсацией и кипением холодильного агента	По теплоте, подведенной к холодильному агенту при кипении	**A.** С использованием калориметра со вторичным холодильным агентом **B.** С использованием калориметра с нагревателем, погруженным непосредственно в холодильный агент **C.** С использованием сухого калориметра
	По теплоте, отведенной от холодильного агента при конденсации	**G.** С использованием конденсатора в качестве калориметра
	Измерение объемного расхода жидкого холодильного агента	**E.** С использованием измерительных сосудов для измерения расхода жидкого холодильного агента **F.** С использованием расходомеров для измерения расхода жидкого холодильного агента
Без конденсации и кипения холодильного агента (паровое кольцо)	По теплоте, отведенной от холодильного агента в калориметре	**K.** С использованием калориметра на нагнетании компрессора
	Измерение объемного расхода парообразного холодильного агента	**D.** С использованием расходомеров для измерения паров холодильного агента
С частичной конденсацией холодильного агента	По теплоте, отведенной от холодильного агента в пароохладителе	**H.** С использованием сухого пароохладителя в качестве калориметра
	По теплоте, отведенной от холодильного агента в пароохладителе	**J.** С использованием влажного пароохладителя в качестве калориметра

Давление на всасывании устанавливают регулирующим вентилем, а температуру пара холодильного агента, поступающего в компрессор, устанавливают изменением подвода теплоты ко вторичному холодильному агенту. Давление на нагнетании регулируют изменением температуры и расхода охлаждающей среды, протекающей через конденсатор.

После достижения установившегося режима замеряют следующие параметры:

давление пара холодильного агента на выходе из испарителя;

температуру пара холодильного агента на выходе из испарителя;

давление жидкого холодильного агента на входе в регулирующий вентиль;

температуру жидкого холодильного агента на входе в регулирующий вентиль;

температуру среды, окружающей калориметр;

давление вторичного холодильного агента;

потребляемую мощность нагревателя калориметра.

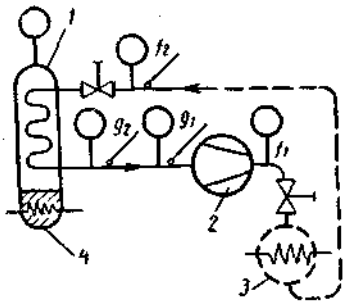


Рис. III—2. Схема испытательной установки для метода А:

1 — калориметр; *2* — компрессор; *3* — конденсатор; *4* — нагреватель

Рекомендуемая точность используемых измерительных приборов приведена в табл. III—3.

Таблица III—3. ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Наименование приборов	Измеряемый параметр	Рекомендуемая точность
Приборы для измерения температуры	Температура рассола или воды в калориметрах	±0,06 °С
	Температура охлаждающей воды в конденсаторах	±0,06 °С
	Все другие температуры	±0,3 °С
Приборы для измерения давления	Давление всасывания в компрессор	±1%
	Для всех других давлений	±2%
Электроизмерительные приборы	Мощность, потребляемая электродвигателем	±1%
	Мощность, потребляемая нагревателем калориметра	±1%
Приборы для измерения расхода	Расход холодильного агента	±1%
	Расход теплоносителя	±1%
	Расход охлаждающей воды	±1%
Приборы для измерения времени	Время заполнения заданного объема	±0,1%
Приборы для измерения массы	Массовая доля масла, содержащегося в жидком холодильном агенте	±0,2%

Массовый расход холодильного агента m_a вычисляют по формуле

$$m_a = [Q_i + q_n(t_{o.c} - t_н)]/(h_{g2} - h_{f2}),$$

где h_{g2}—h_{f2} — изменение удельной энтальпии холодильного агента в испарителе (рис. III—3).

Холодопроизводительность, соответствующую заданным условиям испытаний, Q_0 вычисляют по формуле

$$Q_0 = m_a(h_{g1} - h_{f1})\frac{v_{g1}}{v_{вс.у}},$$

где h_{g1}—h_{f1} — разность значений удельной энтальпии (см. рис. III—3) паров холодильного агента на входе в компрессор и удельной энтальпии насыщенного жидкого холодильного агента при температуре, соответствующей давлению нагнетания на выходе из компрессора; v_{g1} — удельный объем пара холодильного агента на входе в компрессор; $v_{вс.у}$ — удельный объем пара холодильного агента на всасывании, соответствующий заданным условиям испытаний.

Метод В. Метод предусматривает использование калориметра с нагревателем, непосредственно погруженным в холодильный агент.

Калориметр с нагревателем, погруженным в холодильный агент, состоит из одного или нескольких параллельно соединенных герметичных сосудов, в которых теплота передается непосредственно холодильному агенту (рис. III—4). Теплота, подводимая в калориметр Q_i, расходуется на испарение и подогрев холодильного агента и теплообмен с окружающей средой. При электрическом нагреве теплота Q_i равна потребляемой нагревателями мощности, при нагреве жидкостью

$$Q_i = c(t_1 - t_2)m_i,$$

где c — удельная теплоемкость жидкости; t_1—t_2 — изменение температуры жидкости в калориметре; m_i — массовый расход жидкости.

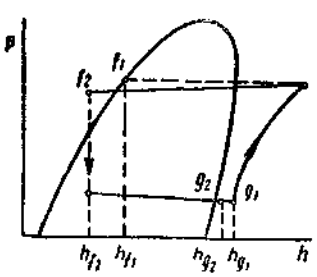


Рис. III—3. Диаграммы цикла для методов А, В, С

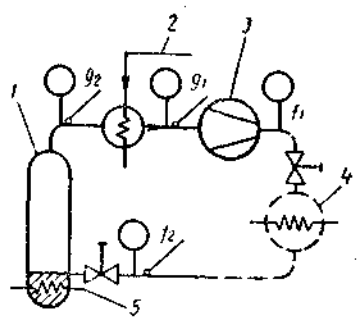


Рис. III—4. Схема испытательной установки для метода В:
1 — калориметр; *2* — перегреватель; *3* — компрессор; *4* — конденсатор; *5* — нагреватель

Калориметр теплоизолирован. Удельную потерю теплоты в окружающую среду определяют с помощью измерений q_h:

$$q_h = Q_h/(t_н - t_{o.c}),$$

где $t_н$ — температура насыщения паров в калориметре; $t_{o.c}$ — температура окружающей среды.

Режим по давлению и температуре всасывания в компрессор, а также по давлению нагнетания устанавливается так же, как и при измерении методом А.

После достижения установившегося режима замеряют следующие параметры:

давление пара холодильного агента на выходе из испарителя;

температуру пара холодильного агента на выходе из испарителя;

давление жидкого холодильного агента на входе в регулирующий вентиль;

температуру жидкого холодильного агента на входе в регулирующий вентиль;

температуру воздуха, окружающего калориметр;

температуру нагревающей жидкости на входе в калориметр t_1;

температуру нагревающей жидкости на выходе из калориметра t_2;

массовый расход нагревающей жидкости m_i;

потребляемую мощность нагревателя калориметра Q_i.

Массовый расход холодильного агента при испытании m_a вычисляют по следующим формулам:

при нагреве жидкостью

$$m_a = [c(t_1 - t_2)m_i + q_n(t_{o.c} - t_н)]/(h_{g2} - h_{f2});$$

при электрическом нагреве

$$m_a = [Q_i - q_h(t_{o.c} - t_н)]/(h_{g2} - h_{f2}),$$

здесь $(h_{g2}$—$h_{f2})$ — разность значений удельной энтальпии холодильного агента (см. рис. III—3).

Холодопроизводительность, соответствующую заданным условиям испытания, Q_0 вычисляют по формуле

$$Q_0 = m_a(h_{g1} - h_{f1})\frac{v_{g1}}{v_{вс.у}},$$

где $(h_{g1}$—$h_{f1})$ — разность значений удельной энтальпии холодильного агента (см. рис. III—3).

Расчет по этой формуле возможен в том случае, если действительная величина удельного объема паров холодильного агента v_{g1} на входе в компрессор не отличается от величины $v_{вс.у}$, соответствующей заданным условиям испытания более чем на ±2%.

Метод С. Метод предусматривает использование сухого калориметра. Калориметр с сухим испарением состоит из трубок, по которым движется холодильный агент, или из сосудов в виде труб соответствующих длины и диаметра, которые позволяют осуществить испарение холодильного агента, отсасываемого компрессором (рис. III—5). Наружная поверхность трубок нагревается жидкостью или электрическим нагревателем. Аналогичные способы применяют-

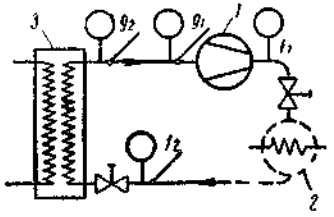


Рис. III—5. Схема испытательной установки для метода С:
1 — компрессор; *2* — конденсатор; *3* — калориметр

ся и для нагрева внутренней поверхности трубок, если испарение идет на наружной поверхности.

Режим по давлению и температуре всасывания в компрессор, а также по давлению нагнетания устанавливается так же, как и при измерении методом А.

Калориметр теплоизолирован. Удельную потерю теплоты в окружающую среду q_h определяют с помощью измерений:

$$q_h = Q_h/(t_п - t_{о.с}),$$

где Q_h — потери теплоты в окружающую среду; $t_п$ — температура наружной поверхности калориметра; $t_{о.с}$ — температура окружающей среды.

После достижения установившегося режима замеряют следующие параметры:

давление пара холодильного агента на выходе из испарителя;

температуру пара холодильного агента на выходе из испарителя;

давление жидкого холодильного агента перед регулирующим вентилем;

температуру жидкого холодильного агента перед регулирующим вентилем;

температуру среды, окружающей калориметр;

температуру нагревающей жидкости на входе в калориметр t_1;

температуру нагревающей жидкости на выходе из калориметра t_2;

массовый расход нагревающей жидкости m_i;

потребляемую мощность нагревателя калориметра Q_i;

среднюю температуру поверхности калориметра.

Массовый расход холодильного агента при испытании $m_а$ вычисляют по следующим формулам:

при нагреве жидкостью

$$m_а = [c(t_1 - t_2)m_i + q_h(t_{о.с} - t_п)]/(h_{g2} - h_{f2});$$

при электронагреве

$$m_а = [Q_h + q_h(t_{о.с} - t_п)]/(h_{g2} - h_{f2}),$$

здесь h_{g2}—h_{f2} — разность значений удельной энтальпии холодильного агента (см. рис. III—3).

Холодопроизводительность Q_0, соответствующую предписанным условиям испытания, вычисляют по формуле

$$Q_0 = m_а(h_{g1} - h_{f1})\,\frac{v_{g1}}{v_{вс.у}},$$

где v_{g1} — удельный объем пара холодильного агента на входе в компрессор; $v_{вс.у}$ — удельный объем пара холодильного агента на всасывании, соответствующий заданным условиям испытаний.

Диаграмма h, p цикла приведена на рис. III—3.

Описанные выше методы позволяли определять массовый расход холодильного агента путем измерения теплоты, подведенной в калориметре без непосредственного измерения расхода холодильного агента.

Метод D. Метод предусматривает использование расходомера для измерения расхода пара холодильного агента. Испытательная система состоит из холодильного компрессора, регулирующего вентиля для понижения давления холодильного агента от давления нагнетания до давления всасывания, а также включает в себе сосуды для отделения жидкости и масла и снижения пульсаций давления пара в измерительном устройстве, оборудование для охлаждения паров до температуры всасывания (рис. III—6). Расходомер, измеряющий расход $m_а$ протекающего холодильного агента с точностью ±2%, устанавливают во всасывающем или нагнетательном трубопроводе в месте, через которое протекает весь холодильный агент. Необходимо предусмотреть мероприятия, обеспечивающие полную гомогенность перегретого пара в этом месте, прежде всего за счет наиболее полного отделения жидкости и масла.

Расчеты по определению холодопроизводительности основываются на измерении расхода чистого пара, поэтому даже незначительное количество масла в паре является причиной неточности измерения расхода холодильного агента через диафрагму (или сопло), а следовательно и холодопроизводительности компрессора. Диафрагмы (или сопла) можно применять только там, где доля масла в паре по массе не превышает 1%.

Давление на всасывании и нагнетании компрессора устанавливают регулирующим вентилем; при этом может меняться количество холодильного агента, циркулирующего в системе. Температуру на всасывании в компрессор регулируют изменением степени охлаждения пара.

После достижения установившегося режима замеряют следующие параметры:

температуру пара холодильного агента перед расходомером;

давление пара холодильного агента перед расходомером;

перепад давления на расходомере;

массовый расход холодильного агента, измеренный расходомером, $m_а$.

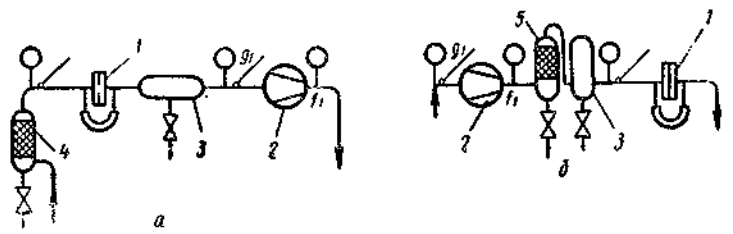


Рис. III—6. Схемы испытательных установок для метода D:
а — расходомер на всасывающем трубопроводе; *б* — расходомер на нагнетательном трубопроводе; *1* — расходомер; *2* — компрессор; *3* — буферная емкость; *4* — отделитель жидкости; *5* — маслоотделитель

Холодопроизводительность Q_0, соответствующую заданным условиям испытаний, вычисляют по формуле

$$Q_0 = m_a(h_{g1} - h_{f1})\frac{v_{g1}}{v_{вс.у}},$$

где h_{g1}—h_{f1} — разность значений удельной энтальпии холодильного агента (см. рис. III—3); v_{g1} — удельный объем пара холодильного агента на входе в компрессор; $v_{вс.у}$ — удельный объем пара холодильного агента на всасывании, соответствующий условиям испытаний.

Метод обеспечивает требуемую точность измерения холодопроизводительности компрессора при использовании расходомеров, обеспечивающих точность измерения ±1%.

Метод E. Метод предусматривает использование измерительных сосудов для измерения расхода жидкого холодильного агента.

Для измерения применяются два термоизолированных вертикальных сосуда высотой около 1,2 м. Диаметр сосуда выбирают таким, чтобы высота накопленного жидкого холодильного агента в течение 2 мин была не менее 150 мм. Сосуды соединены параллельно горизонтальными коллекторами в верхней и нижней частях и снабжены запорными вентилями в каждой верхней и нижней частях трубопровода между коллекторами и сосудом (рис. III—7). Верхний коллектор соединяется с выходным патрубком конденсатора, а нижний коллектор — с ресивером жидкого холодильного агента, если последний применяется, или с входным патрубком регулирующего вентиля. Давление в сосудах постоянно уравновешивается с помощью паропровода малого диаметра, который соединяет верхние полости обоих сосудов.

Каждый измерительный сосуд снабжен указателем уровня со шкалой соответствующей градуировки жидкостью. Для сосудов разных диаметров рекомендуется следующая градуировка: для сосудов диаметром 100 мм — через 0,2 л, для сосудов диаметром 200 мм — через 2,0 л; для сосудов диаметром 300 мм — через 10,0 л.

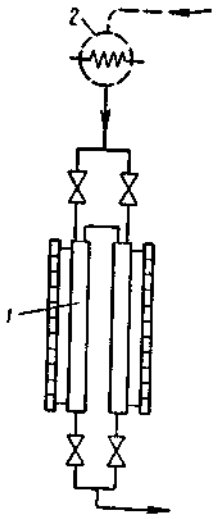


Рис. III—7. Схемы испытательной установки для метода E:
1 — измерительные сосуды; *2* — конденсатор

Определение расхода жидкого холодильного агента производят измерением времени, в течение которого определенный объем наполняется жидкостью. После опорожнения одного из мерных сосудов производят переключение и осуществляют питание регулирующего вентиля (или ресивера) из другого сосуда. Необходимо следить за тем, чтобы в опорожняющем сосуде сохранялся жидкостный затвор на выходе. Регистрируют время заполнения сосуда до заданного уровня и температуру жидкости в сосуде. Режим считается установившимся, если изменение сумарного объема жидкого холодильного агента в двух сосудах в течение испытания составляет ±1%.

Определяют содержание масла в жидком холодильном агенте. Пробу отбирают после измерительных сосудов перед ресивером или регулирующим вентилем в предварительно тщательно взвешенный и вакуумированный сосуд, а затем взвешивают сосуд с пробой. После испарения холодильного агента сосуд вновь взвешивают. Для удовлетворения необходимой точности значения трех последовательных измерений массы сосуда и оставшегося масла должны отличаться не более чем на ±1%. Внешнюю часть сосуда перед взвешиванием необходимо сушить во избежание ошибки в результате наличия конденсированной влаги на ее поверхности. Чистую массу смеси и масла определяют путем вычитания из результатов взвешивания порожнего сосуда.

При испытании замеряют следующие параметры:
время наполнения сосуда жидкостью;
температуру жидкости в наполненном сосуде;
объем накопленной в сосуде жидкости;
содержание масла в смеси жидкого холодильного агента и масла.

Холодопроизводительность Q_0 с учетом поправки на содержание масла, соответствующую заданным условиям испытания, вычисляют по формуле

$$Q_0 = \frac{V\rho_a}{1 - x(1-\mu)}[(1-x)(h_{g1} - h_{f1}) - c_м x(t_{f1} - t_{g1})]\frac{v_{g1}}{v_{вс.у}},$$

где V — объемный расход смеси жидкого холодильного агента и масла; ρ_a — плотность холодильного агента при температуре жидкости в сосуде, при которой измеряется расход; x — массовая доля масла в смеси холодильного агента и масла; μ — отношение плотности масла к плотности холодильного агента при температуре, при которой измерялся расход; $c_м$ — удельная теплоемкость масла; t_{f1}—t_{g1} — разность температур холодильного агента на выходе из конденсатора и на входе в компрессор (рис. III—8); v_{g1} — удельный объем пара на входе в компрессор; $v_{вс.у}$ — удельный объем пара, соответствующий заданным условиям испытаний.

Метод F. Метод предусматривает использование расходомеров для измерения расхода жидкого холодильного агента. Метод F по измеряемым параметрам и зависимостям для определения холодопроизводительности аналогичен методу E, но в качестве прибора для измерения расхода применяют не сосуды, а расходомер (рис. III—9). Жидкий холодильный агент, поступающий в расходомер, охлаждается не менее чем на 3 °С ниже температуры насыщения, соответствующей давлению на выходе из измерительного прибора. Для контроля за отсутствием пузырьков пара в жидком холодильном агенте непосредственно за измерителем устанавливают смотровые стекла.

Метод G. Метод предусматривает использование конденсатора в качестве калориметра.

Пар холодильного агента после сжатия в компрессоре поступает в конденсатор, оснащенный всеми необходимыми приборами для измерения температуры, давления и расхода охлаждающей воды, а также для измерения параметров холодильного агента на входе и выходе из конденсатора (рис. III—10).

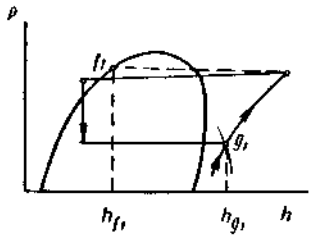


Рис. III—8. Диаграмма цикла для методов E и F

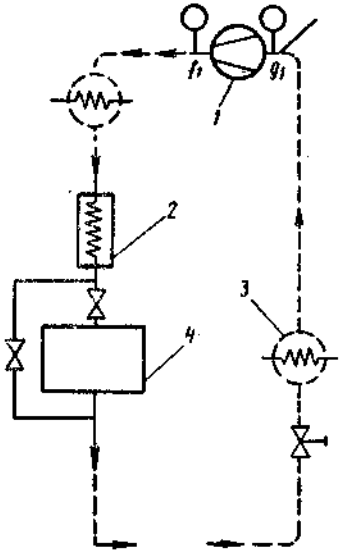


Рис. III—9. Схема испытательной установки для метода F:

1 — компрессор; *2* — переохладитель жидкости; *3* — испаритель; *4* — измеритель расхода

Конденсатор целесообразно теплоизолировать. Удельную потерю теплоты в окружающую среду q_h определяют с помощью измерений:

$$q_h = Q_h/(t_п - t_{о.с}),$$

где Q_h — потери теплоты в окружающую среду; $t_п$ — температура поверхности конденсатора; $t_{о.с}$ — температура окружающей среды.

При отсутствии тарировки приближенно можно считать, что $q_h = 8A$, где A — площадь наружной поверхности конденсатора, м.

Режим по давлению и температуре всасывания в компрессор устанавливается регулированием работы испарителя, а по давлению нагнетания — путем измерения температуры и расхода охлаждающей воды, подаваемой на конденсатор.

После достижения установившегося режима замеряют следующие параметры:

давление пара холодильного агента на входе в конденсатор;

температуру пара холодильного агента на входе в конденсатор;

давление жидкого холодильного агента на выходе из конденсатора;

температуру жидкого холодильного агента на выходе из конденсатора;

температуру воды на входе в конденсатор t_1;

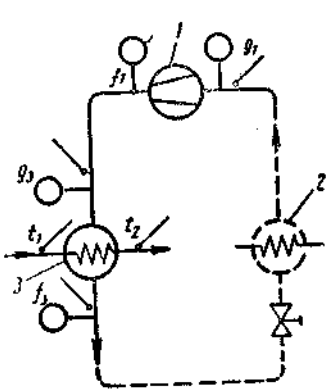
температуру воды на выходе из конденсатора t_2;

массовый расход охлаждающей жидкости m_i;

температуру окружающей среды $t_{о.с}$;

среднюю температуру наружной поверхности конденсатора или поверхности изоляции $t_п$.

Массовый расход холодильного агента m_a вычисляют по формуле



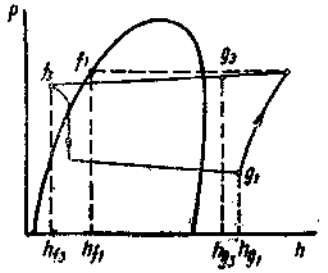


Рис. III—10. Схема испытательной установки и диаграмма цикла для метода G:

1 — компрессор; *2* — испаритель; *3* — конденсатор

$$m_a = \left|c\,(t_2 - t_1)m_i + q_n(t_п - t_{о.с})\right| / (h_{g3} - h_{f3}),$$

где c — удельная теплоемкость охлаждающей жидкости, $h_{g3} - h_{f3}$ — изменение удельной энтальпии холодильного агента в конденсаторе (см. рис. III—10).

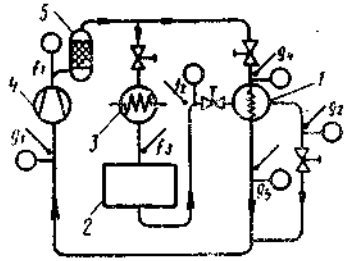
Холодопроизводительность компрессора Q_0, соответствующую заданным условиям испытания, находят по формуле

$$Q_0 = m_a(h_{g1} - h_{f1})\, v_{g1} / v_{вс.у},$$

где v_{g1} — удельный объем пара холодильного агента на входе в компрессор; $v_{вс.у}$ — удельный объем пара холодильного агента на всасывании, соответствующий заданным условиям испытаний.

Метод H. Метод с использованием сухого пароохладителя в качестве калориметра.

В измерительной системе (рис. III—11) основная часть холодильного агента из компрессора, пройдя маслоотделитель и регулирующий вентиль, поступает в пароохладитель для охлаждения до температуры всасывания в компрессор. Другая часть отбирается после маслоотделителя, конденсируется и направляется в пароох-



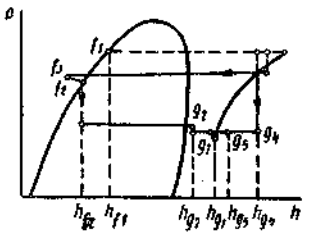


Рис. III—11. Схема испытательной установки и диаграмма цикла для метода H:

1 — пароохладитель; *2* — измеритель расхода по методам E и F; *3* — конденсатор; *4* — компрессор; *5* — маслоотделитель

ладитель для охлаждения основного потока пара за счет собственного испарения, а затем на всасывание в компрессор. Теплообменная поверхность пароохладителя должна быть достаточной для того, чтобы пар, выходящий из испарительной части, был перегрет минимально на 8 °С. Уровень испаряемой жидкости должен быть таким, чтобы исключить попадание капель в выходящий пар. Количество конденсируемого холодильного агента измеряется расходомером или мерными сосудами по методам E и F; может быть использован и метод G.

Давление на всасывании компрессора устанавливают регулирующим вентилем, расположенным между нагнетательным трубопроводом и входом паров в пароохладитель. Температуру на входе в компрессор устанавливают регулирующим вентилем, расположенным на ответвлении нагнетательного трубопровода к конденсатору, а также с помощью регулирования температуры и расхода жидкости, охлаждающей конденсатор.

Теплоизоляция пароохладителя должна быть выполнена так, чтобы потери теплоты были менее 5% от общего количества теплоты, участвующей в теплообмене. С помощью измерений определяют удельную потерю теплоты в окружающую среду:

$$q_h = Q_h/(t_н - t_{о.с}),$$

где Q_h — потери теплоты в окружающую среду; $t_н$ — температура насыщения паров в пароохладителе; $t_{о.с}$ — температура воздуха, окружающего пароохладитель.

После достижения установившегося режима замеряют следующие параметры:

давление пара холодильного агента на выходе из испарительной части пароохладителя;

температуру пара холодильного агента на выходе из испарительной части пароохладителя;

давление жидкого холодильного агента перед регулирующим вентилем;

температуру жидкого холодильного агента перед регулирующим вентилем;

давление пара холодильного агента на входе в пароохладитель;

температуру пара холодильного агента на входе в пароохладитель;

давление пара холодильного агента на выходе из пароохладителя;

температуру пара холодильного агента на выходе из пароохладителя;

температуру воздуха, окружающего пароохладитель, $t_{о.с}$;

массовый расход сконденсированного жидкого холодильного агента $m_{а.ж}$.

Общий массовый расход холодильного агента при испытании $m_а$ вычисляют по формуле

$$m_а = m_{а.ж}\left[1+\frac{(h_{g2}-h_{f2})-\dfrac{q_h}{m_{а.ж}}(t_{о.с}-t_н)}{h_{g1}-h_{g5}}\right],$$

где $h_{g2}-h_{f2}$ — изменение удельной энтальпии жидкого холодильного агента в пароохладителе (см. рис. III — 11); $h_{g4}-h_{g5}$ — изменение

удельной энтальпии пара холодильного агента в пароохладителе (см. рис. III—11).

Холодопроизводительность Q_0, соответствующую заданным условиям испытаний, вычисляют по формуле

$$Q_1 = m_а(h_{g1} - h_{f1})\,v_{g1}/v_{вс.у},$$

где $h_{g1}-h_{f1}$ — разность значений удельной энтальпии холодильного агента (см. рис. III—11); v_{g1} — удельный объем пара холодильного агента на входе в компрессор; $v_{вс.у}$ — удельный объем пара холодильного агента на всасывании, соответствующий заданным условиям испытания.

Метод J. Метод предусматривает использование влажного пароохладителя в качестве калориметра. Метод J отличается от предыдущего метода H тем, что жидкий холодильный агент впрыскивается в пароохладитель и целиком испаряется в нем при смешивании с паром холодильного агента, поступающим в пароохладитель из линии нагнетания компрессора (рис. III—12).

При испытании измеряют:

давление паров холодильного агента на выходе из пароохладителя;

температуру паров холодильного агента на выходе из пароохладителя;

давление жидкого холодильного агента перед регулирующим вентилем;

температуру жидкого холодильного агента перед регулирующим вентилем;

давление паров холодильного агента на входе в пароохладитель;

температуру паров холодильного агента на входе в пароохладитель;

давление паров холодильного агента в пароохладителе;

температуру воздуха, окружающего пароохладитель, $t_{о.с}$;

расход конденсированного жидкого холодильного агента $m_{а.ж}$.

Общую массу расходуемого холодильного агента при испытании $m_а$ вычисляют по формуле

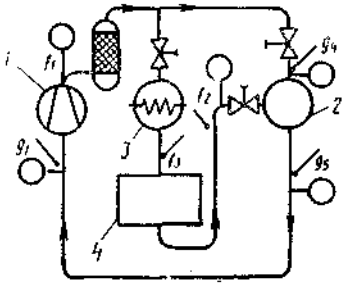
$$m_а = m_{а.ж}\left[1+\frac{(h_{g5}-h_{f2})-\dfrac{g_h}{m_{а.ж}}(t_{о.с}-t_н)}{h_{g1}-h_{g5}}\right],$$

где $h_{g5}-h_{f2}$ — изменение удельной энтальпии жидкого холодильного агента в пароохладителе (см. рис. III—12); $h_{g4}-h_{g5}$ — изменение удельной энтальпии паров холодильного агента в пароохладителе (см. рис. III—12).

Холодопроизводительность Q_0, соответствующую заданным условиям, вычисляют по формуле

$$Q_0 = m_а(h_{g1} - h_{f1})\,v_{g1}/v_{вс.у},$$

где $h_{g1}-h_{f1}$ — разность значений удельной энтальпии холодильного агента (см. рис. III—12); v_{g1} — удельный объем пара холодильного агента на входе в компрессор; $v_{вс.у}$ — удельный объем пара холодильного агента на всасывании, соответствующий условиям испытаний.



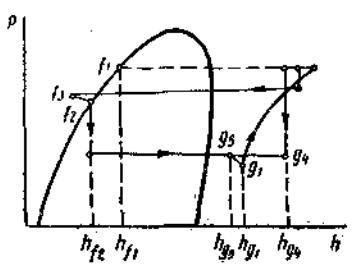
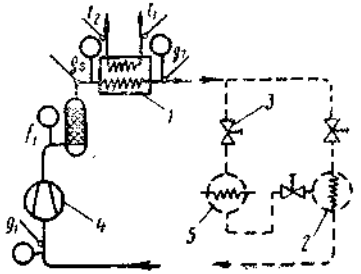


Рис. III—12. Схема испытательной установки и диаграмма цикла для метода J:

1 — компрессор; *2* — пароохладитель; *3* — конденсатор; *4* — измеритель расхода по методу E или F



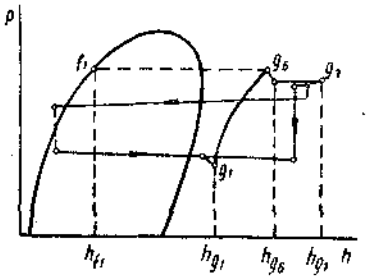


Рис. III—13. Схема испытательной установки и диаграмма цикла для метода K:

1 — калориметр; *2* — пароохладитель; *3* — дроссельный вентиль; *4* — компрессор; *5* — конденсатор

Метод K. Метод предусматривает использование калориметра на нагнетании компрессора. В нагнетательном трубопроводе компрессора устанавливают теплообменник, работающий, как калориметр, через который проходит вся масса холодильного агента, выходящего из компрессора (рис. III—13). Для охлаждения или подогрева газообразного холодильного агента через калориметр протекает регулируемое количество жидкой среды, температура которой должна быть выше температуры конденсации холодильного агента, соответствующей давлению на нагнетании компрессора, для исключения частичной конденсации холодильного агента.

Калориметр теплоизолируют так, чтобы потери теплоты Q_h не превышали 5% от холодопроизводительности компрессора. С помощью измерений определяют удельную потерю теплоты в окружающую среду:

$$q_h = Q_h/(t_п - t_{о.с}),$$

где $t_п$ — температура наружной поверхности калориметра; $t_{о.с}$ — температура воздуха, окружающего калориметр.

Для обеспечения требуемых параметров пара холодильного агента перед компрессором в состав испытательной системы включают пароохладитель, который охлаждает дросселируемые пары до температуры на всасывании компрессора. Охлаждение производят впрыскиванием части сконденсированного холодильного агента в пароохладитель и его испарением. Давление на всасывании в компрессор устанавливают регулирующим вентилем, расположенным между нагнетательным патрубком компрессора и входом паров в пароохладитель. Давление на нагнетании регулируют вентилем, установленным между компрессором и конденсатором, а также изменением температуры и расхода воды, подаваемой в конденсатор.

После достижения установившегося режима замеряют следующие параметры:

давление пара холодильного агента на входе в калориметр;

температура пара холодильного агента на входе в калориметр;

давление пара холодильного агента на выходе из калориметра;

температуру пара холодильного агента на выходе из калориметра;

температуру воздуха, окружающего калориметр, $t_{о.с}$;

среднюю температуру поверхности калориметра $t_п$.

При нагреве жидкостью регистрируют:

температуру жидкости, поступающей в калориметр, t_1;

температуру жидкости, вытекающей из калориметра, t_2;

массовый расход протекающей жидкости m_l.

Теплота, подведенная к калориметру жидкостью,

$$Q_l = c(t_2 - t_1)m_l.$$

При электронагреве регистрируют потребляемую мощность нагревателя калориметра Q_l.

Массовый расход холодильного агента при испытании $m_а$ вычисляют по формуле

$$m_а = [Q_l - q_h(t_п - t_{о.с})]/(h_{g7} - h_{g6}),$$

где $h_{g7} - h_{g6}$ — изменение удельной энтальпии пара холодильного агента в калориметре (см. рис. III—13).

Холодопроизводительность, соответствующую заданным условиям испытания, Q_0 вычисляют по формуле

$$Q_0 = m_а(h_{g1} - h_{f1})\frac{v_{g1}}{v_{вс.у}},$$

где $h_{g1} - h_{f1}$ — разность значений удельной энтальпии холодильного агента (см. рис. III—13); v_{g1} — удельный объем пара холодильного агента на входе в компрессор; $v_{вс.у}$ — удельный объем пара холодильного агента, соответствующий заданным условиям испытаний.

Определения холодопроизводительности. Многообразие рекомендуемых методов измерения массового расхода обусловлено рядом причин.

Во-первых, номенклатура холодильных компрессоров чрезвычайно разнообразна по холодопроизводительности и мощности. Организация и проведение испытаний на паровом кольце всегда проще и дешевле, чем на стенде с полным циклом холодильной машины; особенно это ощутимо при испытании компрессоров большой холодопроизводительности, но при этом абсолютная погрешность измерения, как правило, выше.

Во-вторых, для измерения малых массовых расходов следует применять методы, обеспечивающие меньшую абсолютную погрешность измерения. Поэтому для определения массового расхода холодильных компрессоров, кроме аммиачных, холодопроизводительностью до 20 кВт предпочтительными являются методы с использованием электрических калориметров. Массовый расход холодильного агента в аммиачных компрессорах такой холодопроизводительности также рекомендуется определять на стендах с полным циклом холодильной машины. Измерения холодопроизводительности крупных компрессоров целесообразно проводить на паровом кольце.

В-третьих, для достоверности измерения необходимо проверить двумя независимыми методами в процессе каждого испытания. В связи с этим схема испытательного стенда должна обеспечивать возможность определения массового расхода не менее чем двумя измерениями, не зависящими одно от другого [33]. Ниже описаны рекомендованные схемы теплообменного стенда, теплообменного стенда с регенеративным теплообменником, калориметрического стенда и стенда с паровым кольцом. На рис. III—14 представлена рекомендуемая схема теплообменного стенда, работающего по полному циклу холодильной машины, а на рис. III—15 — схема аналогичного стенда с регенеративным теплообменником. На обоих стендах массовый расход холодильного агента определяется двумя независимыми методами: методом С (с использованием сухого калориметра) и методом G (с использованием конденсатора в качестве калориметра).

На рис. III—16 дана схема калориметрического стенда, при работе которого конденсация пара холодильного агента, выходящего из компрессора, происходит в конденсаторе, а испарение — в калориметре.

Массовый расход измеряют методом А (с использованием калориметра со вторичным холодильным агентом) и методом G (с использованием конденсатора в качестве калориметра).

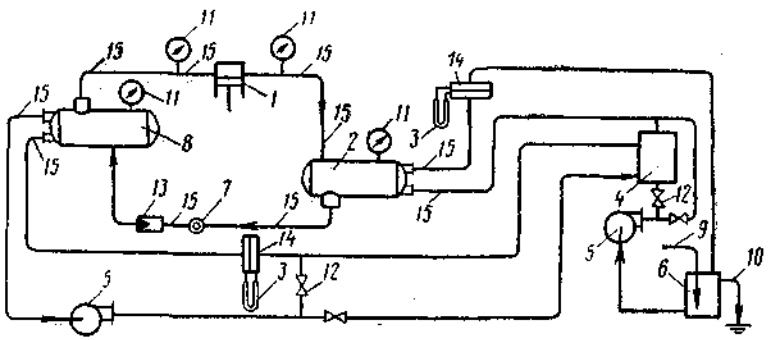


Рис. III—14. Схема теплообменного стенда:

1 — компрессор; *2* — конденсатор; *3* — ртутный дифманометр; *4* — теплообменник «вода — рассол»; *5* — насос; *6* — водяной бак; *7* — смотровое стекло; *8* — испаритель; *9* — подвод воды; *10* — отвод воды; *11* — манометр; *12* — запорный вентиль; *13* — регулирующий вентиль; *14* — измерительное сопло; *15* — место измерения температуры

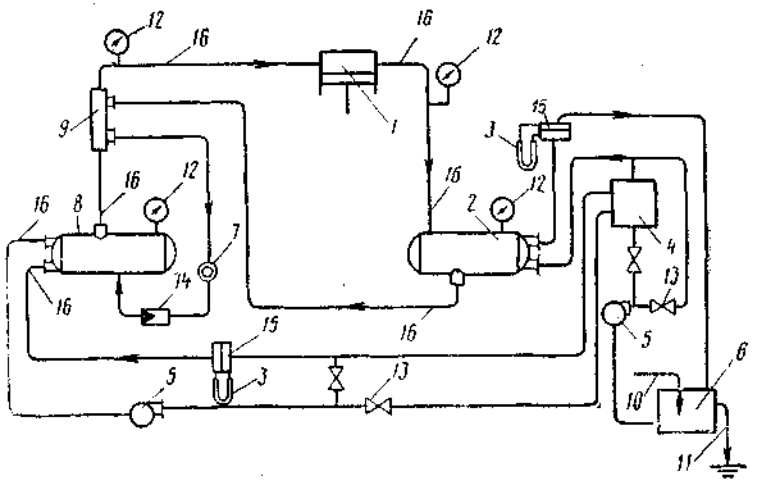


Рис. III—15. Схема теплообменного стенда с регенеративным теплообменником:

1 — компрессор; *2* — конденсатор; *3* — дифманометр; *4* — теплообменник «вода — рассол»; *5* — насос; *6* — водяной бак; *7* — смотровое стекло; *8* — испаритель; *9* — теплообменник; *10* — подвод воды; *11* — отвод воды; *12* — манометр; *13* — запорный вентиль; *14* — регулирующий вентиль; *15* — измерительное сопло; *16* — место измерения температуры

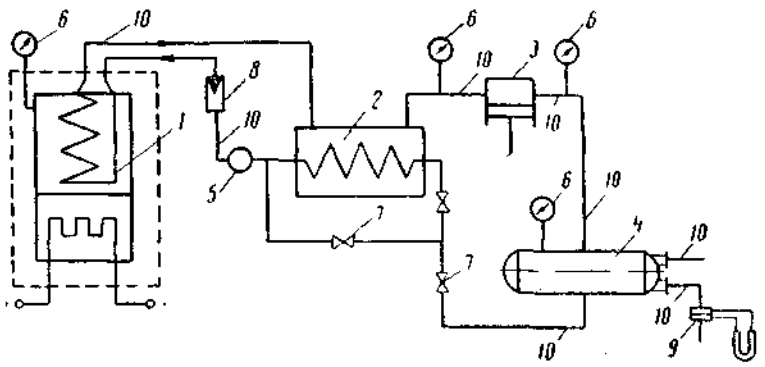


Рис. III—16. Схема калориметрического стенда:

1 — калориметр; *2* — теплообменник; *3* — компрессор; *4* — конденсатор; *5* — смотровое стекло; *6* — манометр; *7* — запорный вентиль; *8* — регулирующий вентиль; *9* — измерительное сопло; *10* — место измерения температуры

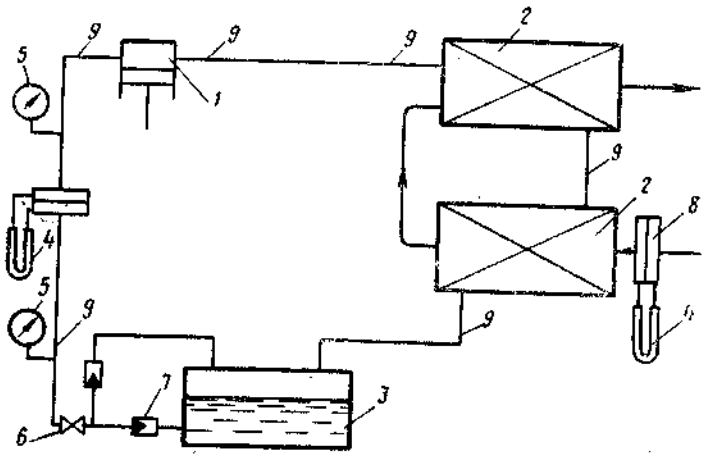


Рис. III—17. Схема стенда с паровым кольцом:

1 — компрессор; *2* — конденсатор (теплообменник); *3* — ресивер; *4* — дифманометр; *5* — манометр; *6* — запорный вентиль; *7* — регулирующий вентиль; *8* — измерительное сопло; *9* — место измерения температуры

Схема стенда с паровым кольцом (рис. III—17) предусматривает измерение массового расхода методом K (с использованием калориметра на нагнетании компрессора) и методом D (с использованием расходомеров для измерения расхода пара холодильного агента).

Строгое соблюдение изложенных в настоящем разделе методических указаний и рекомендаций позволяет осуществить измерение холодопроизводительности с требуемой точностью до ±2%.

III.1.2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ

Для определения эффективной потребляемой мощности N_e на валу компрессора применяют следующие методы [48, 81].

Непосредственный метод. Измеряют крутящий момент на валу компрессора динамометром или другим прибором, обеспечивающим измерение с точностью до ±1%. При испытании измеряют также частоту вращения; при этом используют приборы, обеспечивающие точность измерения до ±0,6%. Среднее значение эффективной мощности вычисляют по средним значениям крутящего момента и частоты вращения в течение испытаний.

Косвенный метод. Для привода применяют электродвигатель с известной характеристикой, позволяющей по мощности, измеренной на клеммах электродвигателя, определить эффективную мощность на валу. Рекомендуется использовать прямое соединение вала электродвигателя с валом компрессора с помощью муфты. В случае привода компрессора через передачу надо учитывать КПД передачи. Для измерения электрической мощности применяют приборы, точность которых составляет ±1%.

Для определения электрической потребляемой мощности $N_э$ измеряют потребляемую мощность на клеммах электродвигателя. Приборы, с помощью которых проводят измерение, должны иметь точность ±1%.

III.2. ИСПАРИТЕЛИ

В холодильных машинах для охлаждения жидких теплоносителей в большинстве случаев применяют испарители кожухотрубной конструкции с кипением холодильного агента как внутри труб, так и в межтрубном пространстве.

Качество испарителя и его потребительские свойства оцениваются следующими основными показателями: площадью теплопередающей поверхности испарителя A (м²), массой испарителя m (кг), коэффициентом теплопередачи k [Вт/(м²·К)], плотностью теплового потока q_A (Вт/м²), гидравлическим сопротивлением испарителя при прохождении холодильного агента $\Delta p_а$ (кПа), гидравлическим сопротивлением при прохождении теплоносителя $\Delta p_{тн}$ (кПа). Коэффициент теплопередачи k и плотность теплового потока q_A относят к одной из теплопередающих поверхностей (внутренней или наружной), как правило, к гладкой поверхности. Поэтому в случае межтрубного кипения чаще пользуются коэффициентом теплопередачи $k_{вн}$ и плотностью теплового потока $q_{Aвн}$, отнесенными к внутренней поверхности, а в случае внутритрубного кипения — коэффициентом теплопередачи $k_н$ и плотностью теплового потока $q_{Aн}$, отнесенными к наружной поверхности. Площадь теплопередающей поверхности испарителя A определяют, как правило, также по гладкой поверхности.

Испытания испарителей для определения указанных теплотехнических и гидродинамических характеристик осуществляются на теплообменном стенде (рис. III—18), работающем по полному

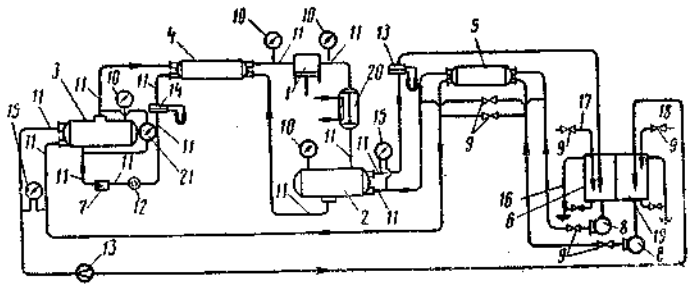


Рис. III—18. Схема теплообменного стенда для испытаний холодильной машины и ее агрегатов:

1 — компрессор; *2* — конденсатор; *3* — испаритель; *4* — регенеративный теплообменник; *5* — теплообменник «вода — теплоноситель»; *6* — водяной бак; *7* — регулирующий вентиль; *8* — насос; *9* — запорный вентиль; *10* — манометр; *11* — место измерения температуры; *12* — смотровое стекло; *13* — измеритель расхода теплоносителя; *14* — измеритель расхода хладагента; *15* — дифманометр; *16* — отвод воды; *17* — подвод холодной воды; *18* — периодический подвод горячей воды; *19* — бак теплоносителя; *20* — водяной теплообменник; *21* — дифманометр

циклу холодильной машины на реальном холодильном агенте с использованием реального теплоносителя.

Питание испарителя осуществляется терморегулирующим вентилем *7*, к которому подводится жидкий холодильный агент, переохлажденный в регенеративном теплообменнике *4*. Смотровое стекло *12*, установленное перед регулирующим вентилем, позволяет контролировать отсутствие пузырьков пара в жидком холодильном агенте. Отсос паров холодильного агента из испарителя производится компрессором *1*. Подвод теплоносителя к испарителю осуществляется из бака *19* насосом *8*. Температура теплоносителя на входе в испаритель устанавливается путем подогрева его в теплообменнике *5* водой, подаваемой в конденсатор. После охлаждения в испарителе теплоноситель возвращается в бак *19*.

Сравнительные температурные режимы испытания испарителей для охлаждения жидких сред приведены в табл. III—4.

Таблица III—4. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ ИСПЫТАНИЯ ИСПАРИТЕЛЕЙ

Группа температурного режима	Температура, °С		
	кипения холодильного агента	перегретого пара холодильного агента на выходе из аппарата	охлаждаемой среды на входе в аппарат
I	+5	+8	+14
I*	−3	+1	+6
II	−15	−12	−6
III	−25	−23	−17
IV	−40	−38	−33

Примечание. По группе I* проводят испытания испарителей с внутритрубным кипением, предназначенных для получения «ледяной» воды.

Для сопоставимости результатов необходимо соблюсти также и другие условия. Температура жидкого холодильного агента перед терморегулирующим вентилем должна быть 25±3 °С при предпочтительной температуре конденсации 30±3 °С. При испытании испарителей в области отрицательных температур в качестве теплоносителя рекомендуется использовать раствор $CaCl_2$ в воде при концентрации, обеспечивающей температуру замерзания на 8 °С ниже температуры кипения при межтрубном кипении холодильного агента и на 5 °С — при внутритрубном кипении. Разность температур охлаждаемой среды, по которой определяется холодопроизводительность, должна быть не менее 3°С. Испаритель и конденсатор рекомендуется теплоизолировать. С помощью измерений определяют теплопритоки из окружающей среды Q_h в зависимости от разности температур окружающей среды и поверхности аппаратов.

Во время испытаний после достижения установившегося режима определяют значения следующих параметров (табл. III—5).

По результатам измерений определяют:

1. Тепловой поток в испарителе Q_0 (Вт)

$$Q_0 = V_{\text{тн}}\rho_{\text{тн}}c_{\text{тн}}/(t_{\text{тн}1}-t_{\text{тн}2}), \qquad \text{(III—1)}$$

где $c_{\text{тн}}$ — теплоемкость теплоносителя при средней температуре, равной 0,5 $(t_{\text{тн}1}+t_{\text{тн}2})$, Дж/(кг·К).

Таблица III—5. ПАРАМЕТРЫ, ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ ИСПАРИТЕЛЕЙ

Параметр	Обозначение	Рекомендуемая точность измерительных приборов
Гемпература теплоносителя, °С		
на входе в испаритель	$t_{\text{тн}1}$	±0,06 °С
» выходе из испарителя	$t_{\text{тн}2}$	±0,06 °С
Температура жидкого холодильного агента перед терморегулирующим вентилем, °С	$t_{\text{а.рв}}$	±0,3 °С
Температура холодильного агента на входе в испаритель, °С	$t_{\text{а.и}1}$	±0,3 °С
Температура пара холодильного агента после испарителя, °С	$t_{\text{а.и}2}$	±0,3 °С
Температура холодильного агента, °С		
перед конденсатором	$t_{\text{а.к}1}$	±0,3 °С
после конденсатора	$t_{\text{а.к}2}$	±0,3 °С
Температура воды, °С		
на входе в конденсатор	t_{w1}	±0,06 °С
» выходе из конденсатора	t_{w2}	±0,06 °С
Давление холодильного агента на выходе из испарителя, кПа	$p_{\text{а.и}2}$	±1%
Разность давлений холодильного агента на входе в испаритель и выходе из него, кПа	$\Delta p_{\text{и.а}}$	±3%
Давление теплоносителя на входе в испаритель, кПа	$p_{\text{тн}}$	±3%
Гидравлическое сопротивление испарителя при прохождении теплоносителя, кПа	$\Delta p_{\text{тн}}$	±3%
Давление холодильного агента в конденсаторе, кПа	$p_{\text{а.к}}$	±1%
Объемный расход жидкого хладагента в смеси с маслом, м³/с	$V_{\text{а}}$	±1%
Объемный расход теплоносителя, м³/с	$V_{\text{тн}}$	±1%
Объемный расход воды через конденсатор, м³/с	V_w	±1%
Плотность смеси жидкого холодильного агента и масла перед расходомером, кг/м³	$\rho_{\text{а}}$	±1%
Плотность теплоносителя на входе в испаритель, кг/м³	$\rho_{\text{тн}}$	±1%
Массовая доля масла в смеси холодильного агента с маслом	x	±0,2%

2. Среднелогарифмический температурный напор Θ (°С)

$$\Theta = \frac{t_{тн1} - t_{тн2}}{\ln \dfrac{t_{тн1} - t_0}{t_{тн2} - t_0}}, \qquad (III—2)$$

где t_0 — средняя температура кипения, равная 0,5 $(t_{а.и1} + t_{02})$; t_{02} определяется как температура насыщенных паров при давлении $p_{а.и2}$.

3. Массовый расход холодильного агента $m_{а.и}$ (кг/с) — по тепловому балансу испарителя:

$$m_{а.и} = \frac{Q_0 + q_h(t_{о.с} - t_п)}{\Delta h_{а.и} - \dfrac{x}{1-x} c_м(t_{а.рв} - t_{а.и2})}, \qquad (III—3)$$

где $\Delta h_{а.и}$ — разность энтальпий, определенная по параметрам холодильного агента на выходе из испарителя ($p_{а.и2}$; $t_{а.и2}$) и на входе ($p_{а.и2} - \Delta p_{и.а}$; $t_{а.и}$) в него; $c_м$ — теплоемкость масла, содержащегося в холодильном агенте, проходящем через испаритель.

Уравнение для расчета $m_{а.и}$ получено из условия, что подведенная в испарителе теплота от теплоносителя Q_0 и окружающей среды $q_h(t_{о.с} - t_п)$ расходуется на изменение энтальпии холодильного агента в испарителе на величину $\Delta h_{а.и}$ и подогрев масла от температуры холодильного агента на входе $t_{а.и1}$ до температуры холодильного агента на выходе $t_{а.и2}$, а также из условия, что охлаждение масла, содержащегося в жидком холодильном агенте, от температуры перед терморегулирующим вентилем $t_{а.рв}$ до температуры холодильного агента на входе в испаритель произошло за счет испарения холодильного агента.

4. Тепловой поток в конденсаторе $Q_к$ (Вт)

$$Q_к = V_w \rho_w c_w (t_{w2} - t_{w1}), \qquad (III—4)$$

где ρ_w — плотность воды, определенная при средней температуре в конденсаторе, равной $0{,}5(t_{w1} + t_{w2})$; c_w — теплоемкость воды, определенная при этой же температуре.

5. Массовый расход холодильного агента $m_{а.к}$ (кг/с) — по тепловому балансу конденсатора:

$$m_{а.к} = \frac{Q_k + q_h(t_п - t_{о.с})}{\Delta h_{а.к} + \dfrac{x}{1-x} c_м(t_{а.к1} - t_{а.к2})}, \qquad (III—5)$$

где $\Delta h_{а.к}$ — разность удельных энтальпий, определенная по параметрам холодильного агента на входе в конденсатор ($p_{ак1} t_{ак1}$) и на выходе ($p_{а.к2} t_{а.к2}$) из него; $c_м$ — теплоемкость масла, содержащегося в холодильном агенте, проходящем через конденсатор.

Уравнение для расчета $m_{а.к}$ получено из условия, что отведение в конденсаторе теплоты водой $Q_к$ и в окружающую среду Q_h вызвало изменение энтальпии холодильного агента на величину $\Delta h_{а.к}$ и охлаждение масла от температуры холодильного агента на входе в конденсатор $t_{а.к1}$ до температуры $t_{а.к2}$ на выходе из него.

6. Массовый расход холодильного агента $m_{а.рв}$ (кг/с) — по измерениям расходомером перед терморегулирующим вентилем:

$$m_{а.рв} = (1 - x) V_{а.рв} \rho_{а.рв}. \qquad (III—6)$$

7. Среднее значение массового расхода холодильного агента $m_{а.ср}$ (кг/с)

$$m_{а.ср} = \frac{m_{а.и} + m_{а.к} + m_{а.рв}}{3}.$$

Результаты измерений можно считать удовлетворительными, если отклонение каждой из величин $m_{а.и}$, $m_{а.к}$, $m_{а.рв}$ от среднего значения массового расхода холодильного агента $m_{а.ср}$ не превышает 4%.

Тепловой поток в испарителе

$$Q_0 = m_{а.ср} \Delta h_{а.и}.$$

В зависимости от конструкции испарителя определяется значение площади внутренней или наружной теплообменной поверхности A.

Основные теплотехнические и гидродинамические показатели испарителя, характеризующие его качество:

1. Коэффициент теплопередачи k[Вт/(м²·К)], определяемый по формуле

$$k = Q_0 / A\Theta.$$

2. Плотность теплового потока (Вт/м²), вычисляемая по формуле

$$q_A = Q_0 / A.$$

3. Гидравлическое сопротивление испарителя при прохождении холодильного агента $\Delta p_{и.а}$, определяемое по результатам измерений.

4. Гидравлическое сопротивление при прохождении теплоносителя $\Delta p_{тв}$ определяемое по результатам измерений.

III.3. ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛИ

Качество воздухоохладителя и его потребительские свойства оцениваются следующими основными показателями: площадью теплопередающей поверхности (как правило, со стороны воздуха) A (м²), массой воздухоохладителя m (кг), коэффициентом теплопередачи, отнесенные к теплообменной поверхности со стороны воздуха $k_в$ [Вт/(м²·К)], плотностью теплового потока q_A (Вт/м²), гидравлическим сопротивлением воздухоохладителя при прохождении холодильного агента $\Delta p_{в.а}$ (кПа), аэродинамическим сопротивлением воздухоохладителя $\Delta p_{в.в}$ (кПа).

Испытание воздухоохладителя для определения указанных характеристик воздухоохладителя проводят на специальном теплообменном стенде, работающем по полному циклу холодильной машины на реальном холодильном агенте и имеющем воздушное кольцо для циркуляции воздуха через испытуемый аппарат (рис. III—19). Питание испарительной части осуществляется терморегулирующим вентилем *18*, к которому подводится жидкий холодильный агент, переохлажденный в регенеративном теплообменнике *3*. Смотровое

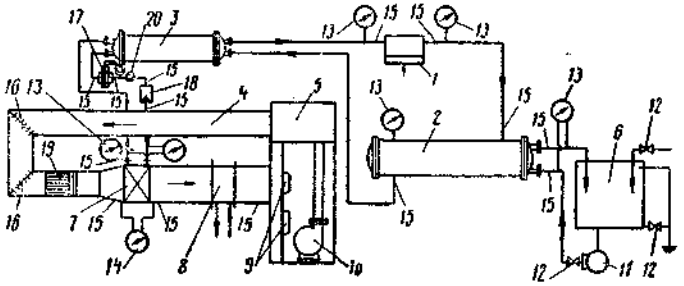


Рис. III—19. Схема теплообменного стенда для испытаний воздухоохладителей:

1 — компрессор; *2* — конденсатор; *3* — регенеративный теплообменник; *4* — воздушное кольцо; *5* — воздушная камера; *6* — водяной бак; *7* — воздухоохладитель; *8* — калорифер; *9* — измерительные сопла; *10* — вентилятор; *11* — водяной насос; *12* — вентиль запорный; *13* — манометр; *14* — дифманометр; *15* — место измерения температуры; *16* — направляющие лопатки; *17* — расходомер; *18* — регулирующий вентиль; *19* — устройство для выравнивания потока; *20* — смотровое стекло

стекло *20*, установленное перед регулирующим вентилем, позволяет контролировать отсутствие пузырьков пара в жидком холодильном агенте. Испарившийся холодильный агент отсасывается компрессором *1* и затем нагнетается в конденсатор *2*. Воздух, продуваемый через воздухоохладитель, циркулирует в воздушном кольце с помощью вентилятора *10*. Для создания установившегося режима при различных температурах продуваемого воздуха после испытуемого аппарата *7* устанавливают калорифер *8*.

Сравнительные температурные режимы испытаний воздухоохладителей даны в табл. III—6.

Таблица III—6. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ ИСПЫТАНИЙ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕЙ

Группа температурного режима	Температура, °С		
	кипения холодильного агента	перегретого пара холодильного агента на выходе из аппарата	охлаждаемой среды на входе в аппарат
I	0	+6	+10
II	—8	—3	0
III	—25	—20	—18
IV	—31	—27	—25
V	—40	—36	—34

Для сопоставимости результатов необходимо соблюсти также и другие условия. Температура жидкого переохлажденного холодильного агента перед терморегулирующим вентилем должна быть 15±3 °С при предпочтительной температуре конденсации 30±3 °С. При испытании на «сухом» режиме (без конденсации влаги на наружной поверхности воздухоохладителя) должна быть проведена

осушка воздуха, циркулирующего в воздушном кольце, до точки росы на 2—4 °С ниже температуры кипения. Осушка может быть проведена, например, путем предварительной работы стенда при более низких температурах кипения и отвода конденсата. Рекомендуется изолировать конденсатор и воздушное кольцо, с помощью тарировки или расчета определить теплоотвод в окружающую среду Q_h в зависимости от разницы температур окружающей среды и поверхности конденсатора и кольца.

Определение Q_h для конденсатора с помощью тарировки или расчетным путем дано в разделе III.1.1 (метод G). Теплопритоки к воздушному кольцу определяются по участкам с одинаковыми температурами на наружной поверхности изоляции кольца. Как правило, участков должно быть четыре (см. рис. III—19): вентиляторная камера, воздуховод от камеры до воздухоохладителя, воздуховод от воздухоохладителя до калорифера, воздуховод от калорифера до камеры. Коэффициент теплоотдачи принимается равным 8 Вт/(м²·К). Теплопритоки на каждом участке рассчитывают по формуле

$$Q_{hi} = 8A_i(t_{пi} - t_{о.с.}),$$

где A_i — площадь наружной поверхности воздушного кольца на данном участке; $t_{пi}$ — температура наружной поверхности; $t_{о.с}$ — температура окружающей среды.

Общий теплоприток в воздушном кольце Q_h в результате теплообмена с окружающей средой определяют как сумму теплопритоков по участкам с учетом направленности теплового потока (подвод или отвод тепла).

После достижения установившегося режима замеряют следующие параметры (табл. III—7).

Таблица III—7. ПАРАМЕТРЫ, ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕЙ

Параметр	Обозначение	Рекомендуемая точность измерительных приборов
Температура воздуха, °С		
перед воздухоохладителем	$t_{в.в1}$	±0,06
после воздухоохладителя	$t_{в.в2}$	±0,06
Температура жидкого холодильного агента перед терморегулирующим вентилем, °С	$t_{а.рв}$	±0,3
Температура холодильного агента на входе в воздухоохладитель, °С	$t_{а.в1}$	±0,3
Температура пара холодильного агента после воздухоохладителя, °С	$t_{а.в2}$	±0,3
Температура холодильного агента, °С		
перед конденсатором	$t_{а.к1}$	±0,3
после конденсатора	$t_{а.к2}$	±0,3
Температура воды, °С		
на входе в конденсатор	$t_{к1}$	±0,06
» выходе из конденсатора	$t_{к2}$	±0,06

Продолжение

Параметр	Обозначение	Рекомендуемая точность измерительных приборов
Температура греющей среды, °С		
на входе в калорифер	$t_{г1}$	±0,06
» выходе из калорифера	$t_{г2}$	±0,06
Температура окружающей среды, °С	$t_{о.с}$	±0,3
Температура поверхности теплоизоляции, °С	$t_{п}$	±0,3
Точка росы воздуха, циркулирующего в воздушном кольце, °С	$t_{т.р}$	±1
Давление холодильного агента на выходе из воздухоохладителя, кПа	$p_{а.в2}$	±1%
Разность давлений холодильного агента на входе в воздухоохладитель и на выходе из него, кПа	$\Delta p_{в.а}$	±3%
Давление воздуха в воздушном кольце, кПа	$p_{в}$	±1%
Аэродинамическое сопротивление воздухоохладителя, кПа	$\Delta p_{в.в}$	±3%
Давление холодильного агента в конденсаторе, кПа	$p_{а.к}$	±1%
Объемный расход жидкого холодильного агента в смеси с маслом, м³/с	$V_{а}$	±1%
Объемный расход воздуха через воздухоохладитель, м³/с	$V_{в}$	±2%
Объемный расход воды через конденсатор, м³/с	V_{w}	±1%
Объемный расход греющей среды через калорифер, м³/с	$V_{г}$	±1%
Плотность смеси жидкого холодильного агента и масла перед расходомером, кг/м³	$\rho_{а}$	±1%
Теплоемкость масла, Дж/(кг·К)	$c_{м}$	±3%
Плотность воздуха перед расходомерным соплом, кг/м³	$\rho_{в}$	±1%
Концентрация масла в смеси холодильного агента с маслом	x	±0,2%
Мощность, потребляемая вентилятором для циркуляции воздуха в воздушном кольце, Вт	$N_{в}$	±1%

Температура воздуха на входе в воздухоохладитель и на выходе из него должна измеряться на расстоянии не более 0,1 м от оребренной части аппарата. Количество термопар, равномерно расположенных по входному фронтальному сечению, должно быть не менее 6. Хорошая равномерность температурного поля перед аппаратом позволяет с достаточной точностью определить среднюю температуру воздуха перед воздухоохладителем как среднее арифметическое всех измерений в данном сечении.

В соответствии с [56] температура воздуха на выходе из аппарата должна измеряться в точках, равномерно размещенных по торцевому сечению (из расчета одна точка замера на 0,5—0,7 м² поверхности), но не менее чем в 6 точках. Температурное поле за аппаратом неравномерно, поэтому среднее арифметическое значение всех измерений не позволяет с необходимой точностью получить среднюю температуру воздуха на выходе из воздухоохладителя; она определяется из теплового баланса.

Измерение расхода воздуха через воздухоохладитель может проводиться независимо от тепловых испытаний с использованием расходомерного устройства (рис. III—20).

Для получения основных характеристик воздухоохладителя по результатам измерений определяют следующие величины:

1. Массовый расход холодильного агента — по тепловому балансу конденсатора $m_{а.к}$ по уравнению (III—5).

2. Массовый расход холодильного агента — по измерениям расходомером $m_{а.рв}$ по уравнению (III—6).

3. Среднее значение массового расхода холодильного агента $m_{а.ср}$ — как среднее арифметическое двух предыдущих значений. Результаты измерений можно считать удовлетворительными, если отклонение каждой из величин $m_{а.рв}$ и $m_{а.к}$ от среднего значения не превышает 4%.

4. Тепловой поток в воздухоохладителе Q_0 (Вт) — по расходу холодильного агента:

$$Q_0 = m_{а.ср}\left[\Delta h_{а.в} - \frac{x}{1-x} c_{м}(t_{р.п} - t_{а.в2})\right], \qquad (III—7)$$

где $\Delta h_{а.в}$ — разность удельных энтальпий, определенная по параметрам холодильного агента на входе в воздухоохладитель и на выходе из него.

5. Тепловой поток в калорифере $Q_г$ (Вт)

$$Q_г = V_г \rho_г c_г (t_{г1} - t_{г2}),$$

где $\rho_г$ — плотность греющей среды, определенная при средней температуре в калорифере, равной 0,5 $(t_{г1}+t_{г2})$; $c_г$ — теплоемкость греющей среды при этой же температуре.

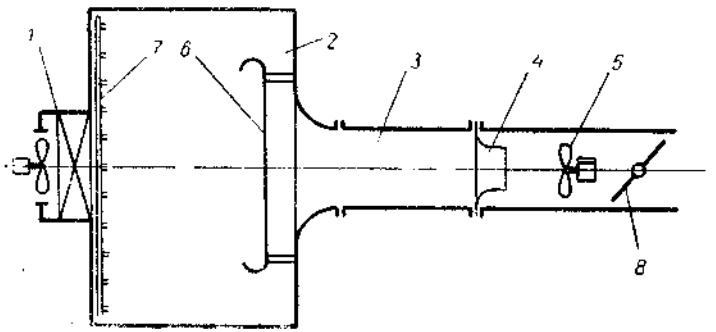


Рис. III—20. Расходомерное устройство:

1 — воздухоохладитель; *2* — компенсационная камера; *3* — измерительный участок воздухопровода; *4* — измеритель расхода; *5* — вентилятор; *6* — отражательная пластина; *7* — кольцо для отбора давления; *8* — заслонка

6. Тепловой поток в воздухоохладителе Q_0 (Вт), рассчитанный по уравнению теплового баланса в воздушном кольце,

$$Q_0 = Q_г + N_в + Q_h.$$

7. Среднее значение теплового потока в воздухоохладителе $Q_{0ср}$ — как среднее арифметическое двух ранее полученных значений. Результаты измерений можно считать удовлетворительными, если отклонение каждой из величин Q_0 от среднего значения не превышает 4%.

8. Среднюю температуру воздуха на выходе из воздухоохладителя $t_{в.в2}$ (°С) — из теплового баланса воздухоохладителя:

$$t_{в.в2} = t_{в.в1} - Q_{0ср}/(V_{в}\rho_{в}c_{рв}),$$

где $c_{рв}$ — теплоемкость воздуха при температуре и давлении перед расходомерным соплом.

Целесообразно сравнить среднюю температуру воздуха, определенную из теплового баланса воздухоохладителя, с результатами измерений.

9. Среднелогарифмический температурный напор Θ (°С)

$$\Theta = \frac{t_{в1} - t_{в2}}{\ln \dfrac{t_{в1} - t_0}{t_{в2} - t_0}},$$

где t_0 — средняя температура кипения, равная $0{,}5(t_{а.в.1} + t_{02})$; здесь t_{02} определяется как температура насыщенных паров при давлении $p_{а.в2}$.

Основные теплотехнические и аэродинамические показатели воздухоохладителя, характеризующие его качество:

коэффициент теплопередачи [Вт/(м²·К)], отнесенный к теплообменной поверхности со стороны воздуха,

$$k = Q_0/A\Theta;$$

плотность теплового потока q_A (Вт/м²)

$$q_A = Q_0/A;$$

гидравлическое сопротивление испарителя при прохождении холодильного агента $\Delta p_{в.а}$, определяемое по результатам измерений;

аэродинамическое сопротивление воздухоохладителя $\Delta p_{в.в}$, определяемое по результатам измерений.

III.4. КОНДЕНСАТОРЫ

Методы измерения, позволяющие определить основные показатели конденсатора, рассмотрены на примере конденсатора с водяным охлаждением.

Качество конденсатора и его потребительские свойства оцениваются следующими основными показателями: площадью теплопередающей поверхности конденсатора A (м²); массой конденсатора m (кг); коэффициентом теплопередачи $k_{вн}$ [Вт/(м²·К)], отнесенным, как правило, к внутренней поверхности; плотностью теплового потока $q_{Авн}$ (Вт/м²); гидравлическим сопротивлением конденсатора при прохождении холодильного агента $\Delta p_{к.а}$ (кПа); гидравлическим сопротивлением при прохождении охлаждающей воды $\Delta p_{кw}$ кПа.

Испытание конденсаторов для определения этих характеристик осуществляется на теплообменном стенде, работающем по полному циклу холодильной машины на реальном холодильном агенте (см. рис. III—18).

В конденсатор *2* поступает пар холодильного агента из компрессора *1* после теплообменника *20*, который позволяет регулировать температуру холодильного агента на входе в конденсатор. Жидкий холодильный агент отводится из конденсатора в испаритель через регенеративный теплообменник *4* и терморегулирующий вентиль *7*. Охлаждающая вода подается в конденсатор из бака *19* насосом *8*. Температура ее зависит от количества свежей холодной воды, подаваемой в бак по трубопроводу *17*.

Сравнительные температурные режимы испытаний конденсаторов с водяным охлаждением определены ОСТом [57] и приведены в табл. III—8.

Таблица III—8. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ ИСПЫТАНИЙ КОНДЕНСАТОРОВ С ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Группа температурного режима	Температура, °С				
	конденсации холодильного агента	перегретого пара холодильного агента на входе в аппарат			охлаждающей среды на входе в аппарат
		R12	R22	NH_3	
I	30	55	75	110	22
II	35	60	80	120	27
III	40	65	85	135	32

Температура перегрева паров на входе в конденсатор должна быть выше температуры конденсации не менее чем на 20 °С. Разность температур охлаждающей воды, подаваемой на конденсатор, должна быть не менее 3 °С.

Конденсатор целесообразно теплоизолировать. С помощью измерений (см. подраздел III.1.1, метод G) определяют теплопритоки из окружающей среды Q_h в зависимости от разности температур окружающей среды и поверхности аппарата.

Во время испытаний после достижения установившегося режима кроме параметров, перечисленных в табл. III—5, замеряют также следующие параметры (табл. III—9).

По результатам измерений определяют:

1. Тепловой поток в испарителе Q_0 — по уравнению (III—1).
2. Массовый расход холодильного агента по тепловому балансу испарителя — по уравнению (III—3).
3. Тепловой поток в конденсаторе $Q_к$ — по уравнению (III—4).
4. Массовый расход холодильного агента по тепловому балансу конденсатора — по уравнению (III—5).
5. Массовый расход холодильного агента по измерениям — расходомером перед терморегулирующим вентилем — по уравнению (III—6).

Таблица III—9. ПАРАМЕТРЫ, ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ КОНДЕНСАТОРОВ

Измеряемые параметры	Обозначение	Рекомендуемая точность измерительных приборов
Разность давлений холодильного агента на входе и выходе из конденсатора, кПа	$\Delta p_{к.а}$	±3%
Гидравлическое сопротивление конденсатора при прохождении воды, кПа	$\Delta p_{к.в}$	±3%
Давление холодильного агента в паровом пространстве конденсатора, кПа	$p_{а.к}$	±0,2%

6. Среднее значение массового расхода холодильного агента, определенного тремя методами измерения, вычисляется как среднее арифметическое. Результаты измерений можно считать удовлетворительными, если отклонения каждой из трех величин от среднего значения массового расхода холодильного агента не превышают 4%.

7. Тепловой поток в конденсаторе $Q_к$ (Вт) — по формуле

$$Q_к = m_{а.ср}\Delta h_{а.ж},$$

где $\Delta h_{а.к}$ — разность удельных энтальпий, определенная по параметрам холодильного агента на входе в конденсатор ($p_{а.к1}$; $t_{а.к1}$) и на выходе ($p_{а.к2}$; $t_{а.к2}$) из него.

8. Среднелогарифмический температурный напор Θ (°С) — по формуле

$$\Theta = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\ln \dfrac{t_к - t_{w1}}{t_к - t_{w2}}},$$

где $t_к$ — температура конденсации холодильного агента, определенная по давлению $p_{а.к}$ в паровом пространстве конденсатора.

Основные теплотехнические и гидродинамические показатели испарителя, характеризующие его качество, определяют:

коэффициент теплопередачи k [Вт/(м²·К)] — по формуле

$$k_{вн} = Q_к/A_{вн}\Theta;$$

плотность теплового потока $q_{Aвн}$ (Вт/м²) — по формуле

$$q_{Aвн} = Q_к/A_{вн};$$

гидравлическое сопротивление конденсатора при прохождении холодильного агента $\Delta p_{к.а}$ — по результатам измерений;

гидравлическое сопротивление при прохождении воды $\Delta p_{кв}$ — по результатам измерений.

III.5. ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Качество холодильных машин оценивается следующими основными показателями: холодопроизводительностью Q_0 (кВт), потребляемой мощностью N (кВт), массой машины m (кг), удельной холодопроизводительностью $\varepsilon = Q_0/N$ и удельной материалоемкостью $\gamma = Q_0/m$.

Рассмотрим методы измерений, применяемые для получения показателей, на примере холодильной машины для охлаждения жидких теплоносителей. Испытание осуществляется на теплообменном стенде, работающем по полному циклу холодильной машины на реальном холодильном агенте с использованием реального теплоносителя. Схема связи машины и ее элементов с аппаратами стенда показана на рис. III—18. Подвод теплоты в испарителе осуществляется с помощью циркуляции теплоносителя, подогреваемого в теплообменнике 5. Отвод теплоты в конденсаторе осуществляется водой из водяного бака *6*, температура в котором поддерживается за счет добавки холодной воды, поступающей по трубопроводу *17*. Испытуемая машина оснащается измерительными приборами, обеспечивающими возможность измерения параметров, приведенных в табл. III—5.

Кроме параметров, приведенных в табл. III—5, при испытании холодильных машин измеряют мощность компрессора одним из методов, изложенных в п. III.1.2.

Для сопоставимости результатов измерений испытания холодильных машин проводятся на следующих сравнительных режимах (табл. III—10).

Таблица III—10. СРАВНИТЕЛЬНЕ РЕЖИМЫ ИСПЫТАНИЯ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

Диапазон работы машины	Температура теплоносителя на выходе из испарителя, °С	Температура воды на входе в конденсатор, °С		Температура воздуха на входе в конденсатор, °С
		проточная	оборотная	
Высокотемпературный	+2	20	25	20
Среднетемпературный	—10	20	25	20

По результатам измерений определяют:

тепловой поток в испарителе Q_0 — по уравнению (III—1);

массовый расход холодильного агента $m_{а.и}$ — по тепловому балансу испарителя по уравнению (III—3);

тепловой поток в конденсаторе $Q_к$ — по уравнению (III—4);

массовый расход холодильного агента $m_{а.к}$ — по тепловому балансу конденсатора по уравнению (III—5);

массовый расход холодильного агента $m_{а.рв}$ — по измерениям расходомером перед терморегулирующим вентилем по уравнению (III—6);

среднее значение массового расхода холодильного агента $m_{а.ср}$, определенного тремя независимыми измерениями, вычисляют как среднее арифметическое. Результаты измерений можно считать удовлетворительными, если отклонение каждой из трех величин от среднего значения массового расхода холодильного агента не превышает 4%.

Основные теплотехнические показатели холодильной машины: холодопроизводительность Q_0 (Вт) холодильной машины

$$Q_0 = m_{а.ср}\Delta h_0,$$

где Δh_0 — разность удельных энтальпий, определенных по параметрам холодильного агента на выходе из испарителя ($p_{а.и2}$; $t_{а.и2}$) и на входе ($p_{а.и2}-\Delta p_{и.а}$; $t_{и.а1}$) в него;

удельная холодопроизводительность

$$\varepsilon = Q_0/N;$$

удельная материалоемкость γ (кВт/кг) холодильной машины

$$\gamma = Q_0/m.$$

Сопоставление полученных таким образом показателей с заданными позволяет объективно оценить качество холодильной машины.

При проведении испытаний холодильной машины следует иметь в виду, что на значение массового расхода холодильного агента $m_{а.и}$, определенное по тепловому балансу испарителя, может оказать влияние величина перегрева паров холодильного агента, выходящих из испарителя. Величина перегрева определяется разницей между температурой пара, выходящего из испарителя $t_{а.и2}$, и температурой насыщенных паров t_{02} при давлении $p_{а.и2}$. При малом перегреве ($t_{а.и2}-t_{02}<2$ °С) вместе с паром из испарителя уносятся капли жидкого холодильного агента с растворенным в них маслом.

У фреоновой машины для охлаждения жидких теплоносителей, имеющей кожухотрубный испаритель с кипением на наружной поверхности труб, возврат масла из испарителя в компрессор осуществляется только за счет переноса его из испарителя вместе с каплями жидкого холодильного агента. Поэтому при испытании машины с таким испарителем рекомендуется с помощью терморегулирующего вентиля устанавливать малый перегрев паров холодильного агента на выходе из испарителя, обеспечивающий постоянное поддержание заданного уровня масла в картере компрессора. Наличие в машине регенеративного теплообменника для доиспарения жидкости и подогрева паров холодильного агента перед входом в компрессор за счет переохлаждения жидкости, выходящей из конденсатора, позволяет учесть в тепловом балансе испарителя количество теплоты, затраченной на испарение жидкости вне испарителя. В связи с этим малый перегрев паров на выходе из испарителя не вносит ощутимой ошибки в результаты измерения массового расхода холодильного агента $m_{а.и}$.

Фреоновая машина для охлаждения жидких теплоносителей в испарителе с кипением внутри труб, как правило, не имеет регенеративного теплообменника. Поэтому для получения достоверного результата измерения массового расхода холодильного агента $m_{а.и}$ в этом случае необходимо с помощью терморегулирующего вентиля устанавливать перегрев паров холодильного агента на выходе из испарителя, равный 4÷6 °С. Если при таком значении перегрева отклонение массового расхода холодильного агента $m_{а.и}$ от среднего значения $m_{а.ср}$ превышает допустимую величину, то это свидельствует о нарушении равномерного распределения парожидкостной смеси холодильного агента по трубкам испарителя.

Глава IV

ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

IV.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Температура — один из основных параметров, характеризующих тепловое состояние системы и, как следствие, один из важнейших параметров многих технологических процессов. Температура связана с кинетической энергией теплового движения частиц и характеризует степень нагретости тела [65].

Единицами температуры являются градусы различных температурных шкал.

В системе СИ температуру выражают в кельвинах (К); 1 К равен 1/273,16 термодинамической температуры тройной точки воды, 1 К равен также 1/100 температурного интервала между точками кипения воды и таяния льда. Шкала Кельвина является абсолютной температурной шкалой.

Шкала Цельсия является условной температурной шкалой, в которой за нулевую точку принята температура таяния льда. Величина градуса Цельсия (°С) равна градусу Кельвина (1 °С = 1 К).

В ряде зарубежных стран сохранились другие условные температурные шкалы, в частности шкала Фаренгейта.

Связь между значениями температуры, выраженными единицами различных шкал, описывается формулами:

$$T[\text{К}] = t[°\text{С}] + 273{,}15 = 5/9t[°\text{F}] + 255{,}37;$$
$$t[°\text{С}] = T[\text{К}] - 273{,}15 = 5/9(t[°\text{F}] - 32).$$

В холодильной технике находит применение контактное измерение температуры тела (газообразного, жидкого или твердого), которое основано на теплообмене между ним и чувствительным элементом измерительного прибора и последующем преобразовании температуры чувствительного элемента в другие величины, удобные для восприятия [66]. В практике чувствительный элемент может оказаться под воздействием посторонних тепловых потоков, которые приводят к отклонению его температуры от температуры измеряемого тела и, как следствие, к погрешностям измерений. Поэтому одно из основных требований к методам измерений температуры — это обеспечение наименьшего термического сопротивления между чувствительным элементом прибора и измеряемым телом и изоляция чувствительного элемента от посторонних тепловых потоков.

IV.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Для контактного измерения температуры используют следующие типы первичных преобразователей:

стеклянные жидкостные преобразователи, основанные на тепловом расширении жидкостей;

манометрические преобразователи, в которых температура преобразуется в изменение давления жидкости, пара или газа;

термоэлектрические преобразователи, в которых под воздействием температуры генерируется термо-ЭДС постоянного тока;

термопреобразователи сопротивления, в которых используется зависимость удельного сопротивления проводника или полупроводника от температуры;

Для преобразователей температуры существенное значение имеют статические и динамические функции преобразования, причем первые зависят от принципа действия и конструкции преобразователя, а вторые, кроме того,— от свойств и состояния измеряемой среды.

IV.2.1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СТЕКЛЯННЫХ ЖИДКОСТНЫХ ТЕРМОМЕТРОВ

Преобразователи стеклянных термометров, применяемых в холодильной технике, служат для лабораторных и технических измерений в области температур от —90 до +200 °С.

Действие этих преобразователей основано на объемном расширении жидкости при постоянном давлении. Выходной величиной является изменение длины столбика жидкости. Термометры различают по виду термометрической жидкости. В холодильной технике применяют следующие термометрические жидкости: ртуть в области температур —30÷+200 °С, спирт —50÷+50 °С, толуол —80÷+60 °С.

Схема простейшего преобразователя приведена на рис. IV—1, *а*. Термометрическая жидкость заполняет резервуар *P* при температуре ниже нижнего предела измерений. При повышении температуры в результате расширения жидкость заполняет капилляр *K*. Его размеры выбираются так, чтобы при температуре, равной верхнему пределу измерений, жидкость заполнила капилляр на длине *L*.

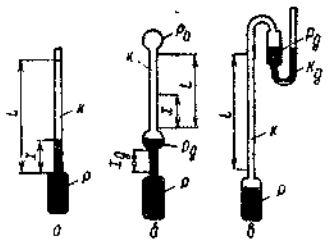


Рис. IV—1. Схемы преобразователей стеклянных жидкостных термометров:

а — обычный; *б* — с укороченным диапазоном температур; *в* — метастатический (Бекмана)

Функция преобразования имеет вид

$$x = At - B, \qquad \text{(IV—1)}$$

где x — длина заполненной части капилляра; t — измеряемая температура.

$$A = v_0\beta/S, \qquad B = t_н(v_0\beta/S),$$

где $t_н$ — начальная температура (нижний предел измерений); v_0 — объем жидкости при начальной температуре; S — площадь поперечного сечения канала капилляра; β — видимый коэффициент расширения термометрической жидкости:

$$\beta = \beta_ж - \beta_{ст},$$

$\beta_ж$ и $\beta_{ст}$ — истинные коэффициенты расширения жидкости и стекла [например, для ртути $\beta_ж = 18\cdot10^{-5}$ 1/град, для стекла $\beta_{ст} = 2\cdot10^{-5}$ 1/град, откуда видимый коэффициент $\beta = (18—2)10^{-5} = 16\cdot10^{-5}$ 1/град].

Функция преобразования (IV—1) линейна относительно t, что позволяет иметь равномерные шкалы.

Из формулы (IV—1) следует, что длина градусного деления шкалы

$$l = L/(t_к - t_н) = v_0\beta/S$$

может быть увеличена уменьшением температурного интервала $t_к—t_н$ ($t_к$ — верхний предел измерений, L — длина шкалы), уменьшением сечения капилляра и увеличением начального объема жидкости.

По технологическим и эксплуатационным соображениям величина v_0 обычно не превышает 2,5 см³, а диаметр канала капилляра изготовляют не менее 0,1 мм ($s \approx 0{,}8\cdot10^{-4}$ см²). Для точных измерений (порядка 0,01 °С) предназначены преобразователи с малой разностью $t_к—t_н$ (4 °С в области измерений 0—60 °С). Схема такого преобразователя представлена на рис. IV—1, *б*.

Наряду с резервуаром *P* на капилляре предусмотрены дополнительное расширение $P_д$ и ограничительное расширение P_0. Рабочий диапазон температур $t_к—t_н$ соответствует участку капилляра между $P_д$ и P_0. Кроме того, имеется участок от *P* до $P_д$, который используют для контроля, например, при 0 °С. Размеры резервуара, расширений $P_д$ и P_0 и объем жидкости выбирают такими, чтобы рабочий диапазон температур укладывался на длине капилляра *L*, при более низких температурах жидкость располагалась в *P* и $P_д$, при более высоких температурах, кроме того, и в P_0. Для перекрытия широкой области температур применяют несколько преобразователей (например, область 0—60 °С перекрывают 15 диапазонов шириной 4 °С).

Для особо точных измерений (порядка 0,001—0,01 °С) небольших изменений температуры используют метастатический преобразователь (термометр Бекмана), схема которого показана на рис. IV—1, *в*. Преобразователь имеет основной *P* и дополнительный $P_д$ резервуары с жидкостью. Рабочий объем жидкости в резервуаре *P* определяет диапазон измерений на длине *L* капилляра *K*. При необходимости изменения диапазона жидкость из резервуара *P* переливают в резервуар $P_д$ (диапазон смещается в об-

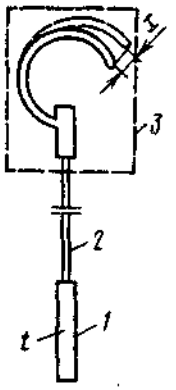


Рис. IV—2. Упрощенная схема манометрического преобразователя температуры:
1 — термобаллон; *2* — капилляр; *3* — манометр

ласть более низких температур) или, наоборот, из резервуара P в резервуар $P_д$ (смещение в область более высоких температур). В связи с тем что объем жидкости в рабочем резервуаре меняется, основная шкала по капилляру K носит условный характер и при измерениях хотя бы одна из точек шкалы должна быть привязана к температуре с помощью другого прибора. Эту привязку осуществляют по дополнительной шкале на капилляре $K_д$.

IV.2.2. МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Манометрические термопреобразователи, в которых температура преобразуется в давление, а затем в механическое перемещение, применяются в технических приборах для измерений в диапазоне от —150 до +600 °С с основной допускаемой погрешностью от ±1 до ±2,5%.

Манометрический термометр представляет собой пружинный манометр (см. главу V), герметично соединенный с термосистемой. Последняя состоит из чувствительного элемента (термобаллона) и соединительной капиллярной трубки. Упругий элемент манометра может приводить в действие стрелку прибора либо элемент промежуточного (передающего) преобразователя для дистанционной передачи информации.

Упрощенная схема манометрического преобразователя представлена на рис. IV—2. Измеряемая температура t воспринимается термобаллоном *1* и преобразуется в давление рабочего вещества (заполнителя). Через капилляр *2* это давление передается в манометр *3*, где вторично преобразуется в перемещение упругого элемента x.

В зависимости от используемого термометрического вещества (заполнителя) манометрические преобразователи подразделяются на газовые, жидкостные и парожидкостные, или конденсационные.

IV.2.2.1. Газовые манометрические термопреобразователи

Эти термопреобразователи характеризуются тем, что их термосистема заполняется газом, обычно азотом.

При изменении температуры термобаллона давление в нем меняется. Если принять, что объем термобаллона $v_т$ составляет основную часть объема всей термосистемы $v_с$ ($v_т/v_с \approx 1$), то зависимость давления от температуры термобаллона выражается формулой

$$p_t = p_0(1 + \beta t), \qquad \text{(IV—2)}$$

где p_0 и p_t — давления газа при температурах 0 °С и t; β — термический коэффициент давления газа, $\beta = 0{,}00366$ К$^{-1}$.

Учитывая, что обычно термосистему заполняют азотом при некотором начальном давлении $p_н$, после преобразования выражения (IV—2) получаем промежуточную функцию преобразования:

$$p_t = p_н\left[1 + \frac{\beta(t - t_н)}{1 + \beta t_н}\right], \qquad \text{(IV—3)}$$

или

$$p_t = A_p t + B_p, \qquad \text{(IV—4)}$$

где

$$A_p = \frac{p_н\beta}{1 - \beta t_н}, \qquad B_p = p_н\left(1 - \frac{\beta t_н}{1 + \beta t_н}\right).$$

Функции (IV—3) и (IV—4) линейны относительно t.

Если выходной величиной термопреобразователя считать перемещение x упругого элемента (см. рис. IV—2) и принять ее пропорциональной давлению, т. е.

$$x = A_x p + B_x,$$

то полная функция преобразования получает вид

$$x = At + B, \qquad \text{(IV—5)}$$

где

$$A = A_x A_p, \; B = B_x + B_p.$$

Функция преобразования (IV—5) выведена при условии, что объем термобаллона остается постоянным. Между тем при изменении температуры размеры его меняются, что приводит к некоторому отклонению функции от линейной. Однако эти отклонения, как правило, невелики и ими можно пренебречь. Также незначительны влияния температуры окружающего воздуха и атмосферного давления. В связи с этим газовые преобразователи позволяют работать с практически равномерными шкалами.

IV.2.2.2. Парожидкостные манометрические термопреобразователи

Термосистема такого преобразователя заполняется жидкостью, находящейся в равновесном состоянии с насыщенным паром, частично заполняющим объем термобаллона. Заполнение выполняется так, чтобы жидкая фаза сохранялась во всем диапазоне измеряемых температур.

В качестве термометрических жидкостей используют: R22 (—25÷+80 °С), пропилен (—50÷+60 °С), хлористый метил (0÷+125 °С) и др.

Промежуточная функция преобразования $p = f(t)$ представляет собой зависимость давления насыщения пара от температуры и потому является существенно нелинейной. В связи с этим и полная функция преобразования $x = f(t)$ также нелинейна. Это приводит к неравномерности шкал приборов с парожидкостной термосистемой.

В некоторых случаях принимают специальные меры для спрямления функции преобразования, например используют жесткую скобу, охватывающую манометрическую пружину и имеющую несколько регулировочных винтов [77].

IV.2.2.3. Жидкостные манометрические термосистемы

Термосистема жидкостного преобразователя полностью заполняется термометрической жидкостью (ртуть, метаксилол, силиконовые жидкости и др.). Действие термопреобразователя основано на изменении объема жидкости при изменении температуры и взаимодействии ее с упругим чувствительным элементом. Для обеспечения заданных свойств в термосистеме не должны присутствовать воздух или другие газы.

В жидкостных термосистемах давление жидкости, а следовательно, и перемещение упругого элемента зависят от жесткости термобаллона и упругого элемента, их объемов, а также от коэффициентов объемного расширения термочувствительной жидкости и термобаллона.

Путем выбора элементов термосистемы и их размеров добиваются, чтобы полный ход упругого элемента соответствовал заданному диапазону измерения температур. При этом функция преобразования достаточно близка к линейной.

IV.2.3. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ТЕРМОПАРЫ)

IV.2.3.1. Основные типы

Термоэлектрические преобразователи (ТП) предназначаются для измерений в широкой области температур (в холодильной технике от —100 до +200 °С). ТП преобразуют температуру в электродвижущую силу (термо-ЭДС).

Действие ТП основано на явлении Зеебека, т. е. на генерации термо-ЭДС в месте соединения двух различных проводников. Величина термо-ЭДС зависит от материалов термоэлектродов и является функцией температуры. В холодильной технике ТП используются в основном при лабораторных и стендовых измерениях с погрешностью $\pm(0{,}1 \div 1)$°С. Распространение получили ТП медь-константановые (МК) и хромель-копелевые (ХК).

Медьконстантановые ТП не имеют стандартизованных градуировочных таблиц, однако в силу целого ряда достоинств находят применение в лабораторной практике для измерений в области от —200 до +300 °С. Основное достоинство — большое постоянство термоэлектрических свойств. Средняя чувствительность (коэффициент преобразования) в области температур от 0 до 100 °С составляет 41 мкВ/°С. При соответствующей градуировке МК ТП позволяют измерять температуру с погрешностями $\pm(0{,}1 \div 0{,}2)$°С.

Хромель-копелевые ТП в соответствии с ГОСТ 3044—77 могут использоваться в области температур от —50 до +600 °С. Достоинство этих ТП — наивысшая чувствительность по сравнению с другими типами ТП. Так, при температурах рабочего спая 100 °С, а свободного 0° терм-ЭДС e=6,00 мВ, что соответствует чувствительности (коэффициенту преобразования) 69,0 мкВ/°С.

Недостатками хромель-копелевых ТП являются плохая воспроизводимость функции преобразования (градуировочной характеристики) различными партиями термоэлектродных проводов, а также наличие неоднородностей материала, особенно хромеля, которые приводят к возникновению паразитных термо-ЭДС [71].

По ГОСТу [31] допускаемое отклонение термо-ЭДС ХК ТП промышленного изготовления от градуировочных характеристик в области температур от —50 до +300 °С составляет 0,2 мВ (более 2 °С). Термоэлектродные провода ХК очень чувствительны к механическим повреждениям, которые приводят к дополнительным неоднородностям.

В холодильной технике используют ХК ТП, изготовляемые в лабораторных условиях и подвергаемые индивидуальной градуировке. Достижимая точность порядка $\pm(0{,}3 \div 0{,}5)$°С. Реже используют ТП промышленного изготовления.

IV.2.3.2. Схемы термоэлектрических преобразователей

Схема простейшего ТП представлена на рис. IV—3, *а*. Два термоэлектродных проводника *А* и *В* соединены между собой (обычно сваркой или пайкой), и спай помещен в измеряемую среду с температурой t. В спае генерируется термо-ЭДС $e_{AB}(t)$, которая полностью передается на концы *а* и *в* (потери отсутствуют из-за того, что в разомкнутой цепи ток равен нулю). Изменениям температуры t соответствуют однозначные изменения величины e_{AB}.

Любой способ измерения термо-ЭДС сопряжен с подключением к термоэлектродным проводам измерительных приборов через посредство проводников, чаще всего медных.

В схеме (рис. IV—3, *б*) измеритель *И* подключен к точкам *а* и *в* проводом из материала *С*. В связи с этим в местах контактов материалов *АС* и *ВС* возникают дополнительные термо-ЭДС и в измерительной цепи действует сумма термо-ЭДС, подводимая к измерительному прибору:

$$U_{\text{и}} = e_{AB}(t) + e_{AC}(t_{\text{н}}) + e_{BC}(t_{\text{н}}), \qquad \text{(IV—6)}$$

где $e_{AC}(t_{\text{н}})$, $e_{BC}(t_{\text{н}})$ — термо-ЭДС, возникающие в точках присоединения *а* и *в* (знаки «+» следует понимать как алгебраическое суммирование, которое должно выполняться с учетом направления ЭДС); $t_{\text{н}}$ — температура в местах контакта *АС* и *ВС*.

Из теории известно [77], что при включении в цепь термоэлектродных проводов третьего провода и при условии, что места соединения этого провода с проводами *А* и *В* имеют одинаковую температуру $t_{\text{н}}$, имеет место равенство

$$e_{AC}(t_{\text{н}}) + e_{BC}(t_{\text{н}}) = e_{AB}(t_{\text{н}}). \qquad \text{(IV—7)}$$

Подставляя (IV—7) в (IV—6) и принимая во внимание фактическое направление ЭДС, получаем

$$U_{\text{и}} = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_{\text{н}}). \qquad \text{(IV—8)}$$

Спай, воспринимающий измеряемую температуру, называется рабочим, а концы, присоединяемые к измерительному прибору,— свободными.

Тогда равенство (IV—8) принимает вид

$$U_{\text{и}} = e_{\text{р}}(t) - e_{\text{св}}(t_{\text{н}}).$$

Определяя экспериментально зависимость $U_{\text{и}}(t)$ при $t_{\text{н}}$=const, получают градуировочную характеристику комплекта из ТП, соеди-

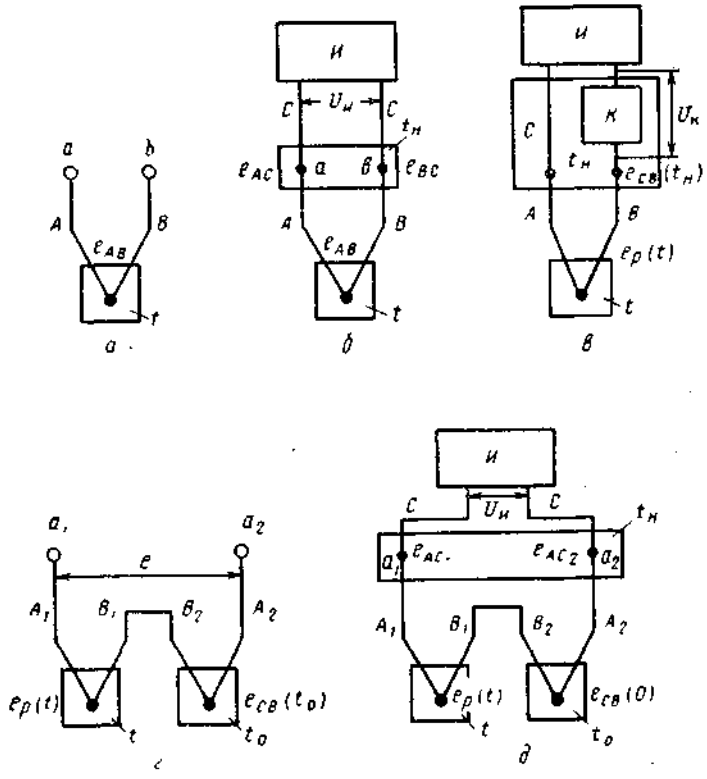


Рис. IV—3. Схема термоэлектрических преобразователей:
а — простейший ТП; *б* — подключение измерителя к ТП; *в* — схема с корректирующим устройством; *г* — ТП с рабочим и свободным спаями; *д* — подключение измерителя к ТП с рабочим и свободным спаями

нительных проводов и прибора *И*. Однако выполнение условия $t_в = \text{const}$ не всегда возможно. Во избежание дополнительных погрешностей применяют измерительные приборы с корректирующим устройством *К* (рис. IV—3, *в*).

Это устройство в зависимости от температуры $t_н$ генерирует напряжение $U_к$ таким образом, чтобы компенсировать изменение термо-ЭДС свободных концов. Подробнее работа корректирующих устройств описана ниже (см. раздел IV.2.3.4).

Для точных измерений в области умеренных температур применяют ТП с двумя спаями: рабочим и свободным (рис. IV—3, *г*). Рабочий спай термоэлектродов A_1 и B_1 воспринимает измеряемую температуру t. Свободный спай A_2 и B_2 из таких же проводов помещается в термостатируемый объем с постоянной температурой t_0. Чаще всего это сосуд Дьюара с тающим льдом, в котором температура с достаточно высокой точностью поддерживается около 0 °С.

Результирующая термо-ЭДС

$$e = e_р(t) - e_{св}(0). \qquad (IV—9)$$

Учитывая, что $e_{св}(0) = \text{const}$, величина e однозначно зависит от измеряемой температуры. Особенность схемы: оба выходящих конца a_1 и a_2 изготовлены из материала *А* (или материала *В*). Присоединяя к ним через медные проводники *С* измеритель *И* (рис. IV—3, *д*) и считая, что места соединений находятся при одной и той же температуре $t_в$, устанавливаем, что $e_{AC_1} = e_{AC_2}$ и в сумме равны нулю. Следовательно, выражение (IV—9) остается в силе, так как влияние паразитных термо-ЭДС выводных присоединений исключается.

Рассмотренные схемы (см. рис. IV—3, *б*, *в* и *д*) находят практическое применение в нескольких вариантах.

Схему (см. рис. IV—3, *б*) обычно применяют при измерениях достаточно высоких температур, когда возможные отклонения температуры $t_н$ от номинального значения не приводят к большим относительным погрешностям. При этом точки соединения *а* и *в* могут находиться вблизи или на самом ТП, и тогда соединительная линия выполняется с помощью проводов *С* (например, медных); либо эти точки находятся на приборе *И* и тогда линия выполняется с помощью термоэлектродных проводов *А* и *В* или соответствующих им удлиняющих (компенсационных) проводов. Последний вариант применяют, когда температура вблизи ТП может существенно отличаться от номинала.

Схема (см. рис. IV—3, *в*) обеспечивает уменьшение погрешности за счет коррекции и поэтому позволяет производить измерения и сравнительно низких температур.

Схема (см. рис. IV—3, *д*) представляет возможности измерять любые температуры с высокой точностью при условии, что точки a_1 и a_2 находятся при одинаковой температуре (место расположения этих точек не имеет значения).

Схема (см. рис. IV—3, *д*) может быть использована для измерения разности температур. В этом случае оба спая являются рабочими. Если принять, что в ограниченном диапазоне температур термо-ЭДС

$$e_р(t) = mt + l$$

(m — постоянный коэффициент; l — постоянная величина),

т. е. является линейной функцией температуры, то в цепи с двумя рабочими спаями

$$U_и = e_{р1}(t_1) - e_{р2}(t_2) = m(t_1 - t_2).$$

Обозначив $\Delta t = t_1 - t_2$, получаем

$$U_и = m\Delta t,$$

т. е. напряжение на измерительном приборе пропорционально разности двух температур и, следовательно, шкала прибора может быть отградуирована непосредственно в градусах разности температур.

Рассмотренные схемы ТП предназначены для измерений в одной точке. Для измерений одним прибором температур нескольких объектов используют многоточечные переключатели. Из множества известных схем покажем две, используемые при испытаниях холодильного оборудования.

В схеме (рис. IV—4, *а*) применен многоточечный переключатель *П*, который коммутирует оба термоэлектродных провода: *А*

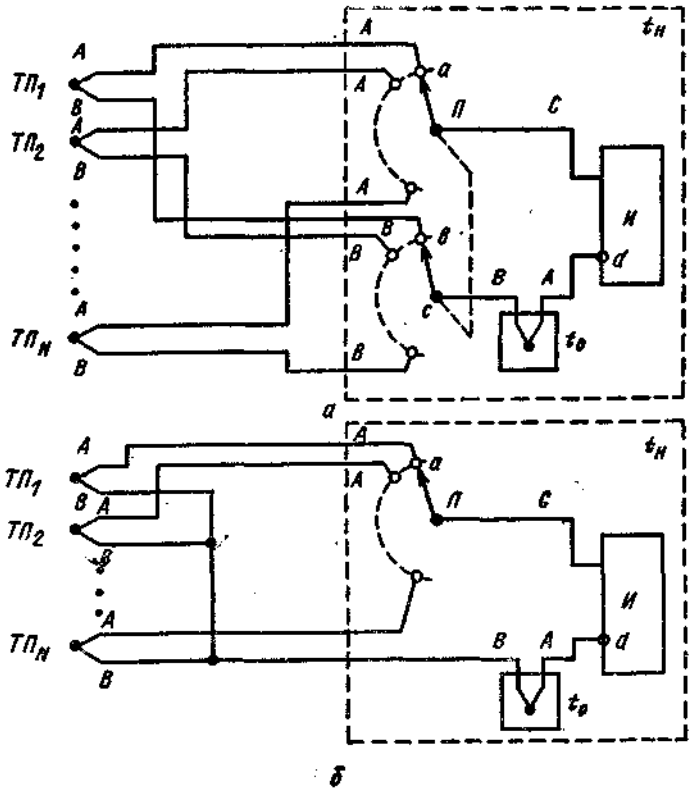


Рис. IV—4. Схема многоточечного измерения температур с двухпроводным (*а*) и однопроводным (*б*) переключателями:

A и *B* — термоэлектродные провода; *C* — коммутационные провода; *И* — измерительный прибор; *П* — переключатель; $ТП_1$, $ТП_2$, $ТП_N$ — термоэлектрические преобразователи

и *B*. Схема включает в себя термостат общего свободного спая. В схеме с переключателем в цепь вносятся дополнительные термо-ЭДС в точках *a*, *в*, *c* и *d*.

Для исключения их влияния необходимо, чтобы все перечисленные точки находились при одной температуре $t_н$. На практике переключатель может оказаться при температуре, отличной от температуры измерителя, что приведет к дополнительной погрешности.

В схеме (рис. IV—4, *б*) коммутируется только один провод *A*. В связи с этим исключаются две точки с дополнительными ЭДС (*в* и *c*), что уменьшает вероятность дополнительной погрешности, однако указанное выше условие равенства температур должно соблюдаться и здесь. Эта схема может применяться при условии, что провода *A* и *B* всех ТП будут тщательно изолированы от «земли» (корпуса, массы) и между собой.

IV.2.3.3. Способы измерения термо-ЭДС

Измерения термо-ЭДС осуществляют двумя способами: измерением ЭДС милливольтметром и методом сравнения с известной ЭДС (компенсационным методом) с помощью потенциометра.

На схеме (рис. IV—5, *а*) показано измерение термо-ЭДС милливольтметром *МВ*.

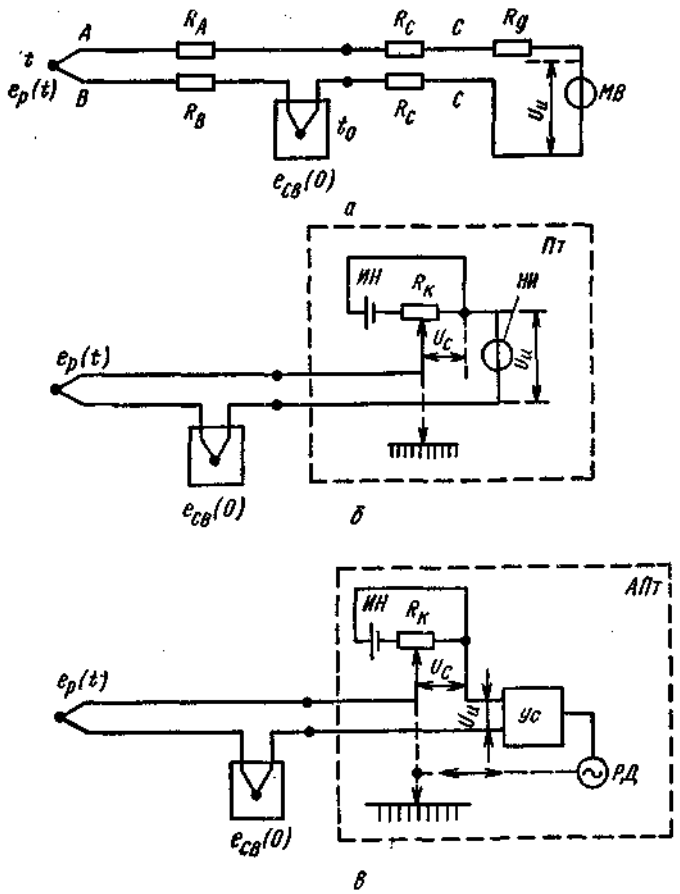


Рис. IV—5. Способы измерения термо-ЭДС:

а — милливольтметром; *б* — ручным потенциометром; *в* — автоматическим потенциометром; R_A, R_B, R_C — сопротивления проводов *A*, *B* и *C*; $R_д$ — дополнительное сопротивление; $R_к$ — сопротивление делителя напряжения; *МВ* — мялливольтметр; *Пт* — ручной потенциометр; *АПт* — автоматический потенциометр; *РД* — реверсивный двигатель; *Ус* — усилитель

Напряжение на милливольтметре определяется по формуле

$$U_{\text{и}} = \frac{R_{\text{мв}} e(t)}{R_{\text{л}} + R_{\text{мв}}} = \frac{e(t)}{\frac{R_{\text{л}}}{R_{\text{мв}}} + 1}, \qquad \text{(IV—10)}$$

где $R_{\text{мв}}$ — внутреннее сопротивление милливольтметра; $R_{\text{л}}$ — суммарное сопротивление цепи ТП для данного милливольтметра:

$$R_{\text{л}} = R_A + R_B + 2RC + R_{\text{д}},$$

где R_A, R_B, R_C — сопротивления термоэлектродных (A и B) и линейных (C) проводов; $R_{\text{д}}$ — дополнительное сопротивление, подбираемое так, чтобы $R_{\text{л}}$ имело заданное значение; $e(t)$ — суммарная ЭДС; $e(t) = e_{\text{р}}(t) - e_{\text{св}}(0)$.

Формула (IV—10) относится к магнитоэлектрическим милливольтметрам, внутреннее сопротивление которых составляет порядка 10^1—10^2 Ом.

Градуировка такого милливольтметра и нормированная погрешность соответствуют требованиям только при заданном $R_{\text{л}}$. Шкалы магнитоэлектрических милливольтметров могут быть градуированы в градусах Цельсия.

В последнее время получили распространение электронные милливольтметры с аналоговыми или цифровым отсчетом. Для таких милливольтметров характерно весьма высокое входное сопротивление порядка 10^5—10^7 Ом. В этом случае отношение $R_{\text{л}}/R_{\text{мв}} \to 0$ и формула (IV—10) обращается в равенство

$$U_{\text{и}} = e(t).$$

При использовании такого прибора не требуется дополнительных сопротивлений и показания прибора не зависят от изменения сопротивления в цепи в широких пределах. Преимущество способа измерения милливольтметром — его простота. Точность в основном зависит от погрешности ТП. Современные цифровые приборы в принципе могут обеспечить погрешность порядка ±0,1 °С.

Компенсационный метод измерения термо-ЭДС состоит в том, что в цепь ТП вводится напряжение сравнения $U_{\text{с}}$ и включается нуль-индикатор *НИ*. Схема простейшего компенсатора представлена на рис. IV—5, *б*. Источник *ИН* создает падение напряжения на резисторе (делителе напряжения) $R_{\text{к}}$. Часть этого напряжения $U_{\text{с}}$ снимается через движок. Положение движка указывается по шкале, которая с необходимой точностью градуируется в единицах ЭДС или температуры.

Напряжение на нуль-индикаторе

$$U_{\text{и}} = e(t) - U_{\text{с}}.$$

Оно равно нулю только при условии $e(t) = U_{\text{с}}$. Факт равенства $U_{\text{с}}$ нулю фиксируется по нуль-индикатору (в данном случае — гальванометру). Таким образом, процесс измерения сводится к постепенному изменению величины $U_{\text{с}}$ до момента, когда напряжение $U_{\text{и}}$ станет равным нулю, и отсчету показаний по шкале. С известным приближением можно считать, что при компенсации ток в цепи ТП отсутствует.

Отсутствие тока в цепи в момент отсчета исключает влияние сопротивлений проводов на точность измерений. От величины сопротивления цепи зависит только требуемая чувствительность нуль-индикатора; с увеличением сопротивления требуется более чувствительный индикатор. Прибор, в котором сосредоточены источник напряжения, устройства его регулировки и нуль-индикатор, называется ручным потенциометром (на схеме обозначен *Пт*).

На основе этого метода действуют автоматические потенциометры (рис. IV—5, *в*). В этом приборе роль нуль-индикатора выполняет усилитель *Ус* который реагирует не только на величину входного напряжения, но и на его знак. Усиленный сигнал с выхода усилителя подается на реверсивный двигатель *РД*. В зависимости от знака напряжения $U_{\text{и}}$ двигатель вращается и перемещает движок в ту или другую сторону. Система приходит в равновесие (двигатель останавливается), когда $U_{\text{и}} = 0$. Как и в ручном потенциометре, отсчет производят по шкале резистора $R_{\text{к}}$.

IV.2.3.4. Коррекция по температуре свободных спаев

Выше указывалось, что в большинстве случаев в градуировочных таблицах приводятся значения термо-ЭДС при температуре свободного спая 0 °С. В практике свободные спаи могут оказаться при температурах, отличных от нуля. Коррекцию осуществляют с целью исключить или уменьшить влияние изменяющейся температуры и привести суммарное напряжение в цепи ТП к условиям, соответствующим температуре свободных концов 0 °С [см. формулу (IV—9)].

Для этой цели используют различные схемы, однако основной является четырехплечая мостовая схема, в одно из плеч которой включают термочувствительный резистор (термопреобразователь сопротивления). Обычно его изготовляют из меди, в то время как остальные резисторы выполняют из термостабильного материала (манганина).

Упрощенная схема коррекции представлена на рис. IV—6. Корректирующий мост из резисторов $R_{\text{т}}$, R_1, R_2 и R_3 одной диагональю (ab) включен последовательно в цепь *ТП*. В другую диагональ (cd) включен источник напряжения ИН. Резистор $R_{\text{т}}$ представляет собой медный термопреобразователь сопротивления, остальные резисторы R_1, R_2 и R_3 — манганиновые.

Напряжение на входе измерительного прибора *И* выражается в виде суммы

$$U_{\text{и}} = e_{\text{р}}(t) - [e_{\text{св}}(0) + \Delta e_{\text{св}}(t_{\text{н}})] + U_{\text{к}}, \qquad \text{(IV—11)}$$

где $\Delta e_{\text{св}}(t_{\text{н}})$ — разность между термо-ЭДС свободных концов при температурах 0 °С и $t_{\text{н}}$, $[\Delta e_{\text{св}}(t_{\text{н}}) = e_{\text{св}}(t_{\text{н}}) - e_{\text{св}}(0)]$; $U_{\text{к}}$ — напряжение, создаваемое корректирующей схемой.

Из формулы (IV—11) следует, что коррекция состоит в выработке напряжения $U_{\text{к}} = e_{\text{св}}(t_{\text{н}})$, так как при этом условии формула приводится к виду (IV—9).

Сопротивления резисторов подбирают такими, чтобы при $t_{\text{н}} = 0$ °С мост оказался уравновешенным, т. е.

$$R_{\text{т}}(0) R_2 = R_1 R_3. \qquad \text{(IV—12)}$$

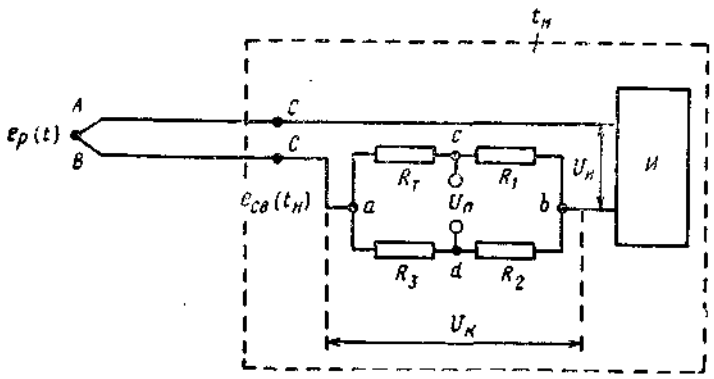


Рис. IV—6. Упрощенная схема коррекции по температуре свободных концов

При температуре 0 °С напряжение в диагонали ab моста $U_к=0$ и корректирующая схема не влияет на напряжение $U_н$.

При отклонении температуры от нуля равенство (IV—12) нарушается, так как

$$R_т(t_н) = R_т(0)\,(1 + \alpha t_н),$$

где α — температурный коэффициент сопротивления меди ($\alpha = 4{,}26 \cdot 10^{-3}$1/°С).

Для компенсационной схемы измерения, когда ток равен нулю, величину корректирующего напряжения можно рассчитать по формуле

$$U_к = U_п\left(\frac{R_3}{R_т+R_3} - \frac{R_2}{R_1+R_2}\right)$$

($U_п$ — напряжение источника питания).

Подбирая параметры схемы, можно добиться, чтобы при температуре $t_н$ имело место равенство

$$U_к(t_н) = \Delta e_{св}(t_н).$$

Тогда с точностью до отклонений от линейности изменение термо-ЭДС свободных концов относительно величины $e_{св}(0)$ компенсируется встречным напряжением $U_к$.

IV.2.4. ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

IV.2.4.1. Основные типы

Термопреобразователи электрического сопротивления (ТС)* находят применение в холодильной технике для измерений температуры в диапазоне от —100 °С (и ниже) до +300 °С.

* Старое наименование — «термометры сопротивления».

По принципу действия ТС относятся к параметрическим преобразователям: измеряемая температура преобразуется в изменения электрического сопротивления.

В зависимости от материала, из которого изготовлены чувствительные элементы, ТС делятся на металлические и полупроводниковые. Для целей измерения в области температур умеренного холода применяют почти исключительно металлические ТС. Полупроводниковые ТС встречаются в некоторых устройствах автоматики и поэтому в данной работе не рассматриваются. Металлические ТС изготовляют из платины (ТСП) и меди (ТСМ).

Функция преобразования для платиновых ТС имеет в области умеренных температур вид

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \qquad \text{(IV—13)}$$

где R_t — сопротивление при температуре t: $A = 3{,}96847 \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$; $B = -5{,}847 \cdot 10^{-7}$ °С$^{-2}$; R_0 — сопротивление ТС при 0 °С.

Для приближенных расчетов в диапазоне температур от —50 до +50 °С можно принимать следующие величины чувствительности платиновых параметров:

R_0, Ом	Чувствительность, Ом/°С
5	0,019
10	0,039
50	0,19
100	0,39

Функция преобразования для медных ТС принимается линейной в виде

$$R_t = R_0(1 + \alpha_t),$$

где α — температурный коэффициент сопротивления меди, равный $4{,}26 \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$.

Приближенно чувствительность медных ТС в диапазоне температур от —50 до +50 °С имеет следующие значения:

R_0, ОМ	Чувствительность, ОМ/°С
10	0,042
50	0,21
100	0,42

Конструктивно ТС представляет собой обмотку из проволоки диаметром 0,05—0,1 мм, нанесенную на изолирующий каркас и помещенную в защитный кожух. Обмотка обычно выполняется бифилярно (петлевым способом), что уменьшает внешние наводки. Провода от чувствительного элемента (их количество бывает 2 или 4) присоединяются к клеммам либо непосредственно выводятся наружу. Сопротивление выводных проводников не превышает 0,1 и 0,2% R_0 соответственно для платиновых и медных ТС. Во всех случаях принимаются меры к герметизации обмотки, чтобы защитить ее от внешних воздействий. Это особенно важно при измерениях отрицательных температур, когда внутрь кожуха ТС может проникать влага и выпадать в виде конденсата или льда.

Наряду с ТС с одним чувствительным элементом находят применение двойные ТС, имеющие два независимых чувствительных элемента. Такие ТС позволяют получать два сигнала из одной точки измерения.

Важным показателем, непосредственно влияющим на погрешность измерений, является мощность рассеяния ТС, которая зависит от коэффициента теплопередачи в измеряемую среду.

Мощность, выделяемая на ТС измерительным током,

$$P_i = I^2 R_т,$$

где $I_т$ — ток, протекающий через ТС; $R_т$ — сопротивление ТС.

Мощность, передаваемая в измеряемую среду,

$$P_и = kA(t_и - t_т),$$

где kA — произведение коэффициента теплопередачи ТС на площадь его поверхности; $t_и$ и $t_т$ — температура измеряемой среды и чувствительного элемента $ТС$.

В установившемся состоянии $P_i = P_и$ или

$$I^2 R_т = kA(t_и - t_т). \qquad (IV—15)$$

Из этого уравнения можно определить допустимое значение питающего тока, обеспечивающее заданное значение погрешности:

$$\Delta t = t_и - t_т.$$

Получить аналитическим путем значение k практически не удается, поэтому его при необходимости определяют экспериментально для каждой измеряемой среды и скорости либо пользуются допустимыми значениями измерительного тока, приводимого в технических характеристиках.

В соответствии с [32] измерительный ток, протекающий по чувствительному элементу, должен изменять номинальное сопротивление при 0 °С не более чем на 0,1%.

IV.2.4.2. Способы измерения температуры с помощью ТС

Находят применение несколько способов измерения температуры с помощью ТС. Все они сводятся к измерению сопротивления ТС и перевода его в температуру посредством градуировочных таблиц или температурных шкал. Различают способы амперметра и вольтметра, неуравновешенного моста и уравновешенного моста.

Способ амперметра и вольтметра. Этот широко известный в электротехнике способ основан на законе Ома:

$$R = U/I.$$

В схеме (рис. IV—7, *а*) применены миллиамперметр и вольтметр, измеряющие ток и напряжение в цепи, состоящей из ТС сопротивлением $R_т$ и двух проводов линии сопротивлением по $R_л/2$.

Измеряемое напряжение

$$U_и = I_т(R_т + R_л),$$

где $I_т$ — ток, протекающий через ТС.

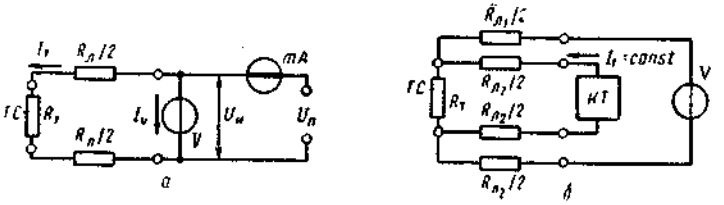


Рис. IV—7. Схемы измерения температуры термопреобразователем сопротивления способом амперметра и вольтметра:

а — с измерением тока и напряжения; *б* — со стабилизированным источником тока ($I_т$=const) и измерением напряжения

Ток, измеряемый миллиамперметром,

$$I_и = I_т + I_V,$$

где I_V — ток, протекающий через вольтметр.

После несложных преобразований и учтя, что

$$I_V = U_и/R_V,$$

где R_V — внутреннее сопротивление вольтметра, получаем искомое значение сопротивления:

$$R_т = \frac{U_и}{I_и - \dfrac{U_и}{R_V}} - R_л. \qquad (IV—16)$$

Из этого выражения вытекает, что данный способ измерений является косвенным, измеряемая величина получается в результате вычислений и использования градуировочной таблицы.

Сопротивление линии $R_л$ должно быть предварительно измерено.

Формула (IV—16) несколько упрощается, если применяют вольтметр с достаточно высоким внутренним сопротивлением R_V.

Если $I_и \gg \dfrac{U_и}{R_V}$, то расчетная формула имеет вид

$$R_т = \frac{U_и}{I_и} - R_л.$$

Это условие выполняется, если, например, применяют электронные вольтметры.

Более совершенная схема, основанная на способе амперметра и вольтметра, показана на рис. IV—7, *б*.

Термопреобразователь сопротивления $ТС$ соединен с измерительным комплектом четырехпроводной линией. Через двухпроводную линию сопротивлением $R_{л1}$ к выводным концам $ТС$ присоединяют вольтметр. Через линию сопротивлением $R_{л2}$ присоединяют стабилизированный источник тока $НТ$, который обеспечивает условие $I_т$=const независимо от величин $R_т$ и $R_{л2}$. Если вольтметр

электронный, то его ток пренебрежительно мал, а следовательно, и малы потери на линии $R_{л1}$. Тогда сопротивление *ТС*

$$R_т = U_и/I_т,$$

но, поскольку $I_т = \text{const}$, то вольтметр может быть отградуирован в градусах Цельсия, т. е. измерение становится прямым.

Особенностью способа амперметра и вольтметра является то, что измерительные приборы работают в сравнительно узком диапазоне, что обусловливает повышенные требования к точности приборов и поддержания тока.

Способ неуравновешенного моста. Данный способ основан на использовании четырехплечего моста, в одно из плеч которого включены *ТС* сопротивлением $R_т$ (рис. IV—8, *а*) и соединительные провода сопротивлением по $R_л/2$ (общее сопротивление $R_л$). Схема питается от источника *ИП*.

При балансе моста, т. е. при выполнении условия

$$(R_т + R_л)R_2 = R_1R_3, \qquad \text{(IV—17)}$$

ток в измерительной диагонали отсутствует ($I_и = 0$) и стрелка измерительного прибора *ИП* находится на нулевой отметке шкалы.

При изменении температуры сопротивление *ТС* изменяется в соответствии с функцией преобразования (IV—13) или (IV—14). Равновесие моста нарушается, и в измерительной диагонали имеет место ток

$$I_и = U_п \frac{R_1R_3 - R_2(R_т - R_л)}{C_1(R_т + R_л) + C_2}, \qquad \text{(IV—18)}$$

здесь

$$C_1 = R_и(R_2 + R_3) + R_2R_3 + R_1R_2 + R_1R_3;$$
$$C_2 = R_и(R_1R_2 + R_1R_3) + R_1R_2R_3,$$

$U_п$ — напряжение источника питания; $R_и$ — внутреннее сопротивление прибора; R_1, R_2, R_3 — сопротивления плеч.

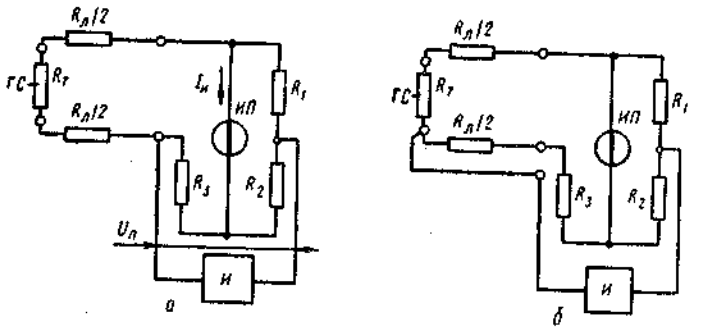


Рис. IV—8. Схемы измерения температуры термопреобразователем сопротивления способом неуравновешенного моста с двухпроводной (*а*) и трехпроводной (*б*) линией

Из формулы (IV—18) следует, что при условии $U_п = \text{const}$, ток $I_и$ однозначно зависит от сопротивления $R_т$. Следовательно, шкала прибора *ИП* может быть отградуирована непосредственно в градусах.

Условие $U_п = \text{const}$, нарушение которого приводит к соответствующей погрешности, может быть выполнено, если применяется стабилизированный источник *И* либо предусмотрено специальное приспособление для контроля за величиной $U_п$ и ее корректировки. Обычно для этой цели применяют переключатель, с помощью которого в цепь вместо *ТС* включается контрольный резистор, и напряжение $U_п$ реостатом изменяется до установления стрелки на контрольное деление.

Баланс моста по условию (IV—17) может выбираться в середине диапазона измерений, если измерительный прибор *ИП* имеет шкалу с нулем посередине, и на нижнем пределе диапазона, если применен прибор с нулем в левом конце шкалы.

Рассмотренная схема с двухпроводной линией имеет тот недостаток, что при длинной линии колебания окружающей температуры могут вызвать заметную погрешность из-за изменений $R_л$.

Для уменьшения погрешности используют мостовую схему с трехпроводной линией (рис. IV—8, *б*). В этой схеме один из проводов от источника питания *И* подводится непосредственно к *ТС*. В результате линейные провода, соединяющие *ТС* с измерительным мостом, оказываются включенными в разные плечи моста: один в плечо с $R_т$, другой — с R_3. Тогда условие равновесия имеет вид

$$(R_т + R_л/2)R_2 = R_1(R_3 + R_л/2). \qquad \text{(IV—19)}$$

Можно показать, что при таком включении погрешность, вызванная изменением температуры линейных проводов, уменьшается.

Неуравновешенные мосты могут использоваться при различных длинах, а следовательно, и сопротивлениях линейных проводов. Для унификации градуировки приборов они снабжаются катушками дополнительных (подгоночных) сопротивлений, выполненными из манганина и включаемыми последовательно с линейными проводами. Сопротивление катушек равно расчетному, соответствующему градуировке шкалы. Фактическое сопротивление проводов измеряют и на эту величину уменьшают сопротивление соответствующей катушки. В результате общее сопротивление провода и катушки останется равным расчетному.

Разновидностью способа неуравновешенного моста является схема с применением логометра (рис. IV—9). Собственно логометр представляет собой электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы с двумя рамками, закрепленными на одной оси.

Теоретически угол отклонения оси со стрелкой пропорционален отношению токов, протекающих через рамки:

$$\alpha = K(I_1/I_2), \qquad \text{(IV—20)}$$

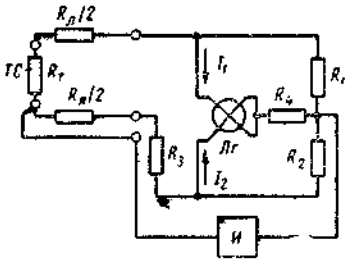


Рис. IV—9. Схема измерения температуры термопреобразователем сопротивления и логометром

т. е. не зависит от напряжения источника питания $И$. Однако практически из-за несовершенства подвижной системы измерительного механизма условие (IV—20) соблюдается при изменении напряжения питания в пределах 10—20% от номинального.

Рассматриваемая схема выполнена по трехпроводному варианту присоединения $ТС$. Применение логометра уменьшает погрешность, возникающую из-за изменения температуры линейных проводов, по сравнению с обычной мостовой схемой (см. рис. IV—8, *б*).

Шкала логометра градуируется непосредственно в градусах Цельсия.

Способ уравновешенного моста. При данном способе измерения мост всякий раз приводится в уравновешенное состояние путем изменения сопротивления одного или двух плеч. О величине измеряемого сопротивления судят по сопротивлению изменяемых плеч.

По схеме такой мост не отличается от рассмотренного выше (см. рис. IV—8, *б*). Одно из плеч, например резистор R_1, выполняют с изменяемым сопротивлением и снабжают его шкалой. Равновесие моста соответствует нулевому току через прибор $ИП$ (в данном случае он играет роль нуль-индикатора). Зная величину R_1, из формулы (IV—19) находят значение сопротивления $R_т$:

$$R_т = AR_1 + B, \qquad (IV—21)$$

где

$$A = R_3/R_2, \quad B = \frac{R_л}{2}\left(\frac{R_3}{R_2} - 1\right).$$

Формула (IV—21) устанавливает однозначную связь между величинами R_1 и $R_т$ при $R_2 = \text{const}$ и $R_3 = \text{const}$, что позволяет отградуировать шкалу переменного резистора в градусах Цельсия.

В формулу (IV—21) не входит величина напряжения, питающего мост. Следовательно, результат измерения не зависит от его изменений. Это является основным достоинством способа уравновешенного моста.

Схема (рис. IV—10, *а*) является модификацией обычного моста и отличается тем, что переменный элемент R_4 имеет движок, включенный в диагональ. Легко показать, что в этом случае изменение контактного сопротивления движка не вносит погрешности в измерение (в схеме на рис. IV—8, *б* было принято, что переменным элементом является R_1; для этого резистор должен иметь движок, сопротивление которого непосредственно влияет на результат измерения).

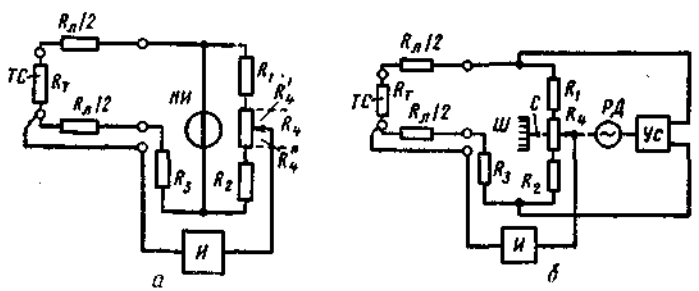


Рис. IV—10. Схемы измерения температуры термопреобразователем сопротивления способом уравновешенного моста:
а — ручной мост; *б* — автоматический мост

Для данного моста условие равновесия имеет вид

$$\left(R_т + \frac{R_л}{2}\right)\left(R_2 + R''_4\right) = \left(R_3 + \frac{R_л}{2}\right)\left(R_1 + R'_4\right),$$

откуда

$$R_т = \frac{\beta R_1 R_с + D}{R_д - \beta R_4}, \qquad (IV—22)$$

где

$$\beta = \frac{R'_4}{R_4}; \quad R_с = R_л + R_3; \quad R_д = R_2 + R_4;$$

$$D = R_3 R_1 + \frac{R_л}{2}(R_1 - R_2 - R_4).$$

Из формулы (IV—22) следует, что $R_т$ является однозначной функцией величины β и в связи с этим движок резистора R_4 может быть жестко связан с указателем шкалы, отградуированной в градусах Цельсия.

На рассмотренном способе основаны автоматические уравновешенные мосты (рис. IV—10, *б*). Вместо нуль-индикатора в измерительную диагональ включается вход усилителя $Ус$, который управляет работой реверсивного двигателя $РД$. Последний через редуктор и механическую передачу перемещает движок реохорда R_4 и связанную с ним стрелку $С$. С ее помощью значение температуры отсчитывается по шкале $Ш$.

В автоматических мостах питание измерительной схемы осуществляют, как правило, переменным током промышленной частоты. Это существенно упрощает схему усилителя.

При отклонении температуры изменяется сопротивление $R_т$, в результате чего равновесие моста нарушается. В измерительной диагонали и на входе усилителя появляется напряжение небаланса. В зависимости от знака отклонения меняется фаза входного напряжения. Усилитель имеет фазочувствительную схему и реагирует на знак отклонения: при отклонении в одну сторону соответственно вращается двигатель $РД$, при изменении знака отклонения вращение происходит в обратную сторону. Схема построена по принципу отрицательной обратной связи, т. е. в ответ на появившееся отклонение движок реохорда перемещается в направлении ликвидации отклонения к новому уравновешенному положению. Каждому значению сопротивления $R_т$ соответствует определенное положение движка R_4 и стрелки.

IV.3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ

В холодильной технике встречаются следующие типовые случаи измерения температур:

жидкостей и газов, протекающих в трубопроводах при умеренных скоростях;

газов, протекающих в трубопроводах и аппаратах с высокими скоростями;

газов, протекающих в трубопроводах и аппаратах, стенки которых могут иметь температуру, значительно отличающуюся от измеряемой;

воздуха в холодильных камерах и других охлаждаемых помещениях, а также окружающей температуры в помещениях и вне их; данный случай характеризуется низкими скоростями воздуха, низкими коэффициентами теплоотдачи;

теплопередающих поверхностей.

Все многообразие случаев измерения температуры в холодильной технике можно свести к нескольким типовым схемам (рис. IV—11):

а) Измеряется температура t рабочего тела *Тл*. Чувствительный элемент *ЧЭ* полностью помещен в рабочее тело (рис. IV—11, *а*). Его связи с внешней средой отсутствуют, или их термическое сопротивление настолько велико, что проникающим тепловым потоком можно пренебречь. Это идеальный случай, когда $t_{ч.э}=t$;

б) Тот же случай, однако через связь с другими частями измерительной схемы к чувствительному элементу проникает посторонний тепловой поток $Q_п$ (рис. IV—11, *б*). В установившемся состоянии имеет место баланс потоков $Q_п=Q_0$ (Q_0 — тепловой поток от чувствительного элемента к рабочему телу). Принимая $Q_0=(kA)_{ч.э}(t_{ч.э}-t)$ и обозначая $\Delta t=t_{ч.э}-t$, находим

$$\Delta t = Q_п/(kA)_{ч.э}, \qquad (IV—22, а)$$

где $(kA)_{ч.э}$ — произведение коэффициента теплопередачи на рабочую поверхность чувствительного элемента; Δt — методическая погрешность измерения.

Из выражения (IV—22, *а*) следует, что для уменьшения погрешности следует по возможности уменьшить поток $Q_п$ и развивать чувствительный элемент, увеличивая его поверхность и коэффициент теплопередачи.

К этому же случаю относится измерение температуры рабочей среды, движущейся по трубопроводу (рис. IV—11, *в*). При прочих равных условиях и при достаточной скорости рабочего тела погрешность уменьшается в результате увеличения $(kA)_{ч.э}$.

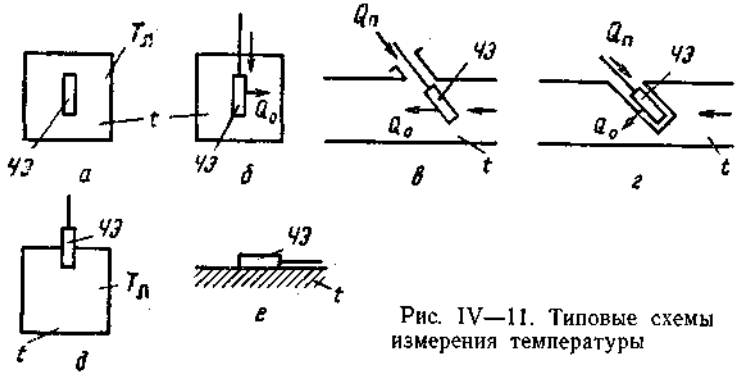


Рис. IV—11. Типовые схемы измерения температуры

в) Чувствительный элемент устанавливается в дополнительный чехол или гильзу (рис. IV—11, *г*). Этот способ может привести к значительной погрешности, так как возможно резкое уменьшение величины $(kA)_{ч.э}$. Следует уменьшать поток $Q_п$ (например, изолированием связи и прилегающего участка трубопровода) и искусственно снижать дополнительное термическое сопротивление от чувствительного элемента к рабочему телу (например, обеспечивая плотное прилегание чувствительного элемента к стенкам гильзы или применяя специальные промежуточные прослойки с большой теплопроводностью).

г) Чувствительный элемент не полностью погружен в рабочую среду (рис. IV—11, *д*). В этом случае погрешность возникает в результате того, что измеряемую температуру воспринимает лишь часть чувствительного элемента, в то время как остальная часть воспринимает температуру окружающей среды. Пренебрегая другими факторами и принимая, что $t_{ч.э}$ одинакова по всему объему чувствительного элемента, находим

$$\Delta t = \frac{t-t_{окр}}{[(kA)_{ч.э2}/(kA)_{ч.э1}]-1}. \qquad (IV—23)$$

(Индекс «1» относится к верхней, а «2» — к нижней части ЧЭ).

Уменьшить погрешность можно, изолировав выступающую часть чувствительного элемента и уменьшив величину $(kA)_{ч.э1}$.

д) Измеряется температура поверхности твердого тела (рис. IV—11, *е*). В этом случае для оценки погрешности применима формула, аналогичная (IV—23). Погрешность может быть уменьшена увеличением площади соприкосновения между чувствительным элементом и рабочим телом, улучшением качества контактирующих поверхностей и изоляцией свободной поверхности чувствительного элемента от окружающей среды.

Свойства средств измерений температуры описываются статическими функциями преобразования, которые связывают выходную величину y с измеряемой температурой в установившемся состоянии. В общем виде такая функция преобразования имеет вид

$$y = f(t) \text{ при } \frac{dt}{d\tau} = 0.$$

Конкретный вид и количественные соотношения этой функции зависят от принципа действия и конструктивных особенностей средства измерения.

В некоторых случаях, например при исследованиях переходных процессов или при регистрации переменных температур, существенное значение приобретают динамические характеристики, с помощью которых возможно оценить точность воспроизведения меняющейся во времени температуры. В отличие от статических динамические характеристики зависят не только от конструкции самого средства измерений, но и от свойств и состояния измеряемого тела. Основное влияние на динамическую характеристику оказывает чувствительный элемент прибора, в котором осуществляется процесс теплообмена с измеряемым телом. В простейшем случае, когда чувствительный элемент может быть представлен как апериодический элемент 1-го порядка (см. главу I), процесс изменения его температуры при скачкообразном изменении измеряемой температуры

описывается дифференциальным уравнением 1-го порядка, решение которого (переходная характеристика) имеет вид

$$t_{ч.э} = t_1 + (t_2 - t_1)(1 - l^{-\tau/T_{ч.э}}), \qquad (IV—24)$$

где $T_{ч.э}$ — постоянная времени, с; τ — время, с; t_1 и t_2 — начальная и конечная температура, °С.

Постоянная времени чувствительного элемента

$$T_{ч.э} = C/(kA)_{ч.э}, \qquad (IV—25)$$

где C — теплоемкость чувствительного элемента, Дж/°С; $(kA)_{ч.э}$ — произведение коэффициента теплопередачи на площадь поверхности чувствительного элемента, Вт/°С.

Величина $T_{ч.э}$ характеризует динамические свойства чувствительного элемента, а следовательно, и всего прибора. Из формулы (IV—25) следует, что $T_{ч.э}$ зависит от коэффициента теплопередади k, т. е. от свойств рабочего тела, скорости обтекания, температуры и т. д. В каталожных данных часто приводят значения $T_{ч.э}$, полученные по определенной методике, например в хорошо перемешиваемой воде. Такие данные следует рассматривать как частные, относящиеся к определенному режиму работы.

IV.3.1. ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ ПРИ УМЕРЕННЫХ СКОРОСТЯХ

Температуру жидкостей и газов обычно измеряют в трубопроводах и аппаратах, которые герметично уплотнены относительно внешней среды. Следствием этого является наличие тепловой связи термоприемника с окружающей средой через элементы конструкции самого термоприемника, стенки трубопровода или аппарата, через гильзы и защитные чехлы. Кроме того, гильзы и защитные чехлы ухудшают условия теплопередачи от измеряемой среды к чувствительному элементу термоприемника, что усиливает воздействие внешних теплопритоков.

Основное внимание должно быть уделено способу установки термоприемника.

Наилучший способ — это введение термоприемника непосредственно в поток измеряемой среды. На рис. IV—12, *а* показана схема введения открытого термоэлектрического преобразователя *ТП* в трубопровод. В зависимости от скорости среды, жесткости термоэлектродных проводов и длины введенной части *ТП* может быть из-

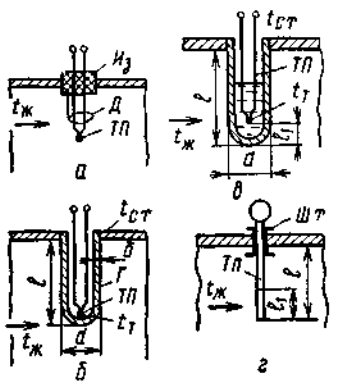


Рис. IV—12. Схемы установки термоприемников в трубопроводы и аппараты:

а — открытый термоэлектрический преобразователь, введенный в рабочую среду; *б* и *в* — открытые термоэлектрические преобразователи в гильзе; *г* — закрытый преобразователь, введенный в рабочую среду

готовлен с держателем *Д* или без него. Термоэлектродные провода выводятся наружу через изолятор *Из*, конструкция которого должна обеспечить герметичность вывода во всем диапазоне рабочих давлений. Данный случай приближается к идеальному, так как имеется прямой контакт чувствительного элемента с рабочим телом и практически отсутствуют внешние теплопритоки.

Схема (рис. IV—12, *б*) относится также к применению открытого термоэлектрического преобразователя, однако он помещен в гильзу *Г*, вваренную в стенку трубопровода или аппарата. При этом обеспечен плотный тепловой контакт между *ТП* и донышком гильзы. Гильза может быть заполнена жидкостью, не замерзающей и не кипящей в рабочем диапазоне температур. Этот случай связан с паразитным тепловым потоком от стенки с температурой $t_{ст}$ к концу гильзы, где закреплен спай *ТП*, имеющий температуру $t_т$. Из-за указанного теплового потока температура термоприемника $t_т$ отличается от истинной температуры жидкости или газа $t_ж$ на величину $\Delta t_м$, которая является методической погрешностью.

Для приближенной оценки методической погрешности рекомендуют [58, 65] пользоваться формулой

$$\Delta t_м = (t_ж - t_{ст})/\mathrm{ch}(ml), \qquad (IV—28)$$

где

$$m = \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_г \delta}};$$

α — коэффициент теплоотдачи поверхности гильзы, Вт/(м²·К); $\lambda_г$ — коэффициент теплопроводности материала гильзы; Вт/(м·К); δ — толщина стенки гильзы, м; l — длина погруженной части гильзы, м.

Значения гиперболического косинуса для величин от 0 до 3,0 представлены ниже.

ml	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
$\mathrm{ch}(ml)$	1,000	1,020	1,081	1,186	1,337	1,543	1,811	2,151
ml	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
$\mathrm{ch}(ml)$	2,577	3,108	3,762	4,568	5,557	6,769	8,253	10,068

Уменьшению методической погрешности (IV—26) способствуют следующие меры: уменьшение разности $t_ж - t_{ст}$ путем изолирования стенки от внешней среды; увеличение длины погруженной части гильзы; увеличение коэффициента теплоотдачи (более высокая скорость рабочего тела, шероховатая поверхность гильзы и др.); уменьшение толщины стенки гильзы.

В практике открытые *ТП* часто устанавливают без контакта с гильзой (рис. IV—12, *в*). В этом случае рабочий спай помещают в жидкость на высоте l_1 от нижнего конца гильзы.

Методическая погрешность для этого случая может быть приближенно оценена по формуле

$$\Delta t_м = \frac{t_ж - t_{ст}}{\mathrm{ch}(ml)} \cdot \frac{\mathrm{sh}(ml_1)}{ml_1}, \qquad (IV—27)$$

где l_1 — высота точки измерения от нижнего конца гильзы, м.

Множитель $\frac{\mathrm{sh}(ml_1)}{ml} \gg 1$, поэтому при данной схеме установки методическая погрешность увеличивается.

Значения этого множителя для величины ml_1 от 0 до 2,0 приведены ниже.

ml_1	0	0,5	1,0	1,5	2,0
$\frac{\mathrm{sh}(ml_1)}{ml_1}$	1	1,04	1,17	1,35	1,81

Некоторые промышленные термоэлектрические преобразователи и термопреобразователи сопротивления выпускаются в защитных чехлах и приспособлены для встраивания непосредственно в трубопровод или аппарат. Схема установки такого термоприемника показана на рис. IV—12, *г*. Корпус его проходит через стенку и уплотняется штуцером *Шт*. Чехол, как и гильза, создает тепловую связь между чувствительным элементом и стенкой и может вызвать методическую погрешность. В зависимости от типа преобразователя оценку методической погрешности можно провести для нижней точки чехла по формуле (IV—26) или для промежуточного положения чувствительного элемента на высоте l_1 по формуле (IV—27).

Могут встречаться и другие случаи установки преобразователей, например стеклянного термометра в гильзу, электрических преобразователей с защитным чехлом в гильзу и др. В этих случаях также будут наблюдаться методические погрешности, величину которых можно оценить по приведенным формулам.

Термоприемники могут быть размещены в трубопроводах перпендикулярно, наклонно и вдоль направления потока (рис. IV—13). Несмотря на то что коэффициент теплоотдачи α имеет наибольшее значение при поперечном обтекании (рис. IV—13, *а*), предпочтительны наклонный и продольный способы (рис. IV—13, *б* и *в*). Последние имеют то преимущество, что позволяют увеличить глубину погружения и таким образом снизить методические погрешности. При использовании гильз они должны располагаться так, чтобы их можно было залить соответствующей жидкостью.

В работе [58] рекомендуется гильзы заливать при отрицательных температурах глицерином, при температурах 0—200 °С — компрессорным маслом.

Особым случаем является измерение разности температур при определении холодопроизводительности по тепловому балансу испарителя или конденсатора (см. главу III).

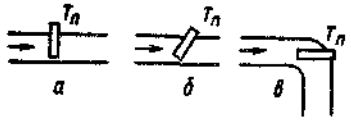


Рис. IV—13. Способы размещения термоприемников в трубопроводах:

а — перпендикулярно потоку; *б* — наклонно; *в* — вдоль направления потока

Измеряемая разность между температурами хладоносителя или охлаждающейся воды на входе и выходе аппарата должна измеряться с высокой точностью, причем допускаемая абсолютная погрешность тем меньше, чем меньше измеряемая разность. На практике при малых разностях (3—4 °С) допустимые погрешности могут быть в пределах $\pm(0{,}06 \div 0{,}1)$ °С. Даже при соблюдении всех мер, устраняющих или уменьшающих методические погрешности, реализовать требуемую точность затруднительно из-за отсутствия доступных средств измерений с необходимой инструментальной погрешностью.

Один из способов состоит в том, чтобы индивидуально отградуировать каждый из приборов с помощью соответствующих образцовых средств при условии, что сами приборы обладают достаточной стабильностью во времени, а их шкала позволяет сделать отсчет с требуемой точностью.

Другой способ позволяет выполнить измерение без точной градуировки, но при условии, что измеряемые температуры остаются постоянными в течение определенного времени или их изменения не превышают допустимых погрешностей. Способ заключается в том, что в процессе измерений приборы, например термометры, меняют местами и таким образом проводят как минимум два измерения.

За результат измерения принимают среднее арифметическое значение двух наблюдений. Если искомую разность температур обозначить $\Delta t = t_1 - t_2$, где t_1 — температура на входе, а t_2 — на выходе аппарата, то при первом наблюдении $\Delta t_1 = t_{11} - t_{22}$ (индексы 11 и 22 обозначают, что t_1 и t_2 измерены соответственно термометрами № 1 и 2), а при втором $\Delta t_2 = t_{12} - t_{21}$ (т. е. термометры поменяли местами). По условию $\Delta t = (\Delta t_1 + \Delta t_2)/2$.

Можно показать, что в этом случае суммарная систематическая инструментальная погрешность равна нулю. Обозначив абсолютные погрешности термометров a_1 и a_2, подставим их в выражения $\Delta t_1 = (t_{11} + a_1) - (t_{22} + a_2)$ и $\Delta t_2 = (t_{12} + a_2) - (t_{21} + a_1)$, а затем в выражение для среднего арифметического Δt. Нетрудно заметить, что при этом сумма величин a_1 и a_2 равна нулю, следовательно, величина Δt не содержит систематической инструментальной погрешности. Статическая погрешность в этом случае равна погрешности отсчета по шкалам.

Однако наряду со статической такому способу свойственны динамические погрешности, которые обусловливаются временем, необходимым для установления показаний после перестановки термометров.

Как следует из уравнения (IV—24), время установления зависит от постоянной времени T и разности температур $t_1 - t_2$. Для его расчета необходимо задаться допустимым «недоходом» температуры чувствительного элемента до теоретически установившейся температуры. Подобный расчет был рассмотрен в главе I (см. с. 20, пример 1).

Если обозначить допустимый «недоход» через d ($d = t_2 - t_{т.э}$), то из (IV—24):

$$d/(t_1 - t_2) = e^{-\tau/T}.$$

Ниже приводятся значения τ/T для нескольких отношений $d/(t_1 - t_2)$:

$d/(t_1 - t_2)$	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035
τ/T	5,3	4,6	4,2	3,9	3,69	3,50	3,35

Пример. Измеряемая разность температур $t_1 - t_2 = 4$ °С, допустимый «недоход» $d = 0{,}05$ °С. Постоянная времени термометра

$T = 20$ с. Определить время установления показаний после переноса термометра.

$$d/(t_1 - t_2) = 0{,}05/4 = 0{,}0125;$$
$$\tau/T \approx 4{,}4, \text{ отсюда } \tau = 4{,}4T = 88\text{с}.$$

IV.3.2. ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ

Абсолютная температура газа $T_г$, движущегося с высокой скоростью, могла бы быть измерена, если бы термоприемник двигался в потоке со скоростью газа. В реальных условиях, когда термоприемник неподвижен, его температура выше, чем $T_г$, на некоторую величину, зависящую от энергии, выделяемой газом при торможении. Температура полного торможения определяется по формуле [12]

$$T_т = T_г\left(1 + \frac{\varkappa - 1}{2} M^2\right), \qquad \text{(IV—28)}$$

где $\varkappa$ — показатель адиабаты; $M = (w/a)$ — число Маха; a — скорость звука; w — скорость потока газа.

Из формулы (IV—28) следует, что при числе Маха порядка 0,3 величина $T_г$ вырастает приблизительно на 2% от $T_г$, что в области 0 °С составляет более 5 °С.

В реальных устройствах результат измерения температуры лежит между $T_т$ и $T_г$ из-за потерь тепла торможения в измеряемый газ.

Для характеристики термоприемника вводится величина коэффициента восстановления

$$r = (T_и - T_г)/(T_т - T_г), \qquad \text{(IV — 29)}$$

где $T_и$ — температура, показываемая измерительным прибором.

В идеальном случае, когда прибор показывает температуру полного торможения, $r = 1$.

Если температура полного торможения

$$T_т = T_г + \frac{w^2}{2c_p}$$

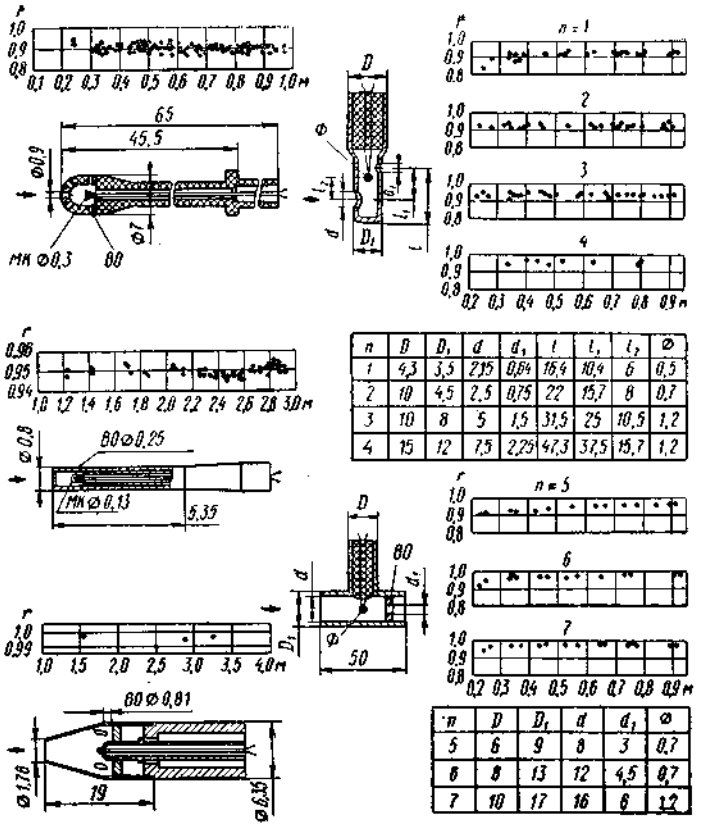
(c_p — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении), то фактическая температура газа с учетом (IV—29)

$$T_г = T_и - r\frac{w^2}{2c_p}.$$

Слагаемое $r\dfrac{w^2}{2c_p}$ является методической погрешностью измерения. Для ее определения необходимо знать скорость газа и коэффициент восстановления.

Коэффициент восстановления r является сложной функцией, зависящей от ряда критериев. Определяющей является зависимость $r = f(M)$, которая определяется экспериментально для каждой конструкции термоприемника.

В качестве чувствительных элементов применяются малогабаритные преобразователи, чаще всего термоэлектрические, иногда — специальные термопреобразователи сопротивления.



n	D	D_1	d	d_1	l	l_1	l_2	⌀
1	4,3	3,5	2,15	0,84	16,4	10,4	6	0,5
2	10	4,5	2,5	0,75	22	15,7	8	0,7
3	10	8	5	1,5	31,5	25	10,5	1,2
4	15	12	7,5	2,25	47,3	37,5	15,7	1,2

n	D	D_1	d	d_1	⌀
5	6	9	8	3	0,7
6	8	13	12	4,5	0,7
7	10	17	16	6	1,2

Рис. IV—14. Варианты конструкции термоприемников для измерения температуры газовых потоков (ВО — вентиляционные отверстия)

Общие требования к конструкции термоприемников следующие:

чувствительные элементы должны обладать малой теплоемкостью;

провода во избежание методических погрешностей должны на определенной длине иметь температуру, близкую к температуре торможения;

во избежание потерь тепла излучением чувствительный элемент должен быть экранирован;

камера торможения должна иметь небольшие вентиляционные отверстия.

Некоторые конструкции термоприемников, предназначенных для измерения температуры торможения, и экспериментальные значения коэффициентов восстановления приведены на рис. IV—14 [12].

IV.3.3. ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ЛУЧИСТОМ ТЕПЛООБМЕНЕ СО СТЕНКАМИ

В ряде случаев при измерении температуры газа возникают методические погрешности, вызванные лучистым теплообменом между термоприемником и стенкой трубы или полости. Интенсивность такого теплообмена возрастает с увеличением разности между температурами газа и стенок.

Методическую погрешность от лученспускания можно вычислить по формуле [58]

$$\Delta t_{\text{м}} = \frac{C_{\text{л}}}{\alpha}\left[\left(\frac{T_{\text{и}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100}\right)^4\right],$$

где $C_{\text{л}}$ — константа лучеиспускания для материала термоприемника, Вт/(м²·К⁴); α — коэффициент теплоотдачи от среды к термоприемнику, Вт/(м²·К); $T_{\text{и}}$ и $T_{\text{ст}}$ — абсолютные температуры чувствительного элемента и стенки, К.

Ниже приведены значения $C_{\text{л}}$[Вт/(м²·К⁴)] для некоторых материалов.

Абсолютно черное тело	4,96
Железо никелированное, полированное	0,35
Сталь с блестящей поверхностью	4,06
Латунь полированная	0,25
Медь:	
шероховатая	3,6
полированная	0,20

IV.3.4. ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МАЛОПОДВИЖНОГО ВОЗДУХА

Измерения температуры воздуха в охлаждаемых помещениях и камерах, а также температуры окружающего воздуха могут выполняться любыми первичными преобразователями и измерительными приборами, включая жидкостные стеклянные, манометрические, термоэлектрические преобразователи и термопреобразователи сопротивления.

При этих измерениях не возникает серьезных трудностей. Следует устанавливать первичные преобразователи внутри объемов, избегать установки первичных преобразователей в отверстиях стен и ограждений, наружные приборы должны быть защищены от солнечной радиации.

Охлаждаемые помещения и камеры обладают значительной теплоемкостью и, следовательно, большой инерционностью, тепловые процессы в них протекают крайне медленно (порядка одного или нескольких градусов в сутки). В связи с этим не стремятся применять быстродействующие (малоинерционные) преобразователи. Такой подход является в целом правильным. Исключение составляют термопреобразователи сопротивления, которые применяются преимущественно для этой цели. Как указывалось (см. п. IV.2.4.1), ток, питающий ТС, подогревает чувствительный элемент и вызывает методическую погрешность. Из формулы (IV—29) следует, что большая инерционность ТС связана с малым значением k, а из

формулы (IV—15) — что именно малое k является причиной заметного перегрева ТС.

Таким образом, при необходимости точно измерить температуру следует применять малоинерционные ТС и по возможности уменьшать силу питающего тока.



Рис. IV—15. Измерение температуры теплопередающей поверхности термоэлектрическим преобразователем

Методическая погрешность измерений температуры воздуха в помещениях может возникать из-за ее неравномерности по объему. Для оценки локальных или средних значений температуры следует выполнять измерения в нескольких точках, которые выбирают, исходя из конфигурации помещения и предъявляемых к нему требований.

IV.3.5. ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПОВЕРХНОСТЕЙ

В практике исследования и испытаний холодильного оборудования встречаются случаи измерения температуры поверхностей: труб и ребер теплообменных аппаратов, стенок цилиндров компрессоров и др.

Измерение температуры поверхностей связано с возникновением целого ряда погрешностей, учет которых представляет значительные трудности. Основные источники методических погрешностей следующие:

влияние температуры жидкости или газа, обтекающих исследуемую поверхность;

наличие больших градиентов температуры внутри стенок;

искажение потока жидкости или газа на границе с исследуемой поверхностью в результате встраивания термоприемника;

искажение температурного поля внутри исследуемой стенки в результате встраивания термоприемника.

В наименьшей степени влияние указанных факторов сказывается при использовании открытых термоэлектрических преобразователей, укладываемых в специальную канавку (рис. IV—15). Термопреобразователь должен изготовляться из возможно более тонких термоэлектродных проводов. Провода должны быть уложены в канавку на длине не менее $50d$ (d — диаметр проводов). Канавку следует закрывать мастикой или клеем с низкой теплопроводностью и тщательно заполировывать заподлицо с поверхностью. Спай должен надежно контактировать с материалом поверхности. Для этого полезно зачеканивать его или припаивать в месте измерения.

IV.4. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ О СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

IV.4.1. ТЕРМОМЕТРЫ СТЕКЛЯННЫЕ

Промышленность выпускает стеклянные термометры следующих типов: ртутные, толуоловые и спиртовые. Термометры различаются диапазонами измерений и ценой деления. Технические характеристики некоторых термометров приведены в табл. IV—1.

Таблица IV—1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКЛЯННЫХ ТЕРМОМЕТРОВ

Тип	Наименование	Пределы измерений, °С	Цена деления, °С
	Термометры ртутные		
ТЛ-1	Термометр метастатический, по Бекману, с установкой на любые 5 °С вспомогательной шкалы (пределы вспомогательной шкалы —20÷+150 °С)	0÷+5	0,01 5
ТЛ-2	Термометр лабораторный	—30÷+70 0÷+100 0÷+150	1 1 1
ТЛ-4	То же	—30÷+20 0÷+50 +50÷+105 +100÷+155 +150÷+205	0,1 0,1 0,1 0,1 0,1
ТЛ-5	»	—30÷+70 0÷+105	0,5 0,5
ТР1	Термометр точных измерений: набор (15 шт.) равноделенных термометров с общими пределами 0—60 °С, с интервалом каждого термометра 4 °С	—	0,01
ТРII	набор (10 шт.) равноделенных термометров с общими пределами 55—155 °С, с интервалом каждого термометра 10 °С	—	0,02
	Термометры толуоловые		
ТН-8	Термометр технический	—80÷+60	1
ТП-6	То же	—55÷+55	1
	Термометры спиртовые		
ТБ-38	Термометр бытовой	—50÷+50	1,0
ТБ-45	То же	—50÷+50	1,0

IV.4.2. МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Промышленность серийно выпускает манометрические термометры для технических измерений трех видов: показывающие с диаметром корпуса 60 и 160 мм; самопишущие с дисковой диаграммой; бесшкальные преобразователи с электрическим выходом.

Основные технические характеристики представлены в табл. IV—2, а внешний вид их — на рис. IV—16.

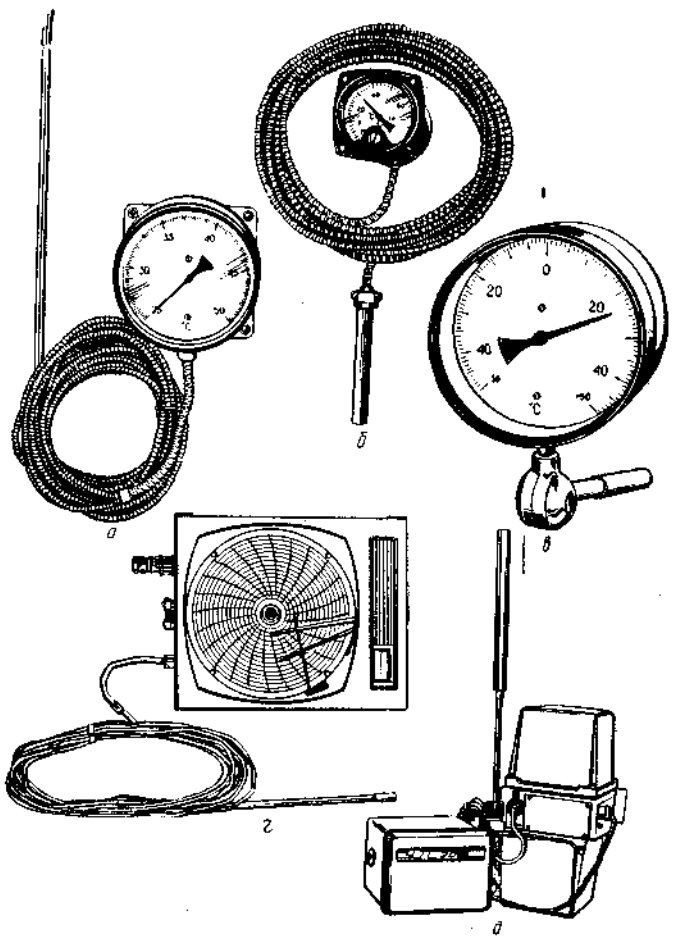


Рис. IV—16. Манометрические термометры:

а — показывающий ТПЖ-4; *б* — показывающий ТКП-60Сч; *в* — показывающие ТГП-160 и ТКП-160; *г* — самопишущий ТЖС-712; *д* — бесшкальный электрический преобразователь ТДЖ-Э

Таблица IV—2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕТРОВ

Характеристики	Показывающие					Самопишущий ТЖС-712	Бесшкальный преобразователь электрический ТДЖ-Э
	ТПЖ-4	ТПГ-4	ТКП-60СГ	ТКП-160	ТГП-160		
Пределы измерения, °С	—50÷+50	0÷+100	—25÷+75	0÷+50	—50÷+50	—50÷+50	—50÷+50
	—50÷+100	0÷+150	0÷+120	0÷+120	—50÷+100	—50÷+100	—50÷+100
	—50÷+150	0÷+200	+50÷+150		—50÷+150	—50÷+150	—50÷+150
	0÷+50				0÷+100	0÷+50	—25÷+25
	0÷+100				0÷+150	0÷+100	—10÷+15
	0÷+150				0÷—200	0÷+150	0÷+25
	0÷+200				+50÷+150	0÷+200	0÷+50
					+100÷+200		0÷+100
							0÷+150
Длина капилляра, м	1,6; 2,5; 4; 6; 10	1,6; 2,5	1,6; 2,5; 4; 6	Без капилляра		1,6; 2,5; 4; 6; 10	2,5
Глубина погружения термобаллона, мм	80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400	160; 200; 250; 315; 400; 500; 630	60; 100; 250	100; 125; 160; 200; 250; 315; 400	160; 200; 250; 315; 400; 500	80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400	80; 100 125; 160 200; 250; 315; 400
Класс точности	1; 1,5	1; 1,5	Для первой трети шкалы—4,0 для последних—2,5	1,5; 2,5	1,0; 1,5; 2,5	1; 1,5	1; 1,5
Максимальное давление рабочей среды, МПа	—	—	64	64	64	—	—
Привод диаграммы	—	—	—	—	—	От синхронного двигателя	—
Время одного оборота диаграммы, ч	—	—	—	—	—	12; 24	—
Выходной сигнал, мА	—	—	—	—	—	—	0—20
Габаритные размеры, мм							
диаметр корпуса×глубина	160×68	160×68	60×77	160×68	160×68	—	—
ширина×высота×глубина	—	—	—	—	—	280×340×125	306×65×19

Таблица IV—3. ГРАДУИРОВОЧНАЯ ТАБЛИЦА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТИПА «ХРОМЕЛЬ-КОПЕЛЬ» (ГРАДУИРОВКА $ХК_{68}$ ПО ГОСТ 3044—77, ТЕМПЕРАТУРА СВОБОДНОГО КОНЦА 0 °С)

Температура рабочего конца, °С	Термо-ЭДС (мВ) для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
—50	—3,110									
—40	—2,500	—2,561	—2,622	—2,683	—2,744	—2,805	—2,866	—2,927	—2,988	—3,049
—30	—1,890	—1,951	—2,012	—2,073	—2,134	—2,195	—2,256	—2,317	—2,378	—2,439
—20	—1,270	—1,332	—1,394	—1,456	—1,518	—1,580	—1,642	—1,704	—1,766	—1,828
—10	—0,640	—0,703	—0,766	—0,829	—0,892	—0,955	—0,018	—1,081	—1,144	—1,207
0	—0,000	—0,064	—0,128	—0,192	—0,256	—0,320	—0,384	—0,448	—0,512	—0,576
0	0,000	0,064	0,128	0,192	0,256	0,321	0,386	0,451	0,516	0,581
10	0,646	0,711	0,776	0,841	0,807	0,973	1,039	1,105	1,171	1,237
20	1,303	1,370	1,437	1,504	1,571	1,638	1,705	1,772	1,840	1,908
30	1,976	8,044	2,112	2,180	2,248	2,316	2,384	2,452	2,520	2,589
40	2,658	2,727	2,796	2,865	2,934	3,003	3,072	3,141	3,210	3,280
50	3,350	3,420	3,490	3,560	3,630	3,700	3,770	3,840	3,910	3,980
60	4,050	4,121	4,192	4,263	4,334	4,405	4,476	4,547	4,618	4,689
70	4,760	4,831	4,902	4,973	5,044	5,115	5,186	5,257	5,327	5,398
80	5,469	5,540	5,611	5,682	5,753	5,824	5,895	5,966	6,037	6,108
90	6,179	6,250	6,322	6,394	6,466	6,538	6,610	6,682	6,754	6,826
100	6,898	6,970	7,043	7,116	7,189	7,262	7,335	7,408	7,481	7,554
110	7,627	7,700	7,774	7,848	7,922	7,996	8,070	8,144	8,218	8,292
120	8,366	8,440	8,515	8,590	8,665	8,740	8,815	8,890	8,965	9,040
130	9,115	9,190	9,265	9,340	9,415	9,490	9,565	9,640	9,715	9,790
140	9,865	9,940	10,016	10,092	10,168	10,244	10,320	10,396	10,472	10,548
150	10,624	10,700	10,777	10,854	10,931	11,008	11,085	11,162	11,239	11,318
160	11,393	11,470	11,548	11,626	11,704	11,782	11,860	11,938	12,016	12,094
170	12,172	12,250	12,329	12,408	12,487	12,566	12,645	12,724	12,803	12,882
180	12,961	13,040	13,120	13,200	13,280	13,360	13,440	13,520	13,600	13,680
190	13,760	13,841	13,922	14,003	14,084	14,165	14,246	14,327	14,408	14,489
200	14,570	14,651	14,732	14,813	14,894	14,975	15,056	15,137	15,218	15,299
210	15,380	15,462	15,544	15,626	15,708	15,790	15,872	15,954	16,036	16,118
220	16,200	16,283	16,366	16,449	16,532	16,615	16,698	16,781	16,864	16,947
230	17,030	17,113	17,196	17,279	17,362	17,445	17,528	17,611	17,694	17,777
240	17,860	17,943	18,026	18,109	18,192	18,275	18,358	18,441	18,524	18,607
250	18,690	18,773	18,856	18,939	19,022	19,105	19,188	19,271	19,354	19,437
260	19,520	19,604	19,688	19,772	19,856	19,940	20,024	20,108	20,192	20,276
270	20,360	20,444	20,528	20,612	20,696	20,780	20,864	20,948	21,032	21,116
280	21,200	21,284	21,368	21,452	21,536	21,620	21,704	21,788	21,872	21,956
290	22,040	22,124	22,208	22,292	22,376	22,460	22,544	22,628	22,712	22,796
300	22,880	22,964	23,048	23,132	23,216	23,300	23,384	23,468	23,552	23,636

IV.4.3. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ВТОРИЧНЫЕ ПРИБОРЫ К НИМ

IV.4.3.1. Термоэлектрические преобразователи

В практике испытаний и исследований холодильного оборудования наибольшее применение нашли ТП открытого типа (гибкие термопары), изготовляемые непосредственно в лабораториях и на предприятиях. В основном это термоэлектрические преобразователи типов «медьконстантан» и «хромель-копель». Стандартная градуировочная таблица хромель-копелевых преобразователей приведена в табл. IV—3.

Для изготовления используют надежно изолированные провода с эмалевой и хлопчатобумажной или шелковой изоляцией. Спаи (рабочий и свободный) выполняют электродуговой сваркой под слоем флюса или защитной жидкости либо пайкой мягким оловянистым припоем. Для прочности концы зачищенных проводов предварительно скручиваются.

Основным требованием к термоэлектродным проводам для точных измерений является их термоэлектрическая однородность. Это требование особенно важно для проводов из сплавов металлов (хромель, копель, константан). Для проверки на неоднородность применяют специальные установки [31].

В процессе эксплуатации следует не допускать механических повреждений проводов, могущих вызвать дополнительные неоднородности. Промышленные ТП выпускаются в широком ассортименте, однако, учитывая их ограниченное применение, в табл. IV—4 приведены основные данные лишь некоторых хромель-копелевых преобразователей.

Таблица IV—4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ХРОМЕЛЬ-КОПЕЛЕВЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ (ГРАДУИРОВКА $ХК_{68}$)

Характеристики	Типы ТП			
	ТХКП-XVIII	ТХК-582	ТХК-0515	ТХК-0806
Пределы измерений, °С	0÷+400	0÷+300	−50÷++600	0÷+600
Конструкция	Герметичная без головки	Негерметичная без головки	Герметичная с головкой	Герметичная с головкой
Материал защитной арматуры	08Х13	—	03Х13 Х18Н10Т 0Х20Н14С2	Х25Т 09Х13 Х18Н10Т
Давление рабочей среды, МПа	—	—	4; 6,4	40
Длина погружаемой части, мм	100	45	120—2000	160—200

Примечание. Типы ТХКП-XVIII и ТХК-582 предназначены для измерения температуры твердых тел, остальные — для измерений температуры жидкостей и газов.

IV.4.3.2. Вторичные приборы к термоэлектрическим преобразователям

Из числа выпускаемых промышленностью приборов для работы в комплекте с термоэлектрическими преобразователями применяют магнитоэлектрические милливольтметры; ручные потенциометры; автоматические потенциометры; цифровые вольтметры; бесшкальные преобразователи с унифицированным аналоговым выходным сигналом.

Магнитоэлектрические милливольтметры по своим пределам измерений и точностным характеристикам малопригодны для использования в холодильной технике, в связи с чем данные о них не приводятся.

Ручные потенциометры. Ручные потенциометры постоянного тока являются лабораторными приборами, используемыми как для измерений, так и для поверки. Различают потенциометры переносные и стационарные.

Переносные приборы используют в основном как рабочие средства измерений. Стационарные потенциометры являются основными высокоточными приборами и применяются в основном для прецизионных физических экспериментов и в качестве образцовых средств измерений.

Технические данные некоторых потенциометров приведены в табл. IV—5.

Таблица IV—5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РУЧНЫХ ПОТЕНЦИОМЕТРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Характеристики	Переносной ПП-63	Стационарные	
		Р332	Р363
Пределы измерений, мВ	$25 \cdot 10^{-3} \div 100$	$10^{-6} \div 2{,}12 \cdot 10^{3}$	$10^{-4} \div 2{,}12 \cdot 10^{3}$
Класс точности	0,05	0,0005	0,001 (исполнение 1) 0,002 (исполнение 2) 0,005 (исполнение 3)
Цена ступени младшей декады (наименьшего деления), мВ	0,025	10^{-5}	10^{-4}
Состав изделия	Потенциометр	Потенциометр, усилитель, переключатель направления тока	Блок измерительный, автокомпенсатор напряжения, усилитель
Масса, кг	7	62	26

Электронные автоматические потенциометры. Электронные автоматические потенциометры представляют собой компенсаторы со следящей схемой уравновешивания (принцип действия см. раздел IV.2.3.3). Конструкции автоматических потенциометров полностью унифицированы с аналогичными автоматическими мостами.

Автоматические потенциометры и мосты принято классифицировать по следующим признакам.

По способу представления выходной информации они подразделяются на показывающие и комбинированные (показывающие и самопишущие), показывающие потенциометры в свою очередь могут быть с круглой шкалой и вращающейся стрелкой (рис. IV—17, *а* и *д*), с вращающимся циферблатом барабанного типа и неподвижной стрелкой (рис. IV—17, *б*) и с прямолинейной шкалой и линейным перемещением стрелки (рис. IV—17, *в*, *г* и *е*). Самопишущие приборы разделяют по форме диаграммы: с записью на ленточную (см. рис. IV—17, *в*, *г*, *е*, *ж*) и дисковую (см. рис. IV—17, *д*) диаграммы.

Кроме показаний по шкале и записи на диаграмму приборы всех типов могут снабжаться дополнительными выходными устройствами для передачи информации в виде электрического сигнала (выходные контакты и реостаты) и пневматического сигнала (пневмопреобразователи).

По числу точек измерения приборы делят на одноточечные и многоточечные. Самопишущие многоточечные приборы имеют систему автоматического опроса точек с заданной периодичностью. Показывающие многоточечные приборы оснащаются ручными переключателями кнопочного типа (см. рис. IV—17, *б*).

По основным размерам приборы делятся на три группы: миниатюрные (база 1, приборы КПП1, КПМ1, КВП1, КВМ1, КСП1, КСМ1), малогабаритные (база 2, приборы КСП2 и КСМ2) и нормально-габаритные (базы 3 и 4, приборы КСП3, КСМ3, КСП4, КСМ4).

Некоторые наиболее употребимые пределы измерений автоматических потенциометров, работающих в комплекте с термоэлектрическими преобразователями градуировки $ХК_{68}$, следующие: —50÷+50; —50÷+100; —50÷+150; 0÷+100; 0÷+150; 0÷+200.

Все потенциометры снабжены устройствами коррекции по температуре свободных концов. Основные технические характеристики электронных автоматических потенциометров приведены в табл. IV—6.

Цифровые вольтметры. Цифровые вольтметры характеризуются высокой чувствительностью, быстродействием и удобством измерений. Выходная измерительная информация представляется в цифровой форме для визуального отсчета, а также в виде кодированных сигналов в цифровой форме для регистрации или дальнейшей обработки в ЭВМ. Приборы отградуированы в единицах напряжения, поэтому при измерениях температуры необходимы соответствующие градуировочные таблицы. Конструктивно цифровые вольтметры выполнены как переносные лабораторные приборы, питающиеся от сети переменного тока.

Технические характеристики некоторых цифровых вольтметров приведены в табл. IV—7. Внешний вид вольтметра В7-28 представлен на рис. IV—18.

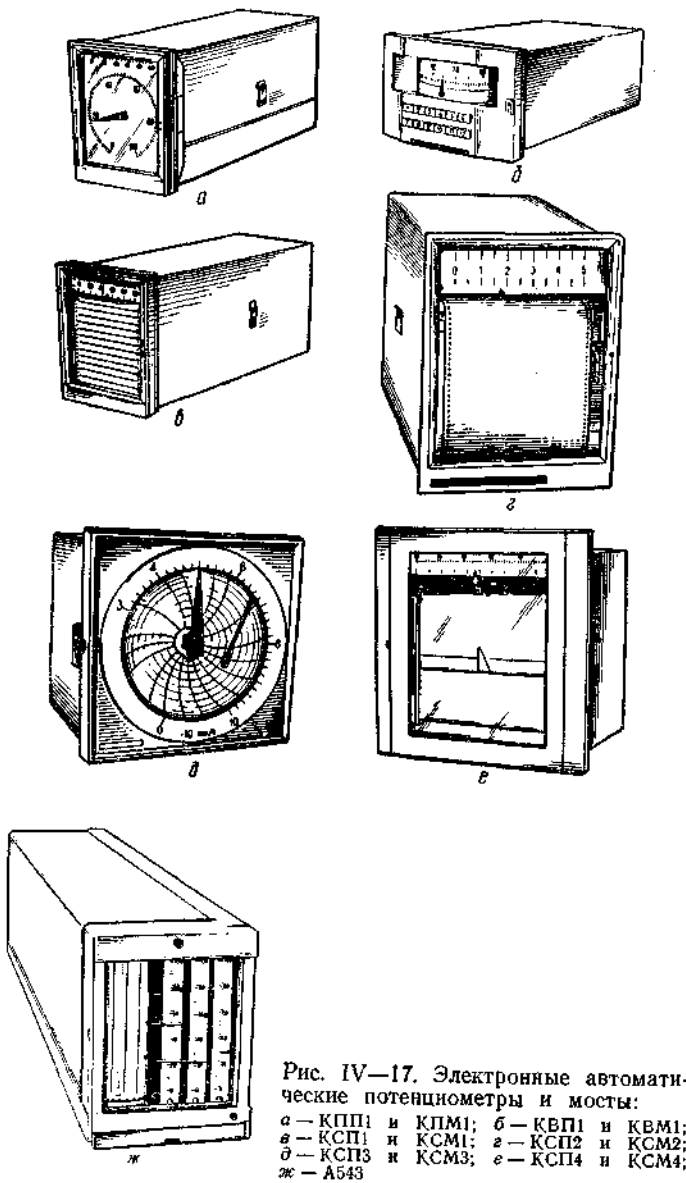


Рис. IV—17. Электронные автоматические потенциометры и мосты:
а — КПП1 и КПМ1; *б* — КВП1 и КВМ1; *в* — КСП1 и КСМ1; *г* — КСП2 и КСМ2; *д* — КСП3 и КСМ3; *е* — КСП4 и КСМ4; *ж* — А543

Таблица IV—6. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИОМЕТРОВ И МОСТОВ

Характеристики	Показывающие		Показывающие и самопишущие					
			с прямолинейной шкалой и записью на ленточную диаграмму					с круглой шкалой и записью на дисковую диаграмму
	с круглой шкалой	с вращающимся циферблатом		Потенциометр и мост				
	Потенциометр КПП1 и мост КПМ1	Потенциометр КВП1 и мост КВМ1	Потенциометр КСП1 и мост КСМ1	А542	А543	Потенциометр КСП2 и мост КСМ2	Потенциометр КСП4 и мост КСМ4	Потенциометр КСП3 и мост КСМ3
Число точек измерений	1	1, 6, 12	1	1,2	3	1, 3, 6, 12	1, 3, 6, 12	1
Длина шкалы, мм	300	500	100	100	100	160	250	600
Ширина диаграммы, мм	—	—	100	100	100	160	250	
Скорость продвижения диаграммы, мм/ч	—	—	10, 20, 40, 60, 120	20, 40, 60, 180, 600 1800	20, 40, 60, 180, 600, 1800	20, 40, 60, 120, 240, 600, 1200 2400	20, 60, 240, 720, . . ., 18000	1 оборот за 24 часа
Время прохождения стрелкой всей шкалы, с	2,5; 5,0	2,5; 10	2,5; 5,0	1; 2,5; 10	1; 2,5; 10	2,5; 10	2,5; 10	5; 16
Основная погрешность, % диапазона измерений (числитель — измерений, знаменатель — записи)	±0,5	±0,5	±1,0 / ±1,0	±0,5 / ±1,0	±0,5 / ±1,0	0,5 / 1,0	0,5 / 0,5	0,5 / 1,0
Габаритные размеры (ширина×высота×глубина), мм	160×200×500	240×160×515	160×200×500	80×160×590	120×160×590	240×320×482	400×400×367	320×320×380
Масса, кг	12	15	12,5	10,5	12,5	18	25	15

Таблица IV—7. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ЦИФРОВЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В КОМПЛЕКТЕ С ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Тип вольтметра	Верхний предел измерения, мкВ	Значение единицы младшего разряда, мкВ	Основная погрешность			Габаритные размеры (ширина×высота×глубина), мм	Масса, кг
			Формула для расчета относительной погрешности	Ориентировочная абсолютная погрешность по напряжению, мкВ	Ориентировочная температурная погрешность при работе с ХКТП, °С		
В7-18	10^5	10	$\pm(0{,}05\pm0{,}02U_п/U_x)$ %	±20	±0,3	490×135×475	25
В7-21	10^4	1	$\pm(0{,}2+0{,}02U_п/U_x)$ %	±2	±0,03	408×142×413	13
В7-23	10^5	10	$\pm(2\cdot10^4U_x+2\cdot10^4U_п)$ В	±20	±0,3	630×564×222	20
В7-28	10^5	1	$\pm(0{,}05+0{,}02U_п/U_x)$ %	±5	±0,07	340×180×330	9
Щ68003	10^4	1	$\pm[0{,}1+0{,}05\cdot(U_п/U_x-1)]$ %	±5	±0,07	490×130×485	15
	10^5	10	$\pm[0{,}06+0{,}02\cdot(U_п/U_x-1)]$ %	±20	±0,3		

Примечания: 1. Входное сопротивление вольтметров составляет 10^7—10^9 Ом. 2. В графе 2 приведены лишь те для измерения температуры. 3. В графе 6 дается только пределы многопредельных вольтметров, которые используют (хромель-копелевого термоэлектрического преобразователя) инструментальная погрешность вольтметра, погрешность ХКТП должна учитываться отдельно. 4. В графе 4: $U_п$ — значение верхнего предела, U_x — измеряемое напряжение.

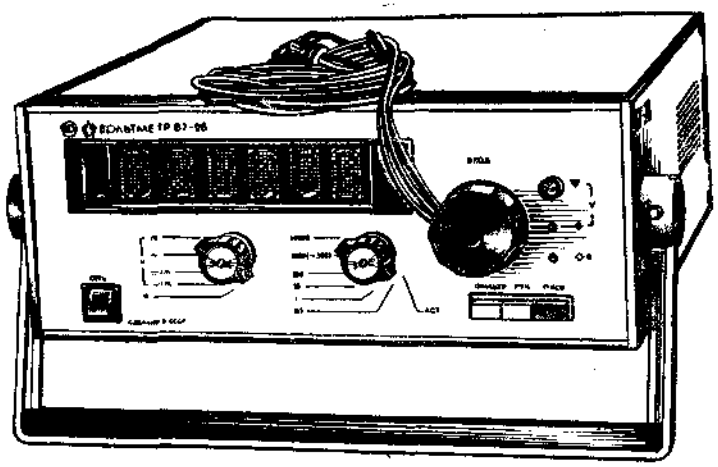


Рис. IV—18. Цифровой вольтметр В7-28

Бесшкальные преобразователи. Бесшкальные преобразователи предназначены для измерения термо-ЭДС путем преобразования их в унифицированный аналоговый сигнал постоянного тока. Последний может быть использован как для измерения, так и для ввода в другие устройства, в том числе в ЭВМ. Преобразователи различают по числу каналов: одноканальные и групповые. Последние имеют встроенный коммутатор, работающий под управлением ЭВМ или других устройств.

Ниже приводятся технические характеристики одноканальных преобразователей НП-ТЛ1М и Ш72 и группового А614-7/3.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БЕСШКАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

	НП-ТЛ1М	Ш72*	А614-7/3
Пределы измерений, °С	—50÷+50 —50÷+100 —50÷+150 0÷+100 0÷+150 0÷+200	—50÷+50 —50÷+100 —50÷+150 0÷+100 0÷+150 0÷+200	—50÷+50 —50÷+110 —50÷+150 —50÷+200 0÷+100 0÷+160
Первичный преобразователь	ТП (градуировка $ХК_{68}$)	ТП (градуировка $ХК_{68}$)	ТП (градуировка $ХК_{68}$)
Число каналов преобразования	1	1	16
Класс точности	1	0,4; 1,0	0,4
Выходной сигнал	0—5 мА	0—5 мА; 0—1Р В	0—5 В; 0—10 В

	НТ-ТЛ1М	Ш72*	А614-7/3
Способ установки	Щитовой	Щитовой	Настенный
Габаритные размеры, мм	160×420×43	80×160×450	543×361×314
Масса, кг	10	5,5	30

* Взамен преобразователей Ш72 подготавливаются к выпуску преобразователи Ш705 с аналогичными характеристиками, но меньшими габаритными размерами (60×160×400 мм) и массой (3,5 кг).

Преобразователи обеспечены коррекцией по температуре свободных концов.

Преобразователи НП-ТЛ1М имеют искробезопасное исполнение входных цепей. Для измерений в комплекте с преобразователями могут использоваться миллиамперметры и вольтметры соответствующих диапазонов.

IV.4.4. ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ВТОРИЧНЫЕ ПРИБОРЫ К НИМ

IV.4.4.1. Термопреобразователи сопротивления (ТС)

Промышленность выпускает широкий ассортимент термопреобразователей сопротивления, различающихся по конструктивным и метрологическим характеристикам.

По конструктивным признакам термопреобразователи сопротивления разделяют на погружные и воздушные.

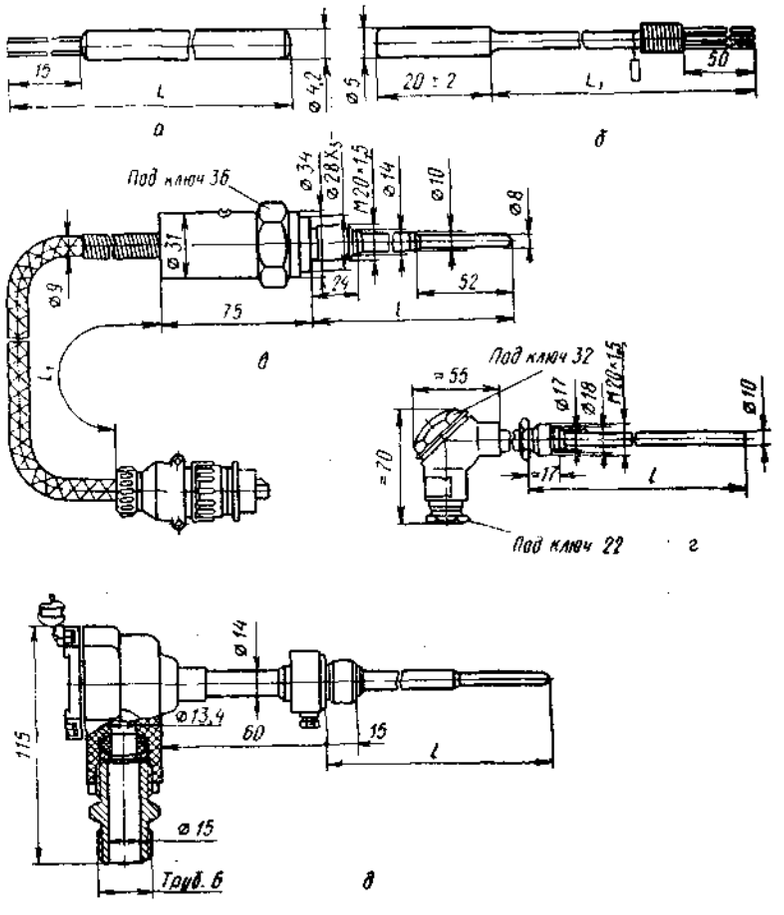
Погружные ТС применяют для измерения температуры жидких, газообразных, а в ряде случаев — твердых тел.

Простейшим ТС является элемент сопротивления (рис. IV—19, *а*). Он представляет собой чувствительный элемент, заключенный в герметическую оболочку из фарфора или синоксаля с короткими проволочными выводами. Элемент сопротивления можно использовать в лабораторных условиях в качестве ТС, обеспечив ему необходимую механическую защиту и надежное электрическое соединение.

Изображенный на рис. IV—19, *б* ТС предназначен для измерения температуры подшипников и должен устанавливаться в специально подготовленные гнезда. Чувствительный элемент заключен в герметичный латунный корпус с выводом трех гибких изолированных проводов. Этот ТС можно использовать и для установки в термометровых гильзах.

Преобразователи (рис. IV—19, *в* и *е*) предназначены для встраивания в трубопроводы и аппараты с избыточным давлением. Чувствительный элемент заключен в защитную арматуру с ввертным штуцером. Термопреобразователи сопротивления снабжены герметично заделанными проводами со штепсельным разъемом или наконечниками на свободном конце.

Наиболее распространены ТС с головкой (рис. IV—19, *г*), в которой размещены зажимы для присоединения внешних проводов. Провода из головки выводятся через сальниковое уплотнение. Показанный ТС имеет закрепленный штуцер, однако выпускаются исполнения с подвижным штуцером, позволяющим менять глубину погружения.



Термопреобразователь сопротивления, показанный на рис. IV—19, *д*, отличается взрывозащищенным исполнением головки.

Воздушные ТС применяют для измерения температуры воздуха в помещениях в условиях естественной конвекции. Конструкция этих ТС должна обеспечивать тепловой контакт с воздухом через возможно большую поверхность с малым термическим сопротивлением. Конструкция одного из воздушных ТС представлена на рис. IV—29, *ж*. Чувствительный элемент установлен на основании с ограждением. Внутрь основания через сальник вводят внешние провода.

Промышленные ТС выпускаются с несколькими стандартными градуировками, отличающимися сопротивлением R_0 при 0 °С (табл. IV—8—IV—14).

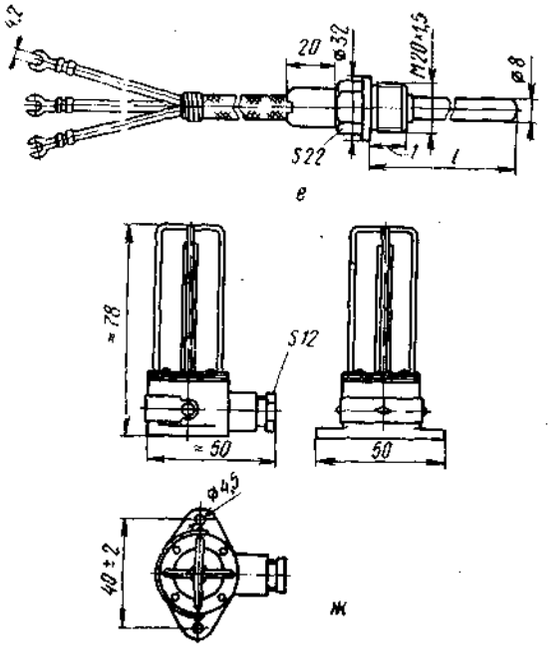


Рис. IV—19. Термопреобразователи сопротивления:
а — ЭСП-01 и ЭЧМ-01; *б* — ТСП-0979 и ТСМ-0979; *в* — ТСП-037К; *г* — ТСП-0879 и ТСМ-0879; *д* — ТСП-5081; *е* — ТСМ-0879-01; *ж* — ТСМ-6114; *L* — длина элементов сопротивления; L_1 — длина выводных концов; *l* — длина монтажной части

Метрологические характеристики ТС определяются классом точности: К-I, К-II или К-III. Допустимые значения отклонений характеристик представлены в табл. IV—15.

Технические характеристики термопреобразователей сопротивления сведены в табл. IV—16, а дополнительные сведения по элементам сопротивления — в табл. IV—17.

Таблица IV—8. СТАНДАРТНЫЕ ГРАДУИРОВКИ ТС

Материал	Градуировка	R_0, Ом	Материал	Градуировка	R_0, Ом
Платина	5П	5	Медь	10М	10
	10П	10		50М	50
	50П	50		100М	100
	100П	100		Гр. 23*	53
	Гр. 21*	46			
	Гр. 22*	100			

* Сняты с производства.

Таблица IV—9. ГРАДУИРОВОЧНАЯ ТАБЛИЦА ПЛАТИНОВЫХ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРАДУИРОВОК 100П И (R_0=100 Ом) И 10П (R_0=10 Ом)*

Температура, °С	Сопротивление (Ом) для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
—120	51,359	50,943	50,528	50,112	49,696	49,279	48,862	48,445	48,029	47,612
—110	55,500	55,086	54,673	54,259	53,846	53,432	53,018	52,603	52,189	51,774
—100	59,621	59,209	58,799	58,387	57,975	57,563	57,151	56,739	56,326	55,912
—90	63,724	63,316	62,906	62,496	62,086	61,676	61,265	60,854	60,443	60,032
—80	67,812	67,404	66,996	66,587	66,179	65,771	65,362	64,953	64,544	64,134
—70	71,883	71,476	71,070	70,663	70,256	69,850	69,443	69,034	68,628	68,220
—60	75,940	75,535	75,130	74,725	74,319	73,914	73,508	73,101	72,695	72,289
—50	79,983	79,580	79,175	78,771	78,368	77,963	77,559	77,155	76,750	76,346
—40	84,012	83,609	83,207	82,805	82,402	82,000	81,596	81,193	80,790	80,387
—30	88,028	87,627	87,226	86,825	86,423	86,022	85,620	85,218	84,816	84,414
—20	92,032	91,631	91,231	90,831	90,431	90,031	89,631	89,230	88,830	88,429
—10	96,022	95,624	95,225	94,827	94,428	94,028	93,629	93,230	92,830	92,431
—0	100,000	99,603	99,206	98,808	98,411	98,012	97,615	97,217	96,819	96,421
+0	100,000	100,397	100,794	101,191	101,587	101,984	102,380	102,776	103,172	103,568
+10	103,965	104,361	104,757	105,152	105,548	105,944	106,339	106,734	107,129	107,524
+20	107,917	108,313	108,708	109,103	109,498	109,892	110,286	110,680	111,073	111,467
+30	111,861	112,254	112,647	113,041	113,434	113,828	114,220	114,613	115,006	115,398
+40	115,791	116,183	116,575	116,967	117,359	117,751	118,142	118,534	118,925	119,317
+50	119,708	120,100	120,490	120,881	121,271	121,662	122,053	122,443	122,833	123,223
+60	123,613	124,003	124,393	124,783	125,172	125,562	125,951	126,340	126,729	127,118
+70	127,507	127,895	128,283	128,672	129,060	129,448	129,836	130,224	130,612	131,000
+80	131,388	131,775	132,162	132,549	132,936	133,323	133,710	134,097	134,484	134,870
+90	135,256	135,642	136,028	136,415	136,801	137,186	137,572	137,958	138,343	138,729
+100	139,113	139,498	139,883	140,268	140,653	141,038	141,423	141,807	142,191	142,576
+110	142,959	143,343	143,727	144,110	144,494	144,877	145,260	145,643	146,026	146,409
+120	146,792	147,175	147,558	147,940	148,322	148,704	149,087	149,469	149,851	150,233
+130	150,613	150,995	151,377	151,758	152,138	152,519	152,900	153,281	153,662	154,043
+140	154,423	154,803	155,183	155,563	155,943	156,323	156,704	157,083	157,463	157,843
+150	158,221	158,600	158,979	159,358	159,736	160,115	160,494	160,873	161,251	161,629
+160	162,007	162,385	162,763	163,141	163,518	163,896	164,274	164,650	165,027	165,404
+170	165,781	166,158	166,535	166,911	167,288	167,664	168,040	168,417	168,793	169,169
+180	169,544	169,919	170,295	170,669	171,045	171,120	171,795	172,170	172,545	172,920
+190	173,294	173,668	174,043	174,417	174,791	175,166	175,540	175,913	176,287	176,660
+200	177,033	177,408	177,779	178,152	178,525	178,808	179,271	179,644	180,016	180,389
+210	180,760	181,132	181,504	181,876	182,248	182,519	182,991	183,362	183,734	184,405
+220	184,475	184,846	185,588	185,588	185,958	186,608	186,698	187,068	187,439	187,809
+230	188,179	188,549	188,919	189,288	189,658	190,027	190,397	190,767	191,135	191,504
+240	191,873	192,211	192,610	192,978	193,347	193,715	194,083	194,451	194,819	195,186

* Для термопреобразователей градуировки 10П все значения сопротивления делить на 10.

Таблица IV—10. ГРАДУИРОВОЧНАЯ ТАБЛИЦА ПЛАТИНОВЫХ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРАДУИРОВОК 50П (R_0=50 Ом) И 5П (R_0=5 Ом)*

Температура, °С	Сопротивление (Ом) для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
—120	25,679	25,471	25,264	25,056	24,848	24,639	24,431	24,222	24,014	23,806
—110	27,750	27,543	27,336	27,129	26,923	26,716	26,509	26,301	26,094	25,887
—100	29,810	29,604	29,399	29,193	28,987	28,781	28,575	28,369	28,163	27,956
—90	31,862	31,658	31,453	31,248	31,043	30,838	30,632	30,427	30,221	30,016
—80	33,906	33,702	33,498	33,293	33,090	32,885	32,681	32,476	32,272	32,067
—70	35,941	35,738	35,535	35,331	35,128	34,925	34,721	34,517	34,314	34,110
—60	37,970	37,767	37,565	37,362	37,159	36,957	36,751	36,550	36,347	36,144
—50	39,991	39,790	39,587	39,385	39,184	38,980	38,779	38,577	38,375	38,173
—40	42,006	41,804	41,603	41,402	41,201	41,000	40,798	40,596	40,395	40,193
—30	44,014	43,813	43,613	43,412	43,211	43,011	42,810	42,609	42,408	42,207
—20	46,016	45,815	45,616	45,415	45,215	45,015	44,815	44,615	44,415	44,214
—10	48,011	47,812	47,612	47,413	47,214	47,014	46,811	46,615	46,415	46,215
—0	50,000	49,801	49,603	49,104	49,205	49,006	48,807	48,608	48,409	48,210
+0	50,000	50,198	50,397	50,595	50,793	50,992	51,190	51,387	51,586	51,781
+10	51,982	52,180	52,378	52,576	52,774	52,972	53,169	53,367	53,564	53,762
+20	53,959	54,156	54,354	54,551	54,719	54,946	55,143	55,340	55,536	55,733
+30	55,930	56,127	56,323	56,520	56,717	56,914	57,110	57,306	57,503	57,699
+40	57,895	58,091	58,287	58,483	58,679	58,875	59,071	59,267	59,462	59,658
+50	59,854	60,050	60,245	60,440	60,635	60,831	61,026	61,221	61,416	61,611
+60	61,806	62,001	62,196	62,391	62,586	62,781	62,975	63,170	63,364	63,559
+70	63,753	63,947	64,141	64,336	64,530	64,724	64,918	65,112	65,306	65,500
+80	65,694	65,887	66,081	66,275	66,468	66,664	66,855	67,048	67,242	67,435
+90	67,628	67,821	68,014	68,207	68,400	68,593	68,786	68,979	69,171	69,364
+100	69,556	69,749	69,941	70,134	70,326	70,514	70,711	70,903	71,095	71,288
+110	71,479	71,671	71,863	72,055	72,238	72,438	72,620	72,821	73,013	73,204
+120	73,396	73,587	73,779	73,970	74,161	74,352	74,543	74,734	74,925	75,116
+130	75,306	75,497	75,688	75,879	76,069	76,259	76,450	76,640	76,831	77,021
+140	77,211	77,401	77,591	77,781	77,971	78,161	78,352	78,541	78,731	78,921
+150	79,110	79,300	79,489	79,679	79,868	80,057	80,247	80,436	80,625	80,814
+160	81,003	81,192	81,381	81,570	81,759	81,948	82,137	82,325	82,513	82,702
+170	82,890	83,079	83,267	83,455	83,644	83,832	84,020	84,208	84,396	84,584
+180	84,772	84,959	85,147	85,334	85,522	85,710	85,897	86,085	86,272	86,460
+190	86,647	86,831	87,021	87,208	87,395	87,583	87,770	87,956	88,143	88,330
+200	88,516	88,704	88,889	89,076	89,262	89,449	89,635	89,822	90,008	90,194
+210	90,380	90,566	90,752	90,938	91,124	91,309	91,495	91,681	91,867	92,052
+220	92,237	92,423	92,609	92,794	92,979	93,164	93,349	93,534	93,719	93,904
+230	94,089	94,274	94,459	94,644	94,829	95,013	95,198	95,383	95,567	95,752
+240	95,936	96,120	96,305	96,489	96,673	96,857	97,041	97,225	97,409	97,593
+250	97,776	97,960	98,143	98,327	98,510	98,694	98,877	99,061	99,244	99,427
+260	99,610	99,793	99,976	100,160	100,343	100,525	100,708	100,891	101,074	101,257
+270	101,439	101,621	101,804	101,986	102,169	102,351	102,433	102,716	102,898	103,079
+280	103,261	103,443	103,625	103,807	103,989	104,171	104,352	104,534	107,716	104,897
+290	105,079	105,260	105,441	105,622	105,803	105,985	106,166	106,347	106,528	106,709
+300	106,889	107,070	107,251	107,432	107,612	107,793	107,973	108,154	108,334	108,514

* Для термопреобразователей градуировки 5П все значения сопротивления делить на 10.

Таблица IV—11. ГРАДУИРОВОЧНАЯ ТАБЛИЦА МЕДНЫХ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРАДУИРОВКИ 100М (R_0=100 Ом) И 10М* (R_0=10 Ом)

Температура, °С	Сопротивление (Ом) для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
—120	47,690	47,250	46,800	46,350	45,900	45,450	45,000	44,550	44,100	43,650
—110	52,160	51,710	51,260	50,820	50,370	49,930	49,480	49,030	48,590	48,140
—100	56,610	56,170	55,720	55,280	54,830	54,390	53,940	53,500	53,050	52,600
—90	61,030	60,590	60,150	59,710	59,270	58,820	58,380	57,940	57,490	57,050
—80	65,420	64,980	64,540	64,100	63,660	63,220	62,790	62,350	61,910	61,470
—70	69,790	69,360	68,920	68,490	68,050	67,610	67,170	66,730	66,300	65,860
—60	74,150	73,710	73,280	72,850	72,410	71,970	71,540	71,100	70,670	70,230
—50	78,480	78,050	77,620	77,190	76,750	76,320	75,880	75,450	75,020	74,580
—40	82,810	82,380	81,950	81,510	81,080	80,650	80,220	79,780	79,350	78,920
—30	87,120	86,690	86,260	85,830	85,400	84,970	84,540	84,100	83,670	83,240
—20	91,420	90,990	90,560	90,130	89,700	89,270	88,840	88,410	87,980	87,550
—10	95,720	95,290	94,860	94,430	94,000	93,570	93,140	92,710	92,280	91,850
—0	100,000	99,572	99,144	98,716	98,288	97,860	97,432	97,004	96,576	96,148
+0	100,000	100,428	100,856	101,284	101,712	102,140	102,568	102,996	103,424	103,852
+10	104,281	104,709	105,138	105,566	105,994	106,422	106,850	107,279	107,707	108,135
+20	108,563	108,991	109,419	109,847	110,275	110,703	111,131	111,560	111,988	112,416
+30	112,844	113,272	113,700	114,128	114,556	114,984	115,412	115,840	116,268	116,696
+40	117,124	117,552	117,980	118,408	118,836	119,264	119,692	120,120	120,548	120,976
+50	121,404	121,832	122,260	122,688	123,116	123,544	123,972	124,400	124,828	125,257
+60	125,684	126,112	126,540	126,968	127,396	127,824	128,252	128,680	129,107	129,535
+70	129,963	130,391	130,819	131,247	131,675	132,103	132,531	132,959	133,386	133,814
+80	134,242	134,670	135,098	135,526	135,954	136,382	136,810	137,238	137,666	138,094
+90	138,522	138,949	139,377	139,805	140,233	140,661	141,088	141,517	141,945	142,373
+100	142,800	143,228	143,656	144,084	144,512	144,940	145,368	145,796	146,224	146,652
+110	147,079	147,507	147,935	148,363	148,790	149,218	149,646	150,074	150,502	150,930
+120	151,357	151,785	152,213	152,641	153,069	153,497	153,924	154,352	154,780	155,208
+130	155,635	156,063	156,491	156,919	157,346	157,774	158,202	158,630	159,058	159,486
+140	159,913	160,341	160,769	161,197	161,625	162,053	162,481	162,908	163,336	163,764
+150	164,192	164,620	165,048	165,476	165,904	166,331	166,759	167,187	167,615	168,042
+160	168,470	168,898	169,326	169,754	170,182	170,610	171,037	171,465	171,893	172,321
+170	172,748	173,176	173,604	174,032	174,460	174,888	175,316	175,743	176,171	176,599
+180	177,026	177,454	177,882	178,310	178,738	179,166	179,594	180,021	180,449	180,877
+190	181,305	181,733	182,160	182,588	183,016	183,444	183,872	184,299	184,727	185,155
+200	185,583	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Для термопреобразователей градуировки 10М значения сопротивлений делить на 10.

Таблица IV–12. ГРАДУИРОВОЧНАЯ ТАБЛИЦА МЕДНЫХ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРАДУИРОВКИ 50М (R_0=50 Ом)

Температура, °С	Сопротивление (Ом) для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
−50	39,240	41,190	40,975	40,755	40,540	40,325	40,110	39,890	39,675	39,460
−40	41,405	43,345	43,130	42,915	42,700	42,485	42,270	42,050	41,835	41,620
−30	43,560	45,495	45,280	45,065	44,850	44,635	44,420	44,205	43,990	43,775
−20	45,710	47,645	47,430	47,215	47,000	46,785	46,570	46,355	46,140	45,925
−10	47,860	49,786	49,572	49,358	49,144	48,930	48,716	48,502	48,288	48,074
−0	50,000	50,214	50,428	50,642	50,856	51,070	51,284	51,498	51,712	51,926
+10	50,000	52,354	52,569	52,783	52,997	53,211	53,425	53,639	53,853	54,067
+20	52,140	54,495	54,709	54,923	55,137	55,351	55,565	55,780	55,994	56,208
+30	54,281	56,636	56,850	57,064	57,278	57,492	57,706	57,920	58,134	58,348
+40	56,422	58,776	58,990	59,204	59,418	59,632	59,846	60,060	60,274	60,488
+50	58,562	60,916	61,130	61,344	61,558	61,772	61,986	62,200	62,414	62,628
+60	60,702	63,056	63,270	63,484	63,698	63,912	64,126	64,340	64,553	64,767
+70	62,842	65,195	65,409	65,623	65,837	66,051	66,265	66,479	66,693	66,907
+80	64,981	67,335	67,549	67,763	67,977	68,191	68,405	68,619	68,833	69,047
+90	67,121	69,474	69,688	69,902	70,116	70,330	70,544	70,758	70,972	71,186
+100	69,261	71,614	71,828	72,042	72,256	72,470	72,684	72,898	73,112	73,326
+110	71,400	73,753	73,967	74,181	74,395	74,600	74,823	75,037	75,251	75,465
+120	73,539	75,892	76,106	76,320	76,534	76,748	76,962	77,176	77,390	77,604
+130	75,678	78,031	78,245	78,459	78,673	78,887	79,101	79,315	79,529	79,743
+140	77,817	80,170	80,384	80,598	80,812	81,026	81,240	81,454	81,668	81,882
+150	79,956	82,310	82,524	82,738	82,952	83,165	83,379	83,593	83,807	84,021
+160	82,096	84,449	84,663	84,877	85,091	85,305	85,518	85,732	85,946	86,160
+170	84,235	86,588	86,802	87,016	87,230	87,444	87,658	87,871	88,085	88,299
+180	86,374	88,727	88,941	89,155	89,369	89,583	89,797	90,010	90,225	90,438
+190	88,513	90,866	91,080	91,294	91,508	91,722	91,936	92,149	92,363	92,577
+200	90,653	92,791	—	—	—	—	—	—	—	—
	92,791	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица IV–13. ГРАДУИРОВОЧНАЯ ТАБЛИЦА ПЛАТИНОВЫХ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРАДУИРОВКИ 21 (R_0=46 Ом)

Температура, °С	Сопротивление, Ом	Температура, °С	Сопротивление, Ом	Температура, °С	Сопротивление, Ом
−120	23,63	−10	44,17	100	63,99
−110	24,54	0	46,00	110	65,76
−100	27,44	10	47,82	120	67,52
−90	29,33	20	49,64	130	69,28
−80	31,21	30	51,45	140	71,03
−70	33,08	40	53,25	150	72,78
−60	34,94	50	55,06	160	74,52
−50	36,80	60	56,86	170	76,26
−40	38,65	70	58,65	180	77,99
−30	40,50	80	60,43	190	79,71
−20	42,34	90	62,21	200	81,43
				310	83,15

Таблица IV–14. ГРАДУИРОВОЧНАЯ ТАБЛИЦА МЕДНЫХ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРАДУИРОВКИ 23 (R_0=53 Ом)

Температура, °С	Сопротивление, Ом	Температура, °С	Сопротивление, Ом	Температура, °С	Сопротивление, Ом	Температура, °С	Сопротивление, Ом	Температура, °С	Сопротивление, Ом
−50	41,71	0	53,00	50	64,29	100	75,58	150	86,87
−45	42,84	5	54,13	55	65,42	105	76,71	155	88,00
−40	43,97	10	55,26	60	66,55	110	77,84	160	89,13
−35	45,10	15	56,39	65	67,68	115	78,97	165	90,25
−30	46,23	20	57,52	70	68,81	120	80,09	170	91,38
−25	47,36	25	58,65	75	69,93	125	81,22	175	92,51
−20	48,48	30	59,77	80	71,06	130	82,35	180	93,64
−15	49,61	35	60,90	85	72,19	135	83,48		
−10	50,74	40	62,03	90	73,32	140	84,61		
−5	51,87	45	63,16	95	74,45	145	85,74		

Таблица IV–15. ДОПУСТИМЫЕ ОТКЛОНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Тип термопреобразователя	Класс	Допустимое отклонение величины R_0, %	Допустимое отклонение отношения R_{100}/R_0
Платиновый	К-I	±0,05	+0,0015 −0,0005
	К-II	±0,1	+0,0015 −0,0010
	К-III	±0,2	+0,0015 −0,0020
Медный	К-II	±0,1	±0,001
	К-III	±0,2	±0,002

Примечание. R_0 и R_{100} — номинальные сопротивления при 0 и 100°С.

Таблица IV—16. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Тип	Наименование и назначение	Диапазон измерений, °С	Градуировка	Исполнение (материал защитной арматуры)	Класс	Инерционность или показатель инерции, с, не более	Давление рабочей среды, МПа	Длина монтажной части, мм	Число чувствительных элементов	Тип выводов	Длина выводных проводов, м
ТСП-0979	Термопреобразователь сопротивления платиновый для измерения температуры подшипников в среде турбинных масел	От 0 до 120	50П	Виброустойчивое (латунь)	К-II	9 (рабочая среда—вода)	—	20	1	—	0,12 0,5 0,63 0,8 1,0 1,6
ТСП-037К	Термопреобразователь сопротивления платиновый для измерения температуры жидкостей и газов	От—220 до +120	100П	Виброустойчивое (сталь 12Х18Н10Т)	К-I	9 (вода)	25	80 120 160 200	1	—	8,0 12,0 16,0 20,0
ТСП-0879	Термопреобразователь сопротивления платиновый для измерения температуры жидкостей и газов	От —50 до +600	50П и 100П	Виброустойчивое (сталь 08Х13) Виброустойчивое (сталь 12Х18Н10Т)	К-II	40 (вода)	6,4	120 160 200 250 320 2000	1 или 2	Головка водозащищенная	—
ТПС-5081-01	Термопреобразователь сопротивления платиновый для измерения температуры жидкостей и газов	От—50 до +200	100П	Виброустойчивое, взрывобезопасное для помещений классов В1-г (сталь 08Х13 или 12Х18Н10Т)	К-II	9 (вода)	32	80	1	Головка брызгозащищенная взрывобезопасная	—
ТСМ-0979	Термопреобразователь сопротивления медный для измерения температуры подшипников в среде турбинных масел	От 0 до+120	50М	Виброустойчивое (латунь)	К-III	9 (вода)	—	20	1	Без головки	0,12 0,5 0,63 0,8 1,0 1,6

Продолжение

Тип	Наименование и назначение	Диапазон измерений, °С	Градуировка	Исполнение (материал защитной арматуры)	Класс	Инерционность или показатель инерции, с, не более	Давление рабочей среды, МПа	Длина монтажной части, мм	Число чувствительных элементов	Тип выводов	Длина выводных проводов, м
ТСМ-0879	Термопреобразователь сопротивления медный для измерения температуры жидкостей и газов	От —50 до +150	50М и 100М	Виброустойчивое (сталь 08Х13)	К-II	40 (вода)	6,4	120 160 200 250 320 ... 3150	1	Головка водозащищенная	—
ТСМ-0879-01	Термопреобразователь сопротивления медный для измерения температуры жидкостей и газов	От—50 до +150	50М и 100М	Виброустойчивое (сталь 08Х13 или 12Х18Н10Т)	К-III	30 (вода)	4,0	80 100 120 160 200 250 320 500	1	Без головки	0,54
ТСМ-6114	Термопреобразователь сопротивления медный для измерения температуры воздуха в помещениях	От—50 до +100	50М	Виброустойчивое (сталь 12Х18Н10Т)	К-III	120 (воздух)	—	—	1	То же	—
ЭСП-01	Элемент сопротивления платиновый	От—260 до +750	50П, 100П	См. табл. IV—17	К-I, К-II	9 (вода) 20 мин (спокойный воздух)	—	—	1,2	—	0,015
ЭСП-02	Элемент сопротивления платиновый	От 0 до+50	100П	То же	К-II	9 (вода)	—	—	1	—	0,015
ЭЧМ-070	Элемент сопротивления медный	От—50 до+200	10М, 50М, 100М	» »	К-III	10—25 вода	—	—	1	—	0,015

Таблица IV—17. МОДИФИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Тип	Обозначение варианта	Градуировка	Длина, мм	Исполнение	Класс	Материалы
ЭСП-01 (одинарный платиновый)	5Ц4.679.200-18	21	46	Виброустойчивый	К-I	Синоксаль
	5Ц4.679.200-19	21	46	То же	К-II	»
	5Ц4.679.200-22	21	61	» »	К-II	» »
	5Ц4.679.200-33	50П	46	» »	К-I	» »
	5Ц4.679.200-34	50П	46	» »	К-II	» »
	5Ц4.679.200-35	50П	61	» »	К-II	» »
	5Ц4.679.200-20	100П	61	» »	К-I	» »
	5Ц4.679.200-21	100П	61	» »	К-II	» »
	5Ц4.679.200-23	100П	61	» »	К-II	»
	5Ц4.679.200-24	21	46	» »	К-I	Керамический или синоксаль
	5Ц4.679.200-25	21	46	» »	К-II	То же
	5Ц4.679.200-26	100П	61	» »	К-I	» »
	5Ц4.679.200-27	100П	61	» »	К-II	» »
ЭСП-01 (двойной платиновый)	5Ц4.679.200-39	50П	61	» »	К-I	» »
	МЦ4.679.200-40	50П	61	» »	К-II	» »
ЭСП-02 (одинарный платиновый)	5Ц5.182.442	100П	61	Обыкновенный	К-II	Латунь Л96
ЭЧМ-070 (одинарный медный)	5Ц4.679.065	10М	20	Виброустойчивый	К-III	То же
	5Ц4.679.065-01	50М	50	То же	К-III	» »
	5Ц4.679.065-02	100М	80		К-III	» »

IV.4.4.2. Вторичные приборы к термопреобразователям сопротивления

В качестве вторичных приборов в комплекте с термопреобразователями температуры применяются: магнитоэлектрические логометры, ручные мосты, электронные автоматические мосты, цифровые приборы, бесшкальные преобразователи с унифицированным аналоговым сигналом.

В соответствии с ГОСТом [32] для приборов, отградуированных в градусах Цельсия, приняты пределы измерений, приведенные в табл. IV—18.

Таблица IV—18. ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРОВ, РАБОТАЮЩИХ В КОМПЛЕКТЕ С ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Тип первичного преобразователя	Пределы измерений, °С			
	нижний	верхний	нижний	верхний
Термопреобразователи сопротивления платиновые (градуировка 10П)	0	300	0	650
	0	400	300	650
	0	500		
То же (градуировка 50П)	—200	—70	0	150
	—120	30	0	200
	—70	180	0	300
	—50	50	0	400
	0	100	0	500
То же (градуировка 100П)	—200	—70	0	100
	—120	30	0	150
	—90	50	0	200
	—70	180	0	300
	—50	50	0	400
	—25	25	0	500
	0	50	200	500
Термопреобразователи сопротивления медные (градуировка 50М)	—50	0	0	100
	—50	50	0	150
	—50	100	0	180
	0	50	50	100
То же (градуировка 100М)	—50	0	0	50
	—50	50	0	100
	—50	100	0	150
	—25	25	0	180
	0	25	50	100

Магнитоэлектрические логометры. Магнитоэлектрические логометры представляют собой щитовые приборы с цилиндрической (рис. IV—20, *а*) или плоской шкалой (рис. IV—20, *б*). Ниже приводятся технические характеристики логометров (пределы измерений см. в табл. IV—18).

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛОГОМЕТРОВ

	Ш69000	Ш69001	Ш69002
Класс точности	1,5	2,0	2,0
Длина шкалы, мм	130	130	130
Сопротивление линии, Ом	15	15	15
Питание	4 В (постоянный ток)	4 В (постоянный ток)	220 В (переменный ток)
Габаритные размеры, мм	200×100×275	120×120×220	120×120×220
Масса, кг	3	3,5	3,5

Ручные мосты постоянного тока. Ручные мосты применяют в основном в качестве лабораторных образцовых средств измерений и используют при точных физических экспериментах и при поверке рабочих средств. Технические характеристики некоторых мостов постоянного тока см. в п. VIII. 3.

Автоматические электронные мосты. Номенклатура и конструкция автоматических мостов аналогичны таковым автоматических потенциометров. Технические характеристики см. в табл. IV—6, пределы измерений — в табл. IV—18, внешний вид приведен на рис. IV—17.

Цифровые приборы. Для измерений могут быть использованы цифровые приборы общего назначения (вольтметры, амперметры, омметры), обеспечивающие заданную точность измерений. Ниже приводятся данные о приборах Ф206-1 и Ф266, специально предназначенных для работы с термопреобразователями сопротивления и отградуированных непосредственно в градусах Цельсия (приборы Ф206-1 снимаются с производства).

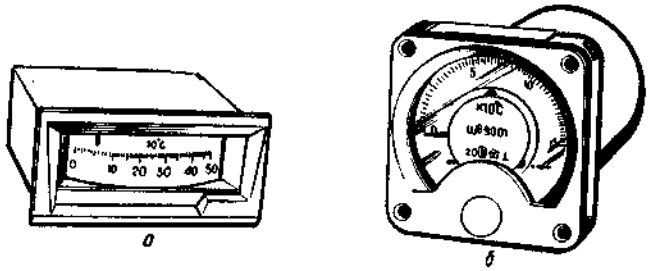


Рис. IV—20. Магнитоэлектрические логометры:
а — Ш69000; *б* — Ш69001 и Ш69002

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИБОРОВ ЧАСТОТНО-ЦИФРОВОГО ТИПА Ф206-1 И Ф266

Пределы измерений	См. табл. IV—19
Основная погрешность, %	0,2
Первичные преобразователи	Стандартные преобразователи сопротивления платиновые и медные
Соединительная линия от термопреобразователя сопротивления	Четырехпроводная, сопротивление каждого провода до 100 Ом
Габаритные размеры (ширина, высота глубина), мм	
Ф206-1	480×118×480
Ф266	237×101×285
Масса, кг	
Ф206-1	13
Ф266	6

Таблица IV—19. ДИАПАЗОНЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРОВ Ф206-1 И Ф266

Тип	Пределы измерений, °С	Основная погрешность, °С	Градуировка термопреобразователя
Ф206-1/1	—120÷+30	±0,3	100П
Ф206-1/2	—100÷+250	±0,7	100П
Ф206-1/3	—100÷+100	±0,4	100П
Ф206-1/4	—50÷+50	±0,2	100П
Ф206-1/5	0÷+100	±0,2	100П
Ф206-1/6	0÷+200	±0,4	50М и 23
Ф206-1/11	—50÷+50	±0,2	50М и 23
Ф206-1/12	—50÷+100	±0,3	50М и 23
Ф206-1/13	0÷+100	±0,2	50М и 23
Ф266	—50÷+200	±0,5	100М
Ф266	—50÷+200	±0,5	50М
Ф266	—200÷+750	±1,1	10П
Ф266	—200÷+750	±1,1	100П

Бесшкальные преобразователи. Бесшкальные преобразователи с унифицированным выходом НП-СЛ1М, Ш71 * и А614-7/2 по конструкции и техническим характеристикам полностью аналогичны рассмотренным выше преобразователям для термоэлектрических преобразователей (см. п. IV.4.3). Диапазоны измерений преобразователей НП-СЛ1М и Ш71 соответствуют данным табл. VI—18.

Ниже приведены некоторые диапазоны работы преобразователя А614-7/2 с термопреобразователями градуировки 100П.

—120÷+40	—25÷+25	0÷+100
—90÷0	—25÷+100	0÷+200
—90÷+70	0÷+50	
—70÷+180	0÷+100	

* Вместо преобразователей Ш71 подготавливаются к выпуску Ш703 (диапазон — 200÷+650 °С) с аналогичными характеристиками; габаритные размеры и масса те же, что у Ш705 (см. п. IV.4.3).

IV.4.4.3. Термопреобразователи сопротивления с унифицированным выходом

Средство измерений этого вида представляет собой термопреобразователь сопротивления, конструктивно объединенный с электронной схемой, на выходе которой имеет место унифицированный токовый сигнал 0—5 или 4—20 мА.

Метрологические характеристики термопреобразователей приведены в табл. IV—20.

Таблица IV—20. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ С УНИФИЦИРОВАННЫМ ВЫХОДОМ

Наименование и тип	Пределы измерений, °С	Предел допускаемой основной погрешности, %	Градуировка
Термопреобразователь платиновый ТСПУ-0183	—200÷+50	1,0	100П
	—25÷+25	1,0	100П
	0÷+100	0,5	100П
	50÷+100	1,0	100П
	—100÷+50	1,0	50П
Термопреобразователь медный ТСМУ-0283	—25÷+25	1,0	50М
	0÷+50	1,0	50М
	0÷+100	0,5	50М
	+50÷+100	1,0	50М
	0÷+200	0,5	50М

Технические характеристики термопреобразователей приведены ниже.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С УНИФИЦИРОВАННЫМ ВЫХОДОМ

Зависимость выходного тока от температуры	Линейная
Верхний предел сопротивления нагрузки, кОм	
при токе 0—5 мА	2,5
» » 4—20 мА	1,0
Максимальное давление измеряемой среды, МПа	0,25 и 6,4
Напряжение питания (от источника постоянного тока), В	24 и 48
Потребляемая мощность, Вт, не более	5
Температура окружающей среды, °С	5—50
Максимальная влажность при температуре 35 °С, %	80
Длина погружаемой части преобразователя, мм	100, 120, 160, 200, 250, 320, 400, 630, 800, 1000
Масса в зависимости от исполнения и длины погружаемой части, кг	0,63—1,36

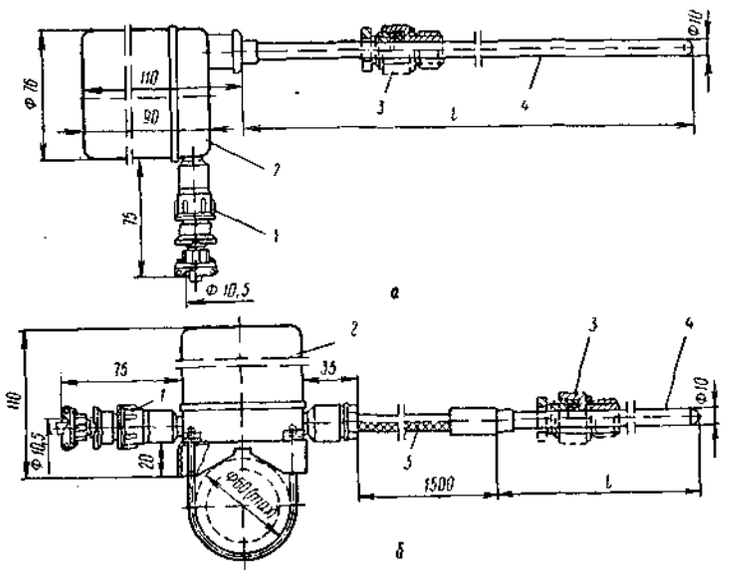


Рис. IV—21. Термопреобразователь сопротивления с унифицированным выходом с жестким соединением блока электроники с первичным преобразователем (*а*) и с соединением через кабель (*б*):
1 — штепсельный разъем; *2* — блок электроники; *3* — штуцер; *4* — первичный преобразователь (чувствительный элемент); *5* — кабель; *L* — длина погружаемой части

Термопреобразователи выпускают в двух исполнениях: с жестким соединением собственно термопреобразователя с блоком электроники и с соединением через кабель длиной 1500 мм. В первом случае термопреобразователь вместе с блоком электроники крепится с помощью штуцера к трубопроводу, во втором — блок электроники крепится отдельно с помощью специальных хомутов. Габаритный чертеж показан на рис. IV—21.

IV.5. СРЕДСТВА ПОВЕРКИ И ГРАДУИРОВКИ

В данном разделе приведены краткие сведения о средствах поверки и градуировки приборов измерения температур, которые могут быть использованы лабораториями ведомственных метрологических служб предприятий, связанных с производством и эксплуатацией холодильного оборудования.

При организации и проведении поверок следует руководствоваться соответствующими стандартами и инструкциями *.

* См., например: ГОСТ 8.279—78 ГСИ «Термометры стеклянные жидкостные рабочие. Методы и средства поверки». ГОСТ 8.461—82 (Ст СЭВ 1058—78) ГСИ «Термопреобразователи сопротивления. Методы и средства поверки».

Сведения об образцовых средствах измерения температуры приведены в табл. IV—21. Образцовые средства должны быть аттестованы и поверены органами Госстандарта.

Таблица IV—21. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ И ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Наименование	Техническая характеристика		
	Пределы измерений, °С	Цена деления, °С	Ориентировочное значение погрешности, °С
Комплект образцовых 1-го разряда термометров стеклянных для точных измерений ТРІ	0—60	0,01	—
То же, ТРІІ	55—155	0,02	—
» » ТРІІІ	140—300	0,05	—
Образцовый 1-го разряда преобразователь сопротивления платиновый ТСПН-1. Потенциометр постоянного тока или потенциометрическая установка на пределы 10^{-3}—10^{2} мВ; класс точности не ниже 0,05	—260÷0	—	0,01
Образцовый 1-го разряда термопреобразователь сопротивления платиновый ПТС-10. Потенциометр постоянного тока или потенциометрическая установка на пределы 10^{-3}—10^{2} мВ; класс точности не ниже 0,05	—260÷+600	—	0,01
Образцовые 2-го разряда термометры стеклянные ТЛ-4	—30÷+20	0,1	—
	0÷+55	0,1	—
	+50÷+105	0,1	—
	+100÷+155	0,1	—
	+150÷+205	0,1	—

Требования к средствам воспроизведения температур приведены в табл. IV—22. Основными показателями их являются нестабильность поддержания температуры, а также градиенты температуры в испытуемом объеме. В автоматических средствах, например в термостатах, нестабильность равна допустимому отклонению температуры от среднего значения. Образцовое средство и средство воспроизведения температуры должны иметь соответственно основную погрешность и нестабильность воспроизведения, не превышающую численно $^1/_4$ допустимого предела основной погрешности поверяемого средства.

Вспомогательные средства и материалы, необходимые для поверки и градуировки выбирают, исходя из конкретных условий *.

* См., например: Сборник комплектов средств поверки. Т. 3 и 6.— М.: Издательство стандартов, 1976.

Глава V

ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЙ И РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ

V.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Давление — это величина, характеризующая интенсивность сил, действующих на какую-либо часть поверхности тела по направлениям, перпендикулярным этой поверхности.

Применительно к жидкости, газу или пару давление — это отношение силы, действующей изнутри на поверхность стенки сосуда в направлении, перпендикулярном этой стенке, к площади ее поверхности. В соответствии с законами механики давление на жидкость или газ передается во все стороны равномерно.

Единицей давления в системе СИ является паскаль (Па): 1 Па = 1 Н/м² (ньютон на квадратный метр). Из-за малости этой величины в технике применяют кратные единицы — килопаскаль (1 кПа = 10^3 Па) и мегапаскаль (1 МПа = 10^6 Па). В некоторых случаях используют единицу системы МКГСС — килограмм-сила на квадратный метр (кгс/м²), а также внесистемные единицы: килограмм-сила на квадратный сантиметр (кгс/см²), бар, миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.), миллиметр водяного столба (мм вод. ст.). Единицу кгс/см² иногда называют технической атмосферой (ат). Кроме того, находит применение единица, называемая физической атмосферой.

Соотношение между единицами давления приведено в табл. V—1, куда наряду с единицами, употребляемыми в СССР, включены и некоторые единицы, применяемые за рубежом: фунт-сила на квадратный дюйм ($lbf \cdot in^{-2}$), фунт-сила на квадратный фут ($lbf \cdot ft^{-2}$), дюйм ртутного столба ($in \cdot Hg$).

Таблица V—1. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ДАВЛЕНИЯ

Единица	Па	кгс·м$^{-2}$	кгс·см$^{-2}$
1 Па	1	$10{,}20 \cdot 10^{-2}$	$10{,}20 \cdot 10^{-6}$
1 кгс·м$^{-2}$	9,807	1	10^{-4}
1 кгс·см$^{-2}$ (атм. техн.)	$9{,}807 \cdot 10^4$	10^4	1
1 атм. физ.	$101{,}3 \cdot 10^3$	$1{,}033 \cdot 10^4$	1,033
1 мм вод. ст.	9,807	1	10^{-4}
1 мм рт. ст.	133,3	13,59	$13{,}59 \cdot 10^{-4}$
1 *бар*	10^5	$10{,}20 \cdot 10^3$	1,020
1 $lbf \cdot in^{-2}$	6895	$7{,}031 \cdot 10^2$	$7{,}031 \cdot 10^{-2}$
1 $lbf \cdot ft^{-2}$	47,78	4,882	$4{,}882 \cdot 10^{-4}$
$in \cdot Hg$	3386	345,3	0,03453

Продолжение

Единица	мм вод. ст.	мм рт. ст.	бар
1 Па	$10{,}20\cdot10^{-2}$	$7{,}50\cdot10^{-3}$	10^{-5}
1 кгс·м$^{-2}$	1	$73{,}56\cdot10^{-3}$	$9{,}807\cdot10^{5}$
1 кгс·см$^{-2}$ (ат. техн.)	10^{4}	735,6	0,9807
1 атм. физ.	$1{,}033\cdot10^{4}$	760	1,013
1 мм вод. ст.	1	$73{,}56\cdot10^{-3}$	$9{,}807\cdot10^{5}$
1 мм рт. ст.	13,59	1	$133{,}3\cdot10^{5}$
1 бар	$10{,}20\cdot10^{3}$	$7{,}50\cdot10^{2}$	1
1 *lbf*·*in*$^{-2}$	$7{,}031\cdot10^{2}$	51,71	0,06895
1 *lbf*·*ft*$^{-2}$	4,882	0,3591	$47{,}78\cdot10^{-3}$
in·Hg	345,3	25,4	0,03386

В зависимости от системы отсчета различают давление абсолютное и условное.

Абсолютным называют давление, отсчитываемое от абсолютного вакуума или от близкой к нему величины.

Условное давление отсчитывается от некоторой величины, принятой за нуль. Чаще всего в качестве нулевого принимают атмосферное давление. В этом случае давление выше атмосферного называют избыточным, а ниже атмосферного — разрежением, или вакуумметрическим давлением. Последнее выражается в единицах давления со знаком «минус».

В необходимых случаях абсолютное давление может быть определено по измеренному избыточному или вакуумметрическому давлению:

$$p_{\text{а}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{и}},$$

где $p_{\text{а}}$ — абсолютное давление; $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление; $p_{\text{и}}$ — измеренное давление («+» для избыточного давления, «—» для вакуумметрического).

При высоких избыточных давлениях, когда $p_{\text{и}} \gg p_{\text{атм}}$, изменениями атмосферного давления можно пренебречь, приняв его равным нормальному $p_{\text{атм}} = p_{\text{н}}$ ($p_{\text{н}} = 760$ мм рт. ст. $= 0{,}1013$ МПа). Тогда

$$p_{\text{а}} = p_{\text{н}} + p_{\text{и}}.$$

Шкалы абсолютного давления показаны на рис. V—1, *а*. На верхней шкале давление выражено в физических атмосферах и мм рт. ст., средняя шкала отградуирована в единицах системы СИ — МПа и внесистемных — барах, нижняя шкала *3* — в кгс/см^2 (технических атмосферах). Пунктирные линии иллюстрируют соотношения между основными единицами. Шкалы избыточного давления (рис. V—1, *б*) имеют нулевые отметки при атмосферном давлении ($p_{\text{атм}}$). Вакуумметрические шкалы (рис. V—1, *в*) начинаются также от атмосферного давления, но располагаются левее нуля.

Названия приборов, предназначенных для измерений давлений, соответствуют их назначению: манометры абсолютного давления; манометры избыточного давления, или просто манометры; вакуумметры, мановакуумметры. Манометр абсолютного давления, предназначенный для измерения атмосферного давления, называется

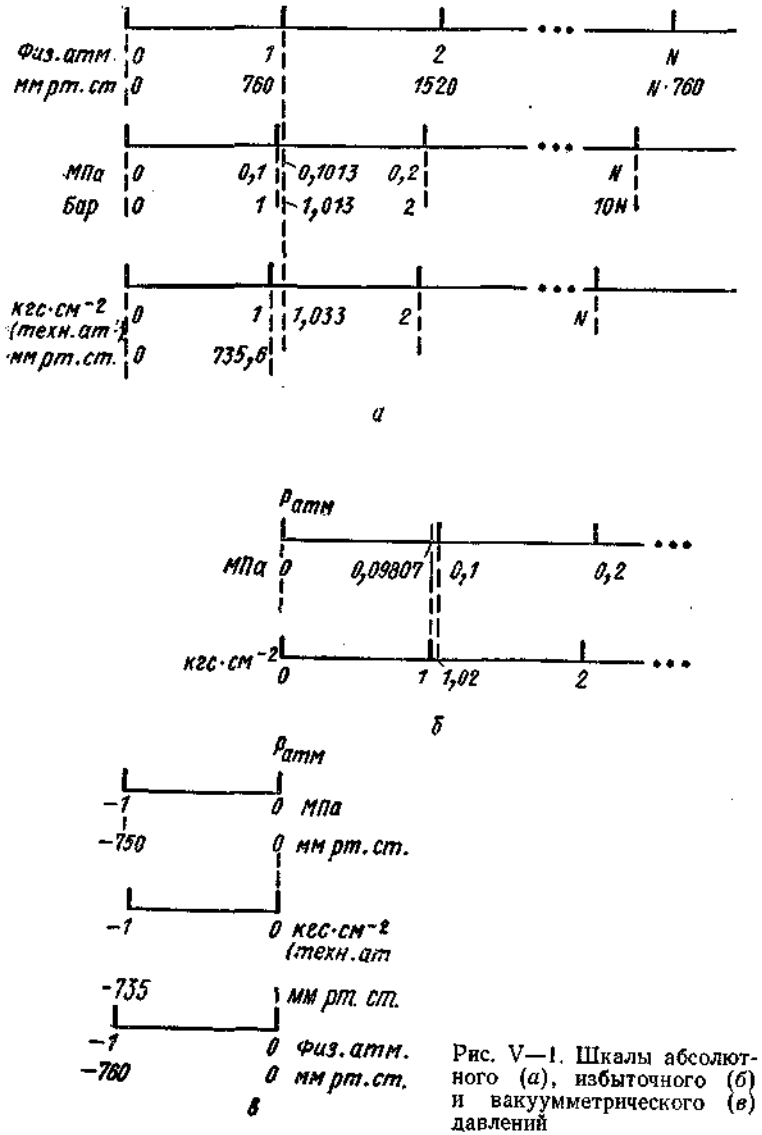


Рис. V—1. Шкалы абсолютного (*а*), избыточного (*б*) и вакуумметрического (*в*) давлений

барометром. Для измерения малых избыточных давлений и разрежений (до +0,04 МПа) применяют приборы, называемые соответственно напоро- и тягомерами, или комбинированные приборы — тягонапоромеры. Для измерений очень малых избыточных давлений (порядка 10^3—10^4 Па) применяют микроманометры.

V.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

V.2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

Преобразователи давления подразделяются на силовые и косвенные [12, 65].

К силовым относят преобразователи, действие которых основано на измерении силы, пропорциональной давлению или разности давлений. Давление является механической величиной, естественным проявлением которой является сила, поэтому такие приборы являются наиболее распространенными.

К косвенным относятся преобразователи, в которых используют изменения физических свойств рабочей среды под воздействием давления. Примером могут служить преобразователи, основанные на изменении теплоотдачи от твердого тела газу при различных давлениях. Это сравнительно ограниченный класс преобразователей специального назначения.

В зависимости от выходной величины преобразователи подразделяют на механические, электрические, пневматические.

В механических преобразователях выходной величиной является линейное или угловое перемещение выходного элемента.

В электрических преобразователях выходной величиной могут быть сила тока или напряжение, а также параметры электрической цепи (сопротивление, индуктивность, емкость и т. д.).

В пневматических преобразователях выходной величиной является давление сжатого воздуха.

Первичные преобразователи давления кроме чувствительных элементов могут содержать и другие узлы, выполняющие роль последовательных ступеней преобразования, т. е. передающие преобразователи, а в отдельных случаях и системы с обратной связью для осуществления компенсационного способа измерения.

V.2.2. СИЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Силовые преобразователи подразделяются на жидкостные и деформационные. В жидкостных преобразователях сила давления уравновешивается гидростатическим столбом жидкости, а давление преобразуется в изменение уровня жидкости.

В деформационных преобразователях сила давления уравновешивается силой упругой деформации чувствительного элемента, а давление преобразуется в перемещение выбранной точки или поверхности упругого элемента.

V.2.2.1. Жидкостные преобразователи

Этот класс преобразователей подразделяют на следующие основные типы:

двухтрубные (U-образные), в которых жидкость располагается в двух вертикальных трубках с соединенными нижними концами; верхние концы трубок открыты, и к ним подводятся два давления для измерения разности между ними;

чашечные (однотрубные), в которых жидкость располагается в сосуде (чаше) и соединенной с ним вертикальной или наклонной открытой трубке; преобразователь также воспринимает два давления, подводимых соответственно к чаше и к открытому концу трубки;

чашечные с запаянной трубкой для измерения абсолютного давления, которое подводится к чаше;

поплавковые, в которых жидкость располагается в чаше и трубке; в чаше размещается поплавок; перемещение поплавка пропорционально разности двух давлений, подводимых к чаше и трубке.

Двухтрубные (U-образные) преобразователи. Данный преобразователь (рис. V—2, *а*) представляет собой U-образную трубку или две трубки, сообщающиеся нижними частями. Давления p_1 и p_2 подводятся к обоим открытым концам. Разность этих давлений преобразуется в разность уровней жидкости в трубках.

Функция преобразования имеет вид

$$\Delta h = \Delta p / g(\rho - \rho_c), \qquad \text{(V—1)}$$

где Δp — разность подводимых давлений, Па; Δh — разность уровней жидкости в трубках м; g — ускорение свободного падения,

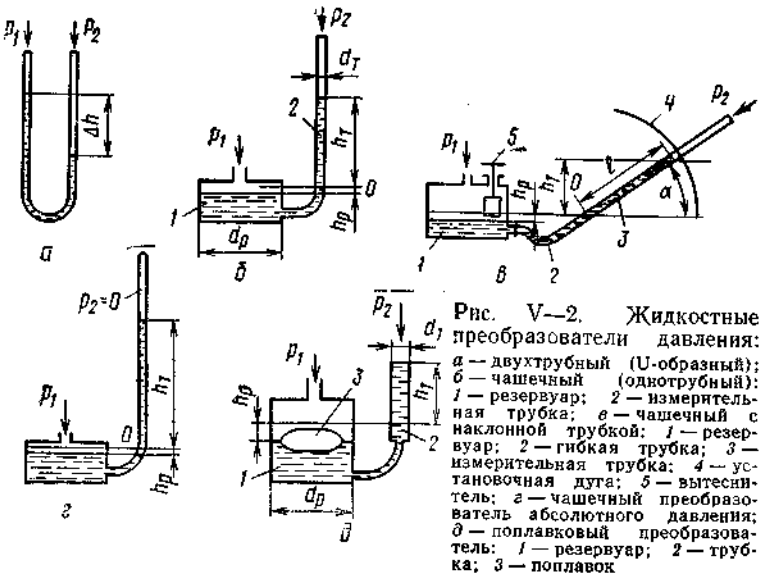


Рис. V—2. Жидкостные преобразователи давления:
а — двухтрубный (U-образный); *б* — чашечный (однотрубный); *1* — резервуар; *2* — измерительная трубка; *в* — чашечный с наклонной трубкой; *1* — резервуар; *2* — гибкая трубка; *3* — измерительная трубка; *4* — установочная дуга; *5* — вытеснитель; *г* — чашечный преобразователь абсолютного давления; *д* — поплавковый преобразователь: *1* — резервуар; *2* — трубка; *3* — поплавок

$м \cdot с^{-2}$; ρ и $\rho_с$ — плотность соответственно рабочей жидкости и среды над рабочей жидкостью, $кг \cdot м^{-3}$.

Если $\rho \gg \rho_с$, что имеет место при измерениях давлений газов, формула (V—1) принимает вид

$$\Delta h = \Delta p / g\rho. \qquad (V—2)$$

Разность давлений может выражаться непосредственно через разность уровней в единицах длины, например в мм рт. ст., мм вод. ст. С помощью двухтрубного преобразователя можно измерять как разность давлений, так и избыточное и вакуумметрическое давления. Для этого одна из трубок сообщается с атмосферой. Верхний предел измерения разности давлений зависит от длины трубок, которая, как правило, не превышает 1 м, в некоторых случаях — 2—3 м. Значения давлений зависят от прочности труб, изготовляемых из стекла, и могут достигать 15 МПа.

Чашечные (однотрубные) преобразователи. В отличие от двухтрубных чашечные преобразователи имеют резервуар *1*, сообщенный с измерительной трубкой *2* (рис. V—2, *б*). Из-за значительной разницы сечений резервуара и трубки имеют место незначительные изменения уровня жидкости в резервуаре. Отсчет разности уровней при измерении давлений производится только по трубке.

Перед измерениями устанавливают нуль отсчета при равных давлениях: $p_1 = p_2$.

Фактическая высота столба жидкости будет

$$\Delta h = h_т + h_р, \qquad (V—3)$$

где $h_т$ — высота столба в трубке, отсчитываемая от нулевой отметки; $h_р$ — снижение уровня жидкости в резервуаре.

$$h_р = h_т d_т^2 / d_р^2. \qquad (V—4)$$

Подставляя (V—4) в формулу (V—3), получаем

$$\Delta h = h_т (1 + d_т^2 / d_р^2) \qquad (V—5)$$

($d_т$ и $d_р$ — диаметры трубки и резервуара).

Давление в системе СИ рассчитывают по формулам (V—1) или (V—2).

Разновидность чашечных преобразователей с наклонной измерительной трубкой приведена на рис. V—2, *в*. Такие преобразователи позволяют существенно уменьшить погрешность отсчета высоты уровня жидкости в трубке. Преобразователь состоит из резервуара *1*, гибкой соединительной трубки *2*, измерительной трубки *3*, установочной дуги *4* со шкалой углов наклона и вытеснителя *5*. Последний служит для установления стабильного нуля отсчета при различных объемах жидкости.

Как и для преобразователя с вертикальной трубкой, справедлива формула (V—3).

Понижение уровня в резервуаре вычисляется по формуле

$$h_р = l d_т^2 / d_р^2,$$

где l — длина столба жидкости в трубке.

Высота гидростатического столба в трубке

$$h_т = l \sin\alpha,$$

откуда после подстановок в (V—3) получаем

$$\Delta h = l \left(\sin\alpha + \frac{d_т^2}{d_{р2}} \right).$$

Величину в скобке называют постоянной преобразователя.

На базе такого преобразователя устроены микроманометры, в которых в качестве рабочей жидкости чаще всего используют спирт. С их помощью можно измерять давление до 1000—2000 Па. Погрешность отсчета в таком преобразователе может быть уменьшена до 0,2—0,3 мм.

Расчет давления в системе СИ производится по формуле (V—1) и (V—2).

Чашечные преобразователи абсолютного давления. Схема преобразователя абсолютного давления показана на рис. V—2, *г*. Верхний конец измерительной трубки запаян. При соответствующем заполнении рабочей жидкостью (обычно ртутью) в полости трубки над жидкостью устанавливается давление, близкое к абсолютному нулю ($p_2 = 0$). В связи с этим высота столба в измерительной трубке пропорциональна абсолютному давлению p_1.

Высота подъема столба подсчитывается по формуле (V—1).

Преобразователи такого типа чаще всего используют в барометрах (измерителях атмосферного давления), однако верхний предел измерений может быть расширен при увеличении длины измерительной трубки.

Поплавковые преобразователи. Поплавковый преобразователь (рис. V—2, *д*) представляет собой разновидность чашечного преобразователя. В отличие от других преобразователей измерительным элементом в нем является не трубка, а резервуар. Трубка выполняет функцию уравновешивающего элемента.

Выходная величина — перемещение поплавка, находящегося в резервуаре. При соответствующем выборе размеров можно получить необходимую подъемную силу поплавка для перемещения стрелки измерительного прибора или приведения в действие электрического или пневматического преобразователя.

Функция преобразователя может быть найдена из совместного решения уравнений (V—1), (V—3) и (V—4):

$$h_р = \frac{\Delta p^2}{g(\rho - \rho_с)\left(1 + \frac{d_т^2}{d_р^2}\right)}. \qquad (V—6)$$

Здесь принято, что изменение уровня $h_р$ равно перемещению поплавка. При переменном нагружении поплавка, например на пружину, в формуле (V—6) должна быть введена поправка на изменение погружения поплавка.

Общие требования и методические погрешности. При выборе рабочей жидкости следует учитывать, что ее плотность должна быть выше, чем плотность измеряемой среды. Должна отсутствовать их взаимная растворимость. Давление кипения рабочей жидкости

при заданной окружающей температуре должно быть ниже нижнего предела измеряемого давления.

Источниками методических погрешностей при использовании жидкостных преобразователей являются:

отклонение трубок от вертикального или заданного наклонного положения;

подстановки в формулы (V—1), (V—2), (V—6) значений ρ без учета изменений в зависимости от температуры;

температурные изменения длины шкалы, по которой отсчитывается разность уровней;

отклонения значения ускорения свободного падения от номинального значения ($g_н$=9,8066 м·с$^{-2}$); фактическое значение ускорения можно рассчитать по формуле

$$g = g_н(1 - 2{,}6\cdot10^{-3}\cos 2\varphi - 2\cdot10^{-7}H),$$

где φ — географическая широта; H — высота над уровнем моря, м.

Имеются и другие источники погрешностей, которые, как правило, не играют существенной роли.

V.2.2.2. Деформационные преобразователи

Деформационные преобразователи строятся на основе упругих чувствительных элементов, с помощью которых давление преобразовывается в механическое перемещение.

Основные характеристики упругих элементов. Следующие величины характеризуют свойства чувствительных элементов.

Перемещение заданной точки упругого элемента как функция разности действующих давлений:

$$x = f(p_1 - p_2). \qquad (V—7)$$

Это выражение является функцией преобразования (статической характеристикой) упругого элемента.

Жесткость упругого элемента относительно результирующей силы P в заданной точке приложения:

$$K_с = P/x.$$

Жесткость упругого элемента относительно разности давлений:

$$K_д = (p_1 - p_2)/x.$$

Чувствительности упругого элемента относительно силы и разности давлений являются величинами, обратными соответствующим жесткостям:

$$S_с = 1/K_с = x/P;$$
$$S_д = 1/K_д = x/(p_1 - p_2).$$

Эффективная площадь упругого элемента

$$F_{эф} = K_с/K_д.$$

Используя понятие эффективной площади, функцию преобразования (V—7) можно записать в виде

$$x = (p_1 - p_2)F_{эф}/K_с.$$

Гистерезис упругого элемента характеризует неоднозначность функции преобразования при нагружении и разгружении. Может выражаться в абсолютных или относительных величинах.

Абсолютное значение (гистерезис) находится как разность

$$\Gamma = x_+ - x_-,$$

где x_+ и x_- — значения перемещения упругого элемента при прямом и обратном ходах при одном и том же давлении.

Относительный гистерезис находят из выражения

$$\gamma = \frac{x_+ - x_-}{x_+}\cdot 100\%.$$

Иногда пользуются приведенным значением относительного гистерезиса, относя его максимальное абсолютное значение к максимальному значению перемещения:

$$\gamma_{пр} = \frac{\Gamma_{max}}{x_{max}}\cdot 100\%.$$

Схемы упругих элементов. В преобразователях давления применяют следующие основные типы упругих чувствительных элементов: мембраны и мембранные коробки; сильфоны; пружины Бурдона. Схемы основных упругих чувствительных элементов представлены на рис. V—3.

Плоская мембрана (рис. V—3, *а*) имеет относительно высокую жесткость, малую чувствительность и небольшое допускаемое перемещение. В связи с этим плоские мембраны сравнительно редко используют в механических преобразователях статического давления. Вместе с тем их часто применяют в электрических преобразователях быстроменяющихся давлений (тензометрических, емкостных и др.). Этому способствуют их частотные характеристики, позволяющие передавать сигналы с частотами порядка единиц и даже десятков килогерц.

Функция преобразования плоской мембраны при значительных перемещениях нелинейна, что необходимо учитывать при градуировке.

Гофрированная мембрана (рис. V—3, *б*) имеет несколько концентрических гофров синусоидаль-

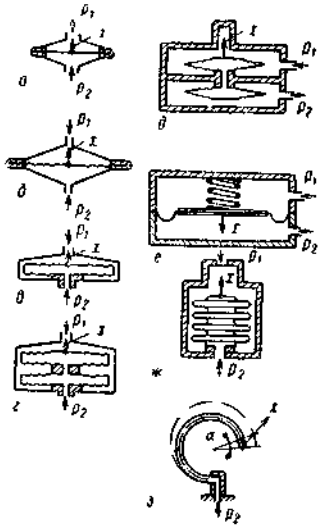


Рис. V—3. Упругие чувствительные элементы:

а — плоская мембрана; *б* — гофрированная мембрана; *в* — гофрированная мембранная коробка; *г* — мембранный блок; *д* — блок складывающихся мембран; *е* — вялая мембрана с пружиной; *ж* — сильфон; *з* — трубка Бурдона

ной, трапецендальной или пилообразной формы. Гофры уменьшают жесткость мембраны, спрямляют ее характеристику и увеличивают допустимый прогиб.

Мембранная коробка (рис. V—3, *в*) состоит из двух спаянных или сваренных гофрированных мембран. Характеристика мембранной коробки еще более благоприятна, чем отдельной мембраны.

Мембранный блок (рис. V—3, *г*) состоит из двух или нескольких последовательно и жестко соединенных между собой мембранных коробок. Блоки позволяют существенно увеличить чувствительность с сохранением прочности. Разновидностью является блок складывающихся мембран (рис. V—3, *д*), внутренняя полость которого заполняется жидкостью. При изменении давления жидкость перетекает из одной мембранной коробки в другую вплоть до полного складывания одной из коробок. Такая конструкция обеспечивает сохранность чувствительного элемента при перепадах давления, значительно превосходящих верхние пределы измерений.

Вялая мембрана с пружиной (рис. V—3, *е*) обычно изготовляется из резины или прорезиненной ткани. Она позволяет получить значительное перемещение при сравнительно небольших размерах. Обычно мембрана имеет формированный гофр, в результате чего эффективная площадь изменяется незначительно от перемещения.

Сильфон (рис. V—3, *ж*) представляет собой металлическую трубку с глубокими поперечными гофрами. Обладает стабильной эффективной площадью и достаточно высокой чувствительностью. Линейность характеристики имеет место при небольших перемещениях.

Трубка Бурдона (рис. V—3, *з*)— наиболее распространенный упругий элемент. Представляет собой изогнутую по дуге окружности трубку эллиптического или плоскоовального сечения. При изменении разности давлений внутри и вне трубки ее конец совершает поступательное движение и изменяет центральный угол α.

Все рассмотренные типы упругих элементов могут использоваться в преобразователях абсолютного, избыточного и вакуумметрического давления.

Для измерения абсолютного давления одну из полостей откачивают до достаточно глубокого вакуума и надежно герметизируют.

При измерениях избыточного или вакуумметрического давления одну из полостей сообщают с атмосферой ($p=p_{ат}$).

V.2.3. КОСВЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Косвенные методы первичного преобразования применяют главным образом для измерения абсолютных давлений газов ниже атмосферного. Все эти методы основаны на изменении физических свойств газа в зависимости от давления. Известны тепловые, ионизационные, магнитные и другие методы [44]. Из названных в холодильной технике нашли применение тепловые преобразователи: термоэлектрические (термопарные) и преобразователи сопротивления.

Рассмотрим принцип действия термоэлектрического преобразователя. В колбе *1* (рис. V—4) размещаются электрический нагреватель *2* и термопара *3*. Через штуцер *4* колба сообщается с сосудом, в котором измеряют давление. Спай термопары прикреплен

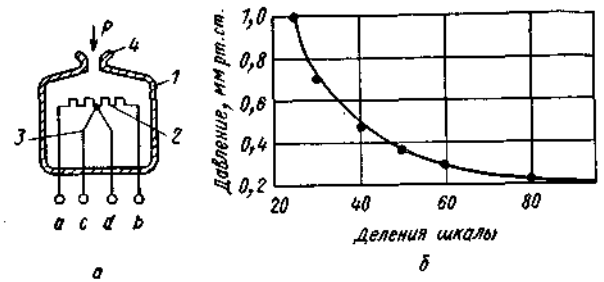


Рис. V—4. Термоэлектрический тепловой преобразователь:
а — схема: *1* — колба; *2* — нагреватель; *3* — термопара; *4* — штуцер; *б* — градуировочная характеристика

к нагревателю. Нагреватель и термопара присоединяются к внешним цепям через герметичные выводы.

Действие преобразователя основано на изменении теплоотдачи от нагревателя к газу и, следовательно, его температуры. Преобразователь подвергается градуировке, при этом выходной величиной могут быть температура (термо-ЭДС) либо величина питающего тока. Последний способ более распространен. Изменяя питающий ток, получают заданное значение термо-ЭДС. По величине тока судят об измеряемом давлении.

Градуировочная характеристика термопарного преобразователя показана на рис. V—4, *б*. Как видно, характеристика существенно нелинейна. Показания теплового преобразователя зависят от заполняющего колбу газа. Градуировку обычно выполняют при заполнении азотом или воздухом. При использовании других газов вводят поправочный коэффициент, который может быть меньше либо больше единицы.

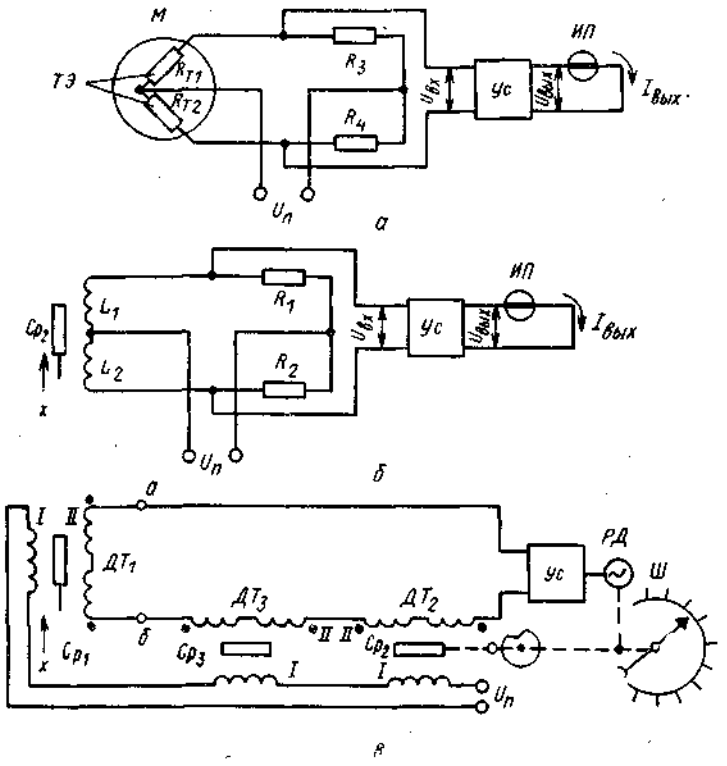
Тепловые преобразователи обладают невысокой точностью: погрешность измерений может достигать 10—20%.

V.3. ПЕРЕДАЮЩИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ

Передающие преобразователи давления воспринимают перемещение чувствительного элемента и преобразуют его в выходной сигнал, который управляет работой последующих устройств: вторичного прибора, входных цепей ЭВМ и др. Наибольшее распространение имеют электрические вторичные приборы и системы, в связи с чем ниже рассматриваются передающие преобразователи с электрическим выходом.

В зависимости от числа элементов, входящих в преобразователи, они бывают простыми (одноступенчатыми) и сложными (с несколькими ступенями преобразователя). Ступени преобразования образуются собственно элементами, преобразующими перемещение в электрический сигнал, а также усилителями, элементами компенсации, источниками тока и напряжения и др.

В зависимости от вида выходного электрического сигнала преобразователи делятся на параметрические и генераторные, или энергетические.



К параметрическим относят преобразователи, выходными величинами которых являются изменения сопротивления, емкости, индуктивности, взаимной индуктивности.

К генераторным, или энергетическим, относят преобразователи, выходные сигналы которых представляют собой изменения величин тока или напряжения.

Поскольку электрические параметры не могут быть использованы непосредственно для получения отсчетной информации, параметрические устройства могут рассматриваться лишь как элементы сложных преобразователей, содержащих кроме них преобразователи генераторного типа.

Ниже рассмотрены наиболее распространенные типы передающих преобразователей. Во всех случаях входной величиной является перемещение чувствительного элемента.

V.3.1. ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Тензометрические преобразователи работают с упругими чувствительными элементами, характеризуемыми малыми перемещениями, например с плоскими мембранами, изгибающимися балочками и т. п.

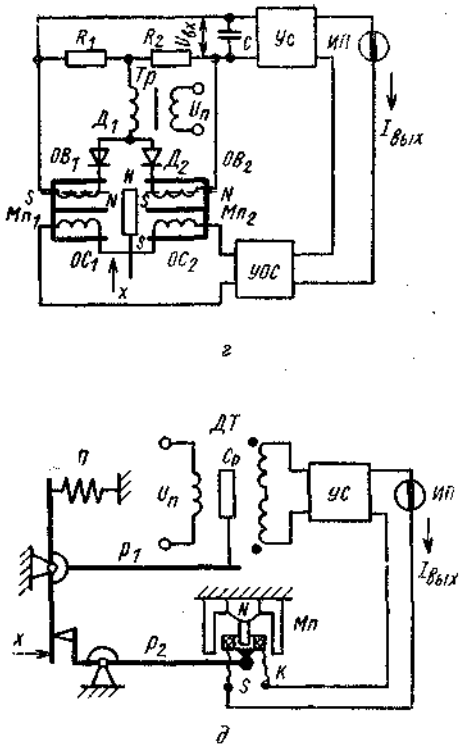


Рис. V—5. Передающие преобразователи (упрощенные схемы):

а — тензометрический; *б* — индукционный; *в* — дифференциально-трансформаторный; *г* — с компенсацией магнитных потоков; *д* — с электросиловой компенсацией; *М* — мембрана; *ТЭ* — тензоэлементы; *Ус* — усилитель; *ИП* — измерительный прибор; *С* — сердечник; *ДТ* — дифференциальный трансформатор; *РД* — реверсивный двигатель; *ОВ* и *ОС* — обмотки возбуждения и обратной связи; *Д* — диод; *УОС* — устройство обратной связи; *Мп* — магнитопровод; *Тр* — трансформатор; *Р* — рычаг; *П* — пружина; *К* — катушка

Тензометрические элементы воспринимают сжатие или растяжение упругого элемента и преобразуют его в изменения электрического сопротивления. В настоящее время получили распространение тензорезистивные элементы на базе твердотельных структур [51]. В частности, выпускаются тензопреобразователи из монокристаллического сапфира с кремниевыми тензорезисторами. Кристаллический элемент плотно сопрягается с металлической мембраной.

Встречаются также тензометрические преобразователи без металлических мембран. Чувствительным упругим элементом является кремниевая мембрана с монокристаллической структурой. Тензоэлементы нанесены на мембрану методом диффузии. Такая технология позволяет получить практически линейную характеристику с весьма малым гистерезисом (порядка 0,01%).

Упрощенная схема одного из вариантов тензометрического преобразователя показана на рис. V—5, *а*. С мембраной *М*, воспринимающей измеряемое давление, взаимодействуют тензоэлементы *ТЭ*. В данном случае это два тензорезистора с сопротивлениями R_{T1} и R_{T2}. Вместе с резисторами R_3 и R_4 они образуют мост, к одной из диагоналей которого приложено питающее напряжение $U_п$, а с другой снимается напряжение разбаланса $U_{вх}$. Усилитель повышает мощность входного сигнала, и на выходе имеют место ток

$I_{вых}$ и напряжение $U_{вых}$. Величины выходных тока и напряжения могут быть произвольными либо стандартизованными (например, 0—5 мА, 0—10 В и т. д.). Выходной сигнал управляет работой измерительного прибора *ИП*, который может быть отградуирован непосредственно в единицах давления.

Возможными источниками погрешностей преобразования являются температурная и временная нестабильность функции преобразования.

V.3.2. ИНДУКТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Схема индуктивного преобразователя приведена на рис. V—5, *б*. Перемещение x чувствительного элемента передается ферромагнитному сердечнику *Ср*, находящемуся в магнитном поле катушек L_1 и L_2. Последние вместе с резисторами R_1 и R_2 образуют четырехплечий мост, к одной из диагоналей которого приложено переменное питающее напряжение $U_п$, а с другой снимается напряжение разбаланса $U_{вх}$.

При среднем положении сердечника индуктивности L_1 и L_2 одинаковы, и при равенстве R_1 и R_2 мост находится в равновесии ($U_{вх}=0$). Если сердечник перемещается вверх, это приводит к увеличению L_1 и уменьшению L_2. В измерительной диагонали моста появляется напряжение $U_{вх}$, которое подается на вход усилителя *Ус*. На его выходе включен измерительный прибор *ИП*, через который проходит ток $I_{вых}$ при напряжении $U_{вых}$. Если сердечник переместится вниз, то на измерительной диагонали окажется напряжение противоположной фазы. Для расшифровки усилитель должен быть фазочувствительным, т. е. реагировать не только на величину, но и на фазу входного напряжения.

Параметры выходного сигнала, как и в случае использования тензометрического моста, могут быть произвольными либо стандартизованными, постоянного или переменного тока.

Обе рассмотренные схемы обладают общим недостатком: их точность зависит от стабильности питающего напряжения. Этот недостаток можно избежать, если применить компенсационные схемы. Такие схемы применительно к термопреобразователям сопротивления рассматривались в главе IV. В тензорезистивных и индуктивных преобразователях давления такие компенсационные схемы встречаются редко.

V.3.3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Как и в предыдущем случае, движение чувствительного элемента x передается ферромагнитному сердечнику $Ср_1$, который находится в поле, создаваемом первичной обмоткой *I* дифференциального трансформатора $ДТ_1$ (рис. V—5, *в*). На ту же катушку наносят две вторичные обмотки *II*, соединенные встречно (условно направление намотки показано точками). Если сердечник располагается симметрично относительно вторичных обмоток, то наводимые на них ЭДС равны по величине и противоположны по фазе. В результате на выводах *а* и *б* трансформатора напряжение равно нулю. При смещении сердечника равенство ЭДС нарушается и на выводах появляется результирующее напряжение, величина которого зависит от смещения, а фаза — от его направления. В ограниченном диапазоне перемещений x характеристика такого преобразователя практически линейна.

Дифференциально-трансформаторный преобразователь может работать как в схеме прямого усиления, так и в схеме компенсационного типа, которая изображена на рис. V—5, *в*. Кроме основного преобразователя $ДТ_1$ в схему входят трансформаторы: $ДТ_2$, выполняющий роль элемента обратной связи, и $ДТ_3$, служащий для подстройки системы. Питающее напряжение $U_п$ приложено к последовательно соединенным первичным обмоткам всех трех трансформаторов.

Вторичные обмотки трансформаторов также соединены последовательно. Ко входу фазочувствительного усилителя *Ус* приложено результирующее напряжение от этих обмоток.

Сердечник $Ср_2$ трансформатора $ДТ_2$ перемещается реверсивным двигателем *РД*, управляемым выходными сигналами усилителя. Сердечник $Ср_3$ трансформатора $ДТ_3$ перемещается вручную при настройке. Пользуясь им, компенсируют напряжение на выводах *а* и *б* при начальном (нулевом) положении чувствительного элемента ($x=0$). Стрелка при этом находится на нулевой отметке шкалы *Ш*. При отклонении x от нуля в цепи появляется нескомпенсированное напряжение, воздействующее на вход усилителя. В результате на выходе усилителя появляется напряжение соответствующей фазы, приводящее реверсивный двигатель *РД* во вращение в заданном направлении. Через механическую передачу движение передается сердечнику трансформатора $ДТ_2$. На его вторичной обмотке появляется напряжение, фаза которого противоположна фазе суммарного напряжения трансформаторов $ДТ_1$ и $ДТ_3$. В момент, когда сумма напряжений в цепи станет равной нулю, $\left(U_{ДТ_1}+U_{ДТ_3}=U_{ДТ_2}\right)$, двигатель останавливается и система приходит в равновесное состояние. Стрелка, механически связанная с сердечником $Ср_2$, указывает на шкале *Ш* величину перемещения x либо соответствующее ему давление.

Преимущество компенсационной системы с дифференциально-трансформаторными преобразователями состоит в том, что питающее напряжение и длина соединительных проводов практически не влияют на точность преобразования, а лишь меняют чувствительность системы. Вместе с тем применение такой системы связано с достаточно сложными электромеханическими устройствами, что снижает общие точностные показатели. Преобразователи такого типа обеспечивают основную приведенную погрешность порядка $\pm(1\div2)$%.

V.3.4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С МАГНИТНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Движение x чувствительного элемента первичного преобразователя передается в данном случае сердечнику *С* (рис. V—5, *г*), который является постоянным магнитом *NS*. Сердечник находится в поле электромагнита, собранного на магнитопроводах $Мп_1$ и $Мп_2$. На средних стержнях магнитопроводов находятся обмотки возбуждения $ОВ_1$ и $ОВ_2$ и обмотки обратной связи $ОС_1$ и $ОС_2$.

Обмотка возбуждения вместе с резисторами R_1 и R_2 и диодами $Д_1$ и $Д_2$ образует четырехплечий мост, питание которого осуществляется напряжением $U_п$ через трансформатор *Тр*. Вследствие

выпрямления тока диодами через обмотки возбуждения протекают однополярные импульсы. При этом средние стержни намагничиваются в одном направлении, например, как показано на схеме (*SN* — слева направо). При симметричном расположении сердечника относительно магнитопроводов его магнитный поток замыкается через боковые стержни магнитопроводов и практически не оказывает влияния на индукцию в средних стержнях. Вследствие симметрии моста в измерительной диагонали напряжение $U_{вх}$ равно нулю. Равен нулю и ток $I_{вых}$ на выходе усилителя *Ус*. При смещении сердечника относительно положения симметрии магнитные потоки перераспределяются. Если, например, сердечник переместился вверх, то в средних сердечниках возникают потоки разбаланса, причем в магнитопроводе Mn_1 этот поток складывается с потоком обмотки возбуждения, а в Mn_2 вычитается. Из-за этого средний стержень магнитопровода Mn_1 переходит в состояние насыщения, вследствие чего индуктивность уменьшается, а ток через его обмотку увеличивается. Баланс моста нарушается, и на выходе усилителя появляется постоянное напряжение $U_{вх}$ (переменная составляющая шунтируется конденсатором *C*). Этот сигнал усиливается в усилителе *Ус* и в виде постоянного тока $I_{вых}$ проходит через измерительный прибор *ИП* и устройство обратной связи *УОС*. Последнее формирует ток, подаваемый в обмотки обратной связи OC_1 и OC_2. Потоки, создаваемые этими обмотками, действуют так, что компенсируют возникшее отклонение от равновесного состояния. Ток $I_{вых}$ растет до тех пор, пока в системе не наступит равновесие. Этот ток является выходной величиной преобразователя. Измерительный прибор может быть отградуирован непосредственно в единицах давления.

Передающие преобразователи с магнитной компенсацией позволяют измерять давление с приведенными погрешностями порядка 1—1,5%.

V.3.5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ЭЛЕКТРОСИЛОВОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

В преобразователях этого типа перемещение *x* чувствительного элемента передается на рычаг P_1 (рис. V—5, *д*), одно из плеч которого соединено с пружиной *П*, а другое — с сердечником *C* дифференциального трансформатора. Его первичная обмотка питается напряжением $U_п$, а соединенные встречно вторичные обмотки присоединены ко входу усилителя *Ус*. Выходная цепь усилителя включает в себя измерительный прибор *ИП* и подвижную катушку электромагнита *K*. Последняя может перемещаться внутри магнитопровода *Mn*, центральный стержень которого представляет собой постоянный магнит *NS*. Постоянный ток $I_{вых}$ создает поле катушки, взаимодействующее с полем магнита *NS*. В зависимости от величины тока меняется усилие, с которым катушка втягивается в магнитопровод. Механически катушка связана с рычагом P_2, передающим усилие на плечо рычага P_1.

Преобразователь действует следующим образом. При изменении *x*, например при увеличении, рычаг P_1 поворачивается вокруг оси и поднимает сердечник *Ср*. Напряжение на выходе дифференциального трансформатора увеличивается. Это приводит к увеличению тока $I_{вых}$ и к увеличению усилия, развиваемого катушкой *K*.

Система уравновешивается при некотором значении тока $I_{вых}$, который является мерой входной величины *x* и от которого работает измерительный прибор *ИП*.

Функция преобразования рассмотренного устройства линейная. В некоторых случаях, когда требуется квадратичная функция преобразования, вместо магнитоэлектрического силового элемента обратной связи используют электромагнитный элемент, в котором вместо постоянного магнита используется электромагнит, а якорем является стальной цилиндр, перемещающийся под действием поля.

Преобразователи данного типа могут обеспечить погрешность порядка $\pm(0{,}6 \div 1)\%$ от диапазона измерений.

V.4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ

V.4.1. ОТБОР СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Данная задача возникает при измерениях статического давления в трубопроводах, в которых рабочая среда движется с определенной скоростью.

Методическая погрешность измерения возникает из-за передачи к измерительному прибору не только статического давления, но и части скоростного напора. В результате прибор указывает давление $p_м$, несколько большее, чем статическое $p_{ст}$, т. е. возникает погрешность: $\Delta p_{ст} = p_м - p_{ст}$.

В относительной форме она может быть выражена так: $\delta_{ст} = \Delta p_{ст}/p_{ст}$.

Источниками возникновения погрешностей отбора статического давления являются: большой диаметр отборного отверстия, качество выполнения отборного отверстия, кривизна потока.

При этом величины погрешностей зависят от скорости потока. По данным [12], при умеренных скоростях $[w = (0{,}2 \div 0{,}4)M]$ каждый из источников погрешностей может вызвать ошибку до $\pm(0{,}5 \div 1)\%$. Наилучшие результаты получают при диаметрах отборного отверстия от 0,5 до 1,5 мм. Диаметры меньше 0,5 мм часто засоряются и не обеспечивают надежной работы. При диаметрах больше 1,5 мм погрешности могут превышать 1%.

Отборное отверстие должно выполняться с острыми кромками. Угол между осью отверстия и образующей трубопровода или касательной к нему должен лежать в пределах от 60 до 90°. Несоблюдение этих требований также приводит к погрешностям до 1%. Наилучшие результаты получают при отборе давления на прямых участках трубопроводов.

V.4.2. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ, БЛИЗКИХ К АТМОСФЕРНОМУ

Измерения давлений, близких к атмосферному, встречаются при определении давления кипения холодильного агента, а также при измерениях напора в вентиляционных установках.

Особенность этих измерений состоит в том, что для приборов избыточного давления измеряемые давления лежат в начале шкалы, т. е. в области повышенных погрешностей. Кроме того, на результаты могут оказать влияние изменения атмосферного давления.

Инструментальную погрешность измерения давления p можно рассчитать по формуле

$$\delta_{ин} = (p_{max}/p)\delta_{пр}, \qquad (V-8)$$

где p_{max} — верхний предел измерений; $\delta_{пр}$ — приведенная относительная погрешность, численно равная классу точности прибора. (Здесь имеется в виду, что $p_{min}=0$.)

Из формулы (V—8) видно, что погрешность растет пропорционально отношению p_{max}/p. Поэтому целесообразно значение p_{max} приближать к измеряемой величине p, т. е. снижать верхний предел шкалы прибора. Это возможно только в тех случаях, когда давление, в том числе и при стоянке установки, не превышает допустимой перегрузки прибора.

Так, для большинства пружинных манометров допускаемая перегрузка составляет 25% от верхнего предела измерения, т. е. предельно допустимое давление в испытуемой установке не должно превышать $p_д \leqslant 1{,}25p_{max}$. Задавшись предельным давлением можно определить p_{max}, т. е. ближайший больший верхний предел измерений. Подставляя его в формулу (V—8), находим ожидаемую инструментальную погрешность.

Пример 1. Необходимо измерить давление $p=0{,}1$ МПа, предельное давление в установке 0,5 МПа. Ближайший больший верхний предел измерений составляет 0,6 МПа. Принимаем манометр класса 0,4.

По формуле (V—8) получаем $\delta = \pm(0{,}6/0{,}1)\cdot 0{,}4\% = \pm 2{,}4\%$.

Учитывая, что некоторые преобразователи разности давлений (дифманометры) допускают перегрузки, значительно превышающие измеряемую разность (см., например, преобразователи «Сапфир»), их применение может значительно уменьшить погрешность измерений.

Пример 2. Условия те же, что и в предыдущем примере. Однако высокие допустимые перегрузки прибора позволяют принять более низкое значение верхнего предела $p_{max}=0{,}16$ МПа. Тогда при том же классе точности имеем $\delta = \pm(0{,}16/0{,}1)\cdot 0{,}4\% = 0{,}64\%$.

При измерениях с помощью приборов избыточного давления в необходимых случаях следует делать поправку на изменения атмосферного давления. В предварительных расчетах рекомендуется принимать за максимальное отклонение атмосферного давления величину ±0,005 МПа.

Все изложенное относится как к избыточному давлению, так и к разрежению (вакуумметрическому давлению). В последнем случае применяют вакуумметры, мановакуумметры и дифманометры.

В тех случаях, когда с помощью приборов избыточного давления измеряют абсолютное давление среды: $p_а = p_и + p_{атм}$, относительную инструментальную погрешность следует вычислять по формуле

$$\delta_{ин} = \Delta p_{ин}/(p_и + p_{атм}), \qquad (V-9)$$

где $\Delta p_{ин}$ — абсолютная допустимая погрешность прибора.

$$\Delta p_{и.i} = \delta_{пр} p_{max}. \qquad (V-10)$$

Нетрудно видеть, что относительная погрешность измерения абсолютного давления несколько уменьшается при прочих равных условиях.

Пример 3. Как и в последнем примере, $p_{max}=0{,}16$ МПа. Примем атмосферное давление $p_{атм}=0{,}1$ МПа. Тогда при избыточном давлении 0,1 МПа абсолютное давление составит 0,2 МПа.

По формулам (V—9) и (V—10) находим

$$\delta_{ин} = (p_{max}/p_а)\delta_{пр} = 0{,}16/0{,}2\cdot 0{,}4\% = 0{,}32\%.$$

Большие удобства представляют преобразователи абсолютного давления. При соответствующем подборе пределов измерений они позволяют измерять давления ниже и выше атмосферного, не требуя при этом учета атмосферного давления.

Для измерения напора в вентиляционных системах, значения которого лежат в пределах от 0,1 до 40 кПа (10—4000 мм вод. ст.), служат специальные приборы — напоромеры и соответствующие преобразователи.

При измерениях напора изменения атмосферного давления могут не учитываться, если напор исчисляется по отношению к этому давлению.

V.4.3. ИЗМЕРЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ АБСОЛЮТНЫХ ДАВЛЕНИЙ 0,06 — 13 кПа (0,5 — 100 мм рт. ст.)

Этот диапазон давлений широко используется при осушке и проверке герметичности холодильного оборудования. Измерения в данном диапазоне связаны с рядом особенностей. Так, при контроле осушки и герметичности не столь важно точно измерить абсолютное давление, сколько важно произвести измерения с чувствительностью и стабильностью порядка 1—3 мм рт. ст., а в некоторых случаях — более высокими.

Существует ряд методов и средств измерения давления в данном диапазоне.

V.4.3.1. Измерения с помощью вакуумметров

Вакуумметры и вакуумметрические преобразователи имеют диапазоны измерения от —1 до 0 кгс/см², или от —0,1 до 0 МПа. Этот диапазон не охватывает всей области давлений: в первом случае остается неохваченным отрезок от 0 (абс.) до 0,033 кгс/см² (0—24,4 мм рт. ст.), во втором случае — от 0 (абс.) до 0,0013 МПа (0—10 мм рт. ст.). В этой связи соответственно ограничиваются пределы измерений: от 24,4 мм рт. ст. при градуировке в кгс/см², от 10 мм рт. ст. при градуировке в МПа.

При использовании образцовых вакуумметров классов 0,16 и и 0,25, имеющих 300 делений, чувствительность составляет 0,002 кгс/см² на 1 деление (1,47 мм рт. ст. на 1 деление), или 0,0002 МПа на 1 деление (1,5 мм рт. ст. на 1 деление). Аналогичные приборы класса 0,4 имеют чувствительность 0,005 кгс/см² на 1 деление (3,67 мм рт. ст. на 1 деление), или 0,005 МПа на 1 деление (3,75 мм рт. ст. на 1 деление).

Для измерений с вакуумметрами необходимо достаточно точно измерять атмосферное давление с помощью барометров.

V.4.3.2. Измерения жидкостными преобразователями

Могут применяться жидкостные приборы двух видов: U-образные дифманометры и чашечные манометры абсолютного давления. Те и другие заполняют ртутью.

Преобразователи этого типа обеспечивают измерения во всем требуемом диапазоне. При хорошем качестве ртути и трубок погрешность измерения можно довести до $\pm(1\div1{,}5)$ мм рт. ст. При использовании дифманометра плюсовую трубку сообщают с атмосферой. Должна вводиться поправка на изменения атмосферного давления по показаниям барометра. Применение жидкостных приборов ограничено в связи с общей тенденцией уменьшения использования ртутных приборов.

V.4.3.3. Измерения манометрами с электрическими передающими преобразователями

Могут применяться дифманометры и манометры абсолютного давления с электрическими выходными сигналами. Дифманометры (мембранные или сильфонные) с электрическим выходом с верхним пределом измерения разности давлений 0,16 МПа (1,6 кгс/см^2) обеспечивают измерение во всем заданном диапазоне давлений. Как и в предыдущем случае, плюсовая полость дифманометра сообщается с атмосферой, а минусовая — с испытуемым объектом. Для учета изменений атмосферного давления необходим барометр.

Дифманометры с дифференциально-трансформаторными, магнитокомпенсационными и электросиловыми преобразователями классов точности 1,0 и 1,5 имеют допустимую абсолютную погрешность соответственно ±12 и ±18 мм рт. ст. и в связи с этим не могут рекомендоваться для решения поставленной задачи. Чувствительность и стабильность порядка 2—3 мм рт. ст. можно получить, используя тензометрические преобразователи разности давлений «Сапфир-22ДД» класса точности 0,25 с верхним пределом измерений 0,16 МПа.

Более удобны для решения данной задачи манометры абсолютного давления, например манометры МАС-Э3 с электросиловым преобразователем. Измерение абсолютного давления от 0,06 до 13 кПа можно осуществить манометром этого типа с верхним пределом измерения 16 кПа (120 мм рт. ст.). При классе точности 0,1 абсолютная погрешность не превышает $\pm1{,}2$ мм рт. ст.

Еще более высокую точность можно получить, используя высокочувствительный преобразователь абсолютного давления «Сапфир-22ДА», имеющий класс точности 0,25. При том же верхнем пределе 16 кПа допустимая абсолютная погрешность составляет $\pm0{,}3$ мм рт. ст.

V.4.3.4. Измерения тепловыми вакуумметрами

Тепловые вакуумметры отличаются сравнительно узким диапазоном измерений при невысоких метрологических характеристиках. Так, вакуумметр термопарный 13-ВТ3-003 в диапазоне с верхним пределом измерения 3 кПа (22,5 мм рт. ст.) имеет допустимую погрешность от —40 до +60%, или абсолютное значение погрешности достигает 1,8 кПа (13,5 мм рт. ст.). Высокая погрешность не позволяет измерять давление с необходимой точностью, однако при точном поддержании тока, питающего нагреватель, можно обеспечить достаточно высокую стабильность показаний, что позволяет следить за изменениями давления в испытуемом объекте.

V.4.4. ИЗМЕРЕНИЕ РАЗНОСТЕЙ ДАВЛЕНИЙ

Измерения разностей давлений осуществляют с помощью двух манометров или двух преобразователей либо с помощью одного разностного прибора — дифманометра. Метод двух манометров можно рекомендовать только при измерениях значительных разностей.

Результат измерений можно представить в виде

$$\Delta p_{изм} = p_{изм_1} - p_{изм_2} = (p_1 \pm \Delta p_{м_1}) - (p_2 \pm \Delta p_{м_2}), \quad (V—11)$$

где $p_{изм_1}$ и $p_{изм_2}$ — показания манометров; p_1 и p_2 — действительные значения давлений; $\Delta p_{м_1}$ и $\Delta p_{м_2}$ — абсолютные погрешности измерений двух давлений.

Если обозначить $\Delta p = p_1 - p_2$ и принять $\Delta p_{м_1} = \Delta p_{м_2} = \Delta p_м$ и если граничную суммарную погрешность определить, например, как сумму погрешностей манометров, то из выражения (V—11) следует: $\Delta p = \Delta p_{изм} \pm 2\Delta p_м$.

При малых Δp величина $2\Delta p_м$ может значительно искажать результат измерения. Задаваясь относительной погрешностью

$$\delta = \pm 2\Delta p_м / \Delta p \quad (V—12)$$

и зная погрешность $\Delta p_м$, определяют минимальное значение Δp, измеряемое данными манометрами с заданной точностью.

Пример 1. Найти минимальную разность давлений, которую можно измерить двумя манометрами класса 0,6 с относительной погрешностью 0,03 (3%). Манометры имеют верхний предел 1 МПа.

Допускаемая абсолютная погрешность манометра будет $\Delta p_м = \pm1 \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-2} = \pm0{,}6 \cdot 10^{-2}$ МПа. По формуле (V—12) находим минимальную разность

$$\Delta p_{min} = 2\Delta p_м / \delta = 2 \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-2} / (3 \cdot 10^{-2}) = 0{,}4 \text{МПа}.$$

Пример 2. Обратная задача: какова относительная погрешность измерения разности давлений $\Delta p = 0{,}05$ МПа, если манометры класса 0,6 имеют верхний предел измерения 1 МПа? Решение по формуле (V—12):

$$\delta = \pm 2 \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-2} / (5 \cdot 10^{-2}) = \pm\, 0{,}24 (\pm 24\%).$$

Примеры иллюстрируют то, что метод двух манометров имеет ограниченное применение.

Применение дифманометра значительно упрощает задачу. Этот случай сводится к прямому измерению разности давлений, точность которого зависит от выбранного верхнего предела измерений и погрешности дифманометра.

V.4.5. ПОГРЕШНОСТЬ ОТ РАЗНОСТИ ВЫСОТ ОТБОРА И ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

В некоторых случаях, когда место отбора давления жидкости расположено заметно выше, чем измерительный прибор или преобразователь, возникает методическая погрешность в результате дей-

ствия гидростатического столба. Аналогичное явление может встречаться и при измерении давления пара холодильного агента, если измерительные трубки и прибор имеют температуру ниже, чем температура конденсации холодильного агента.

Давление гидростатического столба $p_{гс} = hg\rho$, где $p_{гс}$ — гидростатическое давление, Па; ρ — плотность жидкости, кг·м$^{-3}$; g — ускорение свободного падения, м·с$^{-2}$; h — высота столба, м.

Поправка на разность высот и конденсацию должна вводиться с учетом диапазона измеряемых давлений и требований, предъявляемых к точности измерений. При этом величину h следует считать от самой высокой точки линии подвода (необязательно от точки отбора давления).

Помехи измерениям могут возникнуть, если температура окружающей среды равна равновесной или если давление изменяется, переходя через равновесные значения. В этом случае в измерительной линии и в полости прибора может происходить подкипание. Выход пузырей пара сопровождается импульсами давления, которые вызывают дрожание стрелки манометра или всплески на диаграмме.

Устранить указанные явления можно, если точка отбора давления будет расположена ниже места установки прибора и если линии подвода не будут иметь глубоких петель. При значительном удалении прибора от точки отбора линию целесообразно прокладывать с уклоном в сторону точки отбора, с тем чтобы сконденсировавшаяся жидкость самотеком уходила из линии подвода.

V.5. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ О СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ

Средства измерения давления и разности давлений подразделяются на приборы прямого отсчета, измерительные преобразователи (бесшкальные приборы) и вторичные приборы.

К приборам прямого отсчета относят средства измерений, включающие в себя чувствительный элемент, механическую передачу и шкалу с указателем (в некоторых случаях механическая передача отсутствует). Такие приборы, как правило, выпускаются в виде единого изделия.

К измерительным преобразователям (бесшкальным приборам) относят средства измерений, включающие в себя чувствительные элементы, механические передающие устройства и элементы преобразования в соответствующую выходную величину.

В данном пособии рассматриваются преобразователи с электрическим выходным сигналом. Первичные преобразователи в большинстве случаев шкал не имеют и требуют дополнительно присоединять к ним вторичные приборы.

Вторичные приборы представляют собой средства измерений, работающие в комплекте с измерительными преобразователями и предназначенные для восприятия электрического сигнала и преобразования его в положение указателя шкалы.

Ниже приведены сведения о средствах измерения давления и разности давлений, которые находят или могут найти применение в холодильной технике.

V.5.1. ПРИБОРЫ ПРЯМОГО ОТСЧЕТА

Приборы прямого отсчета подразделяются на жидкостные и с упругими элементами.

К жидкостным приборам относят U-образные и чашечные дифманометры, манометры и барометры, в которых в качестве рабочей жидкости используют ртуть, воду и др.

К приборам с упругими элементами относят пружинные, мембранные и сильфонные манометры и дифманометры.

V.5.1.1. Жидкостные приборы

Дифманометры двухтрубные применяют для измерений перепадов давлений в диапазонах 0—2,5 кПа (ДТ-5) и 0—700 мм рт. ст. (ДТ-50). Основные технические характеристики их приведены в табл. V—2. На рис. V—6, *а* показан общий вид, а на рис. V—6, *б* — схема дифманометра ДТ-50.

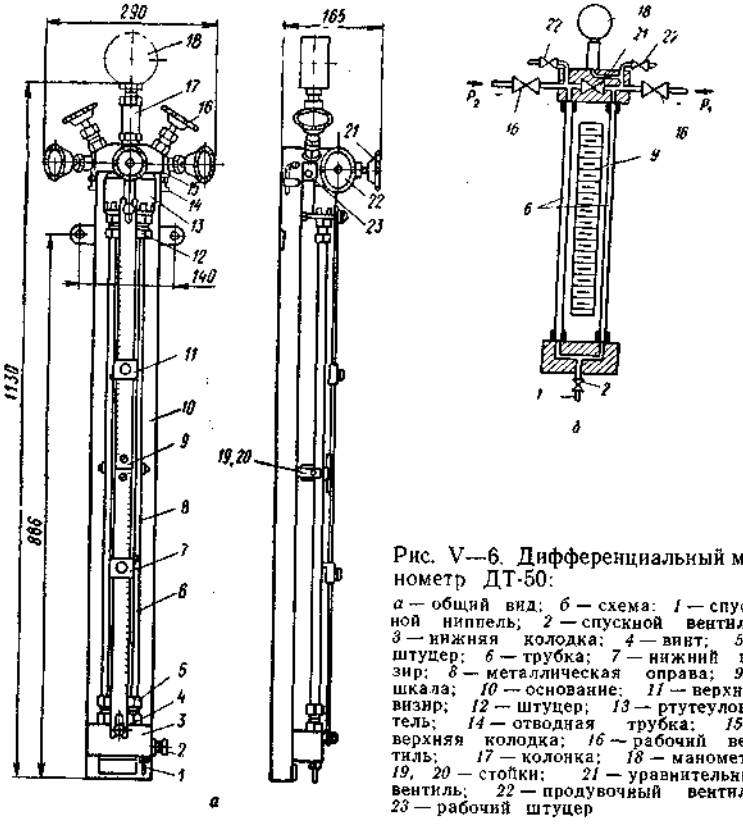


Рис. V—6. Дифференциальный манометр ДТ-50:

а — общий вид; *б* — схема: *1* — спускной ниппель; *2* — спускной вентиль; *3* — нижняя колодка; *4* — винт; *5* — штуцер; *6* — трубка; *7* — нижний визир; *8* — металлическая оправа; *9* — шкала; *10* — основание; *11* — верхний визир; *12* — штуцер; *13* — ртутеуловитель; *14* — отводная трубка; *15* — верхняя колодка; *16* — рабочий вентиль; *17* — колонка; *18* — манометр; *19, 20* — стойки; *21* — уравнительный вентиль; *22* — продувочный вентиль; *23* — рабочий штуцер

Таблица V—2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТНЫХ МАНОМЕТРОВ И ДИФМАНОМЕТРОВ

Наименование прибора	Тип, модель	Допустимое давление, МПа	Пределы измерений			Рабочая жидкость	Основная погрешность (класс точности)	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
			кПа	мм рт. ст.	мм вод. ст.				
Манометр дифференциальный двухтрубный	ДТ-5	0,5	0—2,5	—	0—250	Дистиллированная вода	±2 мм вод. ст.	635×290×165	8,3
То же	ДТ-50	5,0	—	0—700	—	Ртуть	±2 мм рт. ст.	1130×290×165	11,5
Микроманометр многопредельный с наклонной трубкой	ММН-240(5)-1,0	0,01	0—2,4	—	0—240	Спирт этиловый	(1,0)	432×207×200	2,7
Микроманометр жидкостный компенсационный с микрометрическим винтом	МКВ-250	—	0—2,5	—	0—250	Дистиллированная вода	(0,02)	Ø240×430	7,5

На основании *10* закреплены верхняя *15* и нижняя *3* колодки. К верхней колодке прикреплен ртутеуловитель *13* со штуцером *12*. В нижней колодке имеются штуцера *5*. В штуцера вставляются две стеклянные трубки *6* (наружный диаметр 10 мм, внутренний — 4 мм). Штуцера служат для крепления и уплотнения трубок при помощи резиновых колец. Трубки дополнительно крепятся к основанию стойками *19* и сообщаются между собой через канал в нижней колодке. Верхние концы трубок подключаются к измеряемому давлению через рабочие штуцеры *23*, перекрываемые рабочими вентилями *16*. Для сообщения трубок в верхней колодке имеется канал, перекрываемый уравнительным вентилем *21*. Канал в нижней колодке может быть сообщен с атмосферой через ниппель *1*, перекрываемый вентилем *2*.

В верхней колонке предусмотрены две отводные трубки *14* с продувочными вентилями *22*, предназначенные для промывки и продувки дифманометра (в сочетании с ниппелем *1*). Колонка *17* предназначена для установки контрольного пружинного манометра *18*, позволяющего измерить статическое давление в правом (плюсовом) рабочем штуцере. Стеклянные трубки помещены в защитные металлические оправы *8*, предохраняющие от разбрасывания осколков стекла при поломке трубок.

Отсчет уровней жидкости в трубках производится с помощью визиров *7* и *11* по шкалам *9* с делениями от 0 до 360 мм вверх и вниз от середины. Шкалы крепятся к основанию винтами *4* и стойками *20*. Отсчет производится по верхним точкам менисков. Разность давлений вычисляют как сумму полученных в результате отсчета величин. При измерениях открыты рабочие вентили *16*, остальные закрыты. При остановке рабочие вентили закрыты, уравнительный *21* открыт.

При промывках и продувках открывают вентили *2* и *22*, остальные закрывают. Через ниппель *1* подают промывочную жидкость и продувочный газ. При необходимости дифманометры могут быть использованы для измерения избыточного и вакуумметрического давления (в первом случае измеряемое давление подается в правый штуцер, а левый сообщается с атмосферой; во втором случае — наоборот).

Микроманометры применяют в основном для измерений малых избыточных и вакуумметрических давлений и разностей давлений воздуха и газов. Технические характеристики двух типов микроманометров приведены в табл. V—2. Принцип действия микроманометра с наклонной трубкой описан выше (см. рис. V—2, *в*). Микроманометры являются переносными лабораторными приборами и в зависимости от точности могут быть рабочими и образцовыми. Так, микроманометр ММН класса точности 1,0 применяют как рабочий, в то время как МКВ-250 класса точности 0,02 можно использовать в качестве образцового.

V.5.1.2. Приборы с упругими элементами

Пружинные показывающие манометры, вакуумметры и мановакуумметры. Технические характеристики некоторых типов манометров, мановакуумметров и вакуумметров приведены в табл. V—3.

Пружинные приборы рабочие выпускаются с диаметрами корпусов 40, 60, 100 и 160 мм и классом точности 0,4; 0,6; 1; 1,5;

Таблица V—3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРУЖИННЫХ ПОКАЗЫВАЮЩИХ МАНОМЕТРОВ, ВАКУУММЕТРОВ И МАНОВАКУУММЕТРОВ

Назначение	Тип, модель	Пределы измерений				Класс точности	Размеры (диаметр корпуса×толщина), мм	Масса, кг
		МПа		кгс/см²				
		от	до	от	до			
Манометры								
Для неагрессивных сред [1]	ОБМ1-100	0	0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4; 6	0	1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60	2,5	100×53	0,8
Для R12, R13, R22, R142, R502 с дополнительной температурной шкалой [2]	ОБМ1-100бф	0	2,5	0	25	1,5; 2,5	100×53	0,8
Для аммиака с дополнительной температурной шкалой [1]	МТП-160А	0	0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; ...; 60	0	6; 10; 16; 25; 40; ...; 600	1,5	160×53	1,3
Для аммиака [1]	МП-4А	0	0,06; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5	0	0,6; 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25	1,5	160×64	1,45
Железнодорожный для неагрессивных сред [2]	МП	0	0,6; 1,0; 1,6	0	6; 10; 16;	1,5	100×70	0,8
Для неагрессивных сред, а также для кислорода и ацетилена [1,2]	МТ	0	0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,0; 10; 16; 25; 40	0	1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 100; 160; 250; 400	4,0	60×36	0,22
Для неагрессивных сред [1]	М1д	0	0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; ...; 25	0	1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; ... 250	2,5	40×25	0,07
Для точных измерений неагрессивных сред [1]	МТИ1218	0	0,06; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4	0	0,6; 1; 1,6; 2,5; 4	0,6; 1,0	160×64	2,0
То же [1]	МТИ1216	0	0,6; 1; 1,6; 2,5	0	6; 10; 16; 25	0,6; 1,0	160×64	2
Для точных измерений аммиака [1]	МТИ1511	0	0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4; 6	0	2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60	0,6; 1,0	160×64	2
Образцовый для неагрессивных сред [1]	МО1227	0	0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,6	0	1; 1,6; 2,5; 4,0; 6; 10; 16	0,15; 0,25	250×100	6
То же	МО1226	0	4; 6; 10	0	40; 60; 100	0,15; 0,25	250×100	6
»	МО11201		0,1	0	1,0	0,4	160×60	2
	МО11202	0	0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4; 6	0	1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60	0,4	160×60	2
Мановакуумметры								
Для неагрессивных сред [1]	ОБМВ1-100	0,1	0,06; 0,15; 0,3; 0,5; 1,5; 2,4	—1	0,6; 1,5; 3; 5; 15; 24	2,5	100×53	0,8
Для R12, R13, R22, R142, R502 с дополнительной температурной шкалой [2]	ОБМВ1-100бф	—0,1	1,5; 2,4	—1	15; 24	1,5; 2,5	100×53	0,8

Продолжение

Наименование	Тип, модель	Пределы измерений				Класс точности	Размеры (диаметр корпуса×толщина), мм	Масса, кг
		МПа		кгс/см²				
		от	до	от	до			
Для аммиака с дополнительной температурной шкалой [2]	МВТП-160А	−0,1	0,5; 0,9; 2,4	−1	5; 9; 15; 24	1,5	160×53	1,3
Для аммиака [1]	МВП-УА	−0,1	0,06; 0,15; 0,5; 0,9; 2,4	−1	0,6; 1,5; 3; 5; 9; 15; 24	1,5	160×64	1,45
Железнодорожные для R12, R13, R22, R142, R502 с дополнительной температурной шкалой	МВП	−0,1	1,5; 2,4	−1	15; 24	1,5	100×70	0,8
Для фреонов R12 и R22 и аммиака [4]	МВП4-СМ-Т	−0,1	0,15; 0,5	−1	1,5; 5,0	2,5	160×63	1,6
Вакуумметры								
Для неагрессивных сред [1]	ОБВ1-100	−0,1	0	−1	0	2,5	100×53	0,8
Для аммиака [1]	ВТП-160А	−0,1	0	−1	0	1,5; 2,5	160×64	1,5
Для точных измерений неагрессивных сред [1]	ВТИ1218	−0,06; 0 −0,1		−0,6; 0 −1,0		0,6; 1,0	160×64	2,0
Образцовый для неагрессивных сред [1]	ВО1227	−0,1	0	−1,0	0	0,25	250×100	6
	ВО11201	−0,1	0	−1,0	0	0,4	160×60	2

[1] Без фланца для крепления.
[2] С задним фланцем для крепления.
[3] За неагрессивные приняты среды, нейтральные к сплавам медн.
[4] Допускают перегрузку давлением до 1,5 МПа (15 кгс/см²).

2,5; 4, а образцовые — 160 и 250 мм (класс точности 0,15; 0,25; и 0,4).

Вариации показаний приборов не превышают абсолютного значения предела допускаемой основной погрешности. Манометры и мановакуумметры с верхним пределом измерений до 10 МПа (100 кгс/см²) выдерживают перегрузку на 25% к верхнему пределу. Специально разработанные для холодильных машин мановакуумметры МВП4-СМ-Т выдерживают 3- и 10-кратную перегрузку (см. табл. V—3), что позволяет значительно повысить точность измерений.

Приборы присоединяются к месту отбора давления с помощью штуцеров с резьбой в зависимости от диаметра корпуса.

Диаметр корпуса, мм	Обозначение резьбы
40	М10×1
60	М12×1,5
100, 160 и 255	М20×1,5

Корпуса приборов изготовляют без крепящего фланца, с передним фланцем и с задним фланцем. Присоединительные штуцера могут располагаться радиально и параллельно продольной оси корпуса.

Кинематическая схема пружинного манометра показана на рис. V—7, *а*. Под действием измеряемого давления *р* пружина *4 деформируется и через тягу 5 вращает сектор 1 вокруг оси 6*. Сектор приводит во вращение трибку *2* и жестко связанную с ней стрелку *3*. На рис. V—7, *б* показан общий вид манометра в корпусе без крепящего фланца с радиальным штуцером.

Пружинный показывающий дифманометр МДП4-СМ-Т. Данный прибор специально разработан для измерения разности давлений в системе смазки холодильных компрессоров, а также одновременно

Рис. V—7. Пружинный манометр ОБМ1-100:

а — кинематическая схема: *1* — зубчатый сектор; *2* — трибки; *3* — стрелка; *4* — пружина; *5* — тяга; *6* — ось; *б* — общий вид

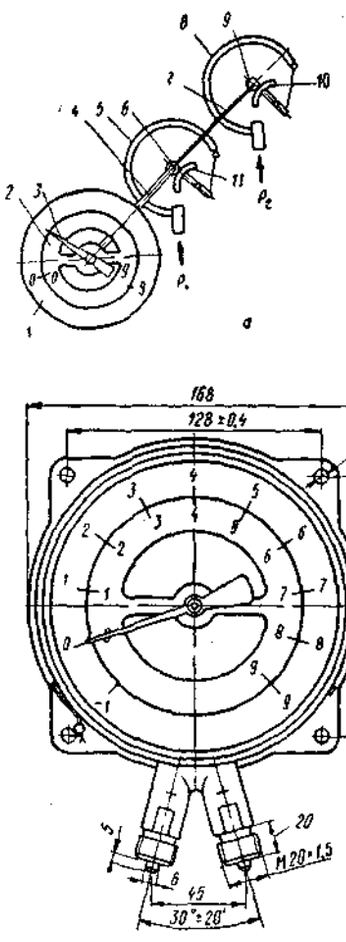


Рис. V—8. Пружинный дифманометр МДП-4-СМ-Т:

а — кинематическая схема: *1* — шкала (неподвижная); *2* — шкала (подвижная); *3* — стрелка; *4* — трубчатая ось; *5*, *8* — пружины Бурдона; *6*, *9* — трибки; *7* — ось; *10* и *11* — секторы; *б* — габаритный чертеж

двух давлений — в картере и в нагнетательной магистрали маслонасоса. Он содержит два измерительных элемента.

Первый элемент, воспринимающий давление p_1 (рис. V—8, *а*), состоит из пружины Бурдона *5*, трибки *6* и зубчатого сектора *11*. Трибка *6* жестко соединена с трубчатой осью *4*, на конце которой насажена подвижная шкала *2*. Второй элемент, воспринимающий давление p_2, состоит из пружины Бурдона *8*, трибки *9* и сектора *10*. Эта трибка соединена с осью *7*, которая проходит через трубчатую ось *4* и на которой закреплена стрелка *3*. На неподвижной шкале *1* и подвижной *2* нанесены одинаковые деления. Кроме того, на подвижной шкале есть указательный выступ. Величина давления p_1 отсчитывается по неподвижной шкале указательным

выступом подвижной шкалы. Давление p_2 отсчитывается стрелкой также по неподвижной шкале. Разность $p_2—p_1$ отсчитывается стрелкой по подвижной шкале.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИФМАНОМЕТРА МДП4-СМ-Т

Рабочая среда	R12, R22, аммиак
Пределы измерений	
МПа	—0,1÷0,9
кгс/см²	—1÷9
Класс точности	1,5
Масса, кг	2

Прибор пригоден для судовых установок неограниченного района плавания. Габаритный чертеж показан на рис. V—8, *б*.

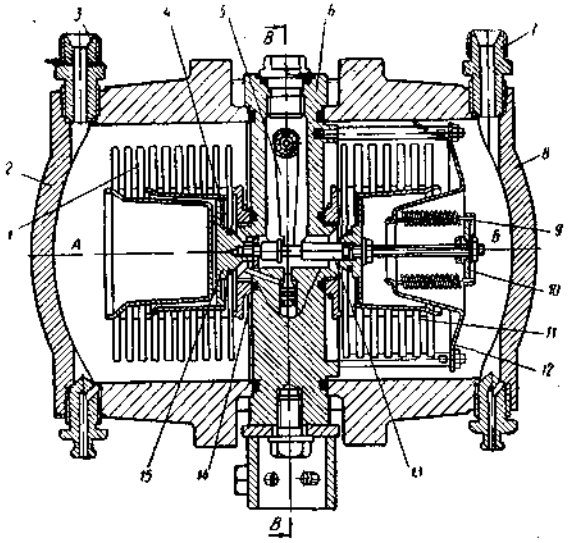
Пружинные самопишущие манометры, вакуумметры и мановакуумметры. Все самопишущие приборы выдают информацию на дисковых диаграммах диаметром 250 мм. Кинематическая схема самопишущего манометра отличается от схемы показывающего манометра тем, что манометровая пружина приводит в движение перо. Последнее чертит кривую на вращающейся диаграмме. Привод диаграммы осуществляется от часового механизма или синхронного электродвигателя. Время полного оборота 12 или 24 ч. Технические характеристики некоторых самопищущих приборов приведены в табл. V—4.

Сильфонные показывающие и самопишущие дифманометры (перепадомеры). Принцип действия сильфонных дифманометров основан на зависимости между измеряемым перепадом давления и упругой деформацией чувствительного элемента (сильфонов, пружин и торсионной трубки). Сильфонный блок (рис. V—9, *а*) имеет две полости: плюсовую (*А*), куда подается большее давление через штуцер *3*, и минусовую (*Б*) — с меньшим давлением и штуцером *7*. Сильфоны *1* и *11* жестко соединены между собой штоком *В*, в выступ которого упирается рычаг *5*, закрепленный на оси торсионного вывода *18*.

Внутренний конец торсионного вывода находится на роликовой опоре *17*. Другой конец оси выходит из сильфонного блока и соединяется с передаточным механизмом показывающего устройства. Выход оси осуществляется при помощи торсионной трубки *19*, внутренний конец которой сварен с осью, а наружный — с основанием торсионного вывода. Объем между сильфонами и каналами торсионного вывода заполнен жидкостью. Конец штока, находящийся в минусовой полости, при помощи втулки *10* соединен с пружинами *9*, закрепленными в держателе *12*.

Под действием перепада давления сильфоны деформируются и перемещают шток. Возникающая сила уравновешивается упругой деформацией сильфонов, пружин и торсионной трубки. Вращение последней передается стрелке прибора.

Конструкция прибора обеспечивает его сохранность при односторонней перегрузке полным рабочим давлением. При перегрузке конус донышка *15* перекрывает седло и полость сильфона герметично перекрывается уплотнительным кольцом *4*. Наружное давление на сильфон полностью уравновешивается внутренним давлением жидкости.



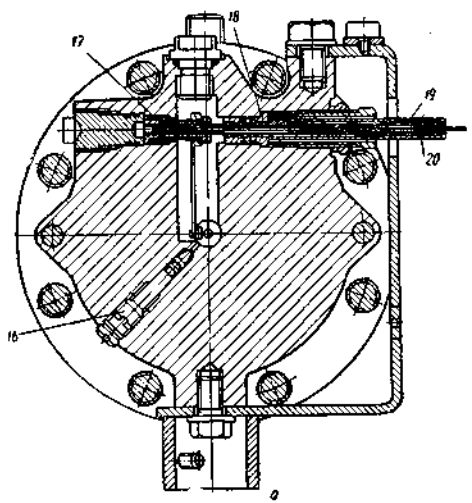


Рис. V—9. Сильфонный показывающий дифманометр ДСП-780:

а — сильфонный блок; *1, 11* — сильфоны; *2* — крышка; *3* — плюсовой штуцер; *4* — уплотнительное кольцо; *5* — рычаг; *6* — основание; *7* — минусовой штуцер; *8* — крышка; *9* — пружина; *10* — втулка; *12* — держатель; *13* — шток; *14* — кладка; *15* — донышко; *16* — игла; *17* — роликовая опора; *18* — торсионный вывод; *19* — торсионная трубка; *20* — ось торсионного вывода; *б* — габаритный чертеж: *1* — крышка; *2* — шкала; *3* — стрелка; *4, 5* — рабочие вентили; *6* — уравнительный вентиль; *7* — корпус; *8* — сильфонный блок

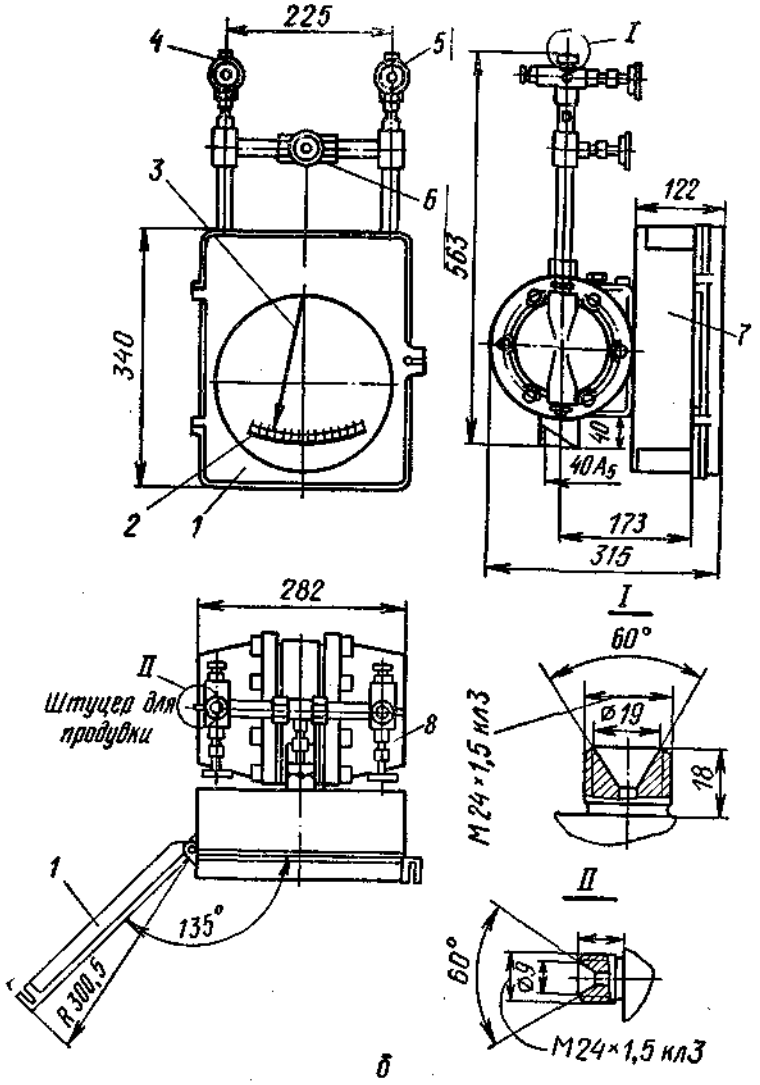


Таблица V—4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРУЖИННЫХ САМОПИШУЩИХ МАНОМЕТРОВ, ВАКУУММЕТРОВ И МАНОВАКУУММЕТРОВ

Наименование	Тип, модель	Привод	Пределы измерения					Класс точности	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
			МПа			кгс/см²				
			от	до		от	до			
Манометр самопишущий	МТС-711	СД	0	0,06; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4,0; ...; 160		0	0,6; 1,0; 1,6	1,0	280×340×125	9
То же	МТС-712	ЧМ								
Вакуумметр самопишущий	ВТС-711	СД	—0,06; —0,1	0		—0,6; —1	0	1,0	280×340×125	9
То же	ВТС-712	ЧМ								
Мановакуумметр самопишущий	МВТС-711	СД	—0,1	0,06; 0,15; 0,3; 0,5; 0,9; 1,6		—1	0,6; 1,5; 3,5; 9; 16	1,0	280×340×125	9
То же	МВТС-712	ЧМ								

Примечание: СД — привод от синхронного двигателя; ЧМ — привод от часового механизма.

Дифманометр снабжен демпферным устройством для гашения пульсаций. При работе жидкость перетекает из одного сильфона в другой через зазор в прокладке *14* и отверстие с регулирующей иглой *16*. Изменяя положение иглы, можно устранить колебания. Габаритный чертеж сильфонного дифманометра представлен на рис. V—9, *б*. Технические характеристики некоторых дифманометров показаны в табл. V—5. Самопишущие дифманометры имеют ту же конструкцию, но вместо стрелки снабжены пером. Запись ведется на дисковой диаграмме диаметром 250 мм. Привод диаграммы осуществляется от синхронного двигателя или часового механизма. Время полного оборота 12 и 24 ч.

V.5.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

V.5.2.1. Преобразователи дифференциально-трансформаторной системы

Современные преобразователи дифференциально-трансформаторной системы являются взаимозаменяемыми: выходной сигнал — взаимная индуктивность дифференциального трансформатора — изменяется от 0 до 10 мГ при изменении измеряемой величины от нижнего до верхнего предела. Преобразователи этого типа приспособлены для работы со вторичными приборами дифференциально-трансформаторной системы (см. ниже) и могут питаться переменным током частотой 50 и 60 Гц. Подсоединение преобразователей ко вторичным приборам осуществляют кабелями с жилами сечением 0,75—1,0 мм². Линия не вносит дополнительной погрешности, если ее активное сопротивление не превышает 5 Ом, а емкость между проводами не превышает 0,02 мкФ. Для контрольных и блокировочных кабелей с резиновой и пластмассовой изоляцией это соответствует длине линии примерно 250 м. При увеличении длины можно ожидать увеличение погрешности на 0,1% на каждые 100 м длины. Технические характеристики двух типов преобразователей (МЭД и ДМ) приведены в табл. V—6.

Преобразователи давления пружинные МЭД. Преобразователи МЭД относятся к приборам с пружинным чувствительным элементом. Они применяются для измерений избыточного и вакуумметрического давлений.

Пружина Бурдона *1* (рис. V—10, *а*) смонтирована в держателе *5*, к которому подводится измеряемое давление. К держателю прикреплена планка *6* с катушкой *7* дифференциального трансформатора, которая закрыта металлическим экраном. Кроме того, на держателе смонтированы постоянный и переменный резисторы, входящие в схему преобразователя. Держатель соединен с корпусом *2* винтами *4*. Корпус отлит из алюминиевого сплава и закрыт крышкой. На задней стенке корпуса установлен штепсельный разъем *3*. Перемещение свободного конца пружины Бурдона передается подвижному сердечнику *8*, связанному с пружиной винта *9*. Перемещение сердечника приблизительно пропорционально изменению давления. Предусмотрена компенсация влияния температуры, которая осуществляется подбором соответствующих материалов. Габаритный чертеж и электрическая схема показаны на рис. V—10, *б* и *в*.

Таблица V—5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКАЗЫВАЮЩИХ И САМОПИШУЩИХ СИЛЬФОННЫХ ДИФМАНОМЕТРОВ (ПЕРЕПАДОМЕРОВ)

Наименование прибора	Тип, модель	Привод диаграммы	Верхние пределы измерения перепадов давления				Предельно допустимые давления, МПа	Класс точности	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
			кПа	мм вод. ст.	МПа	кгс/см²				
Дифманометр показывающий	ДСП-780Н	—	6,3; 10; 16; 25	630; 1000; 1600; 2500	0,04; 0,063	0,4; 0,63	6,3; 16	1,0; 1,5	280×580×335	45
То же	ДСП-780НА	—								
Дифманометр самопишущий	ДСС-710Н	Синхронный двигатель								
То же	ДСС-710НА	То же								
Дифманометр показывающий	ДСП-780В	—	—	—	0,04; 0,063; 0,1; 0,16; 0,25	0,4; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5	6,3; 3,2	1,0; 1,5	280×563×315	40
То же	ДСП-780ВА	—	—	—						
Дифманометр самопишущий	ДСС-710В	Синхронный двигатель	—	—						
То же	ДСС-710ВА	То же								

Примечания: 1. Приборы с индексом А предназначены для аммиака. 2. Самопишущие приборы могут иметь привод от часового механизма.

Таблица V—6. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ И РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СИСТЕМЫ

Наименование прибора	Тип, модель	Измеряемая величина	Пределы измерений								Класс точности	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
			МПа		кгс/см²		кПа		кгс/м² (мм вод. ст.)				
			от	до	от	до	от	до	от	до			
Преобразователь давления пружинный	МЭД22364	Избыточное давление	0	0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6	0	1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16	—	—	—	—	1,0; 1,5	160×155	2
То же	МЭД22365	То же	0	2,5; 4; . . .; 160	0	25; 40; . . .; 1600	—	—	—	—	1,0; 1,5	160×140	2
»	МЭД22364	Избыточное и вакуумметрическое давления	−0,1	0,06; 0,15; 0,3; 0,5; 0,9; 1,5	−1	0,6; 1,5; 3; 5; 9; 15	—	—	—	—	1,0; 1,5	160×155	2
»	МЭД22365	То же	−0,1	2,4	−1	24	—	—	—	—	1,0; 1,5	160×140	2
Дифманометр мембранный	ДМ23573	Разность давлений	0	0,04; 0,063; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63	0	0,4; 0,63; 1; 1,6; 2,5; 4; 6,3	0	1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25	0	160; 250; 400; 630; 1000; 1600; 2500	1,0; 1,5	565×208×200	16,5
То же	ДМ3583М	То же	0	0,04; 0,063; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63	0	0,4; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3	0	1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10; 16	0	160; 250; 400; 630	1,0; 1,5	192×302×180	12

Примечания: 1. Предельно допустимое давление дифманометров ДМ23573 6,3 МПа, ДМ3583М — 16 МПа. 2. Рабочие среды неагрессивны к медным сплавам, углеродистой и нержавеющей сталям.

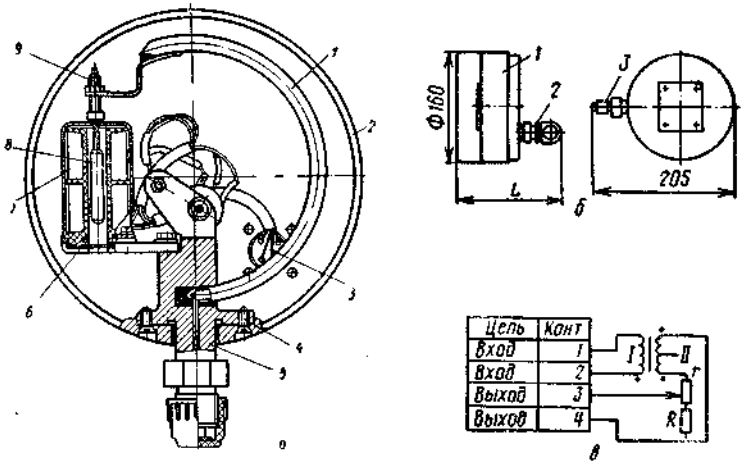


Рис. V—10. Преобразователь давления МЭД:

а — общий вид: *1* — пружина Бурдона; *2* — корпус; *3* — штепсельный разъем; *4* — винт; *5* — держатель; *6* — планка; *7* — катушка дифференциального трансформатора; *8* — подвижной сердечник; *9* — винт; *б* — габаритный чертеж: *1* — корпус; *2* — штепсельный разъем; *3* — присоединительный штуцер (L=155 мм для МЭД22364 и L=140 мм для МЭД22365); *в* — электрическая схема

Дифманометры мембранные ДМ. Дифманометры мембранные ДМ предназначаются для измерений перепадов давлений жидкостей и газов. В качестве чувствительного элемента применяется мембранный блок, состоящий из мембранных коробок *3* и *6* (рис. V—11), укрепленных в перегородке *5*. Перегородка, крышки *2* и *18* и стяжная муфта *4* образуют две полости: плюсовую (нижнюю) и минусовую (верхнюю). Внутренние полости мембранных коробок, которые сообщаются между собой, заполняются водным раствором этиленгликоля (через ниппель *19*, который затем заваривается). С верхней мембранной коробкой связан плунжер (подвижной сердечник) *11* дифференциального трансформатора. Плунжер перемещается внутри разделительной трубки *17*, сообщенной с минусовой полостью. На распределительную трубку насажена катушка дифференциального трансформатора, которая при помощи переходника *16* и контргайки *10* крепится к траверсе *9*. На катушке размещены постоянные и переменные настроечные резисторы.

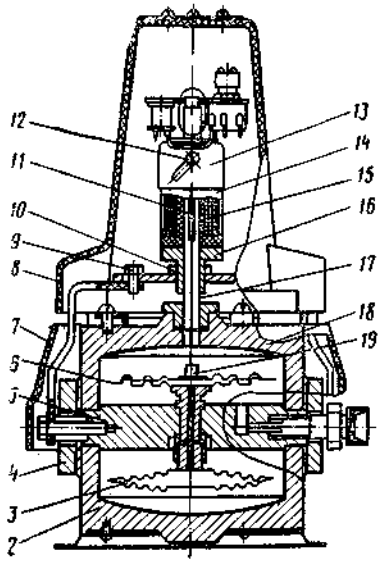
Щитки *7* и колпак *8* защищают преобразователь от механических повреждений. Катушка трансформатора закрыта экраном, состоящим из неподвижного корпуса *14* и подвижного колпачка *13* с фиксирующим винтом *12*. При подаче более высокого давления в штуцер *1*, а меньшего в штуцер *21* в полостях дифманометра создается перепад давления, который сжимает нижнюю мембранную коробку и расширяет верхнюю. Это вызывает перемещение плунжера вверх и, как следствие, изменение напряжения, индуцированного во вторичной обмотке дифференциального трансформатора. Электрическая схема аналогична показанной на рис. V—10, *в*.

V.5.2.2. Преобразователи со стандартным электрическим аналоговым сигналом ГСП

Преобразователи со стандартным электрическим аналоговым сигналом (см. п. I.2) являются наиболее современными и перспективными. Они позволяют значительно повысить точность измерений и расширить использование автоматизированных систем сбора и обработки результатов измерений, в том числе с применением ЭВМ. Характерным для таких преобразователей является выходной сигнал постоянного тока, стандартизованный в Государственной системе приборов (ГСП). В преобразователях давления наибольшее распространение получили токовые сигналы в пределах 0—5, 0—20 и 4—20 мА.

Преобразователи с электрическими аналоговыми сигналами делятся на три группы: преобразователи с магнитной компенсацией, преобразователи с электросиловой компенсацией, электронные преобразователи. Принципы действия всех этих преобразователей рассмотрены выше (см. п. V.3). Технические характеристики основных типов преобразователей приведены в табл. V—7.

Преобразователи с магнитной компенсацией. Приборы с магнитной компенсацией выпускаются в различных вариантах для измерения давлений (избыточных, вакуумметрических и абсолютных) и разностей давлений. Технические характеристики некоторых из них приведены в табл. V—7.



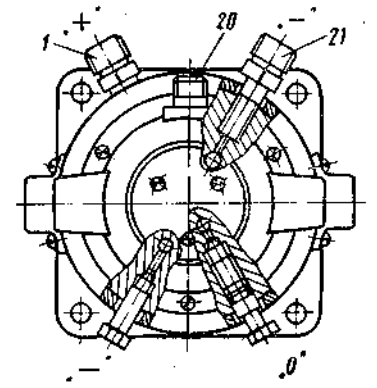


Рис. V—11. Преобразователь разности давлений (дифманометр мембранный) типа ДМ:

1 — штуцер (плюсовой); *2, 18* — крышки; *3, 6* — мембранные коробки; *4* — стяжная муфта; *5* — перегородка; *7* — щиток; *8* — колпак; *9* — траверса; *10* — контргайка; *11* — плунжер (подвижной сердечник); *12* — винт; *13* — подвижной колпачок экрана; *14* — неподвижный корпус экрана; *15* — катушка дифференциального трансформатора; *16* — переходник; *17* — разделительная трубка; *19* — ниппель; *20* — штепсельный разъем; *21* — штуцер (минусовый)

Таблица V—7. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ И РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ СО СТАНДАРТНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ АНАЛОГОВЫМИ ВЫХОДНЫМИ СИГНАЛАМИ ГСП

Наименование прибора	Тип, модель	Измеряемая величина	Пределы измерений						Класс точности	Выходной сигнал, мА	Материал, соприкасающийся с рабочей средой	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
			МПа		кгс/см²		кПа						
			от	до	от	до	от	до					
Преобразователи с магнитной компенсацией													
Манометр пружинный электрический малогабаритный	МПЭ-МИ	Избыточное давление	0	0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; . . .; 60	0	1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; . . .; 600	—	—	0,6; 1,0	0—5; 0—20	36НХТЮ или Х18Н10Т	225×160×266	4
Манометр абсолютного давления мембранный	МАДМЭ	Абсолютное давление	0	0,01; 0,06	0	0,1; 0,6	—	—	2,5	0—5	36НХТЮ или Х18Н10Т	240×210×223	12
Дифманометр мембранный	ДМЭ	Разность давлений	0	0,04; 0,063; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4	0	0,4; 0,63; 1; 1,6; 2,5; 4	0	1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25	1,0	0—5	36НХТЮ или iХ18Н10Т	538×268×362	28,5
То же, малогабаритный	ДМЭ-МИ	То же		0,63; 1,0; 1,6		6,3; 10; 16		160; 250; 400; 630					
								1000; 1600; 2500				282×160×225	10,5
Преобразователи с электросиловой компенсацией													
Манометр сильфонный	МС-Э1	Избыточное давление	0	0,025; 0,04 0,06; 0,1; 0,16 0,25; 0,4	0	0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4	—	—	0,6; 1,0; 1,5	0—5 0—20	36НХТ10	255×142×242	8,5
То же	МС-Э2	То же	0	0,4; 0,6; 1; 1,6; 2,5	0	4; 6; 10; 16; 25	—	—	0,6; 1,0; 1,5	0—5; 0—20	36НХТ10	255×142×24 2	8,5
Вакуумметр сильфонный	ВС-Э1	Вакуумметрическое давление	0	—0,025; —0,04; —0,06; —0,1	0	—0,25; —0,4; —0,6; —1	—	—	0,6; 1,0; 1,5	0—5; 0—20	36НХТ10	255×142×242	8,5
Мановакуумметр сильфонный	МВС-Э1	Избыточное и вакуумметрическое давление	—0,1	0,06; 0,15; 0,3	—1	0,6; 1,5; 3	—	—	0,6; 1,0; 1,5	0—5; 0—20	36НХТ10	255×142×242	8,5
То же	МВС-Э2	То же	—0,1	0,3; 0,5; 0,9; 1,5; 2,4	—1	3; 5; 9; 15; 24	—	—	0,6; 1,0; 1,5	0—5; 0—20	36НХТ10	255×192×242	8,5

Наименование прибора	Тип, модель	Измеряемая величина	Пределы измерений						Класс точности	Выходной сигнал, мА	Материал, соприкасающийся с рабочей средой	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
			МПа		кгс/см²		кПа						
			от	до	от	до	от	до					
Манометр абсолютного давления сильфонный	МАС-Э1	Абсолютное давление	0	0,025; 0,04; 0,06; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4	0	0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,6 2,5; 4	—	—	0,6; 1,0; 1,5; 2,5	0—5; 0—20	36НХТ10	255×142×242	8,5
»	МАС-Э2	»	0	0,6; 1,0; 1,6; 2,5	0	6; 10; 16; 25	—	—	0,6; 1,0; 1,5	0—5; 0—20	36НХТ10	255×142×242	8,5
»	МАС-Э3	»	—	—		—	0	6; 10; 16; 25; 40	0	600; 1000; 1600; 2500; 4000	1; 1,5; 2,5	0—5; 0—20	36НХТ10	255×142×242	8,5
Электронные преобразователи													
Преобразователь давления	«Сапфир-22ДА», 2020	Абсолютное давление	—	—	—	—	0	2,5; 4; 6; 10	0	250; 400; 600; 1000	1,0; 0,5; 0,25; 0,5	0—5; 0—20; 4—20	—	205×225×185 205×225×135	5
То же	«Сапфир-22ДА», 2030	То же	—	—	—	—	0	6,0; 10; 16; 25; 40	0	600; 1000; 1600; 2500; 4000	0,5; 0,25; 0,5	0—5; 0—20; 4—20	—	205×225×185	5
»	«Сапфир-22ДА», 2040	»	—	—	—	—	0	40; 60; 100; 160; 250	0	4000; 6000; 10000; 16000; 25000	0,25	0—5; 0—20; 4—20		205×225×185	5
»	То же	»	0	0,04; 0,06; 0,1; 0,16; 0,25	0	0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5	—	—	—	0,5	—	—	—	—	
Преобразователь (манометр)	«Сапфир-22ДИ», 2140	Избыточное давление	0	0,04; 0,06; 0,1; 0,16; 0,25	0	0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5	0	40; 60; 100; 160; 250	0	4000; 6000; 10000; 16000	0,25; 0,5	0—5; 0—20; 4—20	36НХТЮ, коррозиестойкие сплавы	205×225×185	5
	«Сапфир-22ДИ», 2150	То же	0	0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5	0	4; 6; 10; 16; 25	—	—	—	0,25; 0,5	0—5; 0—20; 4—20	36НХТЮ, прокладки из меди	205×225×185	5
То же	«Сапфир-22ДВ», 2240	Вакуумметрическое давление	−0,04; −0,06; −0,1	0	−0,4; −0,6; −1,0	0	−40; −60; −10	0	−4000; −6000; −10000	0	0,25; 0,5	0—5; 0—20; 4—20	36НХТЮ, коррозиестойкие сплавы	205×225×185	5
»	«Сапфир-22ДИВ», 2350	Вакуумметрическое и избыточное давление	−0,1	0,3; 0,5; 0,9; 1,5; 2,4	−1	3; 5; 9; 15; 24	—	—	—	0,25; 0,5	0—5; 0—20; 4—20	36НХТЮ, прокладки из меди	412×210×110	3

Наименование прибора	Тип, модель	Измеряемая величина	Пределы				
			МПа		кгс/см²		кПа
			от	до	от	до	от
Преобразователь разности давлений	«Сапфир-22ДД», 2420	Разность давления	—	—	—	—	0
То же	«Сапфир»-22ДД», 2430	То же	—	—	—	—	0
							0
							0
»	«Сапфир-22ДД», 2440	»	—	—	0	0,4; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5	0
Преобразователь давления	Кристалл	Избыточное давление	0	0,1; 0,16; 0,25; 0,40; 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4; . . .; 400	0	1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; . . . 400 ;	—
То же	МП, модель 22517	То же	0	2,5; 4,0	0	25 40	—
»	МП, модель 22518	»	0	0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,6 1,0; 1,6	0	1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16	—
Преобразователь давления	МП, модель 22518	Вакуумметрическое и избыточное давление	—0,1	0,06; 0,15; 0,3; 0,5; 0,9; 1,5	—1	0,6; 1,5; 3,5; 9,15	—
То же	МП, модель 22517	То же	—0,1	2,4	—1	24	—
»	МП, модель 22518	Вакуумметрическое давление	—0,1	0	—1	0	—

Манометр пружинный МПЭ-МИ относится к малогабаритным приборам и служит для измерения избыточного давления. Чувствительным элементом является пружина Бурдона, которая связана с подвижным постоянным магнитом, входящим в схему магнитного компенсатора. Принцип действия схемы с магнитной компенсацией описан выше (см. п. V. 3.4). Габаритный чертеж показан на рис. V—12, *а*.

Продолжение

измерений			Класс точности	Выходной сигнал, мА	Материал, соприкасающийся с рабочей средой	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
кПа	кгс/м²						
до	от	до					
1,6; 2,5; 4; 6,3 10	0 0	160; 250; 400; 630 1000	0,25; 0,5 0,5	0—5; 0—20; 4—20	36НХТЮ, коррозионностойкие сплавы	205×182×185	5,5
6,3	0	630	0,25; 0,5	0—5;	36НХТЮ, коррозионностойкие сплавы	205×182×185	5,5
10; 16	0	1000; 1600	0,5	0—20; 4—20			
25; 40	0	2500; 4000	0,25; 0,5				
40; 63; 100; 160; 250	—	—	0,25; 0,5	0—5; 0—20 4—20	36НХТЮ, коррозионностойкие сплавы	205×182×185	5,5
—	—	—	0,6; 1,0	0—5	37НХТЮ, коррозионностойкие сплавы	88×63×160	0,5
—	—	—	0,6; 1,0; 1,5	0,5	Сталь 45, сплав 156, сталь 50ХФА, ЛС-59	160×205×165	2,5
—	—	—	0,6; 1,0; 1,5	0,5	ЛС-59	160×205×165	2,5
—	—	—	0,6; 1,0; 1,5	0—5	Бр.ОФ4-0,25	160×205×165	2,5
—	—	—	0,6; 1,0; 1,5	0,5	Сталь 45, сплав 156, сталь 50ХФА, ЛС-59	160×205×165	2,5
—	—	—	1,0; 1,5	0,5	ЛС-59 Бр. ОФЧ-0,25	160×205×165	2,5

В манометре абсолютного давления МАДМЭ в качестве чувствительного элемента применен мембранный блок, связанный с подвижным постоянным магнитом. Последний входит в схему преобразования с магнитной компенсацией. Габаритный чертеж представлен на рис. V—12, *б*.

Дифманометры мембранные бесшкальные типа ДМЭ. Устройство мембранного блока дифманометров ДМЭ анало-

гично устройству прибора ДМ-3583М (см. рис. V—11, *а*). Габаритный чертеж прибора ДМЭ представлен на рис. V—13. На мембранном блоке *1* смонтированы трубная подводка с вентилями: плюсовым *2*, минусовым *3* и уравнительным *4*. На корпусе мембранного блока под колпаком *5* размещено усилительное устройство, линии связи и питание которого подводятся через ввод *6*.

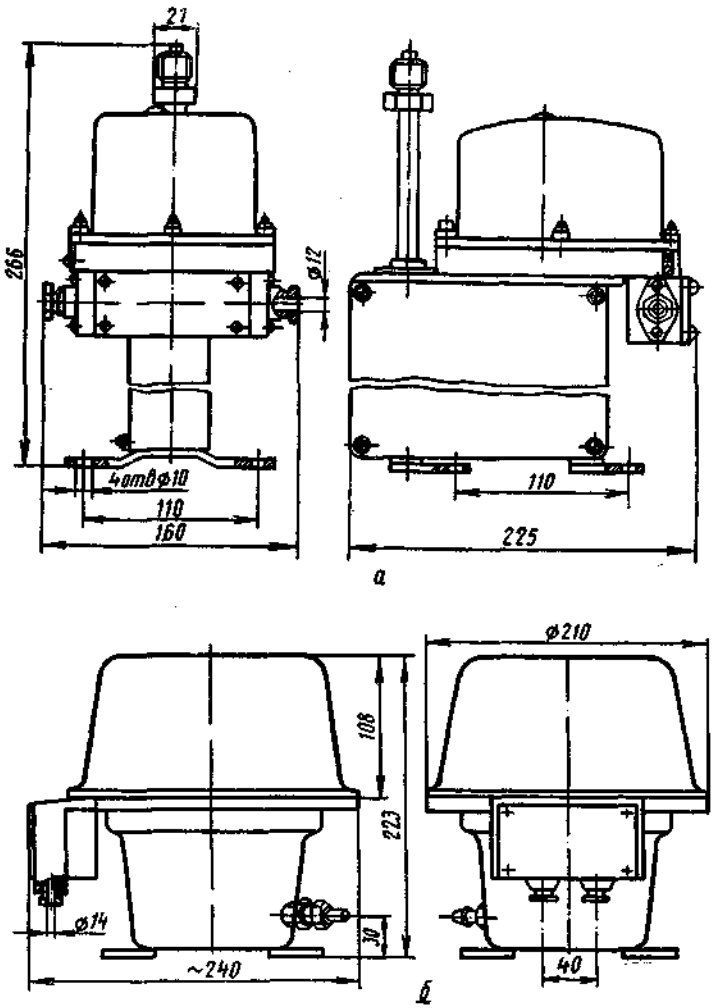


Рис. V—12. Габаритные чертежи преобразователей МПЭ-МИ (*а*) и МАДМЭ (*б*)

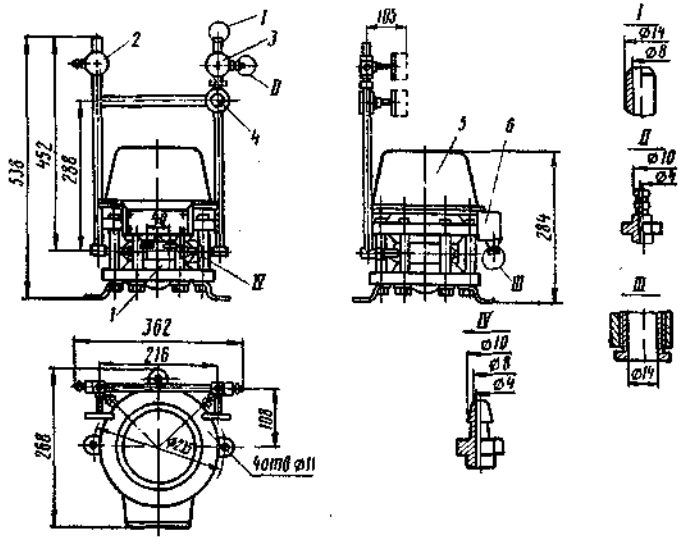


Рис. V—13. Габаритный чертеж дифманометра ДМЭ:
1 — мембранный блок; *2* — плюсовой вентиль; *3* — минусовый вентиль; *4* — уравнительный вентиль; *5* — колпак; *6* — коробка вывода проводов

Преобразователи с электросиловой компенсацией. Для измерений давлений при испытаниях холодильных машин находят применение сильфонные преобразователи: избыточного давления МС-Э1 и МС-Э2; вакуумметрического давления ВС-Э1; избыточного и вакуумметрического давления МВС-Э1 и МВС-Э2; абсолютного давления МАС-Э1, МАС-Э2, МАС-Э3. Эти преобразователи отличаются друг от друга кинематическими схемами и характеристиками упругих элементов.

Манометры МС-Э1 и МС-Э2 имеют кинематическую схему, представленную на рис. V—14, *а*. Измеряемое давление подается внутрь сильфона *1*, который поворачивает рычаг *2* и растягивает пружину *3*. Последняя играет роль основного упругого элемента: ее жесткость определяет чувствительность, а начальный натяг, задаваемый винтом *4*,— пределы измерения. Система автоматической компенсации, формирующая выходной сигнал, состоит из дифференциального трансформатора *5*, усилителя *6* и силового электромагнита *7*. Принцип ее работы описан выше (см. раздел V.3.5 и рис. V—5, *д*). Аналогичную кинематическую схему имеют мановакуумметры МВС-Э1 и МВС-Э2.

Вакуумметры ВС-Э1 работают по схеме (рис. V—14, *б*). В этой схеме сильфон *1* размещается под тем же плечом рычага *2*, что и пружина *3*. Сильфон работает на сжатие за счет перепада между измеряемым и атмосферным давлениями. При уменьшении давления длина сильфона уменьшается, рычаг *2* поворачивается против часовой стрелки, растягивая пружину *3*. Винт *4* служит для подстройки.

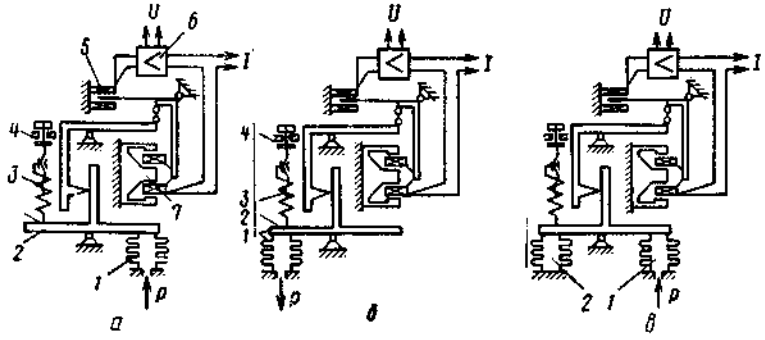


Рис. V—14. Кинематические схемы приборов с электросиловой компенсацией:

а — МС-Э1, МС-Э2, МВС-Э1 и МВС-Э2: *1* — сильфон; *2* — рычаг; *3* — пружина; *4* — винт настройки; *5* — дифференциальный трансформатор; *6* — усилитель; *7* — катушка электромагнита; *б* — ВС-Э1: *1* — сильфон; *2* — рычаг; *3* — пружина; *4* — винт настройки; *в* — МАС-Э1, МАС-Э2, МАС-Э3: *1* — рабочий сильфон; *2* — опорный сильфон

Манометры абсолютного давления МАС-Э1, МАС-Э2 и МАС-Э3 (рис. V—14, *в*) отличаются от рассмотренных выше тем, что снабжены двумя сильфонами: рабочим *1* и опорным *2*. Рабочий сильфон воспринимает измеряемое давление, а опорный сильфон откачен до весьма низкого остаточного давления и тщательно герметизирован. Эффективные площади обоих сильфонов и плечи развиваемых сил одинаковы, в результате чего действие атмосферного давления исключается и выходной сигнал пропорционален абсолютному давлению в сильфоне *1*.

Технические характеристики преобразователей приведены в табл. V—7, а габаритный чертеж показан на рис. V—15.

Электронные преобразователи. Преобразователи «Сапфир» на основе тензоэлементов включают в себя ряды, которые охватывают практически весь диапазон измерений давления и разности давлений. Эти ряды характеризуются высокой точностью, сравнительно малыми габаритами и массой, полным набором выходных стандартных токовых сигналов. Технические характеристики нескольких типов этих преобразователей приведены в табл. V—7.

Преобразователи абсолютного давления «Сапфир-22ДА» (модели 2020, 2030, 2040) собраны на основании *9* (рис. V—16, *а*), закрытом фланцами *10* и *11*.

Тензопреобразователь *4* мембранно-рычажного типа размещен внутри основания и отделен от измеряемой среды металлической гофрированной мембраной *8*. Мембраны *8* и *14* по наружному контуру приварены к основанию и соединены между собой центральным штоком *6*, который связан с концом рычага тензопреобразователя *5* тягой *13*. Измеряемое давление подается в камеру *7*, уплотненную прокладкой *3*. Полость *12* вакуумирована и герметизирована.

Под воздействием давления мембрана *8* прогибается и через шток *6* и тягу *13* поворачивает рычаг *5* тензопреобразователя. Это

приводит к изгибу мембраны тензопреобразователя и изменению электрического сигнала, передаваемого по проводам через герметичный вывод *2* к электронному устройству *1*.

Преобразователь избыточного давления «Сапфир-22ДИ» (модель 2150) собран на основании *9* (рис. V—16, *б*). Между ним и фланцем *5* размещена гофрированная мембрана *6*, приваренная к основанию, фланец уплотнен прокладкой *8*. Надмембранная полость *4* заполнена кремнийорганической жидкостью, которая заполняет и внутреннюю полость тензопреобразователя *3*.

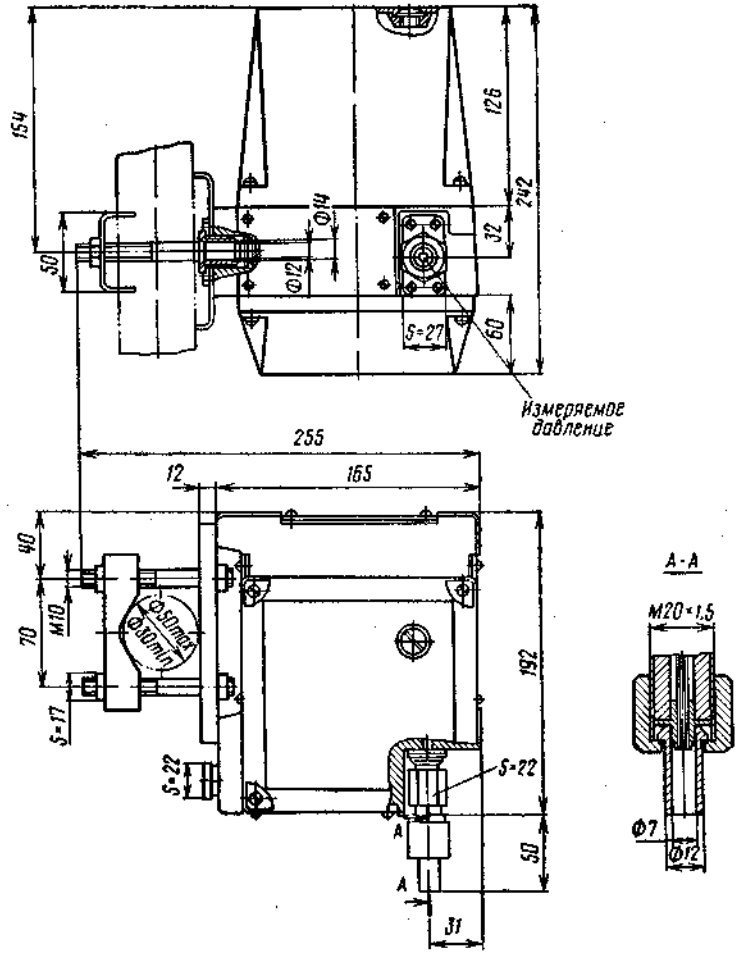


Рис. V—15. Габаритный чертеж приборов МС-Э, МВС-Э, МАС-Э

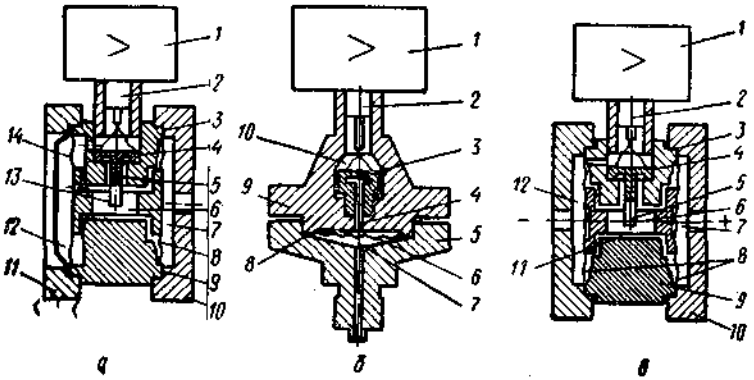


Рис. V—16. Схемы преобразователей «Сапфир-22»:

а — «Сапфир-22ДА» (модели 2020, 2030, 2040): *1* — электронное устройство; *2* — гермовывод; *3* — прокладка; *4* — тензопреобразователь; *5* — рычаг тензопреобразователя; *6* — шток; *7* — камера; *8, 14* — мембраны; *9* — основание; *10, 11* — фланцы; *12* — вакуумированная полость; *13* — тяга; *б* — «Сапфир-22ДИ» (модель 2150) и «Сапфир-22ДИВ» (модель 2350): *1* — электронное устройство; *2* — гермовывод; *3* — тензопреобразователь; *4* — внутренняя полость; *5* — фланец; *6* — мембрана; *7* — камера; *8* — прокладка; *9* — основание; *10* — полость; *в* — «Сапфир-22ДД» (модели 2420, 2430 и 2440); «Сапфир-22ДИ» (модель 2140) и «Сапфир-22ДВ» (модель 2240): *1* — электронное устройство; *2* — гермовывод; *3* — прокладка; *4* — тензопреобразователь, *5* — тяга; *6* — шток; *7* — камера (плюсовая); *8* — мембрана; *9* — основание; *10* — фланец; *11* — внутренняя полость; *12* — камера (минусовая)

Полость *10* над ним сообщена с атмосферой. Провода от тензопреобразователя через гермовывод *2* подаются в электронное устройство *1*. Измеряемое давление подается в камеру *7* и через гофрированную мембрану и жидкость воздействует на мембрану тензопреобразователя. Прогиб последней, линейно зависящий от давления, передается тензоэлементам, которые преобразуют его в соответствующий электрический сигнал, подаваемый в электронное устройство. Такую же схему имеет преобразователь избыточного давления и разрежения «Сапфир-22ДИВ» (модель 2350).

Преобразователи разности давлений «Сапфир-22ДД» (модели 2420, 2430 и 2440) имеют две камеры: плюсовую *7* и минусовую *12* (рис. V—16, *в*), к которым подводятся измеряемые давления. Давления воздействуют на мембраны *8*, приваренные по периметру к основанию *9*. Фланцы уплотняются прокладками *3*. Внутренняя полость *11*, ограниченная мембранами, тензопреобразователем *4* и гермовыводом *2* заполнена кремнийорганической жидкостью. Под действием разности давлений мембраны перемещают шток *6*, который через тягу *5* передает усилие на рычаг тензопреобразователя *4*. Это вызывает прогиб мембраны, тензопреобразователя и соответствующий электрический сигнал, передаваемый в электронное устройство *1*.

Аналогичную схему имеют преобразователь избыточного давления «Сапфир-22ДИ» (модель 2140), у которого камера *12* сообщается с атмосферой, и преобразователь вакуумметрического давления «Сапфир-22ДВ» (модель 2240), у которого с атмосферой сообщается камера *7*.

Габаритные чертежи преобразователей «Сапфир-22» представлены на рис. V—17. Для использования во взрывоопасных помещениях выпускаются преобразователи «Сапфир-22-ВН». Технические характеристики этих преобразователей аналогичны характеристикам приборов «Сапфир-22».

Преобразователи МП имеют в качестве чувствительного элемента пружину Бурдона *Пр* (рис. V—18, *а*), связанную с подвижным сердечником дифференциального трансформатора *ДТ*. Первичная обмотка *I* дифференциального трансформатора питается переменным напряжением прямоугольной формы частотой 800 Гц. Вторичные обмотки *II* и *III* включены в балансную схему. В среднем положении сердечника *С* напряжения вторичных обмоток равны, в результате чего напряжение в балансной схеме равно нулю. При изменении давления *р* происходит смещение сердечника и баланс напряжений нарушается. Электронное преобразовательное устройство *Э* воспринимает небаланс напряжений и преобразует его в пропорциональное изменение выходного тока. Основные технические данные преобразователей МП приведены в табл. V—7, а габаритный чертеж — на рис. V—18, *б*. В связи с наличием деталей из медных сплавов преобразователь непригоден для измерения давления аммиака.

V.5.3. ВТОРИЧНЫЕ ПРИБОРЫ

Вторичные приборы, применяемые для работы в комплекте с описанными выше первичными преобразователями, делятся на две группы: приборы дифференциально-трансформаторной системы; миллиамперметры для работы в системе стандартных токовых сигналов. Вторичные приборы бывают показывающими (стрелочные, автоматические и цифровые) и самопишущими.

V.5.3.1. Вторичные приборы дифференциально-трансформаторной системы

Вторичные приборы дифференциально-трансформаторной системы предназначены для работы со взаимозаменяемыми первичными преобразователями, взаимная индукция которых изменяется от 0 до 10 мГ. Для измерения давления и разности давлений применяют вторичные приборы с линейным профилем кулачков. Шкалы вторичных приборов градуируются в единицах давления или разности давления:

Избыточное давление	
МПа	От 0 до 0,06; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4; . . .; 60
кгс/см²	От 0 до 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; . . .; 600
Вакуумметрическое давление	
МПа	От —0,1 до 0 » —0,06 до 0
кгс/см²	От —1 до 0 » —0,6 до 0

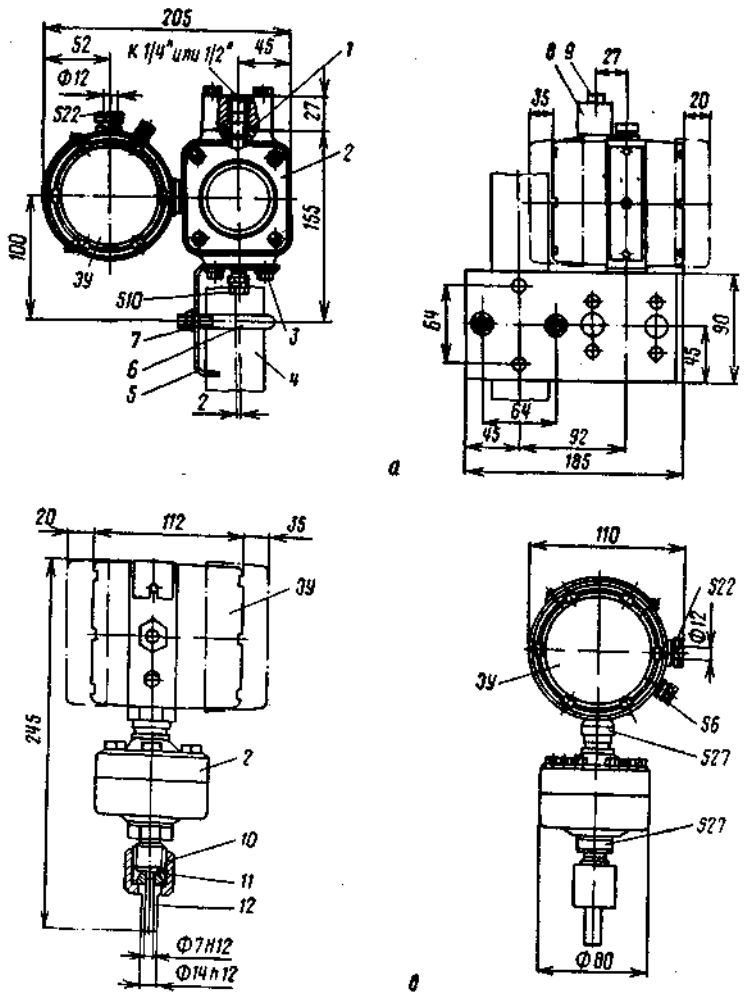


Рис. V—17. Габаритные чертежи преобразователей «Сапфир-22»:

а — моделей 2140, 2240, 2020, 2030, 2040; *б* — моделей 2150, 2350; *в* — моделей 2420, 2430, 2440; *1* — кольцо уплотнительное; *2* — преобразователь; *3* — болт М10×14; *4* — труба диаметром 50 мм; *5* — кронштейн; *6* — скоба; *7* — гайка М8; *8* — фланец; *9* — болт М10×40; *10* — гайка М20×1,5; *11* — прокладка; *12* — ниппель; *ЭУ* — электронное устройство

Вакуумметрическое и избыточное давление

МПа	От —0,1 до 0,06; 0,15; 0,3; 0,5; 0,9; 1,5; 2,4
кгс/см²	От — 1 до 0,6; 1,5; 3; 5; 9; 15; 24

Разность давлений

МПа	От 0 до 0,04; 0,063; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63; 1; 1,6; 2,5; 4; ...; 250
кгс/см²	От 0 до 0,4; 0,63; 1; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25; 40; ...; 2500

Показывающий прибор ВМД (модель 4882) — в миниатюрном исполнении. Он имеет круглую шкалу с развернутой длиной 195 мм. Класс точности 1,0. Время прохождения стрелкой всей шкалы 5 с. Габаритный чертеж представлен на рис. V—19, *а*. Масса прибора 7 кг.

Показывающий прибор КД140 — также в миниатюрном исполнении с круглой шкалой. Класс точности 1,0, время прохождения всей шкалы 5 с. Габаритный чертеж показан на рис. V—19, *б*.

Показывающий прибор КПД1 — в малогабаритном исполнении. Имеет круглую шкалу развернутой длиной 315 мм. Класс точности 1,0, время прохождения шкалы 5 с. Габаритный чертеж приведен на рис. V—19, *в*. Масса прибора 13 кг.

Показывающий прибор с вращающейся шкалой КВД1 — в малогабаритном исполнении. Длина шкалы 500 мм, класс точности 1,0. Время прохождения шкалы не более 10 с. Габаритный чертеж показан на рис. V—19, *г*. Масса прибора 15 кг.

Самопишущий и показывающий прибор КСД1 имеет прямолинейную шкалу длиной 100 мм. Запись на ленте шириной 100 мм.

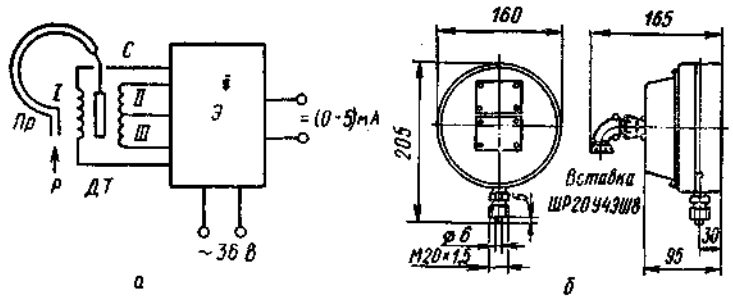


Рис. V—18. Преобразователь МП:
а — упрощенная схема; *б* — габаритный чертеж

Время прохождения шкалы 5 с. Скорость движения диаграммной ленты 10, 20, 40, 60, 120 мм/ч. Толщина линии записи 0,6 мм. Класс точности 1,0. Габаритные размеры и масса те же, что у прибора КПД1.

Самопишущий и показывающий прибор КСД2 с прямолинейной шкалой длиной 160 мм. Запись на диаграммной ленте шириной 160 мм. Скорость движения ленты 20, 40, 60, 120, 240 мм/ч (1-й ряд) и 600, 1200, 2400 мм/ч (2-й ряд). Время прохождения шкалы 2,5 и 10 с. Класс точности 1,0 (измерение и запись). Габаритный чертеж приведен на рис. V—19, *д*. Масса прибора 18 кг.

Самопишущий и показывающий прибор КСД3 имеет круглую шкалу развернутой длиной 600 мм. Запись на дисковой диаграмме ДН-250 с длиной отсчетной дуги 95 мм.

Время одного оборота диаграммы 24 ч. Время прохождения указателем всей шкалы 5 или 16 с. Класс точности измерений 1,0, записи — 1,6. Габаритный чертеж показан на рис. V—19, *е*. Масса прибора 15 кг.

V.5.3.2. Показывающие и самопишущие миллиамперметры

Для работы в комплекте с преобразователями «давление — ток» могут использоваться стрелочные миллиамперметры соответствующих пределов измерений и класса точности, цифровые миллиамперметры, автоматические показывающие и самопишущие миллиамперметры.

Данные о стрелочных и цифровых миллиамперметрах приводятся в главе VIII. Автоматические миллиамперметры выпускаются в тех же конструктивных исполнениях, что и автоматические мосты и потенциометры (см. табл. IV—6), и имеют те же основные технические характеристики. В обозначения приборов введена буква «у», указывающая, что данный вторичный прибор является миллиамперметром. Соответствие обозначений приводится в табл. V—8.

Пределы измерений миллиамперметров 0—5 и 0—20 мА. Основные погрешности приведены в соответствии с табл. IV—6.

Таблица V—8. ОБОЗНАЧЕНИЯ ТИПОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗЫВАЮЩИХ И САМОПИШУЩИХ МИЛЛИАМПЕРМЕТРОВ

Назначение	Базовое обозначение	Обозначение приборов по табл. IV—6	Обозначение миллиамперметров
Показывающие	КП1 КВ1	КПП1 и КПМ1 КВП1 и КВМ1	КПУ1 КВУ1
Показывающие и самопишущие с электронной диаграммой	КС1 КС2 КС4	КСП1 и КСМ1 КСП2 и КСМ2 КСП4 и КСМ4	КСУ1 КСУ2 КСУ4

V.5.4. ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВАКУММЕТР

Теплоэлектрические вакуумметры применяют для измерения абсолютных давлений разреженных газов. Принцип действия теплоэлектрических преобразователей давления рассмотрен в п. V.2.3. Ниже приведены технические характеристики вакуумметра теплоэлектрического типа 13-ВТ3-003 (старое обозначение ВТБ-2). Вакуумметр предназначен для измерения абсолютного давления в пределах от 1,3 до $3{,}9 \cdot 10^3$ Па. Результат измерения отсчитывается по стрелочному прибору на передней панели и передается во внешние цепи в виде аналогового сигнала — напряжения постоянного тока в пределах 0—10 В.

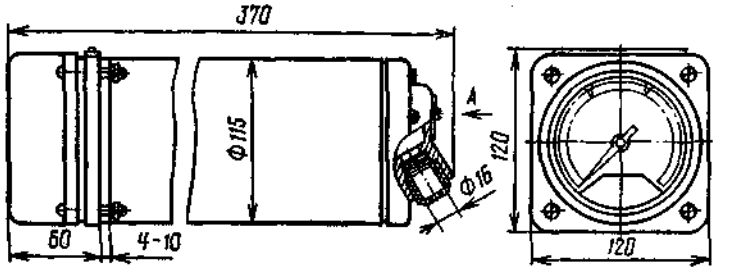
Основная относительная погрешность по аналоговому выходу в диапазоне измерения от 10 до 10^3 Па находится в пределах от —40 до +60%, по стрелочному прибору — от —50 до +70%. В качестве первичного применяется термоэлектрический преобразователь типа ПМТ-6-3. Он соединяется с измеряемым объемом с помощью штуцера грибковым уплотнением. Длина кабеля, соединяющего преобразователь с прибором, 7 м. Соединение через штепсельный разъем.

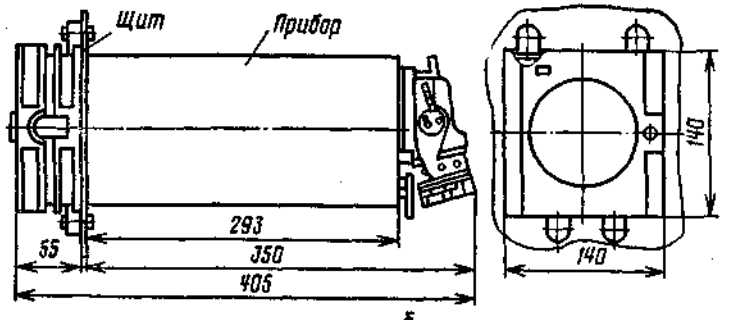
Прибор переносного типа. Габаритные размеры: измерительного блока 208×100×158 мм, преобразователя Ø 24×138,5 мм. Масса 2 кг. Питание прибора осуществляется от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 220 В. Потребляемая мощность не более 12 В·А.

V.6. СРЕДСТВА ПОВЕРКИ И ГРАДУИРОВКИ

В данном разделе приведены краткие сведения о средствах поверки и градуировки приборов измерения давления, которые могут быть использованы в лабораториях ведомственных метрологических служб предприятий, связанных с производством и эксплуатацией холодильного оборудования [1].

[1] При организации и проведении поверки следует руководствоваться соответствующими стандартами и инструкциями.





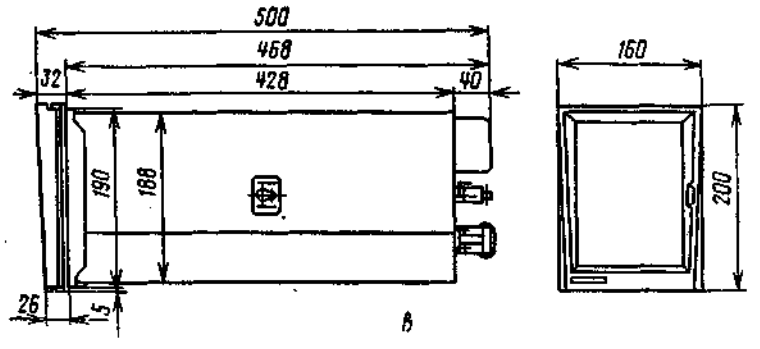
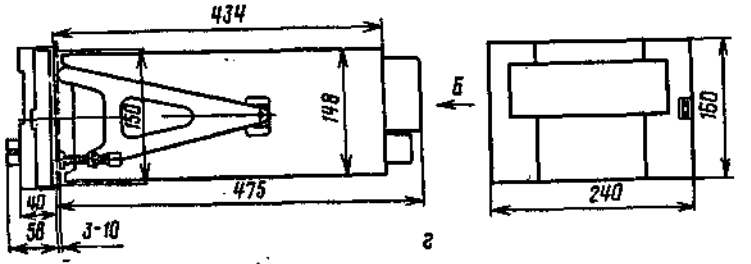
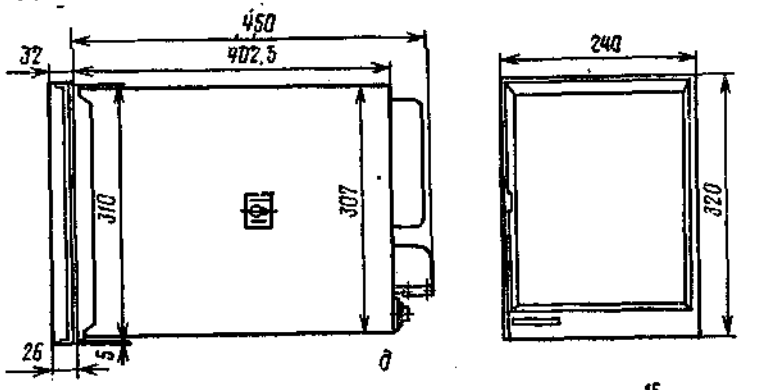
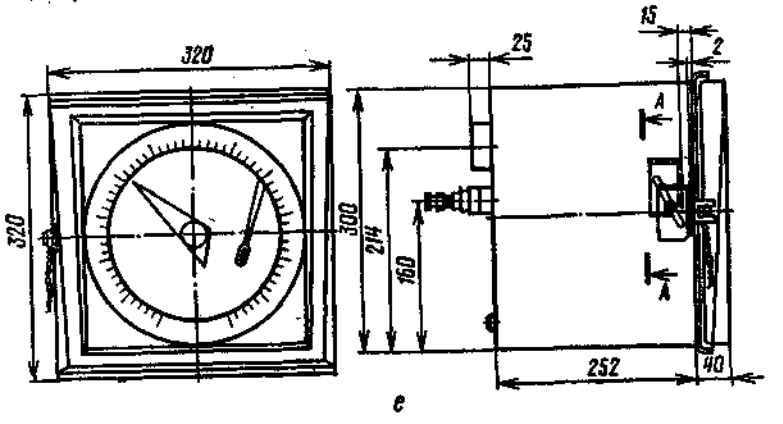


Рис. V—19. Габаритные чертежи вторичных приборов дифференциально-трансформаторной системы:
а — ВМД; *б* — КД140; *в* — КПД1 и КСД1; *г* — КВД1; *д* — КСД2; *е* — КСД3







Поверка и градуировка приборов измерения давления может осуществляться методом непосредственного сличения показателей этих приборов с показаниями образцовых средств, а также методом воспроизведения проверяемых значений давления специальными средствами.

В первом случае применяют в основном пружинные образцовые манометры, мановакуумметры и вакуумметры. Краткие сведения о них приведены в табл. V—9, а более подробные — в табл. V—3.

Таблица V—9. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВЫХ СРЕДСТВ ПОВЕРКИ И ГРАДУИРОВКИ ПРИБОРОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Наименование прибора	Тип	Пределы измерений, МПа	Класс точности
Манометр пружинный	МО	От 0 до 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,0	0,15; 0,25; 0,4
Вакуумметр пружинный	ВО	—0,1÷0	0,15; 0,25; 0,4
Манометр грузопоршневой	МП-2,5	0÷0,25	0,05
	МП-6	0÷0,6	0,05
	МП-60	0÷6	0,05
Мановакуумметр поршневой	МВП-2,5	0÷-0,25	0,05
Вакуумметр грузопоршневой *	ВП	—0,1÷0	0,02
			0,05
Автоматический задатчик давления	АЗД-2,5	0÷0,25	0,05
	АЗД-16	0÷1,6	0,05
	АЗД-60	0÷6	0,05

* По особому заказу.

Во втором случае используют грузопоршневые образцовые приборы и автоматические задатчики давления (см. табл. V—9). В этих устройствах давление в поверяемом приборе создается гидравлической системой, включающей калиброванный плунжер (поршень). Усилие на плунжер создается образцовыми грузами. В связи с этим грузопоршневые приборы могут воспроизводить дискретные величины давлений, количественные значения которых и интервал между ними определяются набором образцовых грузов.

Образцовые средства, используемые для поверок и градуировок, должны быть аттестованы и проходить государственную поверку в органах Госстандарта. При выборе образцового средства следует исходить из его основной погрешности: она не должна превышать $^1/_4$ допустимой погрешности поверяемого средства.

Глава VI

ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

VI.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Термином расход обозначают величину, равную количеству жидкого или газообразного вещества, протекающего по трубопроводу в единицу времени. Различают расходы объемный и массовый, которые выражаются соответственно в м³/с и кг/с (или в других производных единицах: м³/ч, т/ч, л/мин и т. д.).

Приборы, указывающие величину мгновенного расхода, называются расходомерами. Для измерений расхода иногда пользуются счетчиками количества и приборами времени. В этом случае средний расход определяют как частное от деления показаний счетчика на время. Расходомеры часто снабжаются интеграторами, с помощью которых можно определить количество прошедшей через трубопровод рабочей среды.

В холодильной технике измерение расхода играет важную роль при определении холодопроизводительности компрессоров и машин, производительности насосов и вентиляторов, для оценки потребления охлаждающей воды и др. Особенность измерений состоит в том, что рабочие вещества холодильных машин не всегда являются однофазными. Нередко по трубопроводам протекают парожидкостные смеси, смеси холодильных агентов с маслами. Современная техника не имеет надежных методов измерений расхода неоднофазных сред. Поэтому методы измерений и испытаний должны строиться таким образом, чтобы исключить прохождение таких сред через расходомеры и создать надежный контроль состояния, рабочей среды и условий измерений.

При измерении расхода жидкого холодильного агента необходимо обеспечить переохлаждение жидкости. Величина этого переохлаждения определяет допустимый перепад давления на преобразователе расходомера.

Эта задача формулируется так:

$$\Delta p_р \leqslant p_{вх} - p_0,$$

где $\Delta p_р$ — падение давления в расходомере; $p_{вх}$ — давление холодильного агента перед входом расходомера; p_0 — давление насыщения холодильного агента при температуре $t_{вх}+a$, где a рекомендуется принимать не менее 3 °С; $t_{вх}$ — температура переохлажденного холодильного агента перед входом расходомера.

При измерении расхода парообразного холодильного агента на выходе из испарителя во избежание погрешностей из-за выбро-

са капель неиспарившейся жидкости пар должен быть перегрет. В случае использования фреонов желательно, чтобы этот перегрев был не меньше 8—10 °С, аммиака — порядка 3—5 °С.

VI.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДА

Современная измерительная техника располагает большим числом способов преобразования расходов. В основном это преобразователи, в которых чувствительные элементы реагируют на скорость потока жидкости или газа. Лишь в счетчиках и мерных сосудах, с помощью которых измеряют количество вещества, измеряемой величиной является объем жидкости или газа за некоторый интервал времени. Преобразователи, воспринимающие расход через скорость потока, как правило, являются многоступенчатыми, т. е. расход преобразуется в некоторую промежуточную величину, которая затем в свою очередь преобразуется в величину, удобную для дальнейшего использования.

В зависимости от выходной величины первичные преобразователи разделяются на следующие виды:

преобразователи расхода в переменный перепад давления; к ним относятся сужающие устройства (диафрагмы, сопла), которые преобразуют расход в перепад давления; последний воспринимается преобразователем разности давлений (например, дифманометром). К этой группе преобразователей примыкают напорные трубки, которые преобразуют местную скорость потока в перепад давления.

преобразователи расхода в положение (высоту подъема) обтекаемого поплавка (преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления). Приборы с такими преобразователями получили название ротаметров;

тахометрические преобразователи, в которых расход преобразуется в частоту вращения крыльчатки (турбинный расходомер) или шарика (шариковый расходомер), которая измеряется с помощью частотомера;

электромагнитные преобразователи, в которых расход преобразуется в ЭДС, наводимую в самом потоке электропроводной жидкости.

Практически все типы преобразователей могут быть приспособлены для дистанционной передачи измерительной информации по электрическим линиям связи.

VI.2.1. СУЖАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Сужающие устройства предназначены для преобразования расхода в перепад давления.

Известно большое число сужающих устройств, однако широкое применение в технике измерений нашли диафрагмы и сопла. Реже используют сопла и трубы Вентури.

Принцип действия сужающего устройства состоит в том, что при прохождении жидкости через местное сужение наблюдается изменение статического давления. На рис. VI—1, *а* показана схема сужающего устройства, а на рис. VI—1, *б* — диаграмма давления

вдоль стенки трубы. Видно, что в непосредственной близости от сужающего устройства наблюдается перепад давления Δp, который является выходной величиной преобразователя и воспринимается следующей ступенью преобразования — дифманометром. Из графика также видно, что давление на выходе восстанавливается не полностью. Имеет место необратимая потеря давления $\Delta p_п$.

Уравнения для определения расхода несжимаемой жидкости имеют вид:

для объемного расхода V (м³/с)

$$V = \alpha F_0 \sqrt{2\Delta p/\rho}; \quad \text{(VI—1)}$$

для массового расхода m_t (кг/с)

$$m_t = \alpha F_0 \sqrt{2\rho\Delta p}, \quad \text{(VI—2)}$$

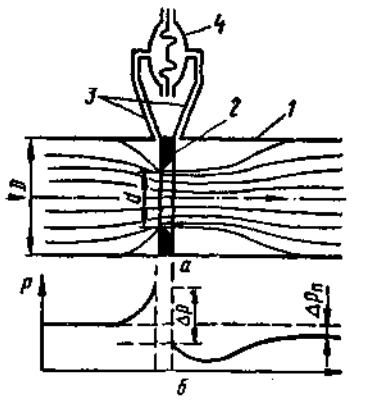


Рис. VI—1. Схема (*а*) и диаграмма давления (*б*) сужающего устройства:

1 — труба; *2* — сужающее устройство; *3* — трубки отбора давлений; *4* — дифманометр

где α — коэффициент расхода; F_0 — площадь отверстия сужающего устройства, м²; ρ — плотность измеряемой среды, кг/м³; Δp — перепад давления, Па.

Если измеряется расход сжимаемой среды (пар, газ), то уравнения (VI—1) и (VI—2) имеют вид:

$$V = \alpha\varepsilon F_0 \sqrt{2\Delta p/\rho}; \quad \text{(VI—3)}$$

$$m_t = \alpha\varepsilon F_0 \sqrt{2\rho\Delta p}, \quad \text{(VI—4)}$$

где ε — коэффициент расширения.

Важное значение при расчете сужающих устройств имеет величина $m = (d/D)^2$, где d — диаметр отверстия сужающего устройства; D — диаметр трубопровода. Величина m называется относительной площадью, или модулем, сужающего устройства.

Сужающие устройства подразделяют на стандартные, или нормальные, и нестандартные. Выбор и расчет стандартных сужающих устройств регламентирован Правилами измерения расхода [63]. Выполненные в соответствии с Правилами сужающие устройства имеют заданные метрологические характеристики и не нуждаются в экспериментальной поверке. Нестандартные сужающие устройства рассчитываются тем же путем, однако их расчетные погрешности не могут быть гарантированы без соответствующей экспериментальной поверки [11].

VI.2.1.1. Расчет стандартных сужающих устройств

В соответствии с Правилами стандартные сужающие устройства должны удовлетворять требованиям, приведенным в табл. VI—1.

Таблица VI—1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СУЖАЮЩИМ УСТРОЙСТВАМ

Вид сужающего устройства	Диаметр трубопровода D, мм		Относительная площадь m		Минимально допустимый диаметр отверстия, мм
	минимальный	максимальный	минимальная	максимальная	
Диафрагма					
с угловым способом отбора	50	1000	0,05	0,64	12,5
с фланцевым способом отбора	50	760	0,04	0,56	12,5
Сопло					
для измерения расхода газа	50	Неограничен	0,05	0,64	15
для измерения расхода жидкости	30	То же	0,05	0,64	15
Сопло Вентури	65	500	0,05	0,60	15
Труба Вентури	50	1400	0,1	0,60	15

Если расходомер заказывается на заводе-изготовителе, то обычно сужающее устройство изготовляется и поставляется в комплекте с дифманометром. Расчет сужающего устройства осуществляется заводом-изготовителем по опросному листу, составляемому заказчиком. При этом обусловливаются основные параметры измеряемой среды и условия измерений. Если в реальной эксплуатации эти параметры и условия будут изменены, то градуировка расходомера должна быть пересчитана в соответствии с формулами (VI—1)—(VI—4). Следует иметь в виду, что в комплекте с дифманометрами поставляются только диафрагмы, что несколько сужает возможности данного способа измерений.

Наряду с этим в практике измерений находят широкое применение нормальные сужающие устройства, рассчитанные и изготовленные на месте, силами организаций, выполняющих измерения.

Выбор сужающего устройства ведут, исходя из следующих соображений:

измерение тем точнее, чем меньше величина m;

уменьшение m при прочих равных условиях обеспечивает бо́льшие перепады давления;

чем больше перепад давления, тем больше необратимые потери давления;

потеря давления в сужающих устройствах при одних и тех же m уменьшается в следующей последовательности: диафрагма, сопло, короткое сопло Вентури, длинное сопло Вентури, труба Вентури;

точность измерения повышается в той же последовательности;

сложность и стоимость сужающего устройства повышаются в той же последовательности.

Исходя из приведенных соображений, целесообразно начинать расчет с выбора диафрагмы и лишь в том случае, когда результаты расчета окажутся неудовлетворительными, переходить к другим, более сложным сужающим устройствам. Исключение составляют случаи, когда заведомо известно о непригодности того или иного сужающего устройства. О потерях давления можно судить по графику (рис. VI—2).

Правила [63] определяют порядок расчета, который схематически сводится к следующему. Если задана допустимая потеря давления $\Delta p_{п.д}$ в сужающем устройстве при расходе V_{max}, то при измерении расхода жидкости находят вспомогательную величину C:

$$C = V_{max}\sqrt{\rho}/(0{,}01252D^2),$$

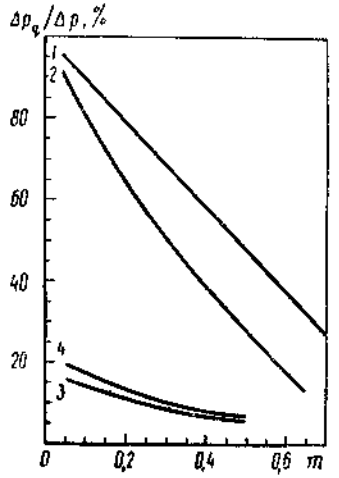


Рис. VI—2. Потеря давления в сужающем устройстве:
1 — диафрагма; *2* — сопло; *3* — длинное сопло Вентури; *4* — короткое сопло Вентури

где V_{max} — предельный расчетный расход, м³/ч; ρ — плотность, кг/м³; D — диаметр трубопровода, мм.

Приведенные в Правилах номограммы позволяют по величинам $\Delta p_{п.д}$ и C найти величину номинального перепада давления $\Delta p_н$, соответствующую расходу V_{max}, и приближенный модуль.

По приближенному значению m выясняют, лежит ли число Рейнольдса Re в допустимых пределах.

Для этого вычисляют Re:

$$\mathrm{Re} = 0{,}0361\frac{V_{ср}}{D\mu} = 0{,}354\frac{V_{ср}\rho}{D\nu}, \qquad (VI—5)$$

где $V_{ср}$ — среднее значение расхода, м³/ч; μ — динамическая вязкость, кгс·с/м²; ν — кинематическая вязкость, м²/с.

Расчет продолжают, если значение Re лежит в пределах, указанных в табл. VI—2. Если Re меньше минимально допустимого значения, то это обозначает, что данный метод измерений в заданных условиях неприменим. Возможный путь — уменьшение диаметра трубопровода. Продолжая расчет, по величине $\Delta p_н$ подбирают соответствующий дифманометр (величину $\Delta p_н$ принимают за верхний предел измерения перепада давления).

Вычисляют вспомогательную величину

$$m\alpha = C'\sqrt{\Delta p_н}. \qquad (VI—6)$$

Коэффициент расхода α находят по соответствующим таблицам, приведенным в Правилах, либо по формулам, приведенным в

Таблица VI—2. РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА И ДОПУСТИМЫЕ ПРЕДЕЛЫ ЧИСЛА Re

Вид сужающего устройства	Формула коэффициента расхода	Пределы числа Рейнольдса
Диафрагма с угловым способом отбора	$\alpha_y = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}}[0{,}5959+0{,}0312m^{1{,}05}-0{,}1840m^4+0{,}0029m^{1{,}25}\times\left(\frac{10^6}{\mathrm{Re}}\right)^{0{,}75}]$	Для $0{,}05\leqslant m\leqslant 0{,}20$ $5\cdot10^3\leqslant\mathrm{Re}\leqslant10^8$; для $0{,}20\leqslant m\leqslant 0{,}59$ $10^4\leqslant\mathrm{Re}\leqslant10^8$; для $0{,}59\leqslant m\leqslant 0{,}64$ $2\cdot10^4\leqslant\mathrm{Re}\leqslant10^8$
Диафрагма с фланцевым способом отбора	$\alpha_\Phi=\alpha_y+\frac{1}{\sqrt{1-m^2}}[0{,}091_1m^2(1-m^2)^{-1}-0{,}0337l_2m^{1{,}5}]$ $l_1=0{,}4333$ при $D>58{,}62$ мм; $D\leqslant58{,}62$ мм, $l_1=25{,}4/D$	$1260mD\leqslant\mathrm{Re}\leqslant10^8$
Сопло и сопло Вентури	$\alpha_c=\left[\frac{1}{\sqrt{1-m^2}}[0{,}99-0{,}2262m^{2{,}05}+(0{,}000215-0{,}001125m^{0{,}5}+0{,}00249m^{2{,}35})\left(\frac{10^6}{\mathrm{Re}}\right)^{1{,}15}\right]$	Для $0{,}05\leqslant m\leqslant 0{,}20$ $7\cdot10^4\leqslant\mathrm{Re}\leqslant2\cdot10^6$; для $0{,}20\leqslant m\leqslant 0{,}6$ $2\cdot10^4\leqslant\mathrm{Re}\leqslant2\cdot10^6$
Труба Вентури	$\alpha_T=\frac{0{,}985}{\sqrt{1-m^2}}$ (с точностью $\pm1\%$ при $0{,}1\leqslant m\leqslant0{,}6$)	$1\cdot10^5\leqslant\mathrm{Re}\leqslant2\cdot10^6$

табл. VI—2. Далее находят точное значение величины m, деля результат вычисления по формуле (VI—6) на α.

Искомый диаметр отверстия вычисляют по формуле

$$d_{20}=\frac{D}{K_t}\sqrt{m},$$

где d_{20} — диаметр отверстия при $t=20$ °С, мм; K_t — поправочный множитель на тепловое расширение материала сужающего устройства; приводится в таблицах [63].

Расчет сужающих устройств для газообразных сред проводят аналогичным путем, однако вспомогательную величину C вычисляют с учетом приведения параметров газа к нормальному состоянию ($t=20$ °С, $p_{абс}=760$ мм рт. ст.):

$$C=\frac{V_{ном}}{0{,}2109D^2}\sqrt{\frac{\rho_{ном}TK}{p}},$$

где $V_{ном}$ — объемный расход газа в нормальном состоянии, м³/ч; $\rho_{ном}$ — плотность сухого газа в нормальном состоянии, кг/м³; T — абсолютная температура перед сужающим устройством, К; K — коэффициент сжимаемости газа:

$$K=\frac{pv}{(pv)_0}\cdot\frac{273{,}2}{T},$$

p — абсолютное давление, Па; v — удельный объем, м³/кг; $(pv)_0$ — произведение при $t=0$ °С, $p=101{,}3\cdot10^3$ Па (760 мм рт. ст.).

Пользуясь номограммами [63], находят, как в предыдущем случае, приближенную величину m и перепад давления Δp, а также коэффициент расхода α. Далее определяют Re и сравнивают с предельными значениями (табл. VI—2). Если Re находится в допустимых пределах, расчет продолжают.

Затем производят последовательно вычисления величин $m\alpha$:

$$(m\alpha)_1=\frac{C}{\varepsilon_1\sqrt{\Delta p}}.$$

Коэффициент ε_1 определяют по таблицам [63], построенным в зависимости от отношения $\Delta p/p$, модуля m и показателя адиабаты газа. При этом берут приближенное значение m. Делят $(m\alpha)_1$ на α и получают точное значение m_1. Для него находят ε_2. Если $\varepsilon_1-\varepsilon_2\leqslant0{,}0005$, то расчет заканчивают: m_1 и ε_2 принимают за окончательные результаты. Если $\varepsilon_1-\varepsilon_2>0{,}0005$, то находят новую величину:

$$(m\alpha)_2=\frac{C}{\varepsilon_2\sqrt{\Delta p}}.$$

Вновь определяют точные m_2 и ε_3 и проверяют условие $\varepsilon_2-\varepsilon_3\leqslant0{,}0005$. Если оно выполняется, то результаты m_2 и ε_2 принимают за окончательные. Если условие не выполняется, расчет продолжают дальше, пока разность не станет меньше 0,0005. По за-

вершении расчета рекомендуется провести проверку результатов по формулам (VI—1)—(VI—4).

Важное значение для обеспечения измерения с заданной погрешностью имеют соблюдение конструктивных размеров сужающих устройств и правильность их монтажа на трубопроводах. Конструктивные размеры сужающих устройств приведены в Правилах.

Особое внимание следует уделять устройству прямых участков до сужающих устройств и после них. Длина прямого участка до сужающего устройства зависит от характера местных сопротивлений и модуля m. При малых m достаточной оказывается длина прямого участка до сужающего устройства $(15\div20)D$, в то время как для больших m эта величина может достигать $(80\div100)D$. Длина прямого участка после сужающего устройства зависит только от величины m. Для $m=0{,}05$ эта длина должна быть не менее $4D$, а для $m=0{,}64$ — не менее $8{,}2D$. Более точные сведения приводятся в специальных таблицах и графиках [63, 65].

Измерение сужающими устройствами сопровождается суммарной (методической и инструментальной) погрешностью, предельное значение которой можно вычислить по формулам:

для жидкости

$$\sigma_v = 2\sqrt{\sigma_\alpha^2+\sigma_{\text{Re}}^2+\sigma_{\text{дм}}^2+25\sigma_\rho^2};$$

для газа

$$\sigma_v = 2\sqrt{\sigma_\alpha^2+\sigma_\varepsilon^2+\sigma_{\text{Re}}^2+\sigma_{\text{дм}}^2+0{,}25\left(\sigma_\rho^2+\sigma_p^2+\sigma_T^2+\sigma_K^2\right)},$$

где величины σ — средние квадратические относительные погрешности соответствующих величин, обозначенных индексами: α — коэффициента расхода; ε — коэффициента расширения; Re — коэффициента коррекции на число Рейнольдса; дм — дифманометра; ρ — плотности; p — давления; T — температуры; K — коэффициента сжимаемости. В Правилах приведены формулы для определения каждой из составляющих.

Если в качестве примера взять диафрагму с $m=0{,}2$ и $\alpha=0{,}8$ при достаточно большом Re $\left(\sigma_{\text{Re}}^2=0\right)$ и принять $\sigma_{\text{дм}}=1\%$ $\left(\sigma_{\text{дм}}^2=1\right)$, $\sigma_\rho=1\%$ $\left(\sigma_\rho^2=1\right)$, то σ_α, вычисленная по рекомендуемой Правилами формуле, составит $\sigma_\alpha=0{,}31$ $\left(\sigma_\alpha^2=0{,}1\right)$, а предельная погрешность

$$\delta_v = 2\sqrt{0{,}1^2+0+1^2+0{,}25\cdot1^2}=2{,}3\%.$$

Особым случаем является применение сопел на трубопроводах диаметром 30 мм$\leqslant D\leqslant$50 мм. В этом случае средняя квадратическая погрешность коэффициента расхода

$$\sigma_\alpha = \sigma_{\alpha_{50}}+1{,}5-0{,}03D, \qquad \text{(VI—7)}$$

где $\sigma_{\alpha_{50}}$ — погрешность коэффициента расхода сопла при его установке на трубопровод диаметром 50 мм.

Из формулы (VI—7) следует, что при $D=30$ мм погрешность увеличивается на 0,6% по сравнению с $\sigma_{\alpha_{50}}$.

VI.2.1.2. Расчет нестандартных сужающих устройств

Нестандартные сужающие устройства применяют, когда диаметр трубопровода и число Рейнольдса не удовлетворяют требованиям, приведенным в табл. VI—1 и VI—2.

Известно несколько типов нестандартных сужающих устройств, однако наибольшее признание получило сопло с профилем в четверть окружности, или, как его называют, сопло «четверть круга». По данным [42, 65], это сопло характеризуется наиболее постоянным коэффициентом расхода в достаточно широком диапазоне чисел Re.

На графике (рис. VI—3, *а*) показана экспериментальная зависимость коэффициента расхода α от модуля m (последний лежит в пределах $0{,}05\leqslant m\leqslant0{,}49$). На этом же графике приведена кривая рекомендуемых величин r/d (r — радиус профиля сопла). На рис. VI—3, *б* и *в* показаны профили сопел «четверть круга» для случаев, когда радиус равен толщине сопла E (*б*) и когда он больше E (*в*).

На основании обобщений многочисленных экспериментальных данных П. П. Кремлевский [42] рекомендует ограничить нижний предел числа Рейнольдса $\text{Re}_{\min}\geqslant(3\div5)10^3$, а верхний $\text{Re}_{\max}\leqslant10^5$.

Расчет сопла может быть выполнен в следующем порядке:

а) проверяют по формуле (VI—5) величину Re и убеждаются, что она не выходит за пределы рекомендуемых $\text{Re}_{\min}$ и $\text{Re}_{\max}$;

б) задаются величиной перепада давления Δp;

в) по формуле (VI—1) или (VI—2) находят величину $m\alpha$, подставляя $F_0=\pi d^2/4=(\pi/4)mD^2$:

$$m\alpha = \frac{4V}{\pi D^2}\sqrt{\frac{\rho}{2\Delta p}};$$

г) с помощью графика (см. рис. VI—3, *а*) по значению $m\alpha$ находят приближенное m и соответствующее ему α;

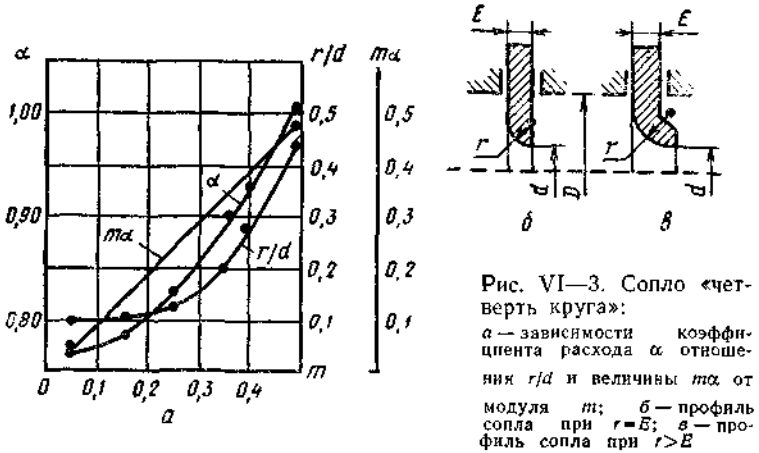


Рис. VI—3. Сопло «четверть круга»:
а — зависимости коэффициента расхода α отношения r/d и величины $m\alpha$ от модуля m; *б* — профиль сопла при $r=E$; *в* — профиль сопла при $r>E$

д) из формулы (VI—6), подставляя найденное a, определяют точное значение m и по нему — d;

е) по графику находят отношение r/d и соответствующее ему значение r.

Если измеряется расход газа, то поправочный множитель на расширение ε может быть найден по формулам, приводимым в [63] для стандартных сопел. По сведениям, приводимым в [42], при испытаниях сопел «четверть круга» при диаметрах труб от 12 до 50 мм и m в пределах 0,06—0,36 погрешность α не превышала $\pm 2\%$. Заметим, что изготовление сопел «четверть круга» представляет известные технологические трудности, так как допустимые отклонения от заданного профиля составляют около 10 мкм. Задний срез сопла должен быть тщательно отполирован.

VI.2.2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ОБТЕКАНИЯ С ПОСТОЯННЫМ ПЕРЕПАДОМ ДАВЛЕНИЯ

Преобразователем обтекания называют средство измерения, в котором расход жидкости или газа преобразуется в перемещение поплавка (поршня, диска). При этом перепад давления на чувствительном элементе остается приблизительно постоянным. Преобразователи обтекания являются основой расходомеров, называемых ротаметрами.

Принцип действия преобразователя поясняется схемами (*рис. VI—4*). *Поплавок 1 (рис. VI—4, а) помещается в мерный* конус *2*, длина которого зависит от заданного перемещения. Если преобразователь предназначен для непосредственного отсчета расхода, то он выполняется в виде конусной стеклянной трубы, на поверхность которой наносят условные деления. Поплавок такого преобразователя свободный. Верхняя его часть — мидель, имеющая наибольшее поперечное сечение, образует кольцевой зазор со стенкой конуса. Поток жидкости или газа увлекает поплавок, поднимая

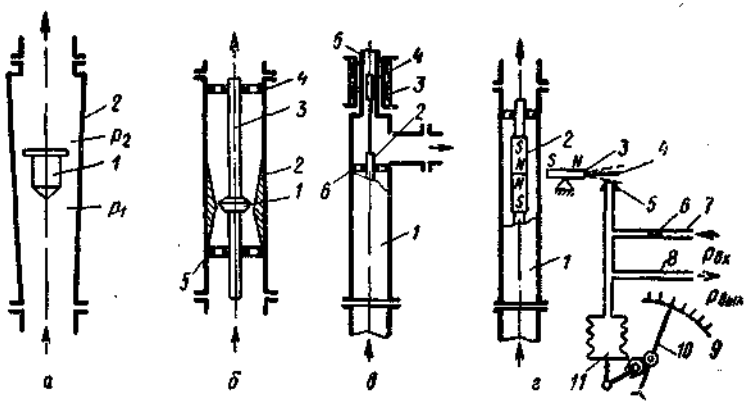


Рис. VI—4. Упрощенные схемы преобразователей обтекания:
а — со свободным поплавком; *б* — с центрированным поплавком; *в* — с электрическим дифференциальным трансформатором; *г* — с пневматической передачей

его вверх. При перемещении вверх сила, создаваемая динамической составляющей перепада давления на носовую часть поплавка и зависящая от кольцевого зазора, превышает силу тяжести поплавка. Поплавок приходит в равновесие, когда эти силы уравновесятся. Ход поплавка в таких преобразователях составляет до 500 мм.

Из теории преобразователей обтекания следует, что перепад давления непосредственно на поплавке $\Delta p = p_1 - p_2$ с перемещением поплавка почти не меняется (точнее, несколько уменьшается). По этой причине такие преобразователи относят к приборам постоянного перепада давления.

В преобразователях, предназначенных для работы в электрических или пневматических системах, применяют центрированные поплавки или диски с малым ходом (рис. V—4, *б*). Поплавок *1*, укрепленный на штоке *3*, перемещается в мерном конусе *2*. Шток центрируется в перфорированных направляющих *4* и *5*.

Статическая функция преобразования может быть представлена в виде [12]

$$\frac{x}{d}\left(1+\frac{x}{d}\operatorname{tg}\frac{\Theta}{2}\right)=\frac{1}{\beta}\,\frac{V}{4fl\operatorname{tg}(\Theta/2)\sqrt{2gl_{\text{п}}\varkappa}}, \qquad \text{(VI—8)}$$

где x — перемещение поплавка; d — минимальный начальный диаметр конуса; Θ — угол конусности трубки; β — коэффициент, зависящий от формы поплавка и числа Re; f — наибольшая площадь поплавка; $l_{\text{п}}$ — длина поплавка; $\varkappa$ — параметр; $\varkappa=(\rho_{\text{п}}/\rho)-1$, $\rho_{\text{п}}$ — плотность материала поплавка; ρ — плотность измеряемой среды.

Опыт показывает [12, 42], что попытки практически использовать функцию (VI—8) для стандартизации расчета преобразователей обтекания не приводят к надежным результатам. Поэтому общепринято преобразователи этого типа подвергать индивидуальной градуировке. Градуировку осуществляют, как правило, на воде или воздухе. Результаты градуировок приводят в паспортах на конкретные средства измерений в виде таблиц и графиков. При использовании преобразователей на средах, отличных от градуировочных, производят пересчет характеристик. Существует целый ряд методов пересчета характеристик.

Один из методов базируется на формуле

$$V = V_{\text{гр}}\sqrt{\frac{C_x(\rho_{\text{п}}-\rho)\rho_{\text{гр}}}{C_{x_{\text{гр}}}(\rho_{\text{п}}-\rho_{\text{гр}})\rho}}, \qquad \text{(VI—9)}$$

где V — объемный расход измеряемой жидкости; $V_{\text{гр}}$ — объемный расход градуировочной жидкости; $\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{гр}}$ и ρ — плотности соответственно материала поплавка, градуировочной и измеряемой жидкостей; $C_{x_{\text{гр}}}$ и C_x — коэффициенты сопротивления поплавка при протекании градуировочной и измеряемой жидкостей.

Коэффициенты $C_{x_{\text{гр}}}$ и C_x определяют для любого значения расхода по таблицам и формулам, приводимым в описаниях и паспортах конкретных приборов.

Для случаев, когда вязкости градуировочной и измеряемой жидкостей близки, отношение коэффициентов сопротивления $C_x/C_{x_{\text{гр}}}$ мало отличается от единицы.

Тогда формула (VI—9) упрощается:

$$V = V_{тр}\sqrt{\frac{(\rho_п - \rho)\rho_{тр}}{(\rho_п - \rho_{тр})\rho}}.$$

Преобразователи с малым ходом поплавка (см. рис. VI—4, *б*) часто снабжаются устройствами для преобразования перемещения поплавка в электрический или пневматический сигнал. Поскольку в этом случае нет необходимости непосредственно наблюдать за поплавком, корпуса таких преобразователей изготовляют из металла, что позволяет значительно поднять рабочие давления.

Схема электрического преобразователя обтекания приведена на рис. VI—4, *в*. Центрированный поплавок находится в корпусе *1*, в который снизу подводится измеряемая жидкость. Шток *2* поплавка центрируется направляющей *6*. К штоку прикреплен ферромагнитный сердечник *4*, находящийся внутри трубки *5* из немагнитного материала. На эту трубку снаружи надета катушка *3* дифференциального трансформатора (см. п. V.3.3). Перемещение сердечника приводит к изменению величины и фазы напряжения на вторичной обмотке трансформатора. В комплекте с таким преобразователем работает вторичный прибор дифференциально-трансформаторной системы (см. п. V.5.3.1). Преобразователь, укомплектованный дифференциальным трансформатором, называется электрическим ротаметром.

Достаточно широко используют и преобразователь пневматического типа, упрощенная схема которого приведена на рис. VI—4, *г*. В немагнитном корпусе *1* на штоке поплавка смонтирован блок из двух встречно направленных постоянных магнитов *2*. В поле этих магнитов вне корпуса расположен следящий магнит *3*, положение которого зависит от положения поплавка. С увеличением расхода (поплавок поднимается) следящий магнит поворачивается по часовой стрелке и опускает вниз заслонку *4*. Последняя работает совместно с соплом *5*: чем ближе заслонка подходит к соплу, тем большее сопротивление оказывается воздуху, вытекающему в атмосферу из сопла. Сжатый воздух с давлением $p_{вх}$ подводится к штуцеру *7* и проходит через дроссель *6*. Выходное управляющее давление $p_{вых}$ зависит от положения заслонки: оно тем выше, чем ближе заслонка подводится к соплу. Давление $p_{вых}$ выводится во внешнюю сеть через штуцер *8*, а также действует на сильфон *11*, который, растягиваясь, через передаточный механизм переворачивает указательную стрелку *10*. С ее помощью расход непосредственно отсчитывается по шкале *9*.

VI.2.3. ТАХОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Тахометрическим называют преобразователь объемного расхода (скорости потока) в частоту вращения ротора, которая в свою очередь преобразуется в частоту следования электрических импульсов.

В зависимости от вида вращающегося элемента тахометрические преобразователи подразделяются на крыльчатые и шариковые.

VI.2.3.1. Крыльчатые преобразователи

Такие преобразователи имеют ротор в виде осевой либо тангенциальной крыльчатки. В преобразователях с осевой крыльчаткой, или турбинных преобразователях, ось вращения ротора совпадает с направлением потока. В тангенциальных преобразователях ось вращения перпендикулярна направлению потока.

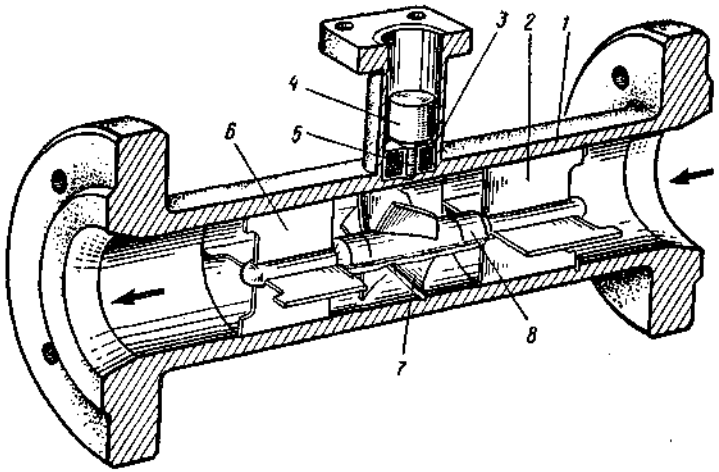


Рис. VI—5. Крыльчатый (турбинный) преобразователь расхода:
1 — корпус; *2* — передняя направляющая; *3* — катушка датчика; *4* — постоянный магнит; *5* — сердечник; *6* — задняя направляющая; *7* — крыльчатка; *8* — ступица

Наибольшее распространение получил турбинный преобразователь, одно из конструктивных исполнений которого показано на рис. VI—5. Ротор представляет собой винтовую крыльчатку *7*, изготовленную заодно со ступицей *8*. Ось крыльчатки опирается на подшипники, расположенные во входной *2* и выходной *6* направляющих. Проточная часть преобразователя размещается внутри цилиндрического корпуса *1* с фланцами или другими приспособлениями для присоединения к трубопроводу. Вне корпуса размещается индуктивный датчик, состоящий из постоянного магнита *4*, сердечника *5* и катушки *3*. Крыльчатку (или концы крыльев) выполняют из ферромагнитного материала, а корпус — из немагнитного материала (коррозиестойкая сталь или цветной металл).

При движении измеряемой жидкости (газа) крыльчатка вращается, в результате чего периодически m раз за 1 оборот (m — число крыльев) в поле датчика оказывается стальное крыло. Соответственно в катушке индуктируется m импульсов за 1 оборот. Частота импульсов f (Гц)

$$f = mn,$$

где n — частота вращения ротора (об/с); является выходной величиной преобразователя.

В общем виде функция преобразования записывается в виде

$$f = AV,$$

где A — параметр, зависящий от конструктивных характеристик преобразователя и свойств измеряемой среды.

При идеально выполненной винтовой крыльчатке и отсутствии других влияний частота следования импульсов

$$f_и = mV/(FH),$$

где F — площадь сечения потока в зоне крыльчатки; H — шаг винта крыльчатки.

В действительности частота f отклоняется от идеальной $f_и$ из-за скольжения ротора относительно потока:

$$f = \frac{mV}{FH}(1 - s),$$

где s — скольжение $\left(s = \frac{f_и - f}{f_и}\right)$.

В связи с этим стабильность характеристик преобразователей зависит от отклонений величины s от номинальной.

Основными величинами, влияющими на скольжение, являются число Re и момент сопротивления вращению M_c. Характер влияния Re иллюстрируется графиком (рис. VI—6), на котором приведена экспериментальная зависимость критерия nD^2/V от Re для реального преобразователя с $D=25$ мм [42]. Поскольку $D=\text{const}$, то данный критерий характеризует чувствительность преобразователя n/V. Видно, что при постоянном расходе увеличение вязкости среды, приводящее к уменьшению Re, вызывает заметное снижение чувствительности преобразователя при $\text{Re}<10^3$. Как и в других видах расходомеров, наряду с ограничением по вязкости число Re ограничивает и минимальный расход V_{min}, при котором еще обеспечиваются заданные точностные показатели. Существенное значение имеет момент сопротивления M_c. Основными элементами, которые могут вызвать изменение характеристик преобразователя, являются подшипники. Из схемы преобразователя видно, что подшипники воспринимают как радиальную, так и в большей степени осевую нагрузку, вызываемую осевой составляющей динамического давления жидкости на крылья. Поэтому при создании крыльчатых преобразователей большое внимание уделяется конструкции подшипников и их износостойкости.

Наряду с применением более совершенных конструкций подшипников выпускаются преобразователи, в которые введены элементы, создающие осевые силы обратного направления и таким образом разгружающие упорные подшипники [12].

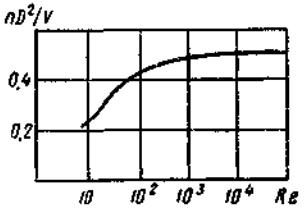


Рис. VI—6. Зависимость параметра nD^2/V от Re для крыльчатого преобразователя расхода

Следует принимать во внимание что только в самых крупных преобразователях ($D>100\div150$ мм) применяются закрытые подшипники с принудительной смазкой. В остальных случаях применяемые подшипники скольжения работают без смазки либо смазываются измеряемой жидкостью. Подшипники склонны к загрязнению, которое может резко увеличить момент сопротивления. Загрязнение приводит также к ускоренному износу пары трения, появлению увеличенных зазоров и перекосов, что в свою очередь может вызвать касание ротора и корпуса.

Сохранение метрологических характеристик требует повышенного внимания к условиям эксплуатации, особенно к чистоте измеряемой среды. Кроме того, преобразователи этого типа требуют достаточно коротких межповерочных интервалов.

Для обеспечения точности измерений крыльчатые преобразователи требуют, чтобы измерительный участок был изготовлен из труб с внутренним диаметром, равным внутреннему диаметру корпуса D. Длина измерительного участка до преобразователя должна быть не менее $10D$, после него — не менее $5D$. Переход от труб большего диаметра к измерительному участку должен осуществляться через конусные патрубки.

К преимуществам крыльчатых преобразователей можно отнести:

широкий диапазон диаметров трубопроводов (от 3—4 мм и даже меньше до 500 мм и более);

широкий диапазон измерений; отношение V_{max}/V_{min} доходит до 10 и более;

относительно высокую точность; даже у промышленных образцов погрешность составляет $\pm(0{,}5\div1{,}0)\,\%$.

Основные их недостатки следующие:

невысокий ресурс (порядка 500 ч, в некоторых конструкциях выше);

сравнительно высокая потеря давления, которая на максимальных расходах доходит до 0,02—0,03 МПа.

VI.2.3.2. Шариковые преобразователи

Эти преобразователи обладают тем отличием, что роль ротора выполняет катящийся шарик, в результате чего в преобразователях такого типа опоры вообще отсутствуют. Шарик вращается в кольцевой камере, или лотке, куда подается измеряемый поток. Предварительно потоку придают вращательное движение. Тангенциальная составляющая скорости приводит поток, проходящий через кольцевую камеру, во вращение. В результате поток увлекает с собой шарик. Частота вращения шарика в определенном диапазоне пропорциональна расходу.

Две основные схемы шариковых преобразователей представлены на рис. VI—7. В преобразователе (рис. VI—7, *а*) поток закручи-

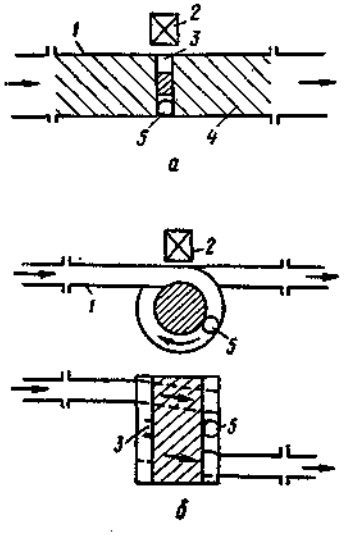


Рис. VI—7. Схемы шариковых преобразователей расхода:

а — с неподвижным направляющим аппаратом; *б* — со спиральной закруткой потока; *1* — корпус; *2* — электрический датчик; *3* — кольцевая камера; *4* — направляющий аппарат; *5* — шарик

вается с помощью неподвижного направляющего аппарата *4*. Тангенциальная составляющая создает вращающийся поток в кольцевой камере *3* и заставляет вращаться шарик *5* в плоскости, перпендикулярной оси трубопровода. Преобразователи по этой схеме в основном используют для трубопроводов больших диаметров.

Схема (рис. VI—7, *б*) относится к преобразователю, в котором весь поток закручивается по спирали сверху вниз, охватывая при этом кольцевую камеру *3*. Поток вращает шарик *5* в плоскости, параллельной оси трубопровода.

В обоих случаях выходной сигнал в виде последовательности импульсов создается индуктивным или дифференциально-трансформаторным датчиком *2*. Для этого шарик должен быть изготовлен из ферромагнитного материала либо содержать такой материал. Корпус преобразователя изготовляют из немагнитного материала.

Теория шариковых преобразователей разработана недостаточно. Экспериментальные исследования [80] показывают значительное влияние вязкости и плотности измеряемой жидкости на характеристику преобразователя. Так, при изменении плотности от 0,8 до 1,3 г/см^3 и вязкости от 0,7 до 12 сСт изменение градуировки составило около 30%. Так же как и другие, шариковый преобразователь требует устройства прямолинейных участков до и после него по $(5 \div 10)D$. К достоинствам шариковых преобразователей относятся простота и надежность конструкции (вероятность безотказной работы за 2000 ч составляет 0,95—0,97), возможность измерять малые расходы (начиная от 0,01—0,025 м^3/ч) в трубопроводах диаметром от 3 мм. При этом погрешность измерений в верхней половине диапазона измерений не превышает $\pm 1{,}5\%$. Основной недостаток — сравнительно высокая потеря давления (до 0,05 МПа при наибольшем расходе).

VI.2.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электромагнитным называют преобразователь, в котором движущаяся электропроводная жидкость взаимодействует с приложенным магнитным полем, в результате чего в жидкости наводится ЭДС, пропорциональная скорости потока. Наведенная ЭДС выводится во внешнюю цепь, где измеряется прибором, отградуированным в единицах расхода.

Принципиальным требованием для данного преобразователя [80] является величина удельной электропроводности жидкости, которая должна быть не меньше 10^{-5}—10^{-3} См/м *. Это обстоятельство накладывает существенные ограничения на применение таких преобразователей в холодильной технике. Удельная электропроводность наиболее распространенных холодильных агентов (аммиак, R12 и др.) при комнатных температурах лежит в пределах 10^{-5}—10^{-11} См/м [6]. Следовательно, область применения включает лишь воду и некоторые растворы.

Принцип действия электромагнитного расходомера поясняется рис. VI—8. Труба *T*, через которую протекает измеряемая жидкость, охвачена магнитопроводом *M* с обмоткой *O*, питаемой напряжением *U*.

* Единица удельной электропроводности — сименс на метр (См/м). То же, что 1/Ом·м.

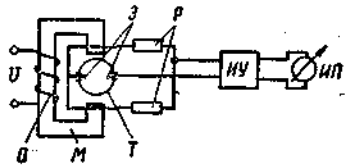


Рис. VI—8. Схема электромагнитного преобразователя расхода

Труба изготовлена из немагнитного материала (чаще всего коррозиестойкая сталь), в результате чего магнитный поток между полюсами магнитопровода пронизывает трубу и протекающую по ней жидкость.

В результате в жидкости наводится ЭДС, которая снимается изолированными электродами *Э* и отводится к измерительному устройству *ИУ* с измерительным прибором *ИП*. В схему включены резисторы *Р*, предназначенные для компенсации наводок. В соответствии с законом электромагнитной индукции наведенная ЭДС определяется из уравнения

$$e = kBwD,$$

где k — коэффициент, зависящий от конструкции преобразователя; B — магнитная индукция; w — скорость потока; D — внутренний диаметр трубы.

Величина ЭДС не зависит от параметров контролируемой жидкости (вязкости, температуры, химического состава, плотности).

Питание электромагнита может осуществляться как постоянным, так и переменным током. Преобразователи с питанием постоянным током более защищены от помех, однако подвержены поляризации электродов. Преобразователи переменного тока, наоборот, менее устойчивы к помехам, однако не подвержены поляризации. Такие преобразователи получили преимущественное распространение.

Электромагнитные преобразователи обладают рядом важных достоинств: малая потеря давления; широкий диапазон диаметров труб (от 10 до 1000 мм); широкий диапазон измерения расхода; возможность измерения расхода вязких, загрязненных и агрессивных сред. Основные недостатки их: сравнительно невысокая точность (порядка 2—3%), ограниченная область измеряемых сред (жидкости с достаточной электропроводностью).

VI.2.5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ОБЪЕМНЫХ СЧЕТЧИКОВ

Преобразователи этого типа содержат вращающиеся элементы, отсекающие определенные объемы измеряемой среды и переводящие их от входного патрубка к выходному. Вращение измерительных элементов происходит под действием самой измеряемой среды. Число сделанных оборотов пропорционально объему жидкости, прошедшей через преобразователь. Известно несколько типов объемных преобразователей: овально-шестереночные, роторные, лопастные, кольцевые.

Принцип действия преобразователей рассматривается на примере преобразователя на овальных шестернях, схема действия которого приведена на рис. VI—9. Преобразователь состоит из камеры *К* с цилиндрическими боковыми поверхностями и плоскими торцами. В корпусе вращаются две овальные шестерни $Ш_1$ и $Ш_2$, находящиеся в зацеплении. Измеряемая жидкость подводится ко входу с давлением $p_{вх}$ и отводится от выхода с давлением $p_{вых}$,

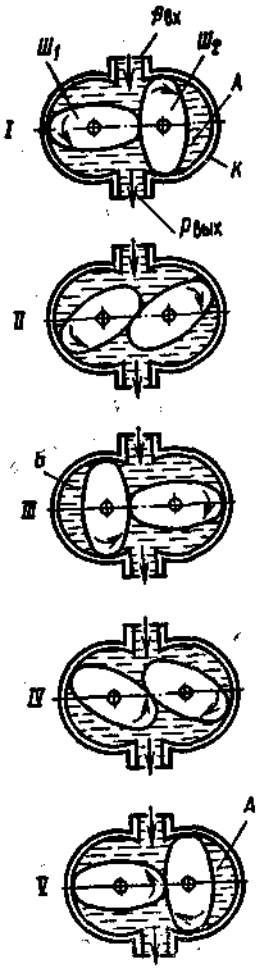


Рис. VI—9. Схема преобразователя объемного счетчика с овальными шестернями

которое меньше входного на величину потери давления в преобразователе.

Основные фазы вращения шестерен показаны на рис. VI—9. В фазе *I* шестерня $Ш_1$ расположена горизонтально. Суммарный вращающийся момент на этой шестерне равен нулю, так как давления действуют симметрично по обе стороны от оси вращения. Шестерня $Ш_2$, расположенная вертикально, отсекает полость *А* мерного объема. Видно, что момент, развиваемый давлением $p_{вх}$ по часовой стрелке, больше момента от давления $p_{вых}$ (по условию $p_{вх} > p_{вых}$). В результате шестерня $Ш_2$ как ведущая вращается по часовой стрелке, увлекая за собой как ведомую шестерню $Ш_1$. В промежуточной фазе *II* шестерни располагаются наклонно, объем *А* сообщен с выходным патрубком. В этом положении вращающие моменты приложены к обеим шестерням. В фазе *III* шестерня $Ш_1$ отсекает полость *Б* и является ведущей, в то время как $Ш_2$ является ведомой. В фазах *IV—V* процесс завершается половиной оборота, вращение продолжается.

В течение каждого оборота имеет место переменный момент вращения, шестерни поочередно выполняют функции ведущей и ведомой. За один полный оборот отсекается четыре мерных объема, которые в сумме равны объему измерительной камеры. Одна из осей шестерен выводится из камеры и передает вращение счетному механизму, который представляет собой счетчик с несколькими разрядами.

Торцевые поверхности шестерен и измерительной камеры должны образовывать достаточно малые зазоры, с тем чтобы избежать неучтенные перетечки жидкости.

К достоинствам рассматриваемых преобразователей относятся: достаточно высокая точность измерений, допустимая погрешность составляет ±0,5%; широкий диапазон температур измеряемой жидкости (приблизительно от —40 до +50 °С); широкий диапазон измерений, охватывающий количества от нескольких литров до сотен кубических метров в час; практическая независимость точности измерений от вязкости жидкости в пределах от 0,5 до 300 сСт.

Недостатками преобразователя являются: сравнительно высокая потеря давления, которая при максимальном расходе доходит до 0,05 МПа; чувствительность к загрязнениям, что требует обязательного применения фильтров.

VI.3. СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

VI.3.1. РАСХОДОМЕРЫ С СУЖАЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

Расходомеры с сужающими устройствами могут быть составлены в трех вариантах.

Вариант 1 (рис. VI—10, *а*) представляет собой сочетание сужающего устройства *СУ*, преобразующего расход в перепад давления Δp, и дифманометра прямого отсчета *ДМ*. В этом варианте сужающее устройство может быть изготовлено на месте либо заказано на заводе-изготовителе комплектно с дифманометром.

В первом случае сужающее устройство выбирают и рассчитывают, как показано в п. VI.2.1. Дифманометр выбирают из числа жидкостных или сильфонных, характеристики которых приведены соответственно в табл. V—2 и V—5. При этом может быть применен дифманометр-перепадомер, отградуированный в единицах давления. Для вычисления расхода показания расходомера подставляют в формулы (VI—1)—(VI—4). Может быть использован сильфонный дифманометр-расходомер, пределы измерения которого соответствуют табл. V—5, а шкала отградуирована в единицах расхода. При этом шкалы могут быть отградуированы в $м^3/ч$, л/ч, кг/ч, т/ч, а также в единицах, отнесенных к минутам и секундам. Верхние пределы дифманометров-расходомеров выбирают из ряда $a \cdot 10^n$, где $a = 1$; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4,5; 6,3 8; n — любое целое положительное или отрицательное число или нуль.

Во втором случае, когда сужающее устройство заказывают в комплекте с показывающим или самопишущим дифманометром, заполняют специальный опросный лист, который направляют на завод-изготовитель.

Вариант 2 (рис. VI—10, *б*) предусматривает работу сужающего устройства *СУ* на передающий преобразователь (дифманометр) дифференциально-трансформаторной системы *П—ДТ*, работающий в комплекте со вторичным дифференциально-трансформаторным прибором *ВП—ДТ*. Как и в предыдущем варианте, сужающее устройство можно изготовить на месте или получить в комплекте с преобразователем и вторичным прибором.

Если сужающее устройство изготовляют на месте, то передающий преобразователь подбирают по номинальному перепаду давления из табл. V—6, а вторичный прибор выбирают по характеристикам, приведенным в п. V.5.3. Вторичный прибор можно выбрать со шкалой, отградуированной в единицах перепада давления либо в единицах расхода, выбираемых из приведенного выше ряда. Если

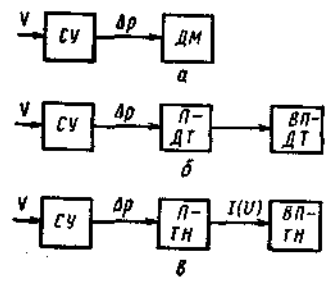


Рис. VI—10. Варианты расходомеров с сужающими устройствами:

а — с дифманометром прямого отсчета; *б* — с преобразователем дифференциально-трансформаторной системы; *в* — с преобразователем в аналоговый электрический сигнал

сужающее устройство получают в комплекте, то заказ осуществляют по тем же опросным листам.

Вариант 3 (рис. VI—10, *в*) предполагает, что в комплекте с сужающим устройством работает передающий преобразователь П-ТН, преобразующий перепад давления в аналоговый электрический сигнал — ток или напряжение. Как и в рассмотренных выше вариантах, сужающее устройство может быть изготовлено на месте или заказано в комплекте по опросному листу. Измерительные преобразователи разности давлений могут быть подобраны по табл. V—7.

В качестве вторичных приборов применяют в основном миллиамперметры показывающие и самопишущие (см. п. V.5.3). Шкалы этих приборов отградуированы в условных единицах, что требует введения соответствующих коэффициентов. Для вычисления расходов следует пользоваться формулами (VI—1)—(VI—4).

VI.3.2. РОТАМЕТРЫ

К ротаметрам относят расходомеры с преобразователем обтекания (преобразователем постоянного перепада давления). В холодильной технике находят применение ротаметры стеклянные прямого отсчета, электрические с дифференциально-трансформаторной передачей и пневматические. Ротаметры используют в основном при измерениях расхода жидкостей, в том числе холодильных агентов [36, 54].

Характерная особенность ротаметров — отсутствие стандартизованных градуировочных характеристик. Каждый ротаметр подвергают индивидуальной градуировке на заводе-изготовителе. Результаты градуировки в виде таблиц и графиков приводятся в паспортах на приборы. При этом градуировку проводят только на воде и на воздухе. При использовании ротаметров на средах, отличных от градуировочных по плотности и вязкости, должна быть проведена соответствующая опытная градуировка или произведен пересчет характеристик. Рекомендуемый способ пересчета указывается в паспорте. Краткие сведения о пересчете приведены в настоящей главе (см. п. VI.2.2).

VI.3.2.1. Стеклянные ротаметры

Стеклянные ротаметры выпускают для измерений расхода при давлениях не выше 0,6 МПа. Их изготовляют из стеклянных конусных трубок, внутри которых помещают поплавки. Поплавки в зависимости от исполнения приборов, измеряемой среды и пределов измерений изготовляют из эбонита, дюралюминия, коррозиестойкой стали и других материалов. Ротаметры выпускают с фланцевым и резьбовым присоединением к трубопроводу или с ниппелями для соединения с гибкими шлангами.

Устройство ротаметра с фланцевым присоединением показано на рис. VI—11, *а*. Стеклянная трубка *1* с нанесенной на внешней поверхности шкалой находится в обойме, состоящей из фланцев *4* и стяжек *7*. Нижний и верхний концы трубки входят в расточки корпусов *5* и *6* и уплотняются прокладками *3*. Отсчет высоты подъема ведется по шкале и верхнему обрезу поплавка *2*.

Вариант ротаметра с ниппельным присоединением представлен на рис. VI—11, *б*. Ротаметр собирается в оправке *8*, имеющей прорези для наблюдения за поплавком, к которому на резьбе присоединяются ниппели *9*. Обязательным требованием является строго вертикальная установка ротаметра. Желательно также иметь прямые участки до и после ротаметра.

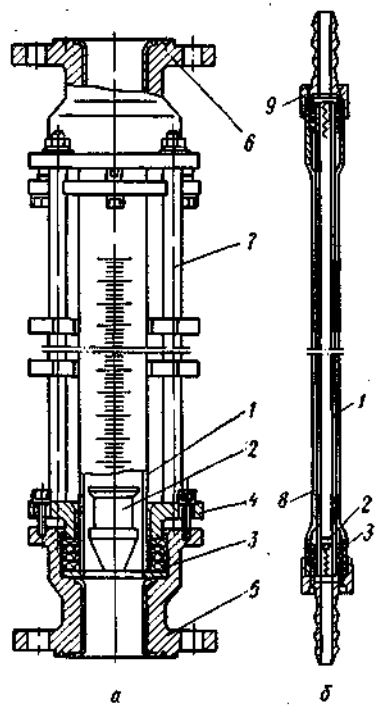


Рис. VI—11. Стеклянные ротаметры:
а — с фланцевым присоединением; *б* — с ниппельным присоединением под шланг; *1* — стеклянная трубка; *2* — поплавок; *3* — уплотнительные прокладки; *4* — фланец; *5* и *6* — нижний и верхний корпуса; *7* — стяжки; *8* — оправка; *9* — ниппель

Ротаметры РСС выпускаются трех типоразмеров, отличающихся диаметрами условных проходов. Они имеют равномерную шкалу. Ротаметры работают на средах температурой от —40 до +100 °С. Рабочие среды должны быть нейтральны относительно стекла, фторопласта-4 и сальниковой набивки ФУМ-В. При максимальном расходе потеря напора в ротаметре не должна превышать 5 кПа (500 мм вод. ст.) на воде и 4 кПа (400 мм вод. ст.) на воздухе. Остальные технические характеристики приведены в табл. VI—3.

Ротаметры РМ выпускаются 5 типоразмеров, имеют равномерную шкалу. Работают ротаметры на средах давлением не более 0,6 МПа и температурой от 5 до 50 °С. Потеря давления в ротаметре не должна превышать 10 кПа на воде и 5 кПа на воздухе. Основная приведенная погрешность не превышает ±2,5%. Корпусные детали могут выполняться в зависимости от заказа из стали Х18Н9Т или латуни ЛС-59-1; поплавок — из стали Х18Н9Т, дюралюминия, эбонита, титана и полистирола; уплотнительные прокладки — из кислотощелочестойкой резины. Остальные технические характеристики приведены в табл. VI—4.

VI.3.2.2. Ротаметры электрические

Ротаметры электрические типа РЭ предназначаются для измерения расхода жидкостей, нейтральных к стали Х18Н9Т. Выпускаются в пылебрызгозащищенном (РЭ) и взрывозащищенном (РЭВ) исполнениях.

Ротаметр работает в комплекте со вторичным прибором дифференциально-трансформаторной системы (см. п. V.5.3). Шкала вторичного прибора должна быть равномерной с пределами от 0 до 100%.

Таблица VI—3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКЛЯННЫХ РОТАМЕТРОВ РСС

Тип	Длина шкалы, мм	Максимальное давление, МПа (кгс/см²)		Присоединение	Габаритные размеры, мм		Пределы измерений расхода			Относительная приведенная погрешность, %, не более	Масса, кг
		жидкости	газа		Диаметр	Высота	л/ч		м³/ч		
							Вода		Воздух		
РСС3	200	0,6(6)	0,4(4)	Ниппельное под шланг с внутренним диаметром 9,5 мм	24	400	— — 1,6—12,5 6—34		0,04—0,32 0,1—0,63 0,2—1	±2,5	0,33
РСС5	250	0,6(6)	0,4(4)	Ниппельное под шланг с внутренним диаметром 16 мм	95	460	— — — — 16—100 25—160 — — 40—250 63—400		0,63—4 1,0 6,3 — — — — 1,6—10 — — — —	±2,5	1,06
РСС7	350	0,3(3)	0,05(5)	Фланцевое	150	640	— — 160—1000 250—1250 400—1600 800—2500		6,3—25 — 10—40 — — — —	±2,5	8

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РОТАМЕТРОВ РЭ

Верхний предел измерений	См. табл. VI—5
Нижний предел измерений, % от верхнего предела	20
Основная приведенная погрешность (при условии, что погрешность вторичного прибора не превышает ±1%), %, не более	±2,5
Диаметры условных проходов, мм	6—150
Максимальное давление, МПа для исполнения РЭ-I, РЭ-II, РЭ-III, РЭ-IV РЭ-V	 6; 16; 64 6; 16
Градуировка	Индивидуальная на воде при $t=20\pm5$ °С
Диапазоны выходного сигнала дифференциального трансформатора, мГ	10—0—10
Температура измеряемой жидкости, °С	—40÷+70

Таблица VI—4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКЛЯННЫХ РОТАМЕТРОВ РМ

Тип	Максимальное давление, МПа (кгс/см²)	Присоединение	Габаритные размеры, мм		Верхний предел измерений, м³/ч		Относительная приведенная погрешность, %, не более	Масса, кг
			Диаметр	Высота	Вода	Воздух		
РМ-А-I	0,6(6)	Резьбовое 1/8″	34	160	0,0025; 0,004; 0,0063;	0,063; 0,1; 0,16; 0,25	±4	0,28
РМ-II	0,6(6)	Резьбовое под шланг с внутренним диаметром 8 мм	24	360	0,016; 0,025; 0,04	0,25; 0,4; 0,63	±2,5	0,3
РМ-IV	0,6(6)	Фланцевое по ГОСТ 6111—52	35	455	0,16; 0,25; 0,4	2,5; 4,0; 6,3	±25	2,4

Примечания: 1. Нижний предел измерений — 10% от верхнего. 2. При заказе указывать среду (жидкость или газ) и верхний предел измерений в м³/ч.

Таблица VI—5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ РОТАМЕТРОВ РЭ

Базовая модель	Тип	Верхний предел измерений, м³/ч	Диаметр условного прохода, мм	Масса, кг
РЭ-I	РЭ-0,025	0,025	6	2,6
	РЭ-0,040	0,040	6	
	РЭ-0,063	0,063	10	
РЭ-II	РЭ-0,1	0,1	10	8,5
	РЭ-0,16	0,16	15	
	РЭ-0,25	0,25	15	
	РЭ-0,4	0,40	15	
РЭ-III	РЭ-0,63	0,63	25	11
	РЭ-1	1,0	25	
	РЭ-1,6	1,6	40	
	РЭ-2,5	2,5	40	
	РЭ-4	4,0	40	
РЭ-IV	РЭ-6,3	6,3	70	27,6
	РЭ-10	10	70	
	РЭ-16	16	100	
РЭ-V	РЭ-25	25	100	54
	РЭ-40	40	150	
	РЭ-63	63	150	

VI.3.2.3. Ротаметры пневматические

Ротаметры пневматические типа РП предназначаются для измерения расхода жидкостей, нейтральных к стали 12Х18Н9Т и деталям из паронита, в частности, для холодильных агентов [18]. Ротаметры снабжены показывающим прибором и могут использоваться для прямого отсчета и для дистанционной пневматической передачи. Для работы показывающего прибора и дистанционного пневмопреобразователя прибор должен питаться сжатым воздухом давлением 0,14 МПа. Устройства приготовления сжатого воздуха для пневмосистемы (стабилизатор давления и воздушный фильтр) поставляются в комплекте с ротаметром.

Присоединение ротаметров к трубопроводу фланцевое. Выпускаются в пяти базовых моделях: РП-I, РП-II, РП-III, РП-IV, РП-V. Все ротаметры имеют единую унифицированную пневмоголовку, обеспечивающую местные показания и пневматическую дистанционную передачу. Устройство ротаметрической части приборов РП-I, РП-II, РП-III показано на рис. VI—12, *а*, РП-IV и РП-V — на рис. VI—12, *б*.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РОТАМЕТРОВ РП

Верхний предел измерений	См. табл. VI—6
Нижний предел измерений, % от верхнего предела	20

Основная приведенная погрешность, %	
для ротаметров с верхним пределом от 0,1 до 0,25 м³/ч	±2,5
для ротаметров с верхним пределом от 0,4 до 63 м³/ч	±1,5
Исполнение	Пылебрызгозащищенное
Градуировка	Индивидуальная на воде при $t=20\pm5$ °С
Температура измеряемой жидкости,	—40÷+150
Давление рабочей среды, МПа	
для ротаметров с верхним пределом от 0,4 до 2,5 м³/ч	6,4
для ротаметров с верхним пределом от 4 до 63 м³/ч	1,6
Потеря давления в ротаметре, МПа	0,01
Пределы изменения выходного пневмосигнала, МПа	0,02—0,1

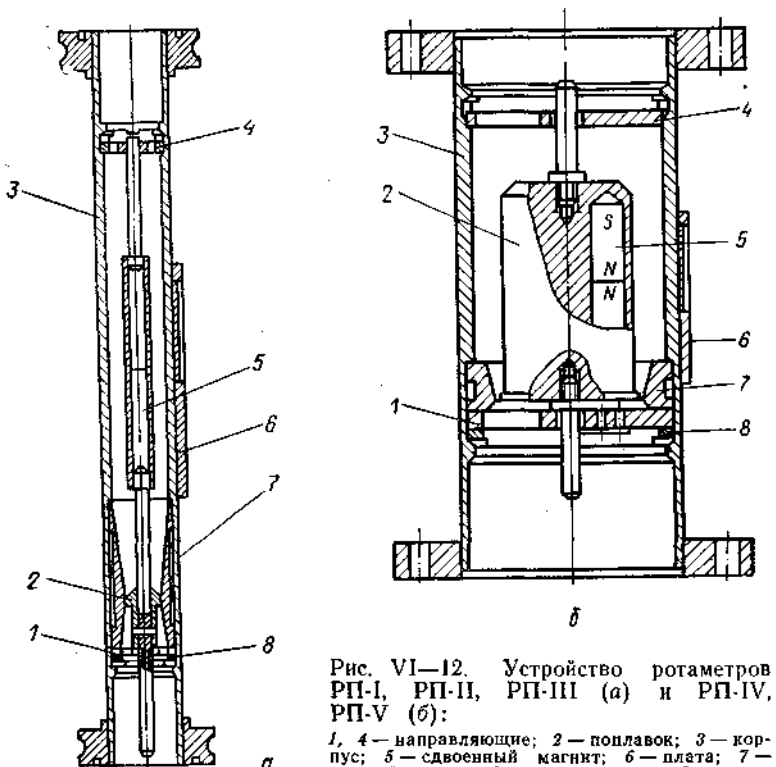


Рис. VI—12. Устройство ротаметров РП-I, РП-II, РП-III (*а*) и РП-IV, РП-V (*б*):

1, 4 — направляющие; *2* — поплавок; *3* — корпус; *5* — сдвоенный магнит; *6* — плата; *7* — мерный конус; *8* — специальная гайка

Таблица VI—6. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ РОТАМЕТРОВ РП

Базовая модель	Тип	Верхний предел измерений, м³/ч	Диаметр условного прохода, мм	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
РП-I	РП-0,1	0,1	10	462×220×196	13
	РП-0,16	0,16	15		
	РП-0,25	0,25	15		
	РП-0,4	0,40	15		
	РП-0,63	0,63	25		
РП-II	РП-1	1,0	25	462×220×217	17
	РП-1,6	1,6	40		
	РП-2,5	2,5	40		
РП-III	РП-4	4,0	40	462×220×250	25
	РП-6,3	6,3	70		
	РП-10	10,0	70		
РП-IV	РП-16	16,0	100	462×245×300	39
	РП-25	25,0	100		
РП-V	РП-40	40,0	150	462×280×340	55
	РП-63	63,0	150		

VI.3.3. ТАХОМЕТРИЧЕСКИЕ РАСХОДОМЕРЫ

VI.3.3.1. Крыльчатые (турбинные) расходомеры

Отечественная промышленность выпускает турбинные расходомеры нескольких типов. В частности, для измерения расхода газа выпускается комплекс расходомеров-счетчиков газа «Тургас». Они предназначены для природных газов, воздуха и других неагрессивных газов с плотностью не менее 0,7 кг/м³ при температуре от 0 до 50 °С и давлении до 0,6 МПа.

Комплекс «Тургас» включает в себя 5 типоразмеров первичных преобразователей с диаметрами условных проходов 65, 80, 100, 150 и 200 мм, обеспечивающих измерение расхода соответственно до 100, 200, 400, 800, 1600 м³/ч. Выпускают преобразователи классов точности 1 и 1,5. Предусмотрен выходной токовый сигнал 0—5 мА.

Расходомеры «Турбоквант» (производство ВНР) предназначены для измерения расхода жидкостей и газов, в том числе сильно агрессивных. Расходомер состоит из первичного преобразователя и электронного блока, который является единым для преобразователей всех типоразмеров. Во ВНИИхолодмаше проведены испытания расходомеров «Турбоквант», которые дали положительные результаты [17]. Расходомер обеспечивает прямое измерение в месте установки электронного блока, для чего последний снабжен показывающим стрелочным прибором, отградуированным непосредственно в единицах расхода. Кроме того, предусмотрен выходной токовый сигнал 4—20 или 0—5 мА.

Первичные преобразователи. Принцип действия рассмотрен в подразделе 2.3.1 настоящей главы.

Основные типоразмеры первичных преобразователей изготовляют с закрытыми подшипниками скольжения из твердого сплава или тефлона. Следует иметь в виду, что при использовании на фреонах предпочтительно применять металлические подшипники. Преобразователи с $D_y \geqslant 100$ мм используют также шарикоподшипники. Все соприкасающиеся с измеряемой средой детали преобразователей диаметром до 75 мм изготовляют из нержавеющей стали, у преобразователей от 100 мм и выше корпуса выполняют из углеродистой стали. Для обеспечения заданной точности требуется устройство прямого измерительного участка длиной 10 диаметров до преобразователя и 5 диаметров после него. Первичные преобразователи малых проходов (6, 10 и 15 мм) снабжаются дополнительным линейным усилителем, вмонтированным в корпус преобразователя.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДОМЕРОВ «ТУРБОКВАНТ»

Пределы измерений	См. табл. VI—7
Диаметры условных проходов, мм	6—500
Погрешность измерения расхода жидкостей вязкостью 1—3 сСт, % от измеряемой величины	±0,5
Погрешность измерения расхода газа при давлениях выше 0,3 МПа и плотностью более 0,65 кг/м³, % от верхнего предела	±1,0
Максимальное давление, МПа	
для преобразователей	
D_y = 6÷50 мм	25
D_y = 75÷250 мм	6,4
Температура рабочей среды, °С	
для преобразователей	
с шарикоподшипниками	—50÷+150
с подшипниками из тефлона	—150÷+250
» » » твердого сплава	—150÷+250
Потеря давления при верхнем пределе измерений, МПа	0,025
Допустимый расход, % от верхнего предела	125
Частота сигнала для верхнего предела измерения, Гц	
для жидкостных расходомеров	1000±200
» газовых »	3000±600
Омическое сопротивление катушки датчика, Ом	1300 (±10%)

Электронные блоки (вторичные приборы) являются универсальными для всех типоразмеров. Электронные блоки выпускают в основной модификации TQ-021 со стрелочным измерительным прибором и в дополнительной модификации MIDI-FLOW с цифровой

Таблица VI—7. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДОМЕРОВ «ТУРБОКВАНТ»*

Тип		Диаметр условного прохода, мм	Пределы измерения расхода, м³/ч	
с фланцевым присоединением	с резьбовым присоединением		жидкости	газа
HF6/0,3	HB6/0,3	6	0,028—0,275	—
HF6/0,6	HB6/0,6	6	0,055—0,55	—
HF12/1	HB12/1	12	0,11—1,1	—
HF15/2	HB15/2	15	0,22—2,2	0,66—6,6
HF15/4	HB15/4	15	0,4—4	1,2—12
HF18/8	HB18/8	18	0,8—8	2,4—24
HF25/16	HB25/16	25	1,6—16	4,8—48
HF37/34	HB37/34	37	3,4—34	10—100
HF50/70	HB50/70	50	6,8—68	20—200
HF75/135	—	75	13,5—135	40—400
HF10—270	—	100	27—270	80—800
HF15—550	—	150	55—550	160—1600
HF20—1100	—	200	110—1100	320—3200

* Справочные данные приводятся для расходомеров с $D_y \leqslant 200$ мм.

индикацией. Электронные блоки снабжаются интегратором, позволяющим определить количество измеряемой среды, прошедшей через первичный преобразователь за определенный промежуток времени. По особому заказу может встраиваться также автоматический дозатор.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ TQ-021

Пределы измерений	См. табл. VI—7
Приведенная погрешность измерительного прибора, %	±1,5
Токовый сигнал, мА	0—5
Приведенная погрешность токового сигнала, %	±0,5
Емкость счетчика интегратора, единицы объема	10^6
Погрешность счетчика интегратора, единицы объема	±1

Электронный блок MIDI-FLOW имеет четырехзначную цифровую индикацию расхода в заданных единицах. Погрешность измерения 0,1% ±единица последнего разряда. Выходной токовый сигнал 4—20 или 0—5 мА с приведенной погрешностью не более ±0,25%. Может иметь интегратор и дозатор. Габаритные размеры первичных преобразователей «Турбоквант» и электронного блока TQ-021 представлены на рис. VI—13.

VI.3.3.2. Шариковые расходомеры

Шариковые расходомеры предназначены для непрерывного преобразования расхода жидкости в аналоговый электрический сигнал [80].

Серийно выпускаемые шариковые расходомеры типов ШРТ и «Сатурн» состоят из первичного преобразователя, принцип действия которого описан в п. VI.2.3.2, и передающего преобразователя. Последний преобразует частоту следования импульсов в аналоговый сигнал.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАСХОДОМЕРОВ ШРТ И «САТУРН»

Диапазон измерений, м³/ч	
ШРТ	0,025—10
«Сатурн»	0,5—400
Пределы измерений	См. табл. VI—8, VI—9
Погрешность измерения в диапазоне 25—100% от верхнего предела измерений, %	±1,5
Материал	
корпуса	Сталь 12Х18Н10Т
шара	Резина В-14 с металлическим наполнителем
Потеря давления при расходе, равном верхнему пределу, МПа	0,05
Рабочее давление, МПа	2,5
Температура рабочей среды, °С	2—100
Выходной сигнал, мА	0—5
Длина линии связи от первичного до передающего преобразователя, м, не более	100
Сопротивление нагрузки, кОм, не более	2,5
Габаритные размеры передающего преобразователя, мм	197×140×375
Масса, кг	
передающего преобразователя	5
первичного »	
ШРТ	2—5
«Сатурн»	10—72

VI.3.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Электромагнитные расходомеры предназначаются для измерения расхода жидкостей с удельной электропроводностью не менее 10^{-5}—10^{-3} См/м [80]. Расходомер состоит из электромагнитного преобразователя, устанавливаемого на трубопроводе, и вторичных приборов, обеспечивающих отсчет показаний и передачу информации с помощью электрического токового сигнала.

В зависимости от свойств жидкости внутренняя поверхность преобразователя покрывается одним из изолирующих материалов: эмалью, фторопластом, полиуретаном, резиной или стеклопластиком. Ниже приведены технические характеристики расходомеров ИР-61 и 4РИМ.

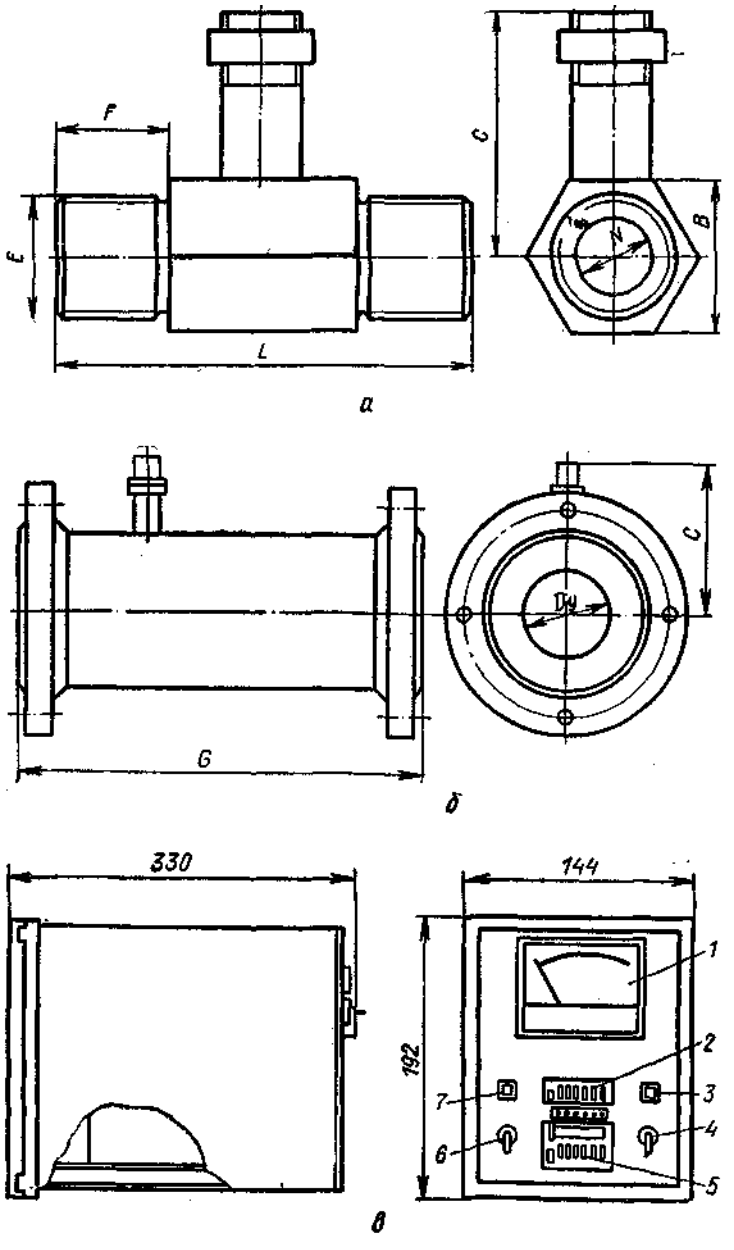


Рис. V—13. Габаритные чертежи расходомера «Турбоквант»:
а — первичный преобразователь с резьбовым присоединением

Тип	Диаметр условного прохода, мм	*A*, мм	*B*, мм	*C*, мм	*L*, мм	*E*, дюйм	*F*, мм
HB6/0,3	6	25,4	—	64	50,8	3/8″	13
HB6/0,6	6	25,4	—	64	50,8	3/8″	13
HB12/1	12	25,4	—	66	63,5	1/2″	19
HB15/2	15	25,4	—	67	63,5	7/8	19
HB15/4	15	25,4	—	67	63,5	7/8″	19
HB18/8	18	—	30,0	70	82,5	3/4″	22
HB25/16	25	—	38,0	73	88,9	1″	23
HB37/34	37	—	56,0	75	114,3	1½″	27
HB50/70	50	—	70,0	85	133,4	2″	29

б — первичный преобразователь с фланцевым присоединением

Тип	Диаметр условного прохода, мм	*G*, мм	*C*, мм
HF6/0,3	6	114	64
HF6/0,6	6	114	64
HF12/1	12	127	66
HF15/2	15	127	67
HF15/4	15	127	67
HF18/8	18	140	70
HF25/16	25	152	73
HF37/34	37	178	75
HF50/70	50	197	85
HF75/135	75	330	100
HF10-270	100	356	113
HF15-550	150	368	135
HF20-1100	200	457	160

в — электрический блок TQ-021: *1* — показывающий прибор; *2* — интегратор; *3* — лампа включения сети; *4* — тумблер сети; *5* — счетчик дозатора (по особому заказу); *6* — переключатель пределов измерений; *7* — лампа сигнализации неисправности

Таблица VI—8. ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ РАСХОДОМЕРОВ ШРТ

Тип	Диаметр трубопровода, мм	Пределы измерений, м³/ч		Тип	Диаметр трубопровода, мм	Пределы измерений, м³/ч	
		нижний	верхний			нижний	верхний
ШРТ-0,1	3	0,025	0,1	ШРТ-1,6	10	0,16	1,6
ШРТ-0,16	5	0,04	0,16	ШРТ-2,5	15	0,25	2,5
ШРТ-0,25	6	0,06	0,25	ШРТ-4	15	0,4	4
ШРТ-0,4	6	0,1	0,4	ШРТ-6	20	0,6	6
ШРТ-0,6	10	0,15	0,6	ШРТ-10	25	1	10
ШРТ-1	10	0,1	1				

Таблица VI—9. ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ РАСХОДОМЕРОВ «САТУРН»

Тип	Диаметр трубопровода, мм	Пределы измерений, м³/ч		Тип	Диаметр трубопровода, мм	Пределы измерений, м³/ч	
		нижний	верхний			нижний	верхний
«Сатурн-32»	32	0,5	2,5	«Сатурн-100»	100	8	40
		0,63	3,15			10	50
		0,8	4			12,5	63
«Сатурн-40»	40	1	5			16	80
		2	10			20	100
		1,25	6,3			25	125
		1,6	8				
		2	10				
«Сатурн-50»	50	1,6	8	«Сатурн-125»	125	16	80
		2	10			20	100
		2,5	12,5			25	125
		3,15	16			31,5	160
		4	20			40	200
		5	25	«Сатурн-150»	150	31,5	160
«Сатурн-70»	70	5	25			40	200
		6,3	31,5			50	250
		8	40			63	315
		10	50			80	400
		12,5	63				

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСХОДОМЕРОВ ИР-61 И 4РИМ

	ИР-61	4РИМ
Диаметры условных проходов, мм	10—300	50—200
Верхние пределы измерений	См. табл. VI—10	
Максимальные давления и температура	См. табл. VI—11	
Основная приведенная погрешность показаний, %	±2	±1,5
Основная приведенная погрешность по записи, %	—	±2,5
Габаритные размеры и масса преобразователей расхода	См. табл. VI—12	
Габаритные размеры вторичных приборов, мм	450×197×140,5	320×320×380

Таблица VI—10. ВЕРХНИЕ ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РАСХОДОМЕРОВ (ПРИНИМАЮТСЯ ПО ВЫБОРУ ЗАКАЗЧИКА)

$D_у$, мм	Верхние пределы измерения (10^{-3} м³/с) при скорости среды, м/с								
	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8
10*	0,8	1,0	1,25	1,6	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0
15*	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0	6,3	8,0	10,0	12,5
25*	5,0	6,3	8,0	10,0	12,5	16,0	20,0	25,0	31,5
50	20,0	25,0	31,5	40,0	50,0	63,0	80,0	100,0	125,0
70**	31,5	40,0	50,0	63,0	80,0	100,0	—	—	—
80	50,0	63,0	80,0	100,0	125,0	160,0	200,0*	250,0*	315,0*
100	80,0	100,0	125,0	160,0	200,0	250,0	315,0*	400,0*	500,0*
125**	125,0	160,0	200,0	250,0	315,0	400,0	—	—	—
150	200,0	250,0	315,0	400,0	500,0	630,0	800,0*	1000,0*	1250,0*
250	315,0	400,0	800,0	1000,0	1250,0	1600,0	2000,0*	3150,0*	4000,0*

* Только ИР-61.
** Только 4РИМ.

Таблица VI—11. МАКСИМАЛЬНЫЕ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РАСХОДОМЕРОВ

Тип	Материал покрытия	Максимальные давления, МПа	Пределы температур рабочей среды, °С
ИР-61	Фторопласт	1,0	—40÷+150
	Полиуретан	2,5	—30÷+50
	Эмаль	2,5	—40÷+150
4РИМ	Стеклопластик	0,6	5—100
	Резина	2,5	5—100

Таблица VI—12. ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ И МАССА ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

$D_у$, мм	ИР-61				4РИМ			
	Строительная длина*, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Масса, кг	Строительная длина*, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Масса, кг
10	250	234	245	16	—	—	—	—
15	250	234	245	16	—	—	—	—
25	250	234	245	16	—	—	—	—
50	530	300	300	36	420	260	260	30
70	—	—	—	—	500	260	260	35
80	530	300	300	36	500	260	260	36
100	600	300	300	75	560	300	300	50
125	—	—	—	—	650	340	340	70
150	750	300	300	175	708	380	380	100
200	850	300	300	200	830	450	450	150

* Строительная длина — расстояние между присоединительными поверхностями фланцев.

VI.3.5. ОБЪЕМНЫЕ СЧЕТЧИКИ

Объемные счетчики служат для измерения количества жидкостей и газов, протекающих по трубопроводам в течение заданного промежутка времени. Газовые счетчики предназначены в основном для измерения расхода природного газа низкого давления и в связи с этим в данном справочнике не рассматриваются. Жидкостные счетчики применяют для измерения количеств различных жидкостей, в том числе с высокой вязкостью. Они могут использоваться для измерения средних расходов в комплекте с измерителем времени.

Ниже приведены данные по жидкостным овально-шестеренчатым счетчика ШЖУ. Счетчики предназначены для установки на горизонтальном трубопроводе с направлением потока жидкости, указанным на корпусе. Счетчики чрезвычайно чувствительны к загрязнению и попаданию газовых включений. Поэтому они требуют обязательного применения фильтров, а в необходимых случаях — фильтров-газоотделителей. Фильтры поставляются комплектно со счетчиками за отдельную плату. Счетчики ШЖУ предназначены для неагрессивных жидкостей. Аналогичные им счетчики ШЖУА позволяют использовать их на агрессивных жидкостях, нейтральных к коррозиестойким сталям 10Х18Н9ТЛ и 10Х18Н12М3ТЛ. Счетчики являются приборами прямого отсчета и не имеют дополнительных устройств для передачи информации.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЧЕТЧИКОВ

Пределы расхода и допускаемые давления	См. табл. VI—13
Пределы температуры, °С	—40÷+50
Допускаемая относительная погрешность при $t=20$ °С, %	±0,5
Потеря давления при максимальном расходе, МПа, не более	0,05
Кинематическая вязкость жидкости, м²/с	$(0{,}55\div300)\,10^{-6}$
Тип счетного указателя	Одно- или двухстрелочный, или роликовый со сбросом на нуль

Таблица VI—13. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ОБЪЕМНЫХ СЧЕТЧИКОВ ШЖУ

Техническая характеристика	Тип			
	ШЖУ-25-6	ШЖУ-40С-6	ШЖУ-40-16	ШЖУ-80-16
Диаметр условного прохода, мм	25	40	40	80
Пределы расхода жидкости, м³/ч				
при вязкости $(0{,}55\div1{,}1)\,10^{-6}$ м²/с	0,9—4,5	4—25	2,5—12,8	20—150
при вязкости $(1{,}1\div6)\,10^{-6}$ м²/с	0,8—4,2	3—24	2,1—10,5	20—150
при вязкости $(6\div60)\,10^{-6}$ м²/с	0,4—3,8	1,8—18	0,9—9	15—150
при вязкости $(60\div300)\,10^{-6}$ м²/с	0,3—33	1,7—17	0,8—8	15—150
Максимальное давление, МПа	0,6	0,6	1,6	1,6
Верхний предел показаний указателей, м³				
роликового	10^3	10^4	10^4	10^4
стрелочного большого	10^{-2}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}
» малого	10^{-1}	1	1	—
Цена деления указателей, м³				
роликового	10^{-4}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-1}
стрелочного большого	10^{-4}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
» малого	10^{-3}	10^{-1}	10^{-1}	—
Присоединение к трубопроводу	Резьбовое или фланцевое		Фланцевое	

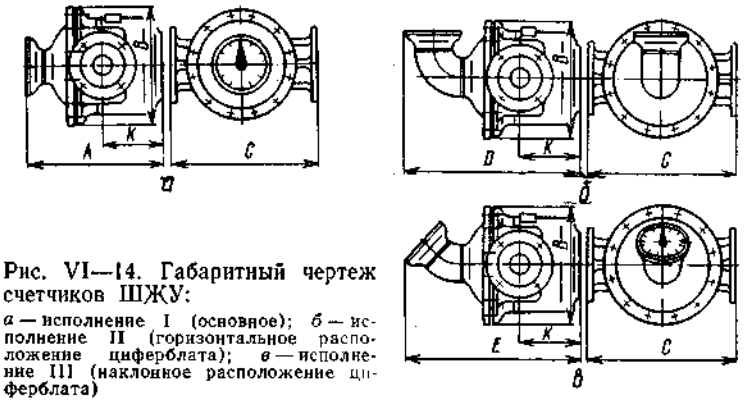


Рис. VI—14. Габаритный чертеж счетчиков ШЖУ:

а — исполнение I (основное); *б* — исполнение II (горизонтальное расположение циферблата); *в* — исполнение III (наклонное расположение циферблата)

Тип	Размеры, мм						Масса, кг	Исполнение
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*K*		
ШЖУ-25-6	280	210	226	—	—	—	7,4	I
ШЖУ-40-16	332	255	335	462	482	110	43	I, II, III
ШЖУ-80-16	395	430	520	—	—	—	126	I

Габаритные размеры и масса объемных счетчиков представлены на рис. VI—14. Объемные счетчики могут применяться для измерения количеств и расходов смазочных масел и теплоносителей, вязкость которых может изменяться в достаточно широких пределах и измерение которых другими типами приборов вызывает значительные трудности.

VI.4. СРЕДСТВА ПОВЕРКИ РАСХОДОМЕРОВ

В зависимости от способа поверки расходомеры можно разделить на две группы.

К первой относят расходомеры, первичные преобразователи которых стандартизованы и для своей поверки требуют лишь проверки расчета и геометрических размеров. В эту группу входят расходомеры переменного перепада давления с первичными преобразователями в виде стандартных сужающих устройств (диафрагм, сопел, сопел Вентури) [63]. В принципе эти расходомеры для своей поверки не требуют физического воспроизведения расхода рабочей среды. Отдельной поверке подвергают дифманометры и вторичные приборы.

Ко второй группе относят все остальные типы расходомеров, поверка которых может осуществляться методом непосредственного сличения с показаниями образцового прибора или методом сравнения с образцовой мерой, но при обязательном воспроизведении расхода.

Технические характеристики средств поверки сужающих устройств, которые позволяют измерить их линейные размеры, приведены в табл. VI—14. Кроме того, применяют шаблоны для поверки формы профильной части сопла, а также профилометры и образцы шероховатости для проверки чистоты поверхностей. Характеристики средств измерения давления, используемых в качестве образцовых при поверке дифманометров, даны в табл. VI—15. Если в состав расходомера входят вторичные приборы, поверка может осуществляться как совместно с дифманометром (характеристика «перепад давления — показания вторичного прибора»), так и раздельно по соответствующим методикам.

Таблица VI—14. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ПОВЕРКИ СТАНДАРТНЫХ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Наименование	Тип	Цена деления, мм	Пределы измерений, мм
Штангенциркуль	ШЦ	0,05	—
Нутромер индикаторный	НИ50-100	0,01	50—100
Нутромер микрометрический		0,01	75—175; 75—600

Таблица VI—15. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ПОВЕРКИ ДИФМАНОМЕТРОВ

Наименование	Тип	Пределы измерения	Класс точности
Микроманометры жидкостные	МТВ	0—0,016 МПа	0,1
Переносные приборы (системы Петрова)	ППР-2М	0—760 мм вод. ст. 0—760 мм рт. ст.	0,3
Манометры контрольные цифровые	КМЦ 1,6	0,01—0,16 МПа	0,1

Примечание: Кроме указанных в табл. V—15 средств могут быть использованы приборы МП-2,5; МВП-2,5; МО; АЗД-2,5.

Для поверки расходомеров с воспроизведением расхода жидкости или газа необходимы специальные установки. Серийно такие установки не выпускают, поэтому их создают по индивидуальным проектам. В состав расходомерных установок входят побудители расхода (насосы, компрессоры и т. д.), устройства для стабилизации расхода, а также образцовые средства. В качестве последних можно использовать расходомеры, аттестованные органами Госстандарта как образцовые.

При поверке жидкостных расходомеров могут также применяться образцовые меры, в частности: весы с необходимыми пределами измерения и погрешностью порядка 0,1—0,01%; мерники образцовые вместимостью от 5 до 100 л; секундомеры с ценой деления не больше 0,2 с. Весы и мерники следует выбирать так, чтобы время заполнения не было меньше 40 с (погрешность отсчета времени не больше 0,5%).

Глава VII

ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

VII.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Область измерительной техники, занимающаяся получением количественной информации о влажности воздуха (в общем случае газов), принято называть гигрометрией [9, 75].

В холодильной технике влажность воздуха, а следовательно, и гигрометрия играют существенную роль при разработке, исследованиях и испытаниях оборудования для охлаждения воздуха, а также при проведении технологических исследований и контроля условий обработки и хранения пищевых продуктов. Большое внимание гигрометрии уделяется и в областях техники, смежных с холодильной, в особенности в технике кондиционирования воздуха.

Влажность воздуха сама по себе не является физической величиной. Ее следует рассматривать как некую обобщенную качественную характеристику воздуха, содержащего воду в парообразном состоянии, которая количественно может характеризоваться несколькими различными физическими величинами [27]. В связи с этим речь может идти лишь об измерениях величин, характеризующих влажность воздуха. М. А. Берлинер [9] предлагает величины, характеризующие влажность, разделить на четыре группы.

Группа первая — величины, характеризующие концентрацию водяного пара. К ним относят *абсолютную влажность* a, т. е. массу водяного пара, содержащегося в единице объема воздуха (в г/м³), и упругость или парциальное давление водяного пара e (в Па или мм рт. ст.). Величина e может при некоторой температуре изменяться в пределах $0 \leqslant e \leqslant E$, где E — упругость насыщенного водяного пара при этой температуре. При отрицательных температурах следует рассматривать упругость относительно воды ($E_в$) и относительно льда или инея ($E_л$). В табл. VII—1 приведены некоторые значения этих величин.

Таблица VII—1. УПРУГОСТЬ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА

Упругость насыщенного водяного пара, Па	Температура, °С					
	−60	−40	−20	0	20	40
$E_в$	1,9	19	125	610	2340	7380
$E_л$	1,1	13	103	610	—	—

Группа вторая — характеристики влажностных отношений. К ним относят влагосодержание (массовая доля влаги) d, т. е. отношение массы водяного пара к массе сухого воздуха в том же объеме (безразмерная величина) и объемную долю влаги x_0, равную отношению объема водяного пара к объему газа (также безразмерная величина). Эту величину выражают в тысячных долях (‰) и миллионных долях (млн.$^{-1}$).

Объемная доля влаги, выраженная в млн.$^{-1}$, определяется формулой

$$x_0 = \frac{e}{p-e} \cdot 10^6, \qquad \text{(VII—1)}$$

где e — парциальное давление влаги; p — давление влажного воздуха.

Группа третья — температура точки росы, т. е. температура, при которой водяной пар, содержащийся в воздухе и охлаждаемый изобарически, становится насыщенным; единицей точки росы является Кельвин (К) и равный ему по размеру градус Цельсия (°С). Наряду с точкой росы в практике встречается точка инея (точка льда). Согласно [27] точка инея — это температура, при которой водяной пар становится насыщенным относительно льда. Разделение понятий важно потому, что при некоторых температурах ниже 0 °С возможно существование конденсата как в жидкой, так и в твердой фазах, а давление насыщенного водяного пара над водой и надо льдом при одной и той же температуре различно [75].

Группа четвертая — относительная влажность φ, т. е. отношение фактической абсолютной влажности к максимально возможной, соответствующей насыщению при данной температуре. Другими словами, это отношение парциального давления водяного пара к парциальному давлению насыщенного пара при той же температуре:

$$\varphi = e/E. \qquad \text{(VII—2)}$$

Обычно φ выражается в процентах. В практической гигрометрии наиболее часто измеряют объемную долю влаги, температуру точки росы (или просто точку росы) и относительную влажность.

Основные формулы величин, характеризующих влажность, позволяют в необходимых случаях произвести пересчет одной величины в другую. Если, например, измерена точка росы $t_в$ (над водой) и температура воздуха t, то, воспользовавшись формулой (VII—2), можно найти относительную влажность φ. При этом парциальное давление водяного пара $e = E(t_в)$, где $E(t_в)$ — давление насыщенного водяного пара при температуре $t_в$ (по табл. VII—1). Величину $E = E(t)$ также находят по табл. VII—1 при температуре t. Подставляя в (VII—2), находим:

$$\varphi = \frac{E(t_в)}{E(t)} \cdot 100\%. \qquad \text{(VII—3)}$$

Аналогично решается обратная задача: по измеренной относительной влажности φ найти точку росы $t_в$. Зная температуру воздуха t, по табл. VII—1 определяют $E(t)$ и по формуле (VII—3) находят

$$E(t_в) = \varphi E(t).$$

По табл. VII—1 находят температуру $t_в$, соответствующую величине $E(t_в)$.

Если измерена относительная влажность, то можно найти объемную долю влаги. Для этого дополнительно измеряют давление влажного воздуха p и его температуру t. Величину e находят из формулы (VII—2) и далее, подставляя в формулу (VII—1), определяют величину x_0. Возможно решение и обратных задач: по величине x_0 найти относительную влажность и точку росы.

Для этого из формулы (VII—1) находят парциальное давление:

$$e = \frac{p}{1 + \frac{10^6}{x_0}}$$

и по нему — величины $t_в$ и φ.

Все другие величины, характеризующие влажность воздуха, могут быть рассчитаны по формулам, приведенным в [75].

VII.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

VII.2.1. ПСИХРОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Принцип действия психрометрического преобразователя основан на измерении двух температур: «сухим» и «мокрым» термометрами. Чувствительный элемент мокрого термометра находится в термодинамическом равновесии с окружающим воздухом.

В связи с этим интенсивность испарения воды с поверхности чувствительного элемента, а следовательно, и снижение температуры мокрого термометра, зависят от влажности: чем меньше относительная влажность, тем больше разница между показаниями термометров.

С помощью полуэмпирической формулы

$$e = E_м - Ap(t_с - t_м)$$

находят парциальное давление водяного пара и после подстановки в (VII—1) получают значение относительной влажности:

$$\varphi = \frac{E_м - Ap(t_с - t_м)}{E_с} \cdot 100\%.$$

В этих формулах:

$t_с$ и $t_м$ — температуры сухого и мокрого термометров; $E_с$ и $E_м$ — давления насыщенного водяного пара при температурах соответственно сухого и мокрого термометров; p — атмосферное давление; A — психрометрический коэффициент.

Коэффициент A существенно зависит от конструкции преобразователя и скорости его обдува воздухом. Определяют коэффициент A опытным путем для каждого типа преобразователя, а значения $E_с$ и $E_м$ — по таблицам [67], а также по табл. VII—1. Чаще, однако, для каждого типа преобразователя составляют психрометрическую таблицу, по которой непосредственно определяют относительную влажность в зависимости от $t_с$ и $t_м$. Отклонения

атмосферного давления от расчетного учитывают с помощью соответствующих поправок.

Точность преобразования зависит от нескольких факторов. Главным из них является скорость обдува. Наихудшие в этом смысле условия — в психрометрических преобразователях без принудительной вентиляции. Их применение может приводить к значительным погрешностям из-за непостоянства коэффициента A. С ростом скорости воздушного потока в преобразователях с принудительной вентиляцией влияние посторонних тепловых потоков на тепловой баланс мокрого термометра уменьшается. При скорости воздуха больше 2,5 м/с коэффициент A приближается к постоянной величине.

Существенную роль играют размеры чувствительного элемента мокрого термометра: чем он меньше, тем слабее зависимость показаний от скорости воздуха.

Увлажнение мокрого термометра производят с помощью фитиля, изготовленного из тонкой хлопчатобумажной ткани (чаще всего — батиста), нижний конец которого погружен в сосуд с водой, а верхний плотно прилегает к чувствительному элементу термометра. Для уменьшения погрешностей применяют дистиллированную воду и предохраняют фитиль от загрязнений. В некоторых автоматических психрометрах увлажнение термометра осуществляют без фитиля, а путем распыления воды.

Существенное значение имеет точность измерения температур сухого и мокрого термометров. Это особенно важно при измерениях высоких относительных влажностей, когда измеренная разность температур значительно снижается. Для повышения точности измерений следует применять термометры с одинаковыми или близкими градуировочными характеристиками.

Психрометрический метод применим и при отрицательных температурах, однако погрешность увеличивается из-за сильного уменьшения разности температур.

Для измерения психрометрической разности температур используют стеклянные ртутные и спиртовые термометры, а также электрические преобразователи: термопреобразователи сопротивления и термоэлектрические преобразователи.

Электрические преобразователи позволяют при помощи специальных схем получать на выходе сигналы, пропорциональные относительной влажности. В этих случаях шкалы приборов могут быть отградуированы непосредственно в единицах относительной влажности [9]. Эти же преобразователи позволяют создать автоматические приборы по типу автоматических мостов и потенциометров (см. главу IV).

VII.2.2. КОНДЕНСАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Принцип действия конденсационного преобразователя основан на фиксации выпадения влаги на поверхности охлаждаемого зеркала и измерении температуры этой поверхности. Температура в момент выпадения влаги равна температуре точки росы.

Создание конденсационных преобразователей связано с несколькими проблемами: требуется охлаждать зеркало в широком диапазоне температур и с плавным их изменением; необходимо точно зафиксировать момент выпадения влаги; необходимо измерить тем-

пературу поверхности в заданный момент и с достаточной точностью.

Схема простейшего конденсационного преобразователя представлена на рис. VII—1, *а*. Рабочая поверхность зеркала *З* находится в контакте с воздухом, точка росы которого измеряется. Температура поверхности зеркала измеряется термоэлектрическим преобразователем (термопарой) *ТП* и измерительным прибором *ИП*. Охлаждающее устройство *ОУ* обеспечивает понижение температуры зеркала до нужного уровня; при этом охлаждающая среда или поток теплоты формируются в источнике холода *ИХ*, снабженном приспособлением для регулировки *Р*. В качестве источника холода можно использовать холодильную паровую или воздушную машину, твердый диоксид углерода (сухой лед) в смеси со спиртом, а также термоэлектрическое устройство. В некоторых случаях используют сжиженные газы, например азот. Зеркало изготовляют из хорошо полированного металла или диэлектрика (стекло, кристаллы).

В простейшем преобразователе появление конденсата на зеркале обнаруживается визуально, что приводит к методической погрешности. Поэтому обычно определяют температуру появления конденсата и температуру его исчезновения. За точку росы принимают среднее арифметическое значение этих температур. В современной измерительной практике такие гигрометры почти не применяют. На основе конденсационных преобразователей создают приборы, в которых основные операции — поддержание и измерение температуры и определение момента выпадения конденсата — выполняются автоматически. В автоматических приборах для фиксации выпадения конденсата применяют оптический и кондуктометрический методы.

При оптическом методе зеркало освещают источником све́та. Отраженный свет воспринимается фотоэлектрическим чувствительным элементом (чаще всего — фоторезистором). Сигналом выпадения конденсата является уменьшение отраженного светового потока на заданную величину.

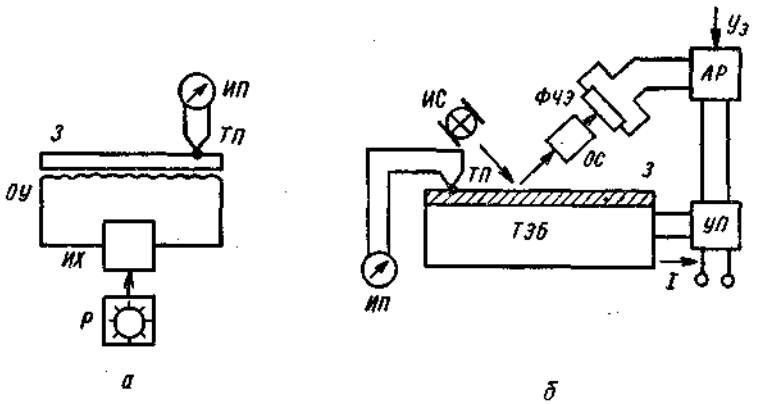


Рис. VII—1. Конденсационные преобразователи:
а — принцип действия; *б* — принципиальная схема автоматического конденсационного гигрометра

При кондуктометрическом методе зеркало изготовляют из диэлектрика или кристалла соли. При выпадении конденсата электрическая проводимость увеличивается, что воспринимается соответствующим чувствительным элементом.

В современных преобразователях охлаждение зеркала чаще всего осуществляют термоэлектрическими батареями, температурный режим которых устанавливается с помощью специальных схем, воздействующих на силу тока питания. Измерение температуры зеркала можно производить с помощью термоэлектрических преобразователей, а также других устройств, например термочувствительных транзисторов.

Принципиальная схема автоматического конденсационного гигрометра показана на рис. VII—1, *б*. Зеркало *З* охлаждается термоэлектрической батареей ТЭБ. Для поддержания температуры зеркала, соответствующей точке росы, собрана система автоматического регулирования, в которую входят источник света *ИС*, оптическая система *ОС*, фоточувствительный элемент *ФЧЭ*, автоматический регулятор *АР* и управляющий преобразователь *УП*. Задающее воздействие $y_з$ подбирают таким образом, чтобы система приходила в установившееся состояние при начальном помутнении зеркала, т. е. при заданной величине светового потока, попадающего на фоточувствительный элемент. При этом через термоэлектрическую батарею протекает ток питания *I*. Если произойдет изменение состояния контролируемого воздуха, то степень помутнения изменится. В результате регулятор воздействует на управляющий преобразователь, а тот в свою очередь изменит ток питания: при возрастании светового потока ток будет увеличен, при снижении уменьшен. Таким образом система обеспечивает поддержание температуры зеркала на таком уровне, чтобы сохранять постоянный равновесный слой конденсата. С помощью термоэлектрического преобразователя *ТП* (или другого чувствительного элемента) и прибора *ИП* измеряют температуру поверхности зеркала, которая соответствует точке росы.

Конденсационные преобразователи чувствительны к загрязнению поверхности зеркала и других оптических элементов, что может привести к значительным погрешностям измерения. В связи с этим применяют меры защиты от попадания грязи, а также периодически очищают зеркало от загрязнений. Существенное значение имеет также стабильность светового потока источника света, которая достигается путем стабилизации напряжения его питания. В некоторых случаях применяют специальные схемы, уменьшающие влияние колебаний светового потока.

VII.2.3. СОРБЦИОННО-РЕЗИСТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Сорбционно-резистивные преобразователи применяют в гигрометрах, измеряющих относительную влажность в диапазоне 20—100% в основном при положительных температурах (в отдельных случаях — до минус 10—15 °С). Принцип действия преобразователей этого типа построен на зависимости поверхностного или объемного электрического сопротивления гигроскопического элемента от количества сорбированной влаги, т. е. от влажности окружающего воздуха. Сопротивление измеряется между электродами, встроенными

в чувствительный элемент. Различают две группы таких преобразователей: гигристорные и электролитические.

В гигристорных преобразователях используют чувствительные элементы, сорбирующие влагу тонким слоем материала с водорастворимыми веществами. Действие влаги на поверхность влагочувствительного элемента вызывает появление ионов, количество которых, а следовательно, и электрическое сопротивление являются функциями влажности воздуха.

Равновесная влажность материала является его индивидуальной характеристикой. Функция преобразования может быть рассчитана, если известны зависимость влагосодержания материала от относительной влажности воздуха и зависимость электрического сопротивления от влагосодержания. На практике гигристорные преобразователи градируют опытным путем.

В электролитических преобразователях влагочувствительными элементами служат ненасыщенные растворы некоторых солей: смесь сегнетовой и поваренной солей, хлористый литий LiCl. Для удержания раствора предусматривают специальные обмотки из стекловолокна, желатиновой пленки и др. либо в раствор вводят органические добавки, повышающие вязкость. Концентрация раствора и его электропроводность зависят от относительной влажности окружающего воздуха.

Конструкция электролитических преобразователей проста, они имеют небольшие габаритные размеры и невысокую стоимость. Недостаток их состоит в трудностях измерений малой относительной влажности из-за насыщения раствора, которое наступает время от времени. Общий недостаток сорбционно-резистивных преобразователей — значительная зависимость их показаний от температуры. Этот недостаток, однако, может быть устранен, если в электрическую схему ввести автоматическую термокомпенсацию.

VII.2.4. ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ ПОДОГРЕВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электролитические подогревные преобразователи применяют для измерения температуры точки росы и массовой доли влаги, а при наличии дополнительного измерителя температуры воздуха их можно использовать для определения относительной влажности. Преобразователи этого типа позволяют измерять температуру точки росы от —30 до +60 °С (в редких случаях — до +80 °С) при температурах воздуха от 0 до 80 °С. В некоторых случаях нижний предел температуры воздуха может быть понижен до —20 °С.

Влагочувствительным элементом подогревных преобразователей является водный раствор соли, обычно хлористого лития LiCl, который под действием подводимой теплоты нагревается и поддерживается в насыщенном состоянии. При этом равновесная влажность над этим раствором равна влажности окружающего воздуха. Температура динамического равновесия, измеряемая встроенным термометром, жестко связана с температурой точки росы.

Принцип действия преобразователя поясняется схемой (рис. VII—2, *а*). На металлическую трубку *4*, наружная поверхность которой покрыта тонким слоем изолирующего лака, надет чулок *3*, изготовленный из стеклоткани, которая пропитана раствором хлористого лития. В электрическом контакте с чулком находится вы-

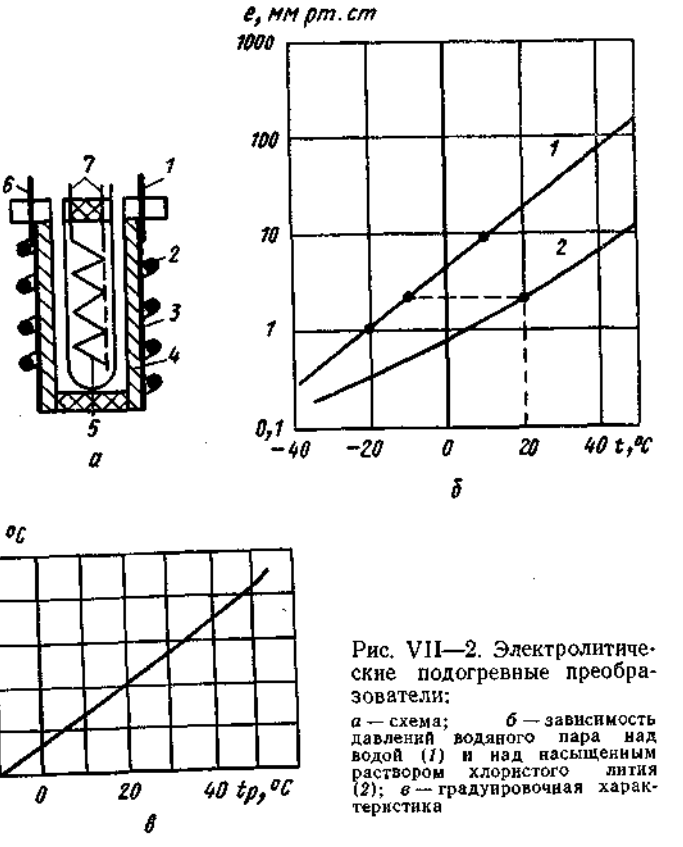


Рис. VII—2. Электролитические подогревные преобразователи:

а — схема; *б* — зависимость давлений водяного пара над водой (*1*) и над насыщенным раствором хлористого лития (*2*); *в* — градуировочная характеристика

вод *1*. Поверх чулка находится спиральный электрод *2*, соединенный с выводом *6*. Внутри трубки помещают термопреобразователь сопротивления *5* с выводами *7*. К выводам *1* и *6* подводят небольшое напряжение переменного тока (до 30 В). Ток, проходя через раствор хлористого лития, нагревает его до температуры, соответствующей равновесному состоянию. Эта температура воспринимается термопреобразователем сопротивления и используется для получения температуры точки росы.

Для градуировки преобразователя пользуются зависимостями от температуры давлений насыщенного водяного пара над поверхностью насыщенного раствора хлористого лития.

Графики этих зависимостей представлены на рис. VII—2, *б*, где кривая *1* относится к воде, а кривая *2* — к хлористому литию. Если, например, термометр преобразователя показал 20 °С, то, найдя соответствующую точку на кривой *2*, переносят ее на кривую *1* и получают температуру точки росы —10 °С. Таким же образом можно определить и другие точки, получая зависимость

$t_в = f(t_р)$, где $t_в$ — температура точки росы, а $t_р$ — равновесная температура раствора. Вид градуировочной характеристики приведен на рис. VII—2, *в*. Характеристика практически линейна в диапазоне $-10 \leqslant t_р \leqslant 50$ °С.

Для измерения относительной влажности рассмотренный преобразователь дополняют термопреобразователем сопротивления, воспринимающим температуру окружающего воздуха. Специальные схемы включения двух термопреобразователей позволяют отградуировать прибор непосредственно в процентах относительной влажности.

Электролитические подогревные преобразователи менее чувствительны к загрязнениям, чем сорбционно-резистивные. При необходимости чулок может быть промыт и заново пропитан раствором хлористого лития. Для сохранения стабильных характеристик преобразователя рекомендуют не выключать питание цепи подогрева даже в периоды, когда не требуется производить измерения.

Нормальная работа подогревных преобразователей обеспечивается в неподвижном воздухе. Обдув несколько уменьшает их инерционность, но может вызвать дополнительную погрешность.

В целом метрологические характеристики этих преобразователей достаточно благоприятны. По некоторым данным, погрешности от старения в течение более года не превышают ±0,5 °С. Подогревные преобразователи могут быть взаимозаменяемыми и иметь стандартную градуировку.

VII.2.5. ПЬЕЗОСОРБЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Пьезосорбционные преобразователи применяют для измерения относительной влажности в пределах от 0 до 100% в основном при положительных температурах. Влагочувствительным элементом является пьезоэлектрический (в основном кварцевый) резонатор, покрытый тонким слоем сорбирующего вещества. Резонатор включен в схему генератора высокой частоты. При изменении влажности меняются масса сорбированной влаги и, как следствие, собственная частота резонатора. Это приводит к изменению частоты генератора. Для воспроизведения преобразованной величины частота генератора модулируется частотой опорного генератора. Разность двух частот (частота биений) является выходной величиной преобразователя.

Функция преобразования может быть приближенно описана линейным уравнением [9]

$$\Delta f = -\frac{f^2}{\rho S N}\,\Delta m,$$

где Δf — изменение частоты резонатора, Гц; f — частота резонатора при абсолютно сухом воздухе, Гц; ρ — плотность кварца, г/дм³; S — площадь поверхности кварцевой пластины, дм²; N — частотный коэффициент, зависящий от геометрических характеристик пьезопластины, Гц·дм; Δm — приращение массы влаги, г.

При достаточно тонких сорбирующих пленках (30—50 нм) чувствительность преобразователя, представляющая собой отношение $\Delta f/\Delta m$, является практически величиной постоянной и составляет 200—400 Гц/мкг. Преобразователи работают в диапазоне частот от 8 до 15 МГц.

Температурную погрешность пьезосорбционных преобразователей определяют опытным путем. Для одного из типов преобразователей предложена эмпирическая формула

$$\Delta\varphi = \varphi\left(\varphi^{\Delta T/T} - 1\right),$$

где φ — относительная влажность, %; $\Delta\varphi$ — абсолютная погрешность, %; T — температура измерения, К; ΔT — разность между температурами градуировки и измерения.

К преимуществам пьезосорбционных преобразователей относят широкие пределы измерений, малую инерционность, достаточно высокую чувствительность, в том числе и в области малых относительных влажностей. Недостатками являются чувствительность к осаждению пыли и других механических загрязнений, а также к некоторым химическим соединениям (диоксиду углерода, парам метилового спирта и др.).

VII.2.6. КУЛОНОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Кулонометрические преобразователи предназначены для измерений малых концентраций влаги обычно в виде объемной доли влаги в воздухе в диапазоне от 0 до 10^4 миллионных долей (млн.$^{-1}$) при температуре анализируемого воздуха от —10 до +50 °С.

Принцип действия кулонометрических преобразователей основан на электролитическом разложении влаги, поглощенной из потока анализируемого воздуха, и измерении тока электролиза. При этом поток воздуха должен строго дозироваться. Влага полностью извлекается из воздуха пленкой сорбирующего вещества, в качестве которого чаще всего используют частично гидратированную пятиокись фосфора P_2O_5.

Устройство кулонометрического преобразователя иллюстрируется схемой рис. VII—3, *а*. На внутреннюю поверхность стеклянного корпуса *2* устанавливают спиральные непересекающиеся электроды (обычно платиновые или родиевые) с выводами *1* и *4*. Между электродами на поверхность корпуса наносят тонкую пленку сорбирующего вещества *3*. Воздух проходит через внутренний канал преобразователя и, омывая сорбент, оставляет в нем содержащуюся влагу.

К выводам электродов присоединяют источник постоянного тока напряжением не менее 2 В и прибор для измерения тока. Под воздействием приложенного напряжения происходит электролитическое разложение воды. В установившемся состоянии система находится в равновесии: количество сорбируемой влаги равно количеству влаги, разлагаемой электрическим током. При постоянной скорости воздуха и его температуре сила тока однозначно зависит от влажности воздуха.

В схему измерений (рис. VII—3, *б*) входят основной *3* и контрольный *4* кулонометрические преобразователи, создающие токи I_1 и I_2. Контрольный преобразователь позволяет следить за состоянием основного преобразователя и при неполном поглощении влаги сигнализировать об этом либо автоматически дополнять показания основного.

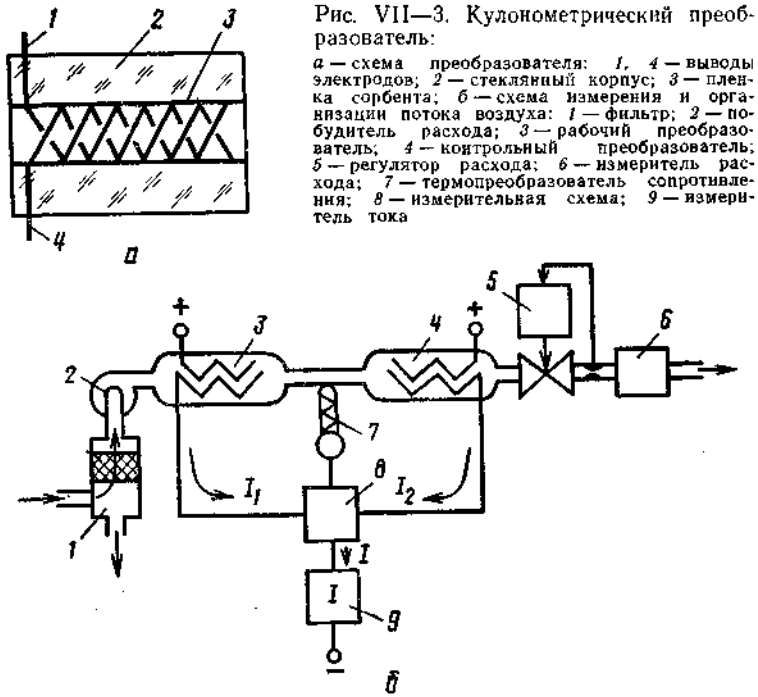


Рис. VII—3. Кулонометрический преобразователь:

а — схема преобразователя: *1*, *4* — выводы электродов; *2* — стеклянный корпус; *3* — пленка сорбента; *б* — схема измерения и организации потока воздуха: *1* — фильтр; *2* — побудитель расхода; *3* — рабочий преобразователь; *4* — контрольный преобразователь; *5* — регулятор расхода; *6* — измеритель расхода; *7* — термопреобразователь сопротивления; *8* — измерительная схема; *9* — измеритель тока

Прокачка воздуха через преобразователи обеспечивается побудителем расхода *2*, а поддержание заданного расхода — регулятором *5*. Величину расхода контролируют измерителем *6*. Коррекция по температуре осуществляется при помощи термопреобразователя сопротивления *7*, который вместе с электродами преобразователей подключается к измерительной схеме *8*. Выходной ток *I* воздействует на измеритель *9*. При наличии механических загрязнений воздух очищают в грубом или тонком фильтре *1*.

Кулонометрические преобразователи будут нормально функционировать в том случае, если в воздухе не содержатся вещества, реагирующие с сорбентом. К таким веществам, в частности, относятся аммиак, пары ацетона, спирта и углеводородистых газов.

Недостатками преобразователей являются постоянные отказы из-за загрязнений и появление платиновой «черни». Во всех случаях чувствительный элемент может быть восстановлен по методике, рекомендуемой заводом-изготовителем.

Основными достоинствами кулонометрических преобразователей являются работа в широких диапазонах температур и давлений, независимость от стабильности напряжения источников питания, возможность взаимозаменяемости и стандартизации чувствительных элементов, в том числе после регенерации.

VII.3. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ О СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Промышленность серийно выпускает ограниченное число средств измерений влажности воздуха. При этом лишь часть из них может найти применение в холодильной технике. Основные технические данные гигрометров приведены в табл. VII—2. Ниже приведены краткие описания некоторых гигрометров.

Гигрометр ГС-210 состоит из двух преобразователей: первичного ППВ и промежуточного ПП. Первичный преобразователь сорбционно-резистивного (электролитического) типа собран из 7 чувствительных элементов, смонтированных в общий блок. В этом же блоке размещен термопреобразователь сопротивления (терморезистор). Схема первичного преобразователя представлена на рис. VII—4, *а*. Каждый из чувствительных элементов $R_{\varphi 1}$—$R_{\varphi 7}$ работает в узком диапазоне относительной влажности (от 10 до 20%), частично перекрывая диапазоны соседних элементов. Чувствительные элементы соединены между собой через постоянные резисторы R_1—R_7. В результате подбора элементов преобразователя его эквивалентное сопротивление R_φ практически линейно зависит от относительной влажности (рис. VII—4, *б*). Полупроводниковый терморезистор $R_т$ имеет собственные выводы.

Промежуточный преобразователь *ПП* имеет достаточно простую схему без усилительных элементов (рис. VII—4, *в*). Первичный преобразователь представлен в виде эквивалентного резистора R_φ и терморезистора $R_т$. Промежуточный преобразователь питается от

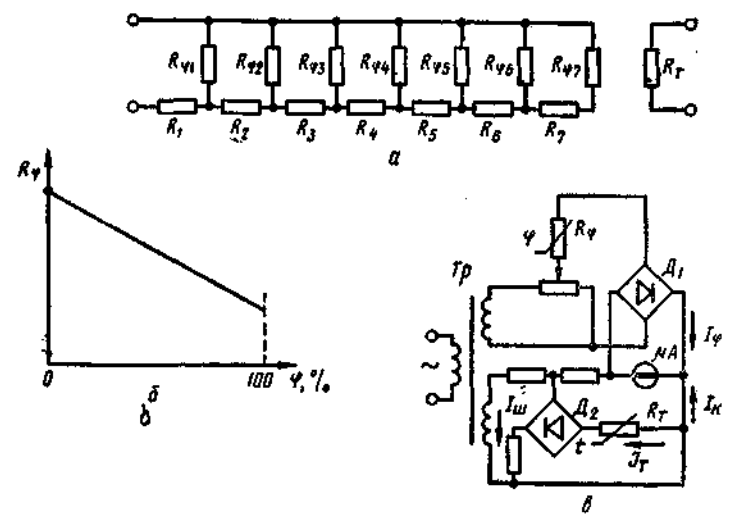


Рис. VII—4. Гигрометр ГС-210:

а — схема первичного преобразователя; *б* — вид статической характеристики первичного преобразователя; *в* — упрощенная схема гигрометра

Таблица VII—2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИГРОМЕТРОВ

Тип гигрометра	Тип первичного преобразователя	Измеряемая величина	Единица измеряемой величины	Пределы измерений	Предел допустимой погрешности	Температура анализируемого воздуха, °С	Давление воздуха, кПа
1	2	3	4	5	6	7	8
Психрометр ПБУ-1М	Психрометрический	ОВ*	%	40—80	±7% (абс.)	0—45	—
Психрометр аспирационный МВ-4М	То же	ОВ*	%	10—100	±7% (абс.)	—10÷+40	—
То же, М-34	»	ОВ*	%	10—100	±7% (абс.)	—10÷40	—
Преобразователь влажности ДВ-02	Сорбционно-резистивный гигристорный	ОВ*	%	40—100	±8% (абс.)	—10÷+45	—
Гигрометры:							
ГС-210	Сорбционно-резистивный электролитический	ОВ*	%	15—98	+3% (абс.)	5—40	101±5 кПа(абс.)

Продолжение

Тип гигрометра	Тип первичного преобразователи	Скорость потока, м/с	Постоянная времени, время установления, с	Состав гигрометра	Способ установки первичного преобразователя	Тип вторичного прибора	Примечание
1	2	9	10	11	12	13	14
Психрометр ПБУ-1М	Психрометрический	—	—	—	Настенный	—	
Психрометр аспирационный МВ-4М	То же	2	—	—	»	—	С механическим приводом вентилятора
То же, М-34	»	2	—	—	»	—	С электрическим приводом вентилятора
Преобразователь влажности ДВ-02	Сорбционно-резистивный гигристорный	—	—	—	Переносный	—	
Гигрометры:							
ГС-210	Сорбционно-резистивный электролитический	—	Время установления 180	Преобразователи первичный ППВ и промежуточный ПП	Переносный и настенный	Показывающий, переносный и щитовой	Имеется стандартный выход 0—10 мВ

Продолжение

Тип гигрометра	Тип первичного преобразователя	Измеряемая величина	Единица измеряемой величины	Пределы измерений	Предел допустимой погрешности	Температура анализируемого воздуха, °С	Давление воздуха, кПа
1	2	3	4	5	6	7	8
ГП-225	Электролитический подогревный	ТР	°С	—20÷+30 или —5÷45	±1°С ±1°С	0÷+40 или 35—80	—
		МДВ	%	2—27	±1,25% (абс.)	10—35	—
«Волна-1М»	Пьезосорбционный	ОВ	%	0—100	±1,5% (абс.)	0÷+60	40—133 кПа (абс.)
«Волна-2М»	То же	ОВ	%	0—100	±2% (абс.)	0÷+60	40—133 кПа (абс.)

Продолжение

Тип гигрометра	Тип первичного преобразователя	Скорость потока, м/с	Постоянная времени, время установления, с	Состав гигрометра	Способ установки первичного преобразователя	Тип вторичного прибора	Примечание
1	2	9	10	11	12	13	14
ГП-225	Электролитический подогревный	—		Преобразователи первичный ППВ-17 и промежуточный	Переносный	Показывающий	
«Волна-1М»	Пьезосорбционный	0—15	Постоянная времени 120, время установления 960	Первичный преобразователь и блок измерений	Настенный	Цифровой	Имеется стандартный выход 0—10 мВ и кодовый выход. Основная частота 5 МГц
«Волна-2М»	То же	0—15	Постоянная времени 60, время установления 600	Первичный преобразователь, блок измерения и автоматический потенциометр	Переносный	Показывающий и самопишущий	Основная частота 5 МГц

Продолжение

Тип гигрометра	Тип первичного преобразователя	Измеряемая величина	Единица измеряемой величины	Пределы измерений	Предел допустимой погрешности	Температура анализируемого воздуха, °С	Давление воздуха, кПа
1	2	3	4	5	6	7	8
АГК-212Ф	Конденсационный	ТР	°С	—50÷+20	±1°С	—45÷+20	—
ФЭГ-21М	»	ТР	°С	—15÷+20	±1°С	10—35	0,5—5 кПа (изб.)
«Байкал-1»	Кулонометрический	ОДВ	млн.$^{-1}$	0—1000 (9 диапазонов)	±(4÷10) % (прив.)	—10÷+50	—
«Байкал-2»	То же	ОДВ	млн.$^{-1}$	0221000 (9 диапазонов)	±(4—10) % (прив.)	—10÷+30	—
«Байкал-3»	»	ОДВ	млн.$^{-1}$	0—1000 (9 диапазонов)	±(4÷10)% (прив.)	—10÷+50	—

Продолжение

Тип гигрометра	Тип первичного преобразователя	Скорость потока, м/с	Постоянная времени, время установления, с	Состав гигрометра	Способ установки первичного преобразователя	Тип вторичного прибора	Примечание
1	2	9	10	11	12	13	14
АГК-212Ф	Конденсационный	—	—	—	Щитовой	Показывающий	
ФЭГ-21М	»	—	Время установления 55	Термопреобразователь и автоматический мост	»	Показывающий и самопишущий	Расход воздуха через преобразователь 1±0,1 л/мин
«Байкал-1»	Кулонометрический	—	—	Первичный преобразователь, блок управления, самопишущий потенциометр	»	То же	
«Байкал-2»	То же	—	—	То же, в искробезопасном исполнении	»	»	
«Байкал-3»	»	—	—	Первичный преобразователь и настольный блок	»	Показывающий	

Примечания: 1. Обозначения измеряемых величин (графа 3): ОВ — относительная влажность, ТР — точка росы, МДВ — массовая доля влажности, ОДВ — объемная доля влажности. 2. Сокращения «абс.» и «прив.» в графе 6 соответствуют абсолютной и приведенной относительной погрешности.

сети переменного тока через трансформатор *Тр*. Верхняя вторичная обмотка питает основную цепь, включающую в себя мостовой выпрямитель D_1 и микроамперметр μ*A*. Резистор R_φ включен последовательно в питающую диагональ моста D_1, поэтому сила тока через эту диагональ зависит от относительной влажности: ток растет с ростом влажности. Соответственно растет и выпрямленный ток I_φ, протекающий через микроамперметр, шкала которого отградуирована в процентах относительной влажности.

Нижняя обмотка питает цепь коррекции по температуре. Видно, что один из полупериодов шунтируется половиной выпрямителя D_2 (ток $I_ш$). Второй полупериод создает токи $I_т$ через терморезистор $R_т$ и $I_к$ через микроамперметр. Ток коррекции $I_к$ зависит от сопротивления $R_т$: чем больше последнее, т. е. чем ниже температура, тем больше ток коррекции.

Внешний вид гигрометра ГС-210 показан на рис. VII—5. Габаритные размеры и масса гигрометра следующие: первичного преобразователя 145×75×62 мм и 0,5 кг; промежуточного преобразователя 197×148×187 мм и 2,1 кг. Длина соединительного кабеля между преобразователями 3 м, однако ее можно увеличить до 30 м.

Первичные преобразователи взаимозаменяемы. Питание — от сети переменного тока напряжением 220 В с колебаниями от —10 до +5%. Наличие дополнительного выхода с сигналом 0—10 мВ (на схеме рис. VII—4, *в* не показан) позволяет включить дополнительный вторичный прибор, например самопишущий потенциометр.

Гигрометр «Волна-1М» *состоит из первичного преобразователя* и блока измерений с цифровой индикацией (индикация трехразрядная: десятки, единицы и десятые доли процентов относительной влажности).

Первичный преобразователь — пьезосорбционного типа с кварцевым чувствительным элементом. На поверхность чувствительного элемента нанесена сорбирующая пленка из полиамида, которая избирательно поглощает водяной пар из анализируемого воздуха. Кроме влагочувствительного элемента первичный преобразователь включает в себя термочувствительный элемент (терморезистор), который обеспечивает температурную компенсацию.

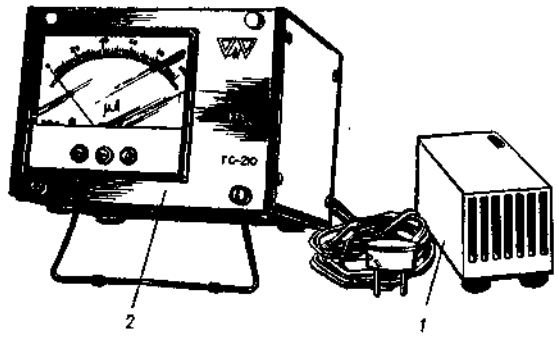


Рис. VII—5. Внешний вид гигрометра ГС-210:
1 — первичный преобразователь; *2* — промежуточный преобразователь

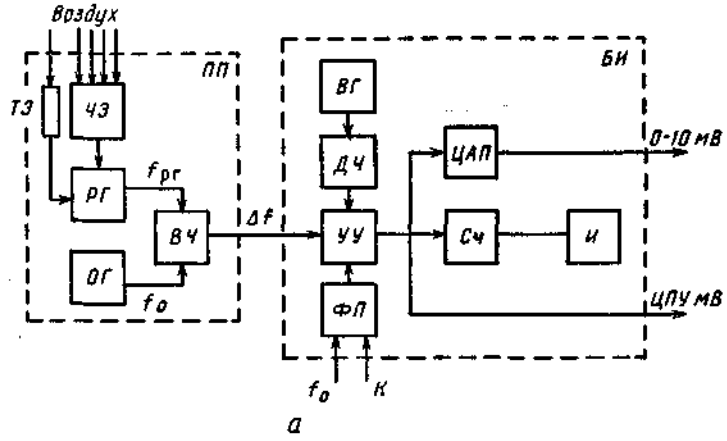
На упрощенной структурной схеме (рис. VII—6, *а*) показано, что влаго- и термочувствительные элементы *ЧЭ* и *ТЭ* включены в рабочий генератор *РГ*, частота которого зависит от измеряемой относительной влажности:

$$f_{рг} = k\Pi(\varphi),$$

где k — постоянный коэффициент; $\Pi(\varphi)$ — статическая функция преобразования относительной влажности.

Опорный генератор *ОГ* вырабатывает частоту f_0 (примерно 5 МГц), соответствующую нулевой влажности. В элементе *ВЧ* происходит вычитание частот, в результате чего на выходе первичного преобразователя *ПП* имеет место сигнал с разностной частотой:

$$\Delta f = f_0 - k\Pi(\varphi).$$



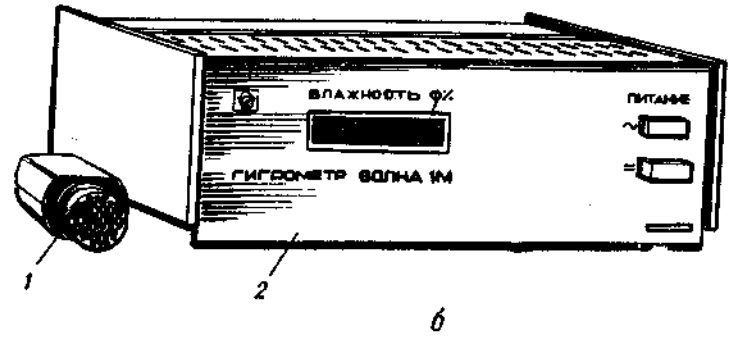


Рис. VII—6. Гигрометр «Волна-1М»:
а — упрощенная структурная схема; *б* — общий вид; *1* — первичный преобразователь; *2* — блок измерений

Зависимость П(φ) нелинейна, а величины k и f_0 зависят от технологии изготовления чувствительных элементов. В связи с этим в блоке измерений *БИ* предусмотрен функциональный преобразователь *ФП*, который вырабатывает сигнал, зависящий от параметров данного первичного преобразователя. Этот сигнал совместно с сигналом Δf подается на вход управляющего устройства *УУ*. Последнее в свою очередь работает под управлением времязадающего генератора *ВГ* и делителя частоты *ДЧ*, которые определяют интервалы времени счета импульсов. В течение этих интервалов счетчик *Сч* определяет число импульсов, пропорциональных относительной влажности, и вводит его в цифровой индикатор *И*, по которому ведется отсчет. С помощью устройства *УУ* формируется также параллельный двоично-десятичный код для управления цифропечатающим устройством *ЦПУ*. Кроме того, во внешнюю цепь выдается стандартный аналоговый сигнал 0—10 мВ, формируемый в цифроаналоговом преобразователе *ЦАП*. Этот сигнал можно использовать для включения аналогового вторичного прибора, например самопишущего потенциометра.

Внешний вид гигрометра показан на рис. VII—6, *б*. Габаритные размеры и масса гигрометра следующие: первичного преобразователя 40×28×140 мм и 0,2 кг; блока измерений 260×95×230 мм и 4 кг.

Первичный преобразователь может монтироваться в трубопровод или аппарат с помощью резьбы М24×1 длиной 10 мм либо на стену или другую вертикальную поверхность с помощью комплектного кронштейна.

Гигрометр «Волна-2М» состоит из первичного преобразователя, блока измерений и самопишущего потенциометра типа КСП2 (см. табл. IV—6).

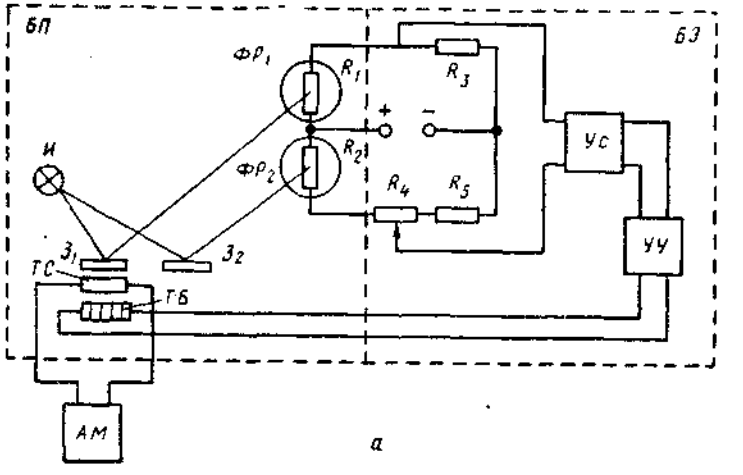
Первичный преобразователь — пьезосорбционного типа. Как и в гигрометре «Волна-1М», наряду с чувствительным элементом в корпусе первичного преобразователя размещены рабочий и опорный генераторы и элемент, выполняющий вычитание частот и выделение разностей частоты. Блок измерений содержит необходимые элементы для преобразования разностной частоты в аналоговый выходной сигнал 0—10 мВ, который измеряется с помощью самопишущего потенциометра, градуируемого непосредственно в процентах относительной влажности. Конструкция блока измерений, так же как и самопишущего потенциометра, предусматривает установку его на щите. Основные технические данные приведены в табл. VII—2.

Габаритные размеры и масса элементов гигрометра следующие: первичного преобразователя ∅ 35×192 мм и 0,25 кг; блока измерений 160×160×280 мм и 5 кг; самопишущего потенциометра 240×320×442 мм и 17 кг.

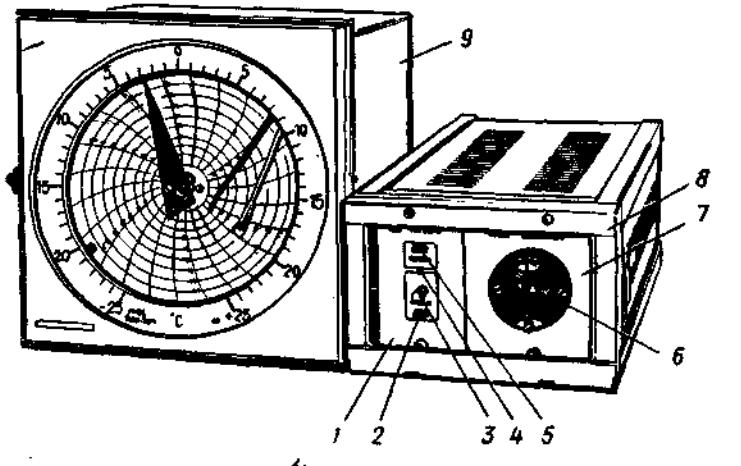
В комплект гигрометра входят также юстировочные стаканы с насыщенными растворами хлористого магния $MgCl_2$ и хлористого калия KCl. Настройку прибора производят, пользуясь графиками зависимости относительной влажности над указанными растворами; графики приводятся в инструкции по эксплуатации и паспорте прибора.

Фотоэлектрический гигрометр ФЭГ-21М относится к приборам конденсационного типа и предназначен для измерения точки росы. В состав гигрометра входят преобразователь ФЭП-21 и автоматический мост КСП3 (см. табл. IV—6).

Преобразователь состоит из двух блоков, размещенных в общем корпусе: блока преобразования и электронного блока. Упрощенная схема гигрометра представлена на рис. VII—7, *а*. В блоке преобразования *БП* размещены два зеркала: рабочее $З_1$ и вспомогательное $З_2$. Они освещаются общим источником света *И*.



а



б

Рис. VII—7. Гигрометр ФЭГ-21М:

а — упрощенная схема; *б* — внешний вид: *1* — электронный блок; *2* — переключатель; *3* — ручка настройки баланса; *4* — светодиод-индикатор баланса; *5* — переключатель «Контроль»; *6* — головка первичного преобразователя; *7* — блок преобразования; *8* — корпус преобразователя; *9* — автоматический мост КСП-3

Отраженные от зеркал световые потоки воздействуют на два фоторезистора: рабочий $ФР_1$ и вспомогательный $ФР_2$ с сопротивлениями соответственно R_1 и R_2. Фоторезисторы включены в мост, куда кроме них входят резисторы R_3, R_4 и R_5. Питание моста осуществляется постоянным током напряжением 5,6 В.

С помощью резистора R_4 добиваются, чтобы баланс моста наступал при определенном слое конденсата на зеркале $З_1$. Если при этой настройке слой конденсата окажется меньше, то световой поток резистора $ФР_1$ увеличится, что приведет к разбалансу моста. При большем слое конденсата световой поток резистора $ФР_1$ уменьшится, что вызовет разбаланс обратного направления. Анализируемый воздух подводится к преобразователю с помощью гибких пластмассовых трубок внутренним диаметром 4 мм. На выходе воздуха из преобразователя устанавливают ротаметр для контроля расхода воздуха.

Приведенная в табл. VII—2 допустимая погрешность относится к условиям, когда температура воздуха равна 20 °С при измерениях точки росы в диапазоне от —15 до +15 °С и 25 °С в диапазоне от —15 до +20 °С.

При отклонении температуры от номинальных значений возникает дополнительная погрешность, вычисляемая по формуле

$$\Delta t = 1 + 0{,}027(t - t_{от}),$$

где t — температура воздуха; $t_{от}$ — температура, равная 20 или 25 °С в зависимости от диапазона рабочих температур.

Общая масса гигрометра не превышает 30 кг. Габаритные размеры преобразователя 239×159×530 мм, автоматического моста 332×320×267 мм. Внешний вид гигрометра представлен на рис. VII—7, *б*.

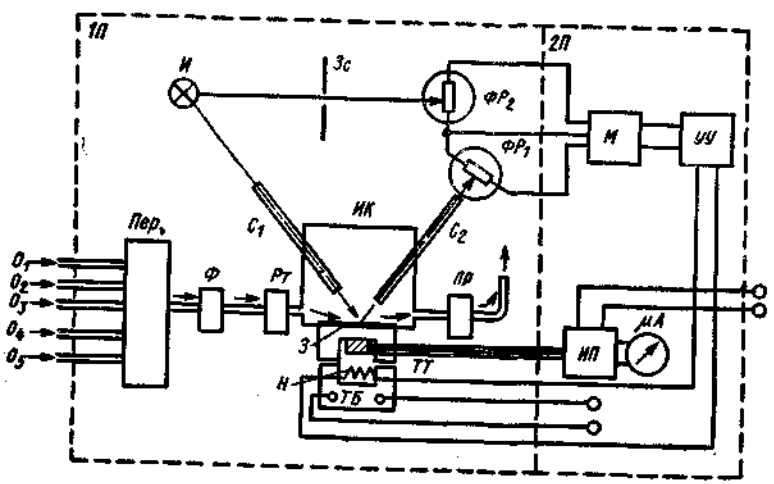


Рис. VII—8. Упрощенная схема гигрометра АГК-212Ф

Гигрометр конденсационный АГК-212Ф предназначен для непрерывного измерения температуры точки росы. Для определения относительной влажности к прибору прилагаются пересчетные таблицы. Гигрометр допускает присоединение до 5 объектов измерений; переключение с точки на точку ручное.

Гигрометр состоит из первичного и промежуточного преобразователей. Упрощенная функциональная схема гигрометра представлена на рис. VII—8. К первичному преобразователю *1П* подводят трубки $О_1$—$О_5$, соединяющие гигрометр с объектами измерений. Выбор объекта измерения осуществляют ручным переключателем, к выходному патрубку которого присоединен фильтр *Ф* и далее — ротаметр *Рт* для визуального контроля расхода анализируемого воздуха. Воздух подводится к измерительной камере *ИК*, в которой размещено охлаждаемое зеркало *З*, и с помощью побудителя расхода *ПР* отводится в атмосферу. Фотоэлектрическая чувствительная система содержит источник света *И* и два фоторезистора: основной $ФР_1$ и компенсационный $ФР_2$. На фоторезистор $ФР_1$ свет от источника попадает через световод $С_1$, зеркало *З* и световод $С_2$. Величина этого светового потока зависит от состояния зеркала: поток уменьшается при выпадении росы. На фоторезистор $ФР_2$ свет попадает через заслонку *Зс*, которая позволяет вручную устанавливать необходимый поток.

Фоторезисторы включены в мостовую схему *М*, размещенную в промежуточном преобразователе *2П*. Мост настраивается так, чтобы его выходной сигнал был равен нулю при заданном слое конденсата. Если слой конденсата увеличивается, то на выходе моста появляется напряжение, которое с помощью усилительно-управляющего устройства *УУ* управляет работой нагревателя *Н* (в данном случае увеличивает нагрев). Полупроводниковая термобатарея работает в постоянном режиме охлаждения, поэтому в режиме постоянной влажности устанавливается необходимая мощность нагрева.

При уменьшении влажности устройство *УУ* снижает мощность нагрева и температура зеркала несколько снижается, возвращая систему к заданной толщине конденсата.

С помощью термочувствительного транзистора *ТТ* измеряется температура зеркала, которая соответствует точке росы. Сигнал от этого транзистора через измерительный преобразователь *ИП* подается на стрелочный микроамперметр *μА*, шкала которого отградуирована непосредственно в градусах Цельсия. Предусмотрен также стандартный выходной сигнал —10—0+10 мВ, который можно использовать для включения вторичного прибора, например автоматического потенциометра.

Основные технические данные гигрометра приведены в табл. VII—2. Гигрометр питается от сети переменного тока напряжением 220 В, потребляя мощность не более 80 В·А. Масса и габаритные размеры следующие: первичного преобразователя 11 кг и 480×390×198 мм, промежуточного преобразователя 11 кг и 480×510×158 мм. Преобразователи предназначены для щитового монтажа. Подвод анализируемого воздуха осуществляют полиэтиленовыми трубками диаметром 10 мм. Трубки должны проходить через помещения, температура воздуха в которых должна быть выше измеряемой точки росы. Допустимая длина подводящих трубок 60 м.

Глава VIII

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

VIII.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрические измерения занимают важное место в испытаниях и эксплуатации холодильных машин и установок. При этом, однако, номенклатура измеряемых величин невелика и сводится в основном к следующим.

Напряжение и силу тока измеряют с целью контроля состояния электрических машин, аппаратов, нагревателей и других устройств, а также наблюдений за исправностью устройств и систем электропитания и электроснабжения. В некоторых случаях напряжение и силу тока измеряют для косвенного определения мощности.

В большинстве случаев измеряют напряжения и силу тока промышленной частоты (50 Гц) в одно- и трехфазных цепях. При этом номинальные значения напряжений соответствуют стандартным — 127, 220 и 308 В, в редких случаях более низкие (12, 24, 36 В) и более высокие (600 В и выше). В практике испытаний встречаются и случаи применения постоянного тока с напряжениями от 12 до 220 В. Сила тока в электрических цепях холодильных машин может иметь значения от долей ампера, например в цепях управления, до 1000 и более ампер в цепях мощных электродвигателей.

Мощность измеряют практически во всех случаях, когда определяют энергетические показатели компрессоров, агрегатов и машин. Диапазон измеряемых мощностей достаточно широк: от десятых долей до сотен киловатт. В большинстве случаев измеряют активную мощность в одно- или трехфазных цепях переменного тока. Реже встречаются случаи измерения полной (кажущейся) и реактивной мощности в цепях переменного тока и мощности в цепях постоянного тока.

Сопротивление постоянному току (омическое сопротивление) измеряют для косвенного определения температуры обмоток электродвигателей и для проверки сопротивления изоляции. Диапазон измеряемых сопротивлений в первом случае зависит от мощности двигателя и охватывает величины от тысячных долей до единиц Ом. Измерения в этом диапазоне имеют специфические особенности в связи с тем, что измерения приходится выполнять на действующих машинах.

Все другие электрические измерения не являются типичными и потому в данной главе не рассматриваются. Сведения о них можно получить в специальной литературе [90]. В отличие от этого

при проверке изоляции имеют дело с сопротивлениями порядка единиц и десятков мегаом.

Измерения электрических величин выполняют с помощью средств измерений (приборов) со стрелочными[1] или цифровыми указателями, а также с использованием измерительных преобразователей. Стрелочные приборы бывают нескольких систем, однако в практике получили распространение приборы электромагнитной, электродинамической, магнитоэлектрической и ферродинамической систем.

Приборы электромагнитной системы предназначены для измерений постоянных и переменных токов и напряжений, а также соответствующих мощностей. Схема измерительного механизма представлена на рис. VIII—1, *а*. Измеряемый ток *I* или ток, вызванный измеряемым напряжением *U*, проходит через обмотку катушки *1* и создает магнитное поле. Подвижной сердечник *2*, изготовленный из мягкого ферроматериала, под действием поля втягивается в катушку, создавая момент вращения вокруг оси *3*. Спиральная пружина *4* создает противодействующий момент. В результате каждому значению тока соответствуют определенный угол поворота и положение стрелки *5* относительно шкалы *6*. Диапазон измерения тока приборами электромагнитной системы лежит в пределах от единиц миллиампер до десятков ампер, напряжение — от единиц до нескольких сотен вольт.

Выпускают приборы данной системы с классами точности от 0,2 до 2,5. При полном отклонении стрелки потребляемая мощность порядка 0,1 Вт.

Приборы электродинамической системы также предназначены для измерений постоянных и переменных токов и напряжений. Измерительный механизм (рис. VIII—1, *б*) состоит из неподвижной двухсекционной катушки *1* и подвижной катушки *7*, закрепленных на оси *3*. Подвод тока к подвижной катушке производится через

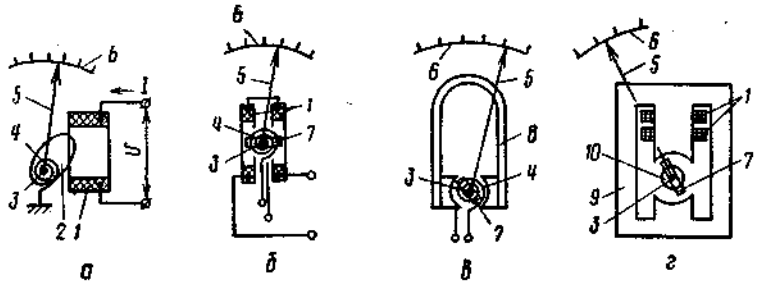


Рис. VIII—1. Схема измерительных механизмов электромагнитной (*а*), электродинамической (*б*), магнитоэлектрической (*в*) и ферродинамической (*г*) систем:

1 — неподвижная катушка; *2* — подвижной сердечник; *3* — ось; *4* — спиральная пружина; *5* — стрелка; *6* — шкала; *7* — подвижная катушка; *8* — постоянный магнит; *9* — магнитопровод; *10* — ферромагнитный сердечник

[1] К стрелочным приборам условно отнесены и приборы со световым отсчетом.

спиральные пружины *4* (или растяжки), которые, кроме того, служат для создания противодействующего момента. Неподвижная и подвижная катушки могут соединяться последовательно и параллельно (в вольтметрах и амперметрах) либо питаться независимо (ваттметры). Диапазон измеряемых токов — от единиц миллиампер до единиц ампер, напряжений — от десятков милливольт до сотен вольт. Наивысший класс точности 0,1. При полном отклонении стрелки на нижнем пределе диапазона измерений потребляемая мощность около 0,1 Вт.

Приборы магнитоэлектрической системы предназначены для измерений постоянных тока и напряжения. Постоянный магнит *8* (рис. VIII—1, *в*) создает поле, в которое помещена подвижная катушка *7*, вращающаяся вокруг оси *3*. Через спиральные пружины *4* в катушку подается измеряемый ток, взаимодействующий с магнитным полем и создающий вращающий момент.

Диапазон измерения тока лежит в пределах от единиц микроампер (гальванометры) до десятков ампер, напряжения — от сотен микровольт до сотен вольт. Наивысший класс точности 0,1. Приборы этой системы отличаются весьма малой потребляемой мощностью: в гальванометрах при токе порядка 1 мкА потребляемая мощность составляет 10^{-9} Вт.

Высокая чувствительность приборов магнитоэлектрической системы, их малые размеры используются в осциллографических гальванометрах, применяемых для регистрации быстроменяющихся величин (см. главу IX).

Приборы ферродинамической системы предназначаются для измерений тока, напряжения и мощности в цепях переменного тока. Рамка (подвижная катушка) *7* (рис. VIII—1, *г*) перемещается в воздушном зазоре между полосами магнитопровода *9* и сердечника *10*. Магнитный поток создается катушками *1*, схема включения которых зависит от измеряемой величины. Диапазон измерений тока находится в пределах от единиц миллиампер до единиц ампер. Наивысший класс точности 0,5. На нижнем пределе тока потребляемая мощность составляет порядка 0,02 Вт.

В отличие от приборов, относящихся к электромеханическим устройствам, находят применение электрические измерительные преобразователи. С их помощью входные величины — сила тока, напряжение и мощность — преобразуются в стандартные электрические сигналы постоянного тока (0—5 мА, 0—10 В и др.). Такие преобразователи можно использовать как для прямых измерений, так и в качестве элементов дистанционных и централизованных систем.

VIII.2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ

VIII.2.1. ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Схемы измерения тока $I_н$, протекающего через нагрузку H, и приложенного к ней напряжения $U_н$ приведены на рис. VIII—2, *а* и *б*. В схемах амперметр и вольтметр условно изображены в виде комбинации измерительных механизмов $ИМ_A$ и $ИМ_V$ и соединенных последовательно с ними внутренних сопротивлений R_A и

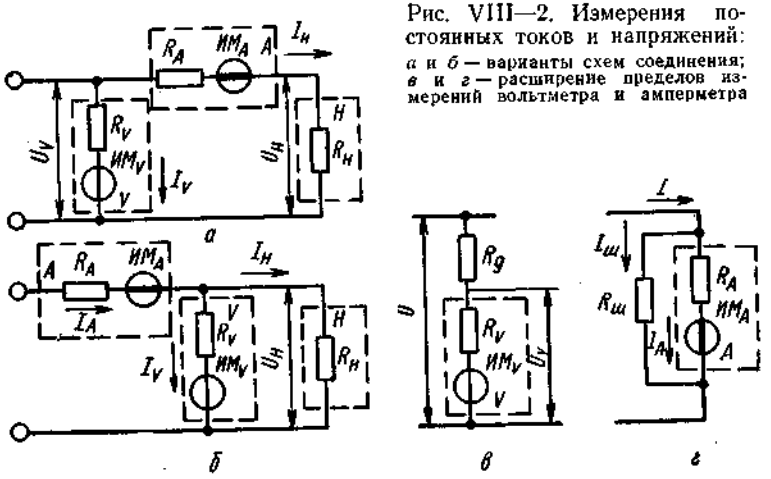


Рис. VIII—2. Измерения постоянных токов и напряжений:
а и *б* — варианты схем соединения; *в* и *г* — расширение пределов измерений вольтметра и амперметра

R_V. Схемы различаются взаимным присоединением вольтметра V и амперметра A. В схеме (см. рис. VIII—2, *а*) ток, протекающий через нагрузку, равен току, текущему через амперметр. В связи с этим методическая погрешность измерения тока отсутствует.

Напряжение U_V, измеряемое вольтметром, отличается от напряжения на нагрузке $U_н$ на величину падения напряжения на сопротивлении амперметра R_A: $U_н = U - I_н R_A$. Величина $\Delta U = I_н R_A$ является методической абсолютной погрешностью измерения напряжения.

Относительную погрешность можно выразить через сопротивления нагрузки и амперметра:

$$\delta_U = R_A / R_н \cdot 100\%. \qquad \text{(VIII—1)}$$

Таким образом, погрешность тем меньше, чем меньше отношение $R_A/R_н$ (чем меньше сопротивление амперметра R_A).

В схеме (см. рис. VIII—2, *б*) напряжение, воспринимаемое вольтметром V, равно напряжению $U_н$ на нагрузке. В этой схеме методическая погрешность измерения напряжения отсутствует.

Ток, протекающий через амперметр A, равен сумме токов $I_н$ и I_V, протекающих соответственно через нагрузку и вольтметр:

$$I_н = I_A - U_н / R_V.$$

Величина $\Delta I = U_н/R_V$ является методической абсолютной погрешностью измерения тока.

Относительную погрешность можно выразить через сопротивление нагрузки и вольтметра:

$$\delta_I = R_н / R_V \cdot 100\%. \qquad \text{(VIII—2)}$$

Из формулы следует, что погрешность уменьшается с увеличением сопротивления вольтметра R_V.

В необходимых случаях верхние пределы измерений вольтметра и амперметра можно расширить, применяя специальные схемы.

Для расширения верхнего предела измерения вольтметра применяют дополнительный резистор $R_д$ (рис. VIII—2, *в*). Если ток, при котором стрелка вольтметра отклоняется до верхнего предела, равен $I_{V\max}$, то максимальное измеряемое напряжение

$$U_{\max} = I_{V_{\max}}(R_д + R_V), \qquad \text{(VIII—3)}$$

а падение напряжения на вольтметре при этом

$$U_{V_{\max}} = I_{V_{\max}} R_V.$$

Беря отношение этих напряжений, находим

$$R_д = R_V\left(\frac{U_{\max}}{U_{V_{\max}}} - 1\right).$$

Величина $R_д$ — это требуемое сопротивление дополнительного резистора для измерения напряжения $U_{\max}$ при известном верхнем пределе $U_{V\max}$.

Если известны ток $I_{V\max}$ и внутреннее сопротивление прибора R_V, то сопротивление $R_д$ можно найти из выражения (VIII—3):

$$R_д = \frac{U}{I_{V_{\max}}} - R_V.$$

Показания вольтметра с последовательно присоединенным резистором $R_д$ пересчитываются по формуле

$$U = UV\left(1 + \frac{R_д}{R_V}\right) \qquad \text{(VIII—4)}$$

где U — измеряемое напряжение; U_V — показания вольтметра. При $R_д \gg R_V$, что часто имеет место, формула (VIII—4) приобретает вид

$$U = U_V \frac{R_д}{R_V}.$$

Для расширения пределов измерений амперметра применяют шунт (рис. VIII—2, *г*), т. е. резистор, параллельно присоединяемый к прибору.

Пользуясь методом, аналогичным показанному выше, находим

$$R_ш = R_A \frac{I_{A\max}}{I_{\max} - I_{A\max}},$$

где $R_ш$ — сопротивление шунта; R_A — сопротивление амперметра; $I_{\max}$ — максимальный измеряемый ток; $I_{A\max}$ — верхний предел измерения амперметра.

Пересчет показаний амперметра производят по формуле

$$I = I_A\left(1 + \frac{R_A}{R_ш}\right), \qquad \text{(VIII—5)}$$

где I — измеряемый ток; I_A — показания амперметра. В часто встречающемся случае $R_A \gg R_ш$ формула (VIII—5) преобразуется:

$$I = I_A \frac{R_A}{R_ш}. \qquad \text{(VIII—6)}$$

Промышленностью выпускаются шунты на различные токи с несколькими номиналами падений напряжения $U_ш$ (например, 60, 75, 100 мВ и т. д.). Зная номинальные значения $I_ш$ и $U_ш$, можно определить $R_ш$ и далее использовать это значение в формулах (VIII—5) и (VIII—6). С такими шунтами следует применять измерительные приборы с известными напряжениями полного отклонения.

VIII.2.2. ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Основные положения, изложенные выше, остаются в силе и при измерениях переменных токов и напряжений (имеются в виду токи и напряжения промышленной частоты 50 Гц). В отличие от измерений в цепях постоянного тока измерительные механизмы характеризуются комплексным сопротивлением переменному току: кроме активного они обладают индуктивным сопротивлением. Однако величины индуктивного сопротивления относительно невелики, в связи с чем в большинстве случаев его можно не учитывать.

Измерительные приборы переменного тока отградуированы в эффективных значениях токов и напряжений (эффективные значения тока и напряжения в $\sqrt{2}$ раз меньше их амплитудных значений). Расширение пределов измерений вольтметров осуществляют дополнительными резисторами и трансформаторами напряжения. Расширение пределов измерений амперметров производят исключительно с помощью трансформаторов тока.

Измерительные трансформаторы характеризуются номинальными коэффициентами трансформации:

$$K_{U_н} = \frac{U_{1н}}{U_{2н}}, \quad K_{I_н} = \frac{I_{1н}}{I_{2н}}, \qquad \text{(VIII—7)}$$

где $K_{U_н}$, $K_{I_н}$ — коэффициенты трансформации соответственно трансформатора напряжения и тока; $U_{1н}$, $U_{2н}$, $I_{1н}$, $I_{2н}$ — номинальные значения напряжений и токов в первичной (индекс 1) и во вторичной (индекс 2) обмотках.

Значения $K_{U_н}$ и $K_{I_н}$ приведены в паспортах трансформаторов.

Схемы включения измерительных трансформаторов показаны на рис. VIII—3. Первичная обмотка I трансформатора напряжения TpH (рис. VIII—3, *а*) включается между точками измерения напряжения U. Во вторичную обмотку II включают вольтметр V, который воспринимает пониженное напряжение U_V.

В соответствии с (VIII—7) измеряемое напряжение будет $U = K_{U_н} U_V$, откуда легко определить пределы измерений вольтметра и пересчитать его показания. В схеме измерения тока (рис. VIII—3, *б*) через первичную обмотку I трансформатора TpT пропускают весь измеряемый ток. Во вторичной обмотке II цир-

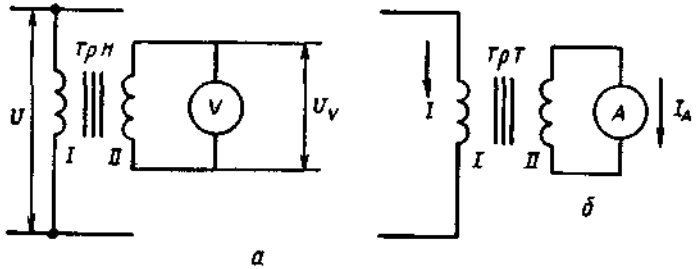


Рис. VIII—3. Применение измерительных трансформаторов напряжения (*а*) и тока (*б*) для расширения пределов измерений

кулирует ток I_A. Измеряемый ток рассчитывается тем же путем: $I=KI_A$.

Трансформаторы отличаются друг от друга числами витков в первичной w_1 и вторичной w_2 обмотках. При этом для трансформаторов напряжения $w_1>w_2$, а для трансформаторов тока $w_1<w_2$.

Измерительные трансформаторы имеют нормированные точностные характеристики. Погрешности, вносимые трансформаторами, в основном связаны с отклонением фактического коэффициента трансформации от номинального. Относительная погрешность трансформатора выражается в виде

$$\delta=\frac{K_н-K}{K},$$

где $K_н$ — номинальное значение коэффициента трансформации; K — действительное значение.

Эта формула справедлива для трансформаторов тока и напряжения.

Из теории известно [90], что действительные коэффициенты трансформации зависят от величин w_1 и w_2, от значений сопротивлений, на которые замкнута вторичная обмотка, а также от напряжения и тока в первичной обмотке.

В связи с этим выпускаемые измерительные трансформаторы предназначаются для определенных пределов напряжений, токов и нагрузок и в этих пределах регламентируются их допустимые погрешности. Промышленность выпускает измерительные трансформаторы классов точности от 0,05 до 3. Следует также иметь в виду, что измерительные трансформаторы вносят и некоторую угловую погрешность. Эта погрешность не имеет значения при измерениях напряжения и тока, однако может влиять на измерения мощности. Современные трансформаторы могут вносить угловую погрешность 2—100 угл. мин.

Эксплуатация измерительных трансформаторов имеет определенные особенности. При правильной эксплуатации трансформаторы повышают безопасность обслуживания, так как отделяют измерительные цепи от цепей высокого напряжения.

Однако при определенных ошибках они сами становятся источником опасности. Не допускается, например, эксплуатировать трансформаторы тока с разомкнутой вторичной обмоткой. Возникающие при этом напряжения могут достигать весьма высоких значений. Нормальный режим работы трансформатора тока — короткое замыкание. Для трансформатора напряжения, наоборот, это аварийный режим, а нормальный — режим холостого хода.

VIII.2.3. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

VIII.2.3.1. Измерение мощности в цепях постоянного и однофазного переменного тока

В общем виде активную P_a и реактивную P_r мощности можно выразить так:

$$\left.\begin{aligned}P_a&=UI\cos\varphi;\\P_r&=UI\sin\varphi,\end{aligned}\right\}\qquad\text{(VIII—8)}$$

где φ — угол сдвига фаз между током и напряжением.

В частном случае чисто активной нагрузки $\cos\varphi=1$, $\sin\varphi=0$, и тогда мощность в цепи постоянного и переменного однофазного тока

$$P_a=UI,\quad P_r=0.\qquad\text{(VIII—9)}$$

Активную мощность измеряют ваттметрами, а реактивную — варметрами. Учитывая, что в подавляющем большинстве случаев измеряют только активную мощность, измерение реактивной мощности не рассматривается.

Для прямых измерений активной мощности чаще всего применяют ваттметры электродинамической или ферродинамической систем.

Необходимое вычисление по формуле (VIII—8) производится измерительным механизмом ваттметра, функция преобразования которого имеет вид

$$\alpha=kUI\cos\varphi.\qquad\text{(VIII—10)}$$

Для постоянного тока

$$\alpha=kUI.$$

В этих выражениях: α — угол отклонения стрелки прибора; k — коэффициент передачи.

Сравнивая выражения (VIII—8) и (VIII—10), находим градуировочную функцию ваттметра

$$\alpha=kP_a,$$

которая определяет шкалу прибора.

В определенных пределах $k=\text{const}$ функция является линейной, а следовательно, шкала — равномерной.

Ваттметр имеет две обмотки: токовую и напряжения. Первая включается последовательно в цепь, вторая — параллельно. Схема включена в цепь с полным сопротивлением нагрузки Z показана на рис. VIII—4, *а*. Нормальная работа ваттметра обеспечивается при определенном сочетании направлений или фаз токов в обеих катушках. Прибор должен быть присоединен так, чтобы концы, обозначенные звездочками, соединялись бы вместе, либо так, как показано пунктиром.

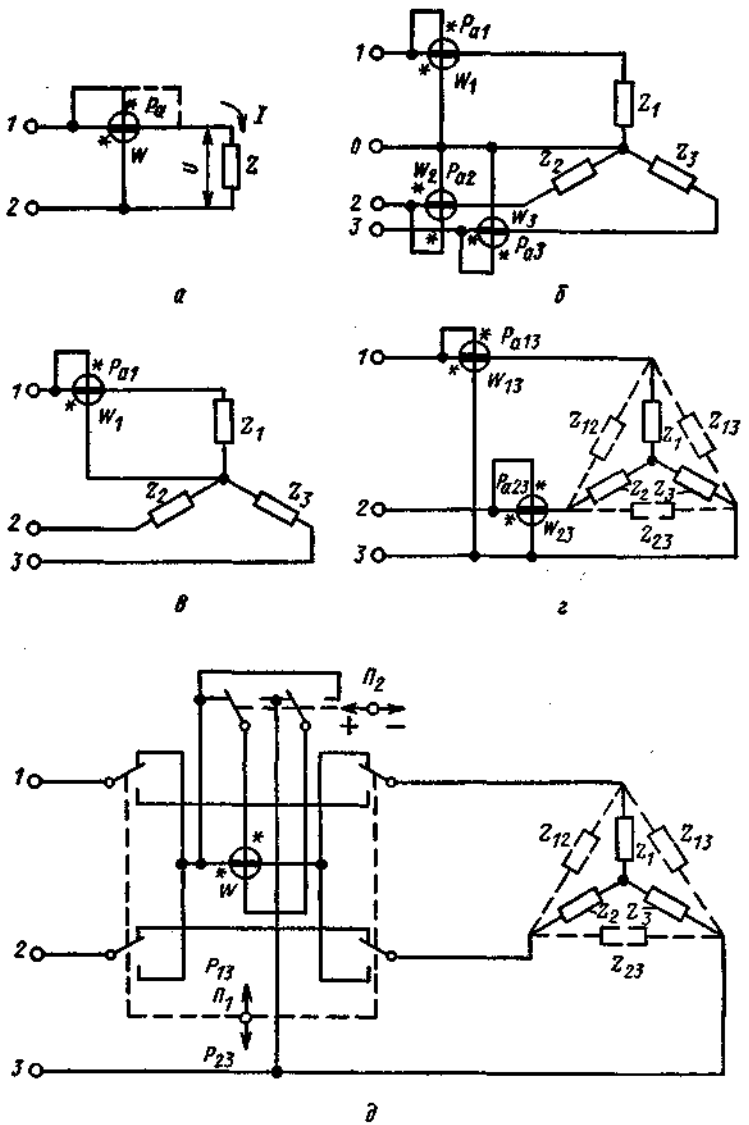


Рис. VIII—4. Измерение активной мощности:

а — в цепи постоянного и однофазного переменного тока; *б* — методом трех ваттметров; *в* — одним ваттметром в симметричной цепи; *г* — методом двух ваттметров; *д* — одним ваттметром с переключателем

Методическая погрешность измерения связана с тем, что при любом включении (сплошная линия или пунктир, см. рис. VIII—4, *а*) имеет место некоторое потребление мощности ваттметром: в первом случае это потеря в токовой катушке, во втором — в катушке напряжения.

Данные о погрешностях могут быть получены из технических характеристик конкретных ваттметров. Учет погрешностей должен быть выполнен в соответствии с указаниями (см. п. I.4.4).

Косвенные измерения активной мощности методом амперметра и вольтметра могут быть выполнены только в цепях с чисто активной нагрузкой, например по схемам (см. рис. VIII—2, *а* и *б*). При этом мощность вычисляется по формуле (VIII—9). Обеим схемам свойственны методические погрешности: в схеме (см. рис. VIII—2, *б*) через амперметр течет суммарный ток нагрузки и ток вольтметров, в схеме (см. рис. VIII—2, *а*) вольтметр фиксирует падение напряжения на нагрузке и на амперметре.

Выбор той или другой схемы зависит от конкретных условий. В цепях с малым сопротивлением нагрузки меньшую погрешность следует ожидать от первой схемы, наоборот, в цепях с высокими сопротивлениями лучше применять вторую схему. Для определения методических погрешностей следует пользоваться формулами (VIII—1) и (VIII—2). Рассмотренные схемы можно использовать для определения коэффициента мощности цепи $\cos\varphi$.

Если в цепь (см. рис. VIII—4, а) с полным сопротивлением Z совместно с ваттметром W включить амперметр и вольтметр (как показано на рис. VIII—2, *а* и *б*), то наряду с активной мощностью P_a, указываемой ваттметром, можно найти кажущуюся (полную) мощность цепи:

$$P = UI,$$

где U и I — показания вольтметра и амперметра.

Тогда из (VIII—8) следует:

$$P_a = P\cos\varphi \text{ или } \cos\varphi = P_a/P.$$

При определении погрешности следует учесть методические погрешности измерения U и I.

VIII.2.3.2. Измерение мощности в трехфазных цепях переменного тока

Общий случай измерения активной мощности в четырехпроводной трехфазной цепи с помощью трех ваттметров W_1, W_2 и W_3 показан на схеме (рис. VIII—4, *б*). Сопротивления нагрузок отдельных фаз Z_1, Z_2 и Z_3 могут быть неодинаковыми (несимметричная цепь). Суммарная активная мощность цепи равна сумме мощностей отдельных фаз:

$$P_a = P_{a1} + P_{a2} + P_{a3}. \qquad \text{(VIII—11)}$$

В частном случае (рис. VIII—4, *в*) при симметричной нагрузке ($Z_1 = Z_2 = Z_3$) достаточно измерить мощность в цепи одной фазы и найти общую мощность: $P_a = 3P_{a1}$. В наиболее распространенном случае, когда система работает без «нуля», применяют метод двух ваттметров (рис. VIII—4, *г*). В этом случае следует строго придерживаться порядка включения генераторных концов катушек

(указана звездочками). Суммарная мощность трехфазной цепи равна алгебраической сумме показаний ваттметров:

$$P_a = P_{a13} + P_{a23}. \qquad \text{(VIII—12)}$$

При некоторых углах сдвига фаз один из ваттметров может показывать мощность меньше нуля («зашкаливает влево от нуля»). Это означает, что одну из обмоток этого ваттметра (удобнее обмотку напряжения) необходимо переключить в обратном направлении. Так, если требуется переключить обмотку ваттметра W_{23}, то вывод, обозначенный звездочкой, надо подключить к проводу *3* и другой — к проводу *2*. Тогда в формулу (VIII—12) значение P_{a23} следует подставлять со знаком минус.

Метод двух ваттметров можно реализовать с помощью одного ваттметра и переключателя (рис. VIII—4, *д*), если нагрузка допускает кратковременный разрыв цепи при переключении. Основным переключателем осуществляют подключение ваттметра W к цепи *1—3* (верхнее положение) или к цепи *2—3* (нижнее положение). С помощью вспомогательного переключателя $П_2$ можно осуществить инверсию обмотки напряжения. Если $П_2$ находится в положении «+», то соответствующее показание ваттметра подставляется в формулу (VIII—12) также с «+» и, наоборот, при положении «—» слагаемое становится отрицательным.

Существуют также трехфазные ваттметры, в которых в одном приборе сочетаются два или три однофазных измерительных механизма. Необходимые вычислительные операции по формулам (VIII—11) или (VIII—12) производятся автоматически.

В симметричных трехфазных цепях метод двух ваттметров позволяет косвенно измерить коэффициент мощности:

$$\cos\varphi = \frac{1}{2}\frac{1+b}{\sqrt{1-b(1-b)}},$$

где $b = P_{a13}/P_{a23}$.

Пределы измерения ваттметров расширяют при помощи добавочных резисторов и трансформаторов напряжения (в цепях напряжения) и трансформаторов тока. При расчете мощности вводят соответствующие коэффициенты (см. п. VIII.2.2).

VIII.2.4. ИЗМЕРЕНИЕ ОМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Измерения малых омических сопротивлений связаны в основном с определением температуры обмоток электродвигателей. Если известны начальная температура обмотки холодного двигателя $t_х$ и ее сопротивление $R_х$ при этой температуре, то сопротивление обмотки в нагретом состоянии $R_г$ можно найти из известной формулы

$$R_г = R_х[1 + \alpha(t_г - t_х)],$$

где α — температурный коэффициент сопротивления, который для меди равен $\sim 0{,}004$ 1/°С.

Отсюда нетрудно найти температуру нагретой обмотки:

$$t_г = t_х + \frac{R_г - R_х}{\alpha R_х}.$$

Если учесть, что величина $R_х$ для двигателей, используемых для привода холодильных компрессоров, лежит в пределах от 0,01 до 10 Ом, то задача сводится к измерению малых сопротивлений с достаточно высокой точностью.

Пользуясь формулами определения погрешностей (см. п. I.4.4), можно найти допустимую абсолютную погрешность измерения сопротивления ΔR, если известны требуемая относительная δ_t или абсолютная Δt погрешности измерения температуры:

$$\Delta R \leqslant \frac{\delta_t}{1{,}1\sqrt{\frac{2}{(R_г - R_х)^2} + \frac{1}{R_х^2}}},$$

здесь $\delta_t = \dfrac{\Delta t}{t_г - t_х}$.

Если например, $R_х = 1$ Ом, $\Delta t = 2$ °С, $t_г - t_х = 100$ °С, то $\Delta R \leqslant \leqslant 0{,}005$ Ом.

Измерение малых сопротивлений можно выполнить четырехплечим мостом (рис. VIII—5, *а*), если в одно из плеч включить измеряемое сопротивление $R_и$, а в другое — магазин сопротивлений R_1. Подавая для питания моста постоянное напряжение $U_п$ и действуя магазином R_1, добиваются равновесия моста (нуль по шкале указателя равновесия *УР*).

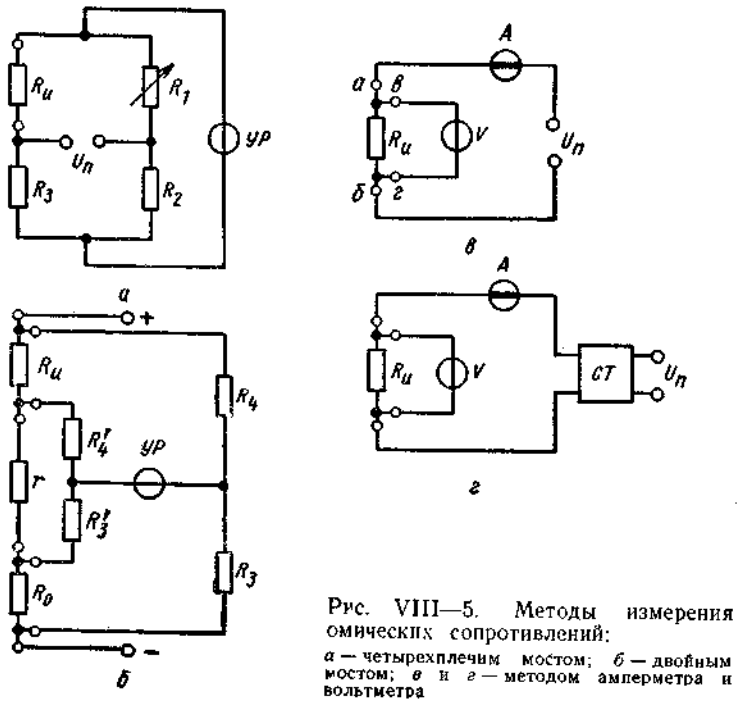


Рис. VIII—5. Методы измерения омических сопротивлений:

а — четырехплечим мостом; *б* — двойным мостом; *в* и *г* — методом амперметра и вольтметра

Из уравнения равновесия моста

$$R_и R_2 = R_1 R_3$$

следует

$$R_и = R_1 R_3 / R_2.$$

Источниками методических погрешностей являются, в частности, сопротивления подводящих проводов и переходных контактов, которые могут внести заметные искажения в результаты измерений.

Область измерений четырехплечими мостами ограничена снизу величинами порядка 10^{-4} Ом. Специально для измерений малых сопротивлений применяют двойные мосты (рис. VIII—5, *б*).

Из уравнения равновесия можно определить $R_и$ [90]:

$$R_и = R_0 \frac{R_4}{R_3} + r \frac{R_4}{R_3' + R_4' + r} \left(\frac{R_3'}{R_3} - \frac{R_4'}{R_4} \right).$$

Для повышения точности в качестве резистора R_0 применяют образцовую катушку сопротивления. Схема моста составлена так, что соединительные провода в цепи $R_и$—R_0 входят только в цепь питания, в то время как балансные цепи подключены непосредственно к резисторам $R_и$ и R_0. Область измерений сопротивлений двойными мостами лежит в пределах от 10^{-9} до 10 Ом. Мосты являются одними из наиболее точных приборов. Выпускаются мосты классов точности 0,005; 0,01; 0,02; 0,1; 0,2 и др.

Косвенные измерения сопротивления выполняют по методу амперметра и вольтметра (рис. VIII—5, *в*). Если пользоваться достаточно высокоомным вольтметром *V*, присоединенным непосредственно к измеряемому сопротивлению $R_и$, то $R_и = U_V/I$ (U_V — *напряжение, воспринимаемое вольтметром*). *Во избежание методической* погрешности из-за контактного перехода падение напряжения на токовых клеммах *а* и *б* не должно охватываться цепью вольтметра, присоединенного к точкам *в* и *г*.

Большие удобства представляет схема (рис. VIII—5, *г*), которая дополнительно снабжается точным стабилизатором тока *СТ*. В этом случае по амперметру *А* устанавливают нужный ток, он поддерживается стабилизатором. В результате шкала вольтметра может быть отградуирована непосредственно в омах.

Измерение сопротивления обмоток электродвигателей осуществляют одним из изложенных выше методов.

Измерение с отключением от сети выполняют по схеме (рис. VIII—6, *а*), в которой двигатель *Дв* получает питание через контакты переключателя *П*. При необходимости измерить сопротивление переключатель переводится в нижнее положение и две обмотки оказываются подключенными к измерителю сопротивления *ИС*. При пользовании точными мостами на выполнение измерения тратится определенное время, что приводит к остыванию обмоток и к определенной погрешности. Неудобство состоит и в том, что двигатель приходится останавливать и, таким образом, нарушать режим испытаний. Измерения проводят многократно и результаты экстраполируют до момента отключения двигателя.

Значительные удобства представляет применение автоматических быстродействующих цифровых омметров. В этом случае для измерения достаточно перевести переключатель лишь на короткое время (порядка 1 с), в течение которого двигатель практически не успевает остыть и режим испытаний не изменяется. В случаях, когда отключение двигателя нежелательно, применяют специальную схему [52], испытанную во ВНИИхолодмаше (рис. VIII—6, *б*).

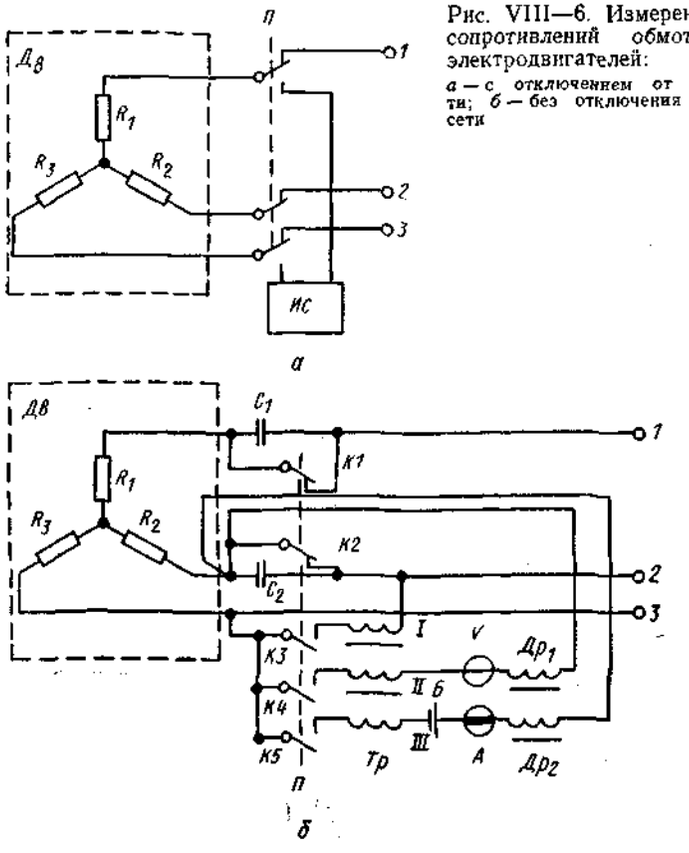


Рис. VIII—6. Измерение сопротивлений обмоток электродвигателей:
а — с отключением от сети; *б* — без отключения от сети

При нормальной работе двигателя обмотки питаются напряжением по проводам *1*, *2* и *3* через замкнутые контакты *К1* и *К2* переключателя *П*. Измерительная часть схемы отключена. Для производства измерения переключатель переводится в верхнее положение, в котором контакты *К1* и *К2* размыкаются, а *К3*, *К4* и *К5* замыкаются. Питающий обмотки ток проходит через конденсаторы C_1 и C_2. К обмоткам подключается источник постоянного тока *Б*, ток от которого проходит через амперметр *А*, дроссель $Др_2$, последовательно соединенные обмотки сопротивлением R_2 и R_3, контакт *К5* и обмотку *III* трансформатора *Тр*. Конденсаторы преграждают ответвление постоянного тока в питающую сеть, а дроссель препятствует протеканию через измерительную цепь переменной составляющей. Напряжение, индуктируемое в обмотке *III* трансформатора, дополнительно компенсирует переменную составляющую.

Измерительная цепь напряжения включает в себя вольтметр V, дроссель $Др_1$ и обмотку II трансформатора. Для исключения методической погрешности от сопротивления подводящих проводов цепь напряжения подключается непосредственно к клеммам двигателя. По окончании измерения переключатель возвращается в исходное положение, восстанавливая нормальную работу помимо конденсаторов.

Основная трудность при создании таких схем состоит в реализации необходимых емкостей C_1 и C_2. Если исходить из допустимого падения напряжения на конденсаторах 1 В, то величины

$$C_1 = C_2 = \sim 3 \cdot 10^3 I_н \text{ мкФ}.$$

Для испытания двигателей мощностью 20 кВт емкость конденсаторов должна составлять порядка 100 000 мкФ.

Сопротивление обмоток вычисляют по формуле

$$R_2 + R_3 = KU/I,$$

где $K = (R_V + R_u)/R_V$;

R_V — внутреннее сопротивление вольтметра; R_u — сопротивление цепи напряжения.

Погрешность измерений зависит от точности примененных амперметра и вольтметра. Рассмотренная схема достаточно просто реализуется для цепей мощностью до 10 кВт. С ростом мощности емкость конденсаторов увеличивается настолько, что применение схемы становится нецелесообразным.

Измерение очень больших омических сопротивлений связано с проверкой состояния изоляции электрических цепей, аппаратов и машин. Обычно эти измерения выполняют методом прямого отсчета с помощью специальных приборов, называемых мегаомметрами. Эти приборы бывают двух типов: магнитоэлектрические и электронные.

В первом случае измерения выполняют магнитоэлектрическим логометром (аналогичным описанному в п. IV.2.4.2), конструктивно объединенным с ручным генератором постоянного тока, развивающим напряжение в различных приборах от 100 до 2500 В. Во втором случае применяют приборы со стрелочным или цифровым отсчетом с внутренним источником напряжения. Во всех случаях принимают специальные меры, исключающие точки утечки в измерительной цепи, которые могут привести к погрешностям.

VIII.3. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ О СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Собранные в настоящем подразделе сведения следует рассматривать как ограниченную выборку лабораторных средств измерений, применяемых в практике исследований и испытаний холодильной техники. Не включены различные щитовые приборы, широко применяемые в эксплуатационном оборудовании. Полные сведения о выпускаемых средствах измерений можно найти в соответствующих изданиях (см., например, [78]).

Показывающие приборы (рис. VIII—7, *а—г*) для измерения тока, напряжения и мощности составляют основу техники электрических измерений. Значительная часть выпускаемых лабораторных приборов для измерений тока, напряжения и мощности унифицирована по конструктивному исполнению. В число применяемых приборов наряду с обычными (классы точности 0,5 и хуже) входят приборы высокой точности (класса точности 0,1), которые используются как рабочие и в необходимых случаях — как образцовые. Большинство встречающихся лабораторных приборов являются многопредельными. Для перехода с предела на предел предусматриваются коммутационные устройства (переключатели, клеммы и др.).



Рис. VIII—7. Внешний вид показывающих приборов и преобразователей:
а — амперметр Д5054 (кл. 0,1); *б* — миллиамперметр Э513 (кл. 0,5); *в* — ваттметр Д5004 (кл. 0,5); *г* — измерительный комплект К506 (кл. 0,5); *д* — измерительный преобразователь тока (Е824-Е827 и Е829) (кл. 1,0)

Основные технические характеристики некоторых показывающих приборов приведены в табл. VIII—1.

Таблица VIII—1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНОСНЫХ ПОКАЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРОВ

Характеристика	Типы приборов				
	Д5054 (A, mA) Д5055 (V), Д5056 (W)	Э513 (mA)	Э514 (A)	Э515 (V)	М2038 (AV)
Система измерительного механизма	Электродинамическая	Электромагнитная	Электромагнитная	Электромагнитная	Магнитоэлектрическая
Род тока	Постоянный и переменный	Постоянный и переменный	Постоянный и переменный	Постоянный и переменный	Постоянный
Класс точности	0,1	0,5 1,0	0,5 1,0	0,5 1,0 2,5	0,5
Число переключаемых пределов					
по току	2	3	2	—	15
» напряжению	4	—	—	4	18
» мощности	12	—	—	—	—
Тип указателя				Стрелочный	
Полоса частот, Гц	45—1500	40—1000 (на пределах выше 100 мА)	40—1500	40—60; 40—1500	—
Габаритные размеры, мм	205×290×135	140×195×96	140×195×108	140×195×92	243×200×100
Масса, кг	4,5	1,5	1,6	1,5	3,0

Характеристика	Типы приборов			
	Д5031 (W)	Д5004 (W)	К506 (AVW)	
Система измерительного механизма	Электродинамическая	Электродинамическая	Электродинамическая	
Род тока	Трехфазный переменный	Постоянный и переменный	Переменный одно- и трехфазный	
Класс точности	0,5	0,5	0,5	
Число переключаемых пределов				
по току	—	—	6	
» напряжению	—	—	4	
» мощности	6	12	24	
Тип указателя				
Полоса частот, Гц	45—65	45—65	40—65	
Габаритные размеры, мм	140×200×95	140×200×95	505×330×190	
Масса, кг	2	1,5	16	

Примечания: 1. В комплект приборов Д5054, Д5055, Д5056 входит трансформатор для питания осветителя, габаритные размеры его 65×85×45 мм, масса 0,5 кг. 2. Условные обозначения: A — амперметр; mA — миллиамперметр; V — вольтметр; W — ваттметр; AV — ампервольтметр; AVW — ампервольтваттметр.

Двух- и многопредельные приборы имеют, как правило, условные шкалы с числом делений рабочей части 100 или 150. При пользовании ими необходимо определять постоянный коэффициент. Так, для амперметра этот коэффициент равен $k_A = I_{max}/n_{max}$ (I_{max} — верхний предел измерений, n_{max} — число делений шкалы, соответствующее верхнему пределу). Аналогичные коэффициенты должны быть определены для вольтметров (k_V) и ваттметров (k_W). Измеренное значение находят как произведение $I = k_A n$, $U = k_V n$, $P = k_W n$.

Наряду с отдельными приборами выпускаются измерительные комплекты, содержащие амперметр, вольтметр и ваттметр, размещенные в общем переносном футляре. В комплект входят все необходимые коммутационные приспособления, а также встроенные добавочные сопротивления и трансформаторы тока.

Измерительные преобразователи (рис. VIII—7, *д*) предназначаются для преобразования измеряемой электрической величины (тока, напряжения или мощности) в стандартный электрический сигнал. Последний может быть использован для прямого измерения либо для ввода в измерительно-информационные или измерительно вычислительные комплексы (см. главу X).

Схемы присоединения преобразователей к измеряемым цепям не отличаются от схем присоединения соответствующих измерительных приборов (амперметров, вольтметров, ваттметров). Технические характеристики измерительных преобразователей тока и напряжения приведены в табл. VIII—2 и VIII—3. Ниже приводится техническая характеристика преобразователя активной мощности Е829.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ Е829

Род тока	Переменный
Вид цепи	Трехфазная, трехпроводная
Диапазон изменения тока, А	0—0,5; 0—1,0
Диапазон изменения напряжения, В	80—120; 20—120
Диапазон изменения выходного сигнала, мА	0—5
Класс точности	1,0
Мощность, потребляемая от измеряемой цепи, В·А	10

Остальные данные те же, что у преобразователей тока (см. табл. VIII—2)

Таблица VIII—2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКА

Характеристика	Типы преобразователей	
	Е824	Е826
Род измеряемого тока	Переменный	Постоянный
Диапазон измерения тока, А	0—1; 0—5	—
Входное напряжение от шунта, мВ	—	75
Класс точности	0,5	1,0
Выходной ток, мА	0—5	0—5
Сопротивление выходной цепи, кОм, не более	3	3
Потребляемая мощность от измеряемой цепи, В·А, не более	1	—
Потребляемый ток от измерительной цепи, мА, не более	—	1
Потребляемая мощность от источника питания, В·А	10	10
Время установления выходного сигнала, с, не более	1,5	1,5
Напряжение питания частотой 50 Гц, В	220	220
Габаритные размеры, мм	220×170×170	220×170×170
Масса, кг	3,9	5

Таблица VIII—3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Характеристика	Типы преобразователей	
	Е825	Е827
Род тока	Переменный	Постоянный
Диапазоны измерения напряжения, В	0—125 (1) 75—125 (2)	0—100 (1) 0—125 (2) 0—200 (3) 0—500 (4) 0—1000 (5) 0—2000 (6)
Класс точности	0,5 (1) 1,0 (2)	1,0
Мощность, потребляемая от измерительной цепи, В·А	5	0,2 (1) 0,25 (2) 0,4 (3) 1,0 (4) 2,0 (5) 4,0 (6)

Примечания: 1. Остальные данные см. в табл. VIII—2. 2. Цифры в скобках обозначают номера диапазонов измерений.

Калиброванные шунты служат для расширения пределов измерения амперметров и ваттметров постоянного тока, а также соответствующих измерительных преобразователей. Шунты изготовляются из манганина, впаянного твердым припоем в латунные или медные наконечники.

Сопротивление шунтов выбирается таким, чтобы при номинальном токе падение напряжения составляло 75 мВ. Падение напряжения измеряется на специальных потенциальных зажимах, в то время как основная цепь присоединяется к токовым зажимам.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ШУНТОВ

	75ШС	75ШСМ
Номинальный ток, А	5, 10, 20 30, 50	75, 100, 150 200, 300, 500 и т. д. до 7500
Падение напряжения, мВ	75	75
Класс точности	0,5	0,5

Габаритный чертеж шунта 75ШС представлен на рис. VIII—8, *а*.

Трансформаторы тока применяют для расширения пределов измерений амперметров и ваттметров переменного тока, а также соответствующих измерительных преобразователей. Числа витков в первичных и вторичных обмотках выбираются такими, чтобы при номинальном токе в первичной обмотке ток во вторичной обмотке был равен 5 А.

Трансформатор имеет встроенную обмотку, обеспечивающую измерение лишь части номинальных токов. Для больших токов первичная обмотка накладывается вручную путем пропускания гибкого кабеля через центральное отверстие трансформатора.

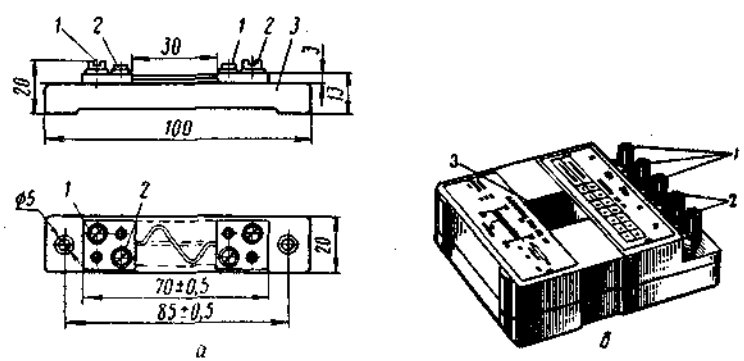


Рис. VIII—8. Калиброванный шунт и трансформатор тока:

а — шунт 75ШС: *1* — токовые зажимы; *2* — потенциальные зажимы; *3* — основание; *б* — трансформатор тока УТТ-5М: *1* — клемма первичной обмотки; *2* — клеммы вторичной обмотки; *3* — отверстие для накладывания первичной обмотки

Внешний вид трансформатора тока УТТ-5М показан на рис. VIII—8, *б*.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА УТТ-5М

Номинальные значения верхних пределов измеряемых токов, А	15, 50, 100, 150, 200, 300, 600
Верхний предел тока вторичной обмотки, А	5
Класс точности	0,2
Допустимая погрешность при токе, равном 10% номинального, %	±0,5
Напряжение первичной цепи, В, не более	660
Номинальный ток встроенной первичной обмотки, А	15, 50
Число витков в первичной обмотке, наносимой вручную при токе, А	
100	6
150	4
200	3
300	2
600	1
Габаритные размеры, мм	164×131×60
Масса, кг	1,5

Средства измерений сопротивлений делят на ручные и полуавтоматические мосты и цифровые омметры. Ниже приведены технические характеристики некоторых из них.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Тип	УПИП-60М	Р3009	Ш34
Наименование средства измерения	Прибор универсальный	Мост одинарно-двойной	Омметр цифровой
Диапазон измерения сопротивлений, Ом	10^{-4}—10^{6}	10^{-8}—10^{10}	10^{-3}—10^{9}
Класс точности	0,1	0,01—0,2*	0,05**
Источник питания	Гальванические элементы, напряжение 6,6 В	—	От сети переменного тока напряжением 220 В
Нуль-индикатор	Гальванометр	Автокомпенсатор с усилителем	—
Чувствительность нуль-индикатора	$4{,}5 \cdot 10^{-7}$ А на 1 деление	10^{-8}—10^{-1} В на 1 деление	—
Время установления показаний, с	—	Не более 4	1,2
Габаритные размеры, мм	235×360×460	490×210×620 (блок измерений) 240×225×150 (блок автокомпенсатора) 440×210×210 (блок усиления)	480×118×360
Масса, кг	13	26 (общая)	12

* Класс точности в диапазоне 10^{-1}—10^{2} Ом 0,01; 10^{-4}—10^{-2} Ом — 0,02; 10^{-5}—10^{-4} Ом — 0,05.

** В диапазоне 10^{-3}—10^{9} Ом.

VIII.4. СРЕДСТВА ПОВЕРКИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Поверку электроизмерительных приборов проводят методом непосредственного сличения с показаниями образцовых средств либо методом сравнения. При поверке методом непосредственного сличения используют образцовые приборы соответствующего назначения: вольтметры, амперметры, ваттметры и т. д. В поверочные схемы при этом входят источники тока и напряжения. К последним не предъявляют высоких метрологических требований. При поверке методом сравнения используют образцовые меры и образцовые средства воспроизведения электрических величин, например источники калиброванного напряжения, катушки и магазины сопротивления и т. д. В этом случае к мерам и средствам воспроизведения предъявляют соответствующие метрологические требования.

Как и в других случаях, средства поверки должны быть аттестованы в качестве образцовых и проходить периодическую государственную поверку в органах Госстандарта. При поверке электроизмерительных приборов следует руководствоваться требованиями стандартов и инструкций*. Краткие технические данные некоторых

Таблица VIII—4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛЬТМЕТРОВ ЛАБОРАТОРНЫХ (ОБРАЗЦОВЫХ)

Тип	Род тока	Верхние пределы измерений	Класс точности
Д5055	Постоянный и переменный (однофазный)	7,5—600	0,1
Д5015/1	То же	7,5; 15; 30; 60	0,2
Д5015/2	»	7,5; 150; 300; 600	0,2
М2004	Постоянный	1,5; 3,0; 7,5; 30; 75; 150; 300	0,2

Примечание. Вольтметр Д5055 имеет 8 поддиапазонов. Технические данные см. в табл. VIII—1.

* См. например: ГОСТ 8.497—83 ГСИ. Амперметры, вольтметры, ваттметры, варметры. Методы и средства поверки.

образцовых средств, которые можно использовать в ведомственных лабораториях для поверки электроизмерительных приборов, приведены в табл. VIII—4—VIII—7.

Таблица VIII—5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АМПЕРМЕТРОВ И МИЛЛИАМПЕРМЕТРОВ ЛАБОРАТОРНЫХ (ОБРАЗЦОВЫХ)

Тип	Род тока	Верхние пределы измерений, А	Класс точности	Примечание
Д5054	Постоянный и переменный	0,05÷10	0,1	12 поддиапазонов. Технические данные см. в табл. VIII—1
Д5017	Переменный	0,1; 0,2; 0,5; 1; 2,5; 5; 10; 20	0,2	—
Д5014/1	Постоянный и переменный	5, 10	0,2	Амперметр
Д5014/2	То же	2,5; 5	0,2	»
Д5014/3	»	0,5; 1	0,2	»
Д5014/4	»	0,1; 0,2	0,2	Миллиамперметр
Д5014/5	»	0,025; 0,05	0,2	То же
Д5014/6	»	0,005; 0,01	0,2	»

Таблица VIII—6. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАТТМЕТРОВ ЛАБОРАТОРНЫХ (ОБРАЗЦОВЫХ)

Тип	Род тока	Верхние пределы измерений, Вт	Класс точности	Примечание
Д5056	Постоянный и переменный	3—6000	0,1	8 поддиапазонов. Технические данные см. в табл. VIII—1. В каждом исполнении 2 поддиапазона по току и 6 поддиапазонов по напряжению
Д5016/1		150—6000	0,2	
Д5016/2	То же	75—3000	0,2	
Д5016/3	»	15—600	0,2	
Д5016/4	»	3—120	0,2	
Д5016/5	»	0,75—30	0,2	
	»			

Таблица VIII—7. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВЫХ МЕР И СРЕДСТВ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Наименование	Тип	Род тока	Обозначение единиц воспроизводимых величин	Значения воспроизводимых величин	Класс точности	Примечание
Элемент нормальный	Х482 Х4810	Постоянный »	В В	1018 1018	0,001 0,01	
Делитель напряжения	Р35	»	Коэффициенты деления	10 : 1 100 : 1 1000 : 1	0,005	Напряжение до 1000 В Сопротивление 10 МОм
Трансформатор тока	И56М	Переменный	А	Первичный—1—1000; вторичный—1 и 5	0,1; 0,5	
Источник калиброванных напряжений	В1-8	Постоянный и переменный	В	$10 \cdot 10^{-3}$—300	0,2	
Установка	У300	То же	В А	0,5—1000 Постоянный—0,1—50; переменный—0,1—300	— —	Нестабильность 0,1%

Продолжение

Наименование	Тип	Род тока	Обозначение единиц воспроизводимых величин	Значения воспроизводимых величин	Класс точности	Примечание
Установка потенциометрическая	У355	Постоянный	В	$0{,}6 \cdot 10^{-3}$—600		
			А	$0{,}3 \cdot 10^{-6}$—30		
			Вт	$95 \cdot 10^{-5}$—6000	0,01	
			Ом	$10^{-3} \div 10^{5}$		
Установка	У1134М	Переменный	В	150, 300, 600	0,1	Могут проверяться одно- и трехфазные приборы
			А	0,5—50		
			ВА	20—50		
Катушки электрического сопротивления	Р310	Постоянный	Ом	0,001; 0,01	0,01	
	Р321	»	Ом	0,1; 1; 10	0,01	
Магазин сопротивления	МСР-63	»	Ом	0,035—10^{5}	0,05	

Глава IX

ИЗМЕРЕНИЯ БЫСТРОМЕНЯЮЩИХСЯ ВЕЛИЧИН

IX.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

К быстроменяющимся относят величины, периодически изменяющиеся во времени с частотой от единиц до нескольких десятков герц, а также величины в неустановившемся состоянии (переходном процессе) с временем установления порядка десятых долей секунды. Измерительная информация о быстроменяющихся величинах представляется в функции времени в виде осциллограмм (аналоговая информация) или таблиц (дискретная информация). Примерами периодических быстроменяющихся величин являются давление и температура в цилиндрах и полостях холодильных компрессоров. Обычно они представляются в функции времени, но при необходимости могут перестраиваться в функции других величин, например угла поворота вала, хода поршня и др. Примером измерения величины в переходном процессе является осциллографирование тока в цепях электродвигателей в режимах пуска и разгона компрессоров.

Выполнение измерений с заданной точностью возможно при условии, что каждый из элементов измерительной цепи и вся цепь в целом обладают необходимыми статическими и динамическими свойствами. В главе I приведены основные статические и динамические характеристики, с помощью которых можно оценить точность воспроизведения измеряемой величины. Ниже рассмотрены основные методы и средства измерений, применяемые в холодильной технике, и их характеристики.

IX.2. ОБЩИЕ СХЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

IX.2.1. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР В РАБОЧИХ ПОЛОСТЯХ ХОЛОДИЛЬНЫХ КОМПРЕССОРОВ

Измерение быстроменяющихся давлений (этот процесс называют также индицированием) служит для получения графического или числового изображения процесса изменения давления в цилиндрах или других полостях холодильных компрессоров. В зависимости от принятой схемы результат измерений может быть представлен в виде осциллограммы (рис. IX—1, а) в координатах «давление — время» (p, τ) либо в виде индикаторной диаграммы (рис. IX—1, $б$) в координатах «давление — ход поршня» (p, l). Осциллограмму

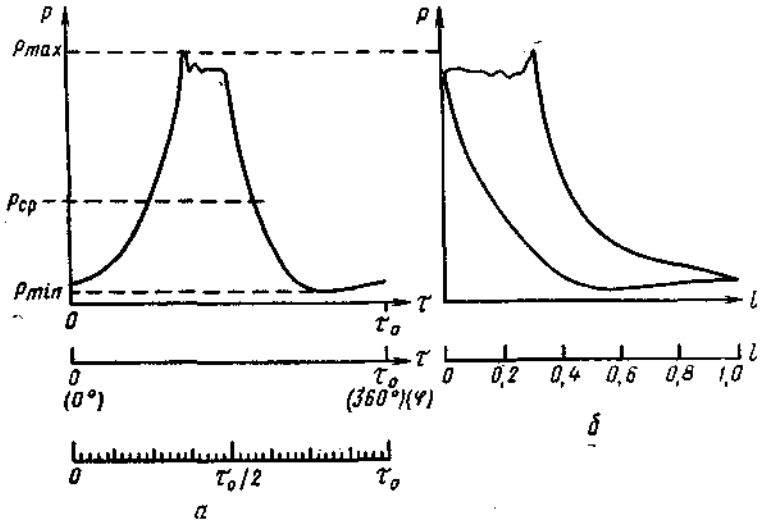


Рис. IX—1. Осциллограмма давления (*а*) и индикаторная диаграмма (*б*)

давлений получают с помощью электронно-лучевого или светолучевого осциллографа.

При использовании электронно-лучевого осциллографа *ЭЛО* (рис. IX—2, *а*) исследуемый компрессор *Км* оборудуется первичным преобразователем — датчиком давления *ДД* и датчиком положения *ДП*. Датчик *ДД* воспринимает измеряемое давление в цилиндре и преобразует его в электрическое напряжение, подаваемое на вход вертикального отклонения луча осциллографа (*Верт*). Датчик *ДП* генерирует импульсы, совпадающие по времени с прохождением характерного положения поршня, например нижней (или верхней) мертвой точки. Эти импульсы подаются на вход синхронизации развертки изображения осциллографа (*Синхр*).

Внутреннее устройство развертки генерирует пилообразное напряжение, подаваемое на пластины горизонтального (*Гор*) отклонения луча. В результате на экране изображается осциллограмма, начало которой при $\tau=0$ (см. рис. IX—1, *а*) соответствует импульсу при угле поворота вала $\varphi=0$, а конец при $\tau=\tau_0$ — импульсу при $\varphi=360°$. Абсциссы осциллограммы в углах поворота вала находят делением интервала 0—360° на равные доли, считая развертку по горизонтали линейной.

Тот же случай, но с применением светолучевого магнитоэлектрического осциллографа *СЛО* показан на рис. IX—2, *б*. Датчики *ДД* и *ДП* включаются в цепи малоинерционных зеркальных гальванометров $Г_1$ и $Г_2$, лучи от которых падают на светочувствительную ленту *Л* (из бумаги или пленки), которая движется со скоростью w. В результате на ленте вычерчивается изображение

осциллограммы и отдельно — изображение импульсов — отметок мертвой точки.

Как и в случае электронного осциллографа, абсциссы (углы поворота) находят делением периода τ_0 на равные доли, принимая скорость протяжки ленты w равномерной. В действительности развертка является неидеально линейной.

Влияние нелинейности развертки исключают применением специального генератора импульсов *ГП* (рис. IX—2, *в*), который механически сочленяется с вращающимся валом. Генератор выдает импульсы как для синхронизации развертки, так и для воспроизведения на экране осциллографа. В этом случае используют двухлучевой осциллограф с двумя входами вертикального отклонения *I* и *II*. Подобная система применяется в аппаратуре фирмы «Диза» (Дания); малые метки на экране следуют через 2° поворота вала, большие — через 10° [93]. Воспроизведение меток возможно и в случае использования многоканального светолучевого осциллографа: метки воспроизводятся собственным гальванометром. Вид таких

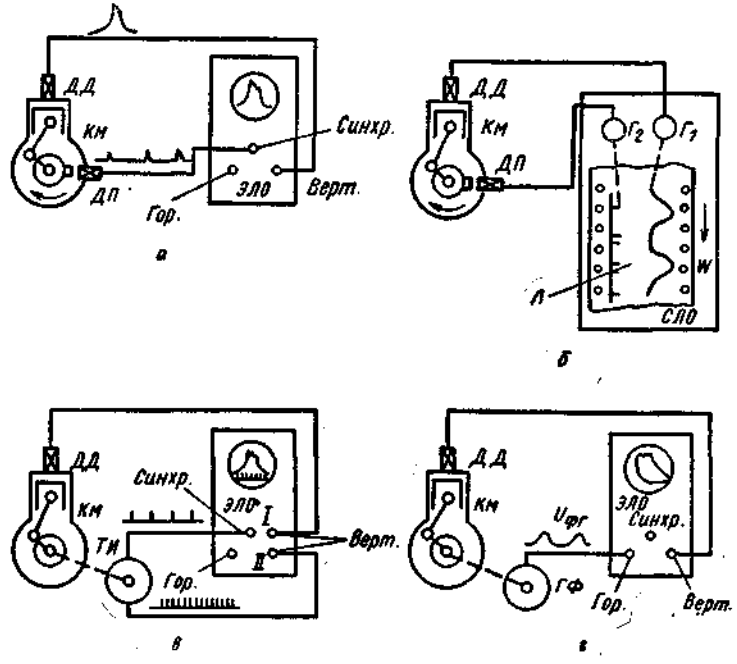


Рис. IX—2. Схема измерения быстроменяющегося давления:

а — получение осциллограммы, синхронизированной импульсами от датчика положения на электронно-лучевом осциллографе; *б* — регистрация давления и отметок положения на ленте светолучевого осциллографа; *в* — регистрация давления и отметок на экране двухлучевого электронного осциллографа; *г* — регистрация индикаторной диаграммы на экране электронно-лучевого осциллографа

меток в сочетании с осциллограммой виден на графике (см. рис. IX—1, *а*).

Наконец, при помощи электронно-лучевого осциллографа можно получить изображение в виде индикаторной диаграммы, т. е. в координатах $p=f(l)$, где l — ход поршня. Для этого в схему вводится функциональный генератор напряжения *ГФ* (рис. IX—2, *г*). Ось этого генератора механически связывается с валом компрессора. Начальное положение генератора устанавливается по одному из характерных положений, например мертвой точке.

Напряжение генератора *ГФ* зависит от положения вала или хода поршня l:

$$U_{\text{фг}}=f(l),$$

где l в свою очередь является функцией угла поворота, длины шатуна и радиуса кривошипа.

Напряжение $U_{\text{фг}}$ подают на вход горизонтального отклонения луча, в результате взаимодействия напряжений от датчиков *ДД* и *ГФ* на экране осциллографа изображается замкнутая кривая вида, изображенного на рис. IX—1, *б*. Схемы измерения быстроменяющихся температур строятся на тех же принципах (см. рис. IX—2, *а, б, в*), но в качестве первичных преобразователей используют быстродействующие датчики температуры, чаще всего — проволочные термопреобразователи сопротивления.

Для полного анализа процессов в цилиндрах компрессоров измерения давления и температуры выполняют одновременно. Комбинированная система может быть осуществлена с помощью двухлучевого электронного осциллографа с синхронизацией от датчика положения либо светолучевого осциллографа. Возможность одновременной регистрации нескольких величин (в некоторых светолучевых осциллографах — до 12) позволяет расширить систему и одновременно исследовать процессы в нескольких цилиндрах.

IX.2.2. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ В ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Пусковые токи электродвигателей имеют место в режимах разгона, которые в зависимости от мощности двигателя и момента сопротивления на валу могут продолжаться от десятых долей до единиц секунд. Их измерение и анализ возможны только путем регистрации. Чаще всего для этой цели применяют светолучевые осциллографы. На рис. IX—3 показана упрощенная схема измерения тока в цепи трехфазного двигателя *Д*. В один из фазных проводов включена первичная обмотка трансформатора тока *ТТ*. Вторичная обмотка его нагружена на балластный резистор *R*, напряжение с которого снимается на гальванометр *Г* светолучевого осциллографа *СЛО*. Через оптическую систему луч от гальванометра записывает процесс на ленту. Запись на ленте производится в виде синусоиды с изменяющейся амплитудой.

IX.2.3. ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ЦЕПЯМ

Системы для измерений быстроменяющихся величин представляют собой цепи, состоящие из отдельных элементов: датчиков, усилителей, промежуточных преобразователей, регистрирующих устройств. В главе I были рассмотрены основные элементы с типовыми динамическими характеристиками.

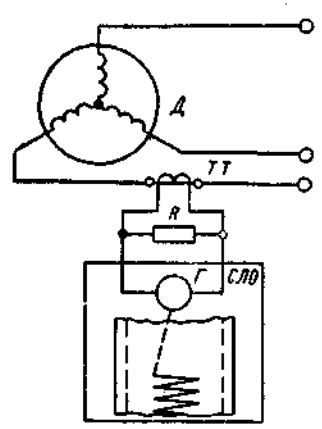
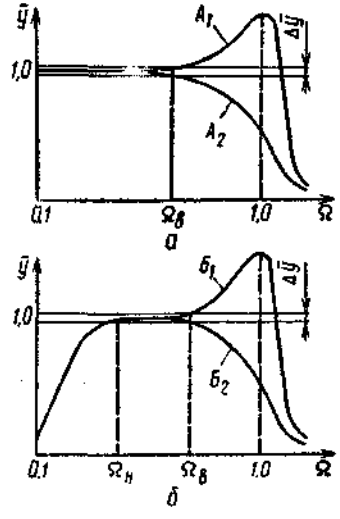


Рис. IX—3. Схема измерения пускового тока электродвигателя с регистрацией на ленте светолучевого осциллографа

Встречающиеся на практике системы могут быть разделены на две основные группы. Первая (группа *А*) состоит из апериодических и колебательных элементов и потому воспроизводит сигналы с частотами, начиная от нуля. Вторая (группа *Б*) содержит дифференцирующие элементы, и потому коэффициент передачи при частоте $f=0$ равен нулю. В обеих группах частотная характеристика в области высоких частот может иметь резонансный пик, если в цепи есть колебательное звено с малым относительным затуханием, либо иметь монотонно снижающуюся характеристику, если в цепи есть апериодические элементы или колебательные элементы с большим относительным затуханием.

Вид частотной характеристики цепи группы *А* представлен на рис. IX—4, *а*. По оси абсцисс отложена относительная частота $\Omega=f/f_0$ в логарифмическом масштабе (f_0 — собственная резонансная частота), а по оси ординат — коэффициент передачи $\bar{y}=y/x$ (y — выходной сигнал, x — входной). Если задать зону $\Delta\bar{y}$, определяющую допустимую динамическую погрешность, то сигналы с от-



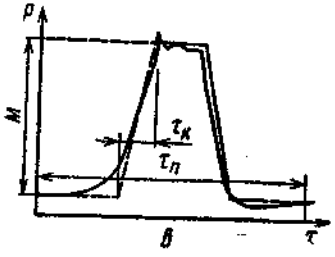


Рис. IX—4. Амплитудно-частотные характеристики элементов цепи и определение частотного состава измеряемого давления:
а и *б* — частотные характеристики типов *А* и *Б*; *в* — замена исходной функции $p=\varphi(\tau)$ трапецеидальной функцией (пунктир)

носительной частотой ниже $\Omega_в$ будут воспроизводиться с допустимыми искажениями. Показано, что характеристика может иметь выраженный резонансный характер (A_1) и быть монотонно снижающейся (A_2). Таким образом, характеристика группы $А$ обеспечивает воспроизведение постоянной составляющей и полосы частот до $\Omega_в$.

На графике (рис. IX—4, *б*) показаны амплитудно-частотные характеристики цепи группы $Б$. Их особенность в том, что в области нижних частот характеристика стремится к нулю, и поэтому постоянную составляющую такой элемент не воспроизводит. Полоса эффективно воспроизводимых частот начинается от $\Omega_н$ и заканчивается при $\Omega_в$.

Для формирования требований к измерительной цепи и ее элементам необходимо знать частотный состав измеряемой величины. Выше указано, что давление в цилиндре компрессора содержит постоянную составляющую ($f=0$). Такой же характер носит и температура. В то же время пусковой ток в цепи двигателя переменного тока этой составляющей не имеет.

Рассмотрим один из возможных подходов к формированию требований на примере измерения давления. Давление в цилиндре компрессора, как измеряемая величина (см. рис. IX—1, *а*) характеризуется колебаниями между минимальным давлением p_{min} и максимальным p_{max}, причем колебания несимметричны и происходят вокруг некоторого среднего значения $p_{ср}$, являющегося постоянной составляющей давления. Основная частота колебаний $f_1=1/\tau_0$ или через частоту вращения $f_1=n/60$ (n — частота вращения, об/мин). Колебания давления имеют сложную несинусоидальную форму, в связи с чем периодическая функция $p=\varphi(\tau)$ может быть разложена в бесконечный тригонометрический ряд Фурье [43]. Смысл этого разложения состоит в том, что исходную функцию заменяют суммой синусоидальных составляющих, или гармоник, частота которых $f_N=Nf_1$ (N — любое целое число больше нуля — номер гармоники). Частота первой гармоники f_1 равна основной частоте колебаний.

Как показано выше, любая реальная система или элемент в состоянии воспроизвести ограниченную полосу частот. Задача создания измерительной цепи состоит в том, чтобы воспроизвести такое число гармоник, которое обеспечило бы воспроизведение всей функции с погрешностью не более заданной. Точное решение задачи затрудняется сложностью аналитического представления измеряемой функции $p=\varphi(\tau)$. Для приближенного анализа заменим исходную функцию трапецеидальной (рис. IX—4, *в*), характеризуемой амплитудой M, периодом $\tau_п$, равным периоду исходной функции, и временем нарастания и спада функции $\tau_к$. Примем эту величину $\tau_к=\tau_п/8$.

Существует несколько приближенных способов нахождения верхней границы полосы частот. Воспользуемся условием, что измерительная цепь должна пропускать частоты не ниже, чем частота гармоники с амплитудой, составляющей 1% от основной.

Из теории рядов Фурье [5] известно, что амплитуда N-й гармоники трапецеидального импульса находится из выражения

$$M_N = \frac{4M}{\omega_п \tau_к \pi} \frac{\sin(N\omega_п\tau_к)}{N^2},$$

где M — амплитуда исходного сигнала;

угловая частота $\omega_0=2\pi/\tau_п$, $N=1, 3, 5, \ldots$;

$$\omega_п\tau_к = \frac{2\pi}{\tau_п}\frac{\tau_п}{8} = \frac{\pi}{4};$$

$$\sin(N\omega_п\tau_к) = \sin(N\pi/4) = 0{,}7.$$

По условию $M_N=0{,}01M$. Тогда из формулы (1)

$$N = \sqrt{\frac{4M\sin(N\omega_п\tau_к)}{M_N\omega_п\tau_к\pi}} \approx 10.$$

Из приведенного ориентировочного расчета следует, что верхняя частота полосы воспроизведения должна быть порядка $10f_1$ (для частоты вращения 1500 об/мин это составляет 250 Гц, для частоты 3000 об/мин — 500 Гц).

При другом подходе [14] исходят из того, что для выявления тонких деталей процесса (всплесков, высокочастотных колебаний и др.), имеющих место при измерениях давлений в цилиндрах компрессоров, приходится значительно расширять полосу частот. При этом рекомендуется верхнюю граничную частоту принимать равной $f_в \geqslant (5/2)\tau_и$, где $\tau_и$ — ожидаемая длительность регистрируемых деталей. Если принять, например, время открытия нагнетательного клапана $\tau_и=(1/50)\tau_п$ (см. рис. IX—4, *в*), то верхние частоты должны быть 3 и 6 кГц для частот вращения соответственно 1500 и 3000 об/мин.

Из сказанного вытекают следующие основные выводы:

измерительная цепь должна воспроизводить постоянную составляющую $p_{ср}$;

верхняя граничная частота полосы воспроизведения должна не менее чем в 10 раз (а в некоторых случаях в 50 и более раз) превосходить основную частоту процесса;

для удобства обработки результатов статические характеристики должны быть близки к линейным в диапазоне давлений от p_{min} до p_{max}.

Формирование требований к цепям для измерения других величин выполняется таким же порядком. Опыт показывает, что наиболее жесткие требования предъявляют к цепям для измерений давления.

IX.3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

IX.3.1. ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

Датчики, предназначенные для измерения быстроменяющихся давлений в холодильных компрессорах, должны удовлетворять следующим основным требованиям:

измерять давление в пределах от сотых долей до 2—2,5 МПа (по абсолютной шкале); при этом статическая характеристика должна быть близкой к линейной;

обладать равномерной частотной характеристикой в заданном диапазоне;

сохранять свои метрологические характеристики в диапазоне температур от нормальной до 250 °С и выше;

иметь малые размеры, позволяющие встраивать датчики в клапанные доски и другие детали компрессоров без нарушения их характеристик; практически необходимы датчики с диаметром от 5 до 15 мм;

обеспечивать достаточный ресурс работы, имея в виду, что замена датчика связана с трудоемкой процедурой разборки и сборки компрессора.

Кроме перечисленного весьма желательной является взаимозаменяемость датчиков, а следовательно, унификация их метрологических характеристик.

В зависимости от вида частотной характеристики в области нижних частот датчики подразделяются на две группы:

датчики, воспроизводящие нижние частоты от 0 Гц, т. е. включая постоянную составляющую давления (частотная характеристика типа *А*, см. рис. IX—4, *а*);

датчики, воспроизводящие нижние частоты от некоторого граничного значения и, следовательно, не пропускающие постоянную составляющую давления (частотная характеристика типа *Б*, см. рис. IX—4, *б*).

Принципиальное различие между этими группами датчиков состоит в том, что первые могут подвергаться статической градуировке, которая при определенных условиях сохраняется и в динамическом режиме.

Датчики второй группы не могут быть отградуированы в статическом режиме. Специальными опытами можно определить чувствительность такого датчика, т. е. приращение выходной величины на единицу приращения давления. Определение же величин давлений, т. е. искусственное восстановление постоянной составляющей, требует в каждом измерении получать косвенным путем опорные, или реперные, значения давлений.

Графики на рис. IX—5 иллюстрируют особенность рассматриваемых датчиков.

Левый график (рис. IX—5, *а*) представляет собой статическую характеристику датчика первой группы в данном случае — зависимость выходного напряжения U от измеряемого давления. Ее получают простым экспериментом, пользуясь образцовыми средствами, например манометром и вольтметром. На правом графике представлена осциллограмма напряжений и во времени. Если масштабы изображения напряжения U на обоих графиках совпадают и если нулевые точки размещаются на одном уровне, то давления p_1 и p_2 (в точках *1* и *2*) определяются простым переносом ординат (показано пунктиром). В общем случае при таком способе обработки зависимость $U=f(p)$ может быть и нелинейной.

Для датчиков второй группы статической характеристики не существует. Поэтому ее аналог — квазистатическую характеристику — получают из динамического эксперимента. Один из способов состоит в том, что непосредственно на осциллограмму в координатах «отклонение луча l — время τ» (рис. IX—5, *б* — правый график) наносят реперные линии L_1 и L_2. При этом известно, что они соответствуют давлениям p_{0_1} и p_{0_2}.

Тогда через точки с координатами (p_{0_1}, L_1) и (p_{0_2}, L_2) на левом графике (рис. IX—5, *б*) проводят прямую, являющуюся

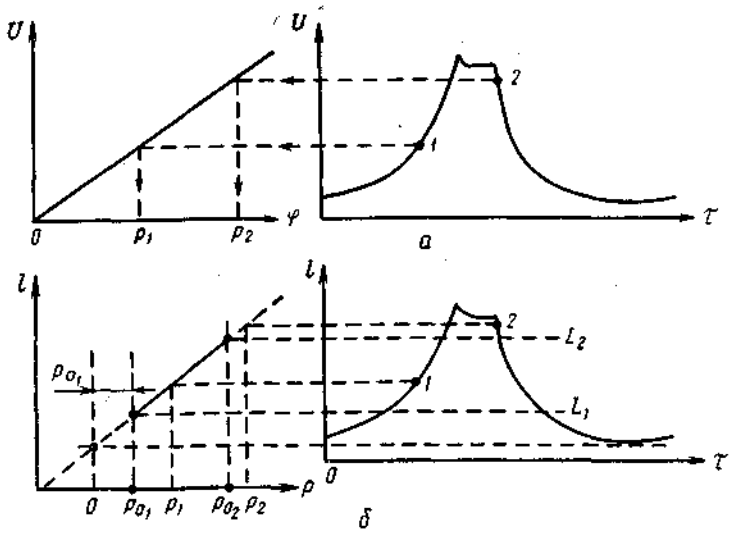


Рис. IX—5. Обработка осциллограмм в системах с постоянной составляющей (*а*) и без постоянной составляющей (*б*)

частью квазистатической характеристики. Ее продолжают в обе стороны (пунктир), в том числе и к нулевой точке давления, которая соответствует началу отсчета. Далее обработку осциллограммы можно вести переносом ординат с осциллограммы на квазистатическую характеристику, т. е. так, как это делалось в предыдущем случае. Основная трудность этого метода состоит в получении точных реперных линий или точек.

Как указывалось, существенное влияние на точность измерений оказывают частотные характеристики датчиков. Частотная характеристика датчика зависит от его геометрических размеров и свойств материала. Большинство датчиков воспринимает давление через металлическую, чаще всего стальную, мембрану, которая затем передает усилие на преобразовательный элемент.

Мембрана, зажатая по периметру, является колебательным элементом, имеющим собственную резонансную частоту. Эта частота для стальных мембран, колеблющихся в воздухе или газе, может вычисляться по упрощенной формуле [93]

$$f_м = 1250\delta/R^2,$$

где $f_м$ — собственная резонансная частота мембраны, кГц; δ — толщина мембраны, см; R — радиус заделки, см.

В некоторых случаях динамические качества датчиков определяются не мембранами, а другими элементами, например пьезокристаллами или деталями из пьезокерамики. В этом случае должны быть определены резонансные частоты механических колебаний, которые, как правило, значительно выше, чем у мембран.

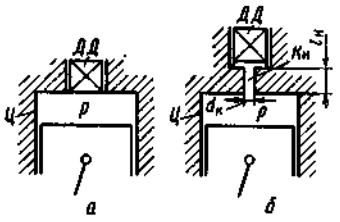


Рис. IX—6. Способы установки датчика давлений:
а — заподлицо; *б* — через канал

Свойства колебательного элемента необходимо учитывать при расчете полосы частот воспроизводимого давления. Следует иметь в виду, что значительные искажения сигнала может внести также канал, соединяющий датчик с измеряемой полостью. На рис. IX—6 показаны два способа установки датчика давления *ДД*.

Если чувствительный элемент датчика *ДД* введен непосредственно в полость с измеряемым давлением p, например заподлицо с крышкой цилиндра *Ц*, как показано на рис. IX—6, *а*, то дополнительных погрешностей такой способ не вызывает. Если же между рабочей полостью и датчиком давления *ДД* имеется канал *Кн* (рис. IX—6, *б*), то при определенных условиях он может внести дополнительные амплитудные и фазовые погрешности. Влияние канала будет тем заметнее, чем больше его длина $l_к$ и чем меньше диаметр $d_к$.

Теоретический анализ возникающих в каналах гидроакустических явлений достаточно сложен. Некоторые его положения можно почерпнуть в [12]. Приближенный анализ можно провести способом, приведенным в [93]. Канал как гидроакустический элемент обладает собственной резонансной частотой, которую можно подсчитать по формуле

$$f_к = \frac{1}{4}\,\frac{a}{l_к + 4v/(\pi d_к^2)},$$

где $f_к$ — собственная резонансная частота канала, Гц; $l_к$ — длина канала, см; v — объем канала и полости под датчиком, см³; $d_к$ — диаметр канала, см; a — скорость звука, см/с.

Сигнал проходит через канал с малыми искажениями (не более 1—3% по амплитуде), если его верхняя граница полосы частот не превышает $(0{,}2 \div 0{,}3) f_к$.

IX.3.1.1. Датчики с постоянной составляющей

Датчики этой группы представляют собой преобразователи параметрического типа, в которых давление преобразуется в изменение одного из электрических параметров. В практике находят применение емкостные и резистивные датчики.

Емкостные датчики представляют собой электрический конденсатор, емкость которого изменяется под воздействием измеряемого давления.

Принцип действия емкостного датчика показан на рис. IX—7, *а*. Мембрана M с жестко заделанными краями воспринимает давление p, в результате чего прогибается на величину h. Она является одной из обкладок конденсатора, второй обкладкой которого служит неподвижный электрод *Э*. Если начальное расстояние между мембраной и электродом равно d, то начальная емкость составит

$$C = \varepsilon_0 F/d,$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная диэлектрика (в данном случае воздуха) $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; F — площадь электрода, м; d — начальное расстояние между электродом и мембраной, м.

В датчиках промышленных типов с диаметром мембраны 12—15 мм полная начальная емкость составляет порядка 15—20 пФ. Переменная часть емкости, изменяющаяся при прогибе мембраны, составляет около 1,0 пФ. Чувствительность датчиков составляет приблизительно 0,01 пФ на 1% диапазона измерений.

Принцип построения электрической схемы поясняется на рис. IX—7, *б*. Полная емкость датчика *ДД* складывается из двух составляющих: начальной (постоянной) C_c и переменной C_V. Вместе с индуктивностью L они составляют колебательный контур генератора высокой частоты *Г*. При давлении $p=0$ генерируется частота f_0 (левый график). При появлении переменного давления мембрана периодически прогибается, емкость C_V уменьшается, в результате чего частота генератора изменяется, повторяя измеряемое давление. Это явление называется частотной модуляцией. Включенный далее частотный детектор *ЧД* преобразует частотно-модулированный сигнал в напряжение U, которое можно использовать для регистрации осциллографом.

При таком способе модуляции частота определяется известным выражением $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$. Изменение величины C в общем случае приводит к нелинейному преобразованию. Однако степень нелинейности невелика и легко устраняется в усилительной аппаратуре.

Частота генератора f_0 принимается в таких системах порядка 5—10 МГц. Работа на такой высокой частоте требует применения

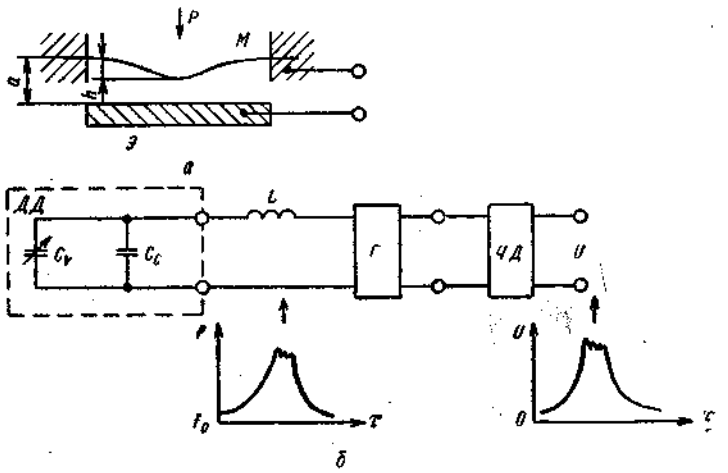


Рис. IX—7. Измерение быстроменяющегося давления емкостным датчиком:
а — схема датчика; *б* — упрощенная электрическая схема; M — мембрана; *Э* — неподвижный электрод; C_c — полная начальная емкость; C_V — изменяющаяся часть емкости; L — индуктивность; *Г* — генератор высокой частоты; *ЧД* — частотный дефектор; *ДД* — датчик давления

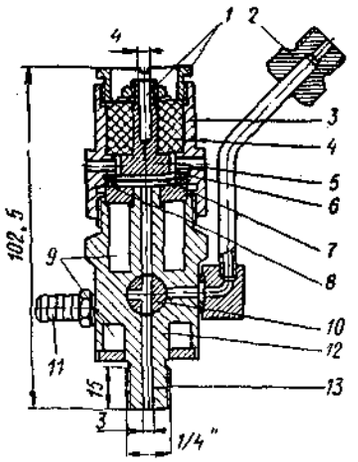


Рис. IX—8. Емкостные датчики давления фирмы «Диза» (Дания):

1 — штепсель коаксиального кабеля; *2* — патрубок для статической калибровки; *3* — верхний корпус; *4* — изолятор; *5* — электрод; *6* — стальное кольцо; *7* — мембрана; *8* — медное кольцо; *9* — полости водяного охлаждения; *10* — шаровой кран; *11* — водяные патрубки; *12* — нижний корпус; *13* — канал

специальных концентрических (коаксиальных кабелей), при этом длина линии от датчика до генератора не превышает 1—2 м.

Сравнительно невысокая полезная чувствительность емкостных датчиков делает их очень чувствительными к изменениям температуры. По данным [93], температурный дрейф нуля может доходить до 0,01 пФ/°С, или до 1% диапазона измерений на 1 °С. Полезная чувствительность также изменяется примерно на 0,1%/°С. В связи с этим емкостные датчики защищаются от воздействия температуры при помощи их искусственного охлаждения, а также путем отнесения собственно датчика на некоторое удаление от полости с высокой температурой. Последнее требует применения передающего канала.

Общий вид емкостного датчика давления фирмы «Диза» (Дания) приведен на рис. IX—8. Нижний корпус имеет водяное охлаждение, которое в значительной мере уменьшает влияние температуры на характеристику емкостного преобразователя, но не устраняет его полностью. Для полного устранения дополнительной погрешности датчик снабжен патрубком и краном, с помощью которых в установившемся тепловом состоянии может быть снята статическая характеристика датчика. Точность градуировки может быть достаточно высокой при использовании соответствующего манометра. Ниже приводится техническая характеристика этого датчика.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Верхние пределы измерений, МПа	0,0005—2,0 (см. табл. IX—1)
Нелинейность характеристики, %, не более	2
Температурный дрейф нуля, пФ/°С	0,01

Предельная температура, °С	150
Гистерезис	Не обнаруживается
Объем канала, см³	0,75
Резонансная частота канала, кГц	0,8—1,1
Масса, кг	0,5

В более совершенной конструкции емкостного датчика той же фирмы в качестве одного из электродов используют металлизированный кристалл кварца. Такой датчик предназначен для измерения давлений в диапазонах с верхними пределами от 0,1 до 25 МПа (ряд чисел 1; 16; 2,5; 4; 6,3, умноженных на 10^{-1} и 10). Собственные частоты не ниже 14 кГц. При этом температурный дрейф снижен до 0,0005 пФ/°С, а верхний температурный предел может быть повышен до 500 °С. Однако штепсель и кабель не допускают повышения температуры более 150 °С. Предусмотрена возможность установки как непосредственно в измеряемую полость, так и в специальный корпус с каналом и с охлаждением сжатым воздухом.

Таблица IX—1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

Характеристика	Толщина мембраны, мм						
	0,05	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,2
Пределы измерения							
кПа							
min	—0,5	—0,8	—4	—7	—1,1	—1,6	—3,1
max	+0,5	+0,8	+4	+7	+1,1	+1,6	+3,1
МПа							
min	—	—	—	—	—	—	—
max	—	—	—	—	—	—	—
Перегрузка, МПа	2,7	4,9	8,7	11	15	15	15
Резонансная частота мембраны, кГц	1,9	2,5	3,1	3,8	4,4	5,0	6,3

Продолжение

Характеристика	Толщина мембраны, мм						
	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Пределы измерения							
кПа							
min	—6,1	—	—	—	—	—	—
max	+6,1	—	—	—	—	—	—
МПа							
min	—	—0,1	—0,1	—0,1	—0,1	—0,1	—0,1
max	—	+0,11	+0,25	+0,49	+0,85	+1,3	+2,0
Перегрузка, МПа	15	15	15	15	15	15	15
Резонансная частота мембраны, кГц	7,8	9,4	12,5	16	19	20	25

Резистивные датчики представляют собой преобразователи, в которых деформации упругого элемента (чаще всего мембраны) преобразуются с помощью тензорезистивных элементов в изменения электрического сопротивления. Тензорезистивный элемент — это комбинация одного или нескольких тензорезисторов с упругим чувствительным элементом, воспринимающим измеряемое давление. Сопротивления тензорезисторов изменяются пропорционально деформациям упругих элементов.

Среди известных тензорезистивных устройств — металлические упругие элементы с наклеенными проволочными и фольговыми тензодатчиками и тензоэлементы, изготовленные методами микроэлектронной технологии. Первые практически вышли из употребления из-за трудностей, связанных с надежной приклейкой датчиков, выводом проводов и др. К тому же их использование связано с необходимостью применения упругих элементов значительных размеров.

Вторые получают все более широкое распространение как для измерения статических (см. п. V.3.1), так и динамических давлений. Особо перспективными являются кристаллические полупроводниковые преобразователи, производство которых освоено многими зарубежными фирмами и некоторыми отечественными предприятиями [51].

Производство полупроводниковых тензорезистивных элементов основано на возможностях микроэлектронной технологии формировать в объеме твердого тела (полупроводника) сложные электрические схемы.

Основная часть схемы — упругий элемент, выполненный из монокристаллического полупроводника (чаще всего кремния), в котором методом диффузии или ионного легирования формируют интегральную тензорезистивную структуру, содержащую несколько резисторов, соединенных в четырехплечий мост. Несмотря на широкое распространение тензорезистивных преобразователей, датчики на их основе, пригодные для измерения быстроменяющихся давлений в холодильных компрессорах, встречаются достаточно редко. Устройство кристаллического тензорезистивного элемента показано на рис. IX—9, *а*. Основой элемента является пластина *2*, вырезанная из кристалла. Средняя ее часть *3* утончается и выполняет роль мембраны. Собственно тензорезисторы располагаются в теле мембраны, их внешний монтаж осуществляется с помощью выводов *5*. Пластина *2* склеивается с основанием (стекло или кристалл). Если полость под мембраной откачать до достаточно низкого давления, то прогиб мембраны под действием давления сверху будет пропорционален абсолютному давлению. Если эту полость сообщить с атмосферой, то датчик будет измерять избыточное давление. Наконец, внутрь полости можно подать давление от опорного источника и косвенно проверять и корректировать статическую характеристику. В чувствительном элементе используются четыре резистора, два из которых воспринимают деформацию мембраны, а два других служат для температурной компенсации.

Тензорезисторы соединяются в четырехплечий мост, к одной диагонали которого подводят питание, а с другой снимают выходное напряжение.

Сильная зависимость сопротивления резисторов от температуры требует дополнительных мер для ее компенсации. В частности, фирма «Кистлер» (Швейцария) [51] применяет мост с дополнительны-

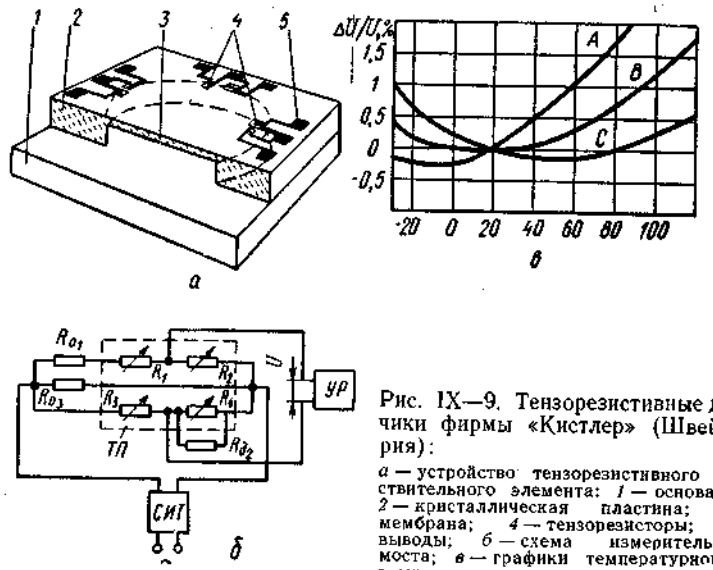


Рис. IX—9. Тензорезистивные датчики фирмы «Кистлер» (Швейцария):

а — устройство тензорезистивного чувствительного элемента: *1* — основание; *2* — кристаллическая пластина; *3* — мембрана; *4* — тензорезисторы; *5* — выводы; *б* — схема измерительного моста; *в* — графики температурной погрешности

ми резисторами и с питанием моста стабилизированным током (а не стабилизированным напряжением, как это часто делается). На рис. IX—9, *б* приведена схема измерительного моста. Резисторы R_1—R_4 являются элементами тензорезистивного преобразователя *ТП*. Резисторы R_{01}, R_{02}, и R_{03} служат для уменьшения влияния температуры на характеристики преобразователя в целом. Питание моста осуществляется от стабилизированного источника тока СИТ, выходное напряжение подается на усилительно-регистрирующее устройство *УР*. На графике рис. IX—9, *в* показаны зависимости относительного отклонения выходного напряжения $\Delta U/U$ при изменениях температуры для различных диапазонов компенсации. Так, отклонение не более ±0,5% обеспечивается в диапазоне *A* от —25 до +40 °С, в диапазоне *B* — от —25 до +70 °С и в диапазоне *C* от —10 до +120 °С. Зависимость для каждого диа-

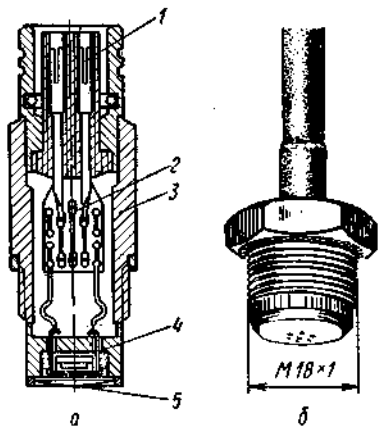


Рис. IX—10. Устройство тензорезистивных датчиков фирмы «Кистлер» нормальной (*а*) и упрощенной (*б*) конструкций

пазона определяется сочетанием сопротивлений дополнительных резисторов.

Устройство тензорезистивного датчика давления фирмы «Кистлер» показано на рис. IX—10, *а*. Тензорезистивный чувствительный элемент *4* размещается в корпусе *3*. Измеряемое давление воспринимается тонкой металлической мембраной *5*. Полость, образованная мембраной и пластиной чувствительного элемента, заполняется кремнийорганической жидкостью. Для дополнительных резисторов и осуществления монтажа предусмотрена плата *2*. Соединение с источником питания и усилителем осуществляется через четырехштырьковый штепсельный разъем *1*. В полость измеряемого давления датчик вворачивается на резьбе. На рис. IX—10, *б* приведен внешний вид датчика более простой конструкции. Ниже приведена техническая характеристика датчиков фирмы «Кистлер».

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Предел измерений, МПа	0—0,1 0—0,2 0—1 . . . . . . 0—20
Температура, °С	—20÷+50 —20÷+120 0÷+80
Предельная рабочая частота, кГц	10
Стабилизированный ток питания, мА	2—5

Сравнительно невысокий верхний предел температур приводит в необходимых случаях к конструкциям с искусственным охлаждением чувствительных элементов [69].

IX.3.1.2. Датчики без постоянной составляющей

Эта группа датчиков получила наибольшее распространение в исследованиях компрессорных машин. Этому способствовал ряд обстоятельств и прежде всего сравнительная простота их устройства, хорошие динамические свойства, достаточно высокая надежность. В группу входят генераторные датчики, основанные на использовании пьезоэлектрического эффекта [46, 61]. Это явление свойственно некоторым природным кристаллам, например кварцу, и некоторым искусственным материалам, например пьезокерамикам, на основе титаната бария и его композиций. В датчиках давления используют прямой пьезоэффект, при котором механическая деформация сопровождается появлением на поверхностях электрических зарядов.

Величина заряда Q (Кл) рассчитывается по формуле [46]

$$Q = dP, \qquad (IX—1$$

где d — пьезомодуль, Кл/Н; P — сила, Н.

Чувствительный элемент из пьезокристалла или пьезокерамики является генератором напряжения, которое зависит от заряда и собственной электрической емкости,

$$U = Q/C_д, \qquad (IX—2$$

где U — напряжение, В; $C_д$ — емкость элемента датчика, Ф.

Если, например, чувствительный элемент из пьезокерамики с $d = 10^{-10}$ Кл/Н при активной площади 1 см² (10^{-4} м²) и емкости 1000 пФ (10^{-9} Ф) воспринимает давление 1 МПа (10^6 Н/м²), то ожидаемое напряжение, вычисленное по формулам (IX—1) и (IX—2), составит 10 В. Сравнительно высокое напряжение, генерируемое пьезодатчиками (у кристаллического кварца оно примерно на порядок ниже), является одним из важных их преимуществ. Как видно из формулы (IX—2), на величину напряжения заметное влияние оказывает емкость. Отсюда следует, что добавление емкости, например, при использовании длинных соединительных проводов, приводит к снижению напряжения.

Другая особенность состоит в том, что пьезоэлементы, являясь диэлектриками, обладают весьма высоким внутренним сопротивлением и в связи с этим требуют высоких сопротивлений нагрузки (входное сопротивление усилителей для кварцевых датчиков должно быть 10^{10}—10^{12} Ом). С этими сопротивлениями связан основной недостаток пьезодатчиков — невозможность воспроизведения постоянной составляющей.

Как следует из выражения (IX—1), приложенная сила вызывает появление заряда размером Q, который теоретически мог бы существовать длительное время. Однако в действительности заряд стекает через внутреннее и внешнее сопротивления. Скорость стекания зависит от постоянной времени цепи $\tau_ц = RC$. Если сила действует на пьезоэлемент с периодом $\tau_п \ll \tau_ц$, то эффект стекания заряда не оказывает заметного влияния. Постоянная же составляющая должна сохраняться весьма длительное время (по крайней мере, в течение всего времени эксперимента $\tau_э$), т. е. $\tau_э \gg \tau_ц$. Поэтому практически при любых R не удается длительное время удержать заряд и постоянную составляющую. Существуют схемы, в которых $\tau_ц$ доводится до 10 мин. Эти схемы предназначены для статической градуировки, и их практическая реализация связана со значительными трудностями [87].

Отсутствие постоянной составляющей приводит к необходимости в процессе измерений производить оценку давлений по специальным реперным точкам.

Таблица IX—2. ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ КВАРЦА И ПЬЕЗОКЕРАМИК

Константы	Материалы				
	кварц	ЦТС-19	ЦТС-23	ЦТБС-1	ЦТБС-3
Относительная диэлектрическая постоянная	4,5	1500	1000	3700	2400
Пьезомодуль, 10^{12} Кл/Н	2,2	200	200	470	400
Температура структурного превращения, °С	570	290	280	440	450
Удельное объемное электрическое сопротивление при 100 °С, Ом·см	—	10^{10}	10^{10}	10^8	10^8

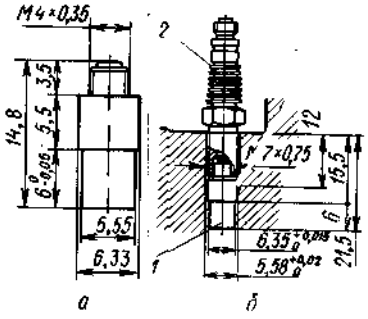


Рис. IX—11. Кварцевый датчик фирмы «Кистлер»:

а — собственно датчик; *б* — установка датчика на машину: *1* — датчик; *2* — арматура

Сравнение физических свойств кварцевых и пьезокерамических преобразователей показывает, что кварц, обладая невысоким пьезомодулем, характеризуется весьма высокой стабильностью пьезомодуля в широком диапазоне температур (10^{-4} 1/°C). Наоборот, пьезокерамики имеют значительно большие величины пьезомодуля однако его стабильность существенно ниже. Из этого следует, что при необходимости сохранить при различных температурах стабильную чувствительность датчика применяют кварцевые датчики. Если имеется достаточно эффективный способ обозначения реперных точке, то бо́льшие удобства представляют пьезокерамические датчики. Некоторые физические константы кварца и пьезокерамик групп ЦТС и ЦТБС приведены в табл. IX—2.

Кварцевые датчики в основном используют при исследованиях двигателей внутреннего сгорания и высокотемпературных компрессоров. *Они отличаются высокими собственными частотами, широ*кими пределами измеряемых давлений и рабочих температур. Вместе с тем эти датчики требуют весьма высоких сопротивлений изоляции и нагрузок и, следовательно, специальной усилительной аппаратуры. На рис. IX—11 показаны габаритный чертеж современного датчика фирмы «Кистлер» (*а*) и чертеж его установки с помощью специальной арматуры, обеспечивающей закрепление датчика и защиту выводных штепселей и проводов от действия высоких температур. Ниже приводится техническая характеристика этого датчика.

Пределы измерений, МПа	0—25
Допускаемая перегрузка, МПа	35
Порог чувствительности, МПа	<0,0002
Чувствительность, пКл/МПа	150
Нелинейность, %	0,8
Гистерезис, %	0,5
Рабочий диапазон температур, °C	—196÷+350
Температурный дрейф в диапазоне 20—350 °C, %	<3
Сопротивление изоляции при 20 °C, Ом	$>10^{13}$
Собственная частота, кГц	150
Масса, г	1,8

В тех случаях, когда требуется уменьшить температурную погрешность или расширить область рабочих температур, прибегают к выносу чувствительного элемента в область более умеренного нагрева или применяют искусственное охлаждение (см. рис. IX—8).

Пьезокерамические датчики изготовляются в основном из материалов типа ЦТС (цирконат-титанат свинца). Эти материалы обладают высокими пьезоэлектрическими свойствами при температуре до 250 °C [10]. Целый ряд конструкций пьезокерамических датчиков разработан и прошел длительные испытания во ВНИКТИхолодпроме [3]. Эти датчики долгое время были основным средством измерения быстроменяющихся давлений при исследованиях холодильных компрессоров. Один из вариантов конструкции датчика представлен на рис. IX—12.

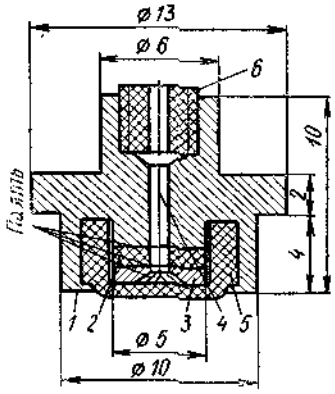


Рис. IX—12. Пьезокерамический датчик ВНИКТИхолодпрома

Датчик предназначен для встраивания непосредственно в исследуемую полость со стеной толщиной 4 мм. Датчик монтируется в корпусе *1*, в гнездо которого закладывается пьезокерамический элемент *2* с металлизированными поверхностями. Одной плоскостью элемент припаивается к корпусу, к другой плоскости припаивается электрод *3*. К электроду паяется выводной провод, заключенный во фторопластовую изоляцию, который через отверстие *4* в корпусе и через уплотняющий фторопластовый сальник *6* выводится наружу. Вторым проводом является корпус. Узел пьезоэлемента закрывается фторопластовым стаканчиком *5*, который, будучи завальцованным в корпус, обеспечивает герметизацию датчика, а также передает усилия через электрод на пьезоэлемент. Кроме того, обладая достаточной эластичностью, стаканчик предотвращает боковое сжатие пьезокерамики при температурных и механических деформациях.

В более поздних конструкциях была введена дополнительная металлическая мембрана, повышающая надежность и долговечность датчика. Кроме рассмотренного варианта выпускались датчики с металлической трубкой, через которую провода выводились наружу, а также с ввертным корпусом на резьбе М12×1.

Ниже приведена техническая характеристика датчика [1]

Предел измерений, МПа	0—15
Предельная температура, °C	250
Область воспроизводимых частот, Гц	1—10 000
Чувствительность, В/МПа	6—10
Абсолютная погрешность измерения мгновенного давления (МПа) в диапазоне, МПа	
0—0,5	0,02
0—1,6	0,05
0—5	0,1

IX.3.2. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Измерение быстроменяющейся температуры представляет собой сложную техническую задачу. Обычно такие измерения выполняют контактным способом, применяя один из известных термоприемни-

ков, чаще всего проволочный термопреобразователь сопротивления.

В идеальном случае, соответствующем отсутствию динамических погрешностей, температура чувствительного элемента термоприемника в каждый момент времени должна быть равна температуре измеряемой среды.

В действительности процесс теплообмена между чувствительным элементом и средой протекает с конечной скоростью, определяемой коэффициентом теплоотдачи, коэффициентом теплопроводности, формой и массой чувствительного элемента, а также способом его крепления. Проблема осложняется тем, что прямой эксперимент по определению динамических характеристик датчиков температуры, особенно на достаточно высоких частотах, технически очень сложен.

В работах [2, 40] показано, что основными источниками динамических погрешностей являются переменное значение коэффициента теплоотдачи, тепловые потоки к чувствительному элементу через опоры и выводы, запаздывания из-за высоких скоростей изменения температуры. Теоретические и экспериментальные исследования [2] показали, что датчик, выполненный из платиновой проволоки диаметром 2—5 мкм на основании из фторопласта-4, при начальном сопротивлении порядка 50—100 Ом обеспечивает измерение с максимальной погрешностью 4—5 °С при частоте вращения вала компрессора 1500 об/мин.

Конструкция такого датчика показана на рис. IX—13. Малая толщина проволоки, которая остается открытой во время измерения, не только затрудняет изготовление датчика, но и делает его уязвимым при хранении, монтаже и непосредственной работе. Чувствительный элемент можно изготовлять и из других металлов, например из вольфрамовой проволоки приблизительно той же толщины [40].

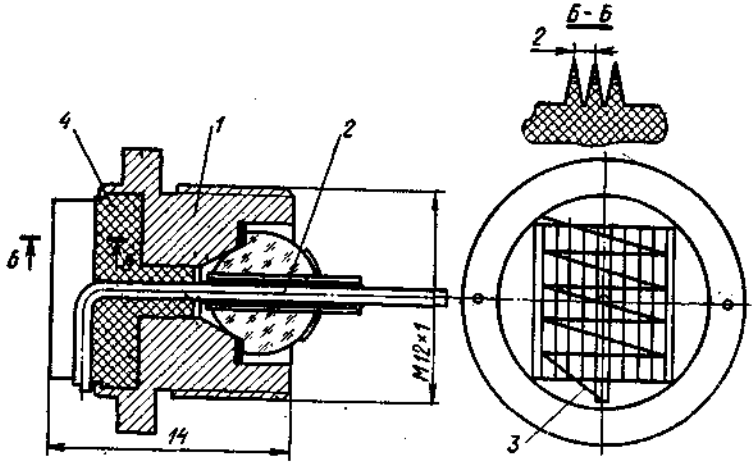


Рис. IX—13. Термопреобразователь сопротивления для измерения быстроменяющихся температур:

1 — корпус; *2* — вывод; *3* — проволочный чувствительный элемент; *4* — основание из фторопласта

Датчик обычно включают в одно из плеч неуравновешенного моста, элементы которого подбирают таким образом, чтобы приблизить характеристику моста к линейной.

Периодический процесс изменения температуры регистрируется с помощью электронно-лучевого или светолучевого осциллографа. Получаемая кривая должна быть расшифрована, т. е. на осциллограмму должны быть нанесены реперные линии, соответствующие определенным температурам. Для этого пользуются [2] замещением датчика образцовым сопротивлением. Зная сопротивления, соответствующие нанесенным линиям, и пользуясь специальными номограммами, учитывающими свойства материала проволоки и сопротивление датчика при некоторой известной температуре, определяют температуры, соответствующие реперным линиям. Определение других температур выполняют методом линейной интерполяции.

IX.3.3. ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ХОДА ПОРШНЯ

Одно из условий надежной расшифровки осциллограмм — точное нанесение меток, связывающих ось времени с положением поршня. Для этой цели применяют специальные датчики, чаще всего воспроизводящие положение верхней мертвой точки (ВМТ). Выбор ВМТ связан с тем, что ее легче установить прямым измерением на неработающем компрессоре.

Наиболее распространен индукционный датчик (рис. IX—14, *а*), состоящий из неподвижной катушки *2*, сердечником которой служит постоянный магнит *3*, и подвижного сердечника (флажка) *4*, закрепленного на валу или маховике компрессора. Подвижной сердечник, вращаясь с валом, периодически попадает в поле магнита и, меняя его, наводит в катушке ЭДС индукции. На выходе катушки имеют место импульсы с амплитудой $U_{вых}$.

Разновидностью индукционного датчика (рис. IX—14, *б*) является конструкция, в которой магнитный поток в стальном сердечнике *5* создается дополнительной катушкой *6*, питающейся от источника постоянного тока. Такой датчик более удобен, так как

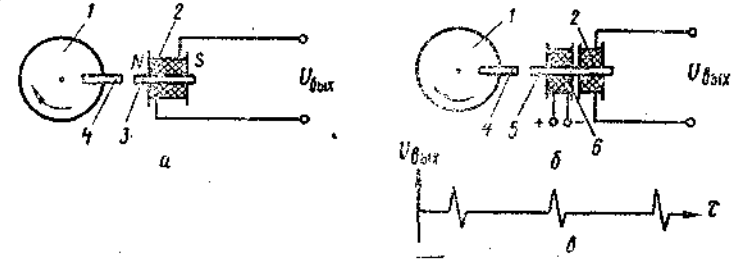


Рис. IX—14. Индукционные датчики положения поршня:

а — с постоянным магнитом; *б* — с катушкой подмагничивания; *в* — график импульсов на выходе датчика; *1* — вал или маховик компрессора; *2* — катушка; *3* — постоянный магнит; *4* — подвижной сердечник (флажок); *5* — стальной сердечник; *6* — катушка намагничивания

позволяет получить магнитный поток нужной величины. При этом обработка и придание наружной формы неподвижному сердечнику из стали проще, чем из материала постоянного магнита.

Форма импульсов, генерируемых датчиком, видна из графика (рис. IX—14, *в*). Прохождение флажком оси датчика соответствует пересечению линией импульса оси времени. Для повышения точности отметок целесообразно поперечные размеры сердечника и флажка делать одинаковыми и минимальными (порядка 3—6 мм). Важное значение имеет точная установка датчика: оси флажка и сердечника должны совпадать при положении поршня в ВМТ. Для этой цели применяют точные механические и электроконтактные индикаторы.

Точность фиксации положений поршня зависит также от длительности импульсов, кривизны их фронтов. Некоторые зарубежные фирмы выпускают датчики положения, генерирующие практически прямоугольные импульсы малой длительности.

Схема одного из вариантов такого датчика показана на рис. IX—15. С валом компрессора соединяется диск со щелевыми прорезями. Фотоэлектрическая головка *2*, охватывающая диск, содержит источник света, оптическую систему и фотоэлектрический преобразователь. Импульсы поступают на вход триггерного формирователя *3*, задача которого — обработать их, превратив в короткие вертикальные импульсы трех высот: рядовой, групповой и начальной (например, ВМТ). Изображение импульсов на осциллограмме показано на графике (см. рис. IX—15). Такие датчики могут работать при частоте вращения до 10 000 об/мин (~167 Гц). Рядовые метки могут следовать через интервалы от 2 до 10°. При этом ширина импульса не превышает 0,5°, а время нарастания импульса не превышает 1 мкс. Настройка датчика ведется по ВМТ с помощью соответствующих меток на диске и головке.

Выше указывалось (см. рис. IX—2, *г*) на возможность получать индикаторную диаграмму в координатах «давление — ход поршня» («давление — объем»). Для этого используют электронно-лучевой осциллограф, на вход вертикального отклонения которого подают напряжение, пропорциональное давлению в цилиндре, а на вход горизонтального отклонения — напряжение, пропорциональное ходу поршня. Поскольку прямое измерение хода поршня связано с серьезными техническими трудностями, эту величину получают путем косвенного измерения через угол поворота коленчатого вала. Связь между углом поворота φ и ходом поршня l описывается уравнением [15]

$$l = R\left[1 - \cos\varphi + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos 2\varphi)\right]$$

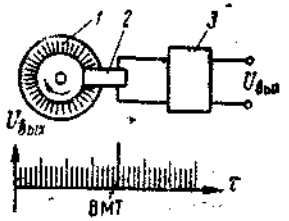


Рис. IX—15. Фотоэлектрический датчик положения:
1 — диск; *2* — фотоэлектрическая головка; *3* — формирователь импульсов

или в относительной форме

$$\bar{l} = 1 - \cos\varphi + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos 2\varphi).$$

В этих формулах
$\bar{l} = l/R$; $\lambda = R/L$, где R — радиус кривошипа; L — длина шатуна.

Преобразование угла поворота φ в напряжение, пропорциональное относительному перемещению $\bar{l}$, осуществляется функциональным преобразователем (см., например, [93]). Схема электромеханического преобразователя емкостного типа приведена на рис. IX—16. Ротор *1* цилиндрической формы вращается вместе с валом компрессора. Длина цилиндрической поверхности $l_ц = K\bar{l}$ (K — масштабный коэффициент). Вместе с неподвижной пластиной *2* ротор образует конденсатор с переменной емкостью C_V. Как следует из формулы (IX—3), емкость C_V пропорциональна $l_ц$ и, следовательно, $C_V = K_1\bar{l}$. Дальнейшее преобразование осуществляется так же, как в схемах с емкостными датчиками давления (см. п. IX.3.1). Форма выходного напряжения $U_{вых}$ показана на графике.

IX.4. УСИЛИТЕЛЬНО-РЕГИСТРИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА

Требования к усилительно-регистрирующей аппаратуре определяются видом первичного преобразователя и принятым типом осциллографа. Если принят электронно-лучевой осциллограф, то в большинстве случаев оказывается возможным использовать те усилители, которые входят в его состав. В случае применения светолучевого магнитоэлектрического осциллографа необходимо подбирать или изготовлять специальные усилители. Учитывая, что лишь немногие датчики поставляются серийно в комплекте с усилителями и что для подбора усилителей необходимо располагать основными требованиями к ним, ниже приводятся рекомендации по составлению измерительных цепей и методам подбора усилителей.

Система с емкостными датчиками давления (рис. IX—17, *а*). Выше указывалось, что емкостный датчик *1* включается в колебательный контур генератора высокой частоты *2*. Модулированные по частоте колебания затем преобразуются в детекторе *3* в сигнал низкой частоты с постоянной составляющей. Далее возможны два варианта: регистрация с помощью электронно-лучевого или светолучевого осциллографа. При использовании ЭЛО усиление сигнала

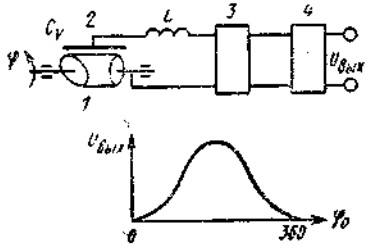


Рис. IX—16. Функциональный преобразователь угла поворота вала в напряжение, пропорциональное ходу поршня:
1 — ротор; *2* — неподвижная пластина; *3* — генератор высокой частоты; *4* — частотный детектор

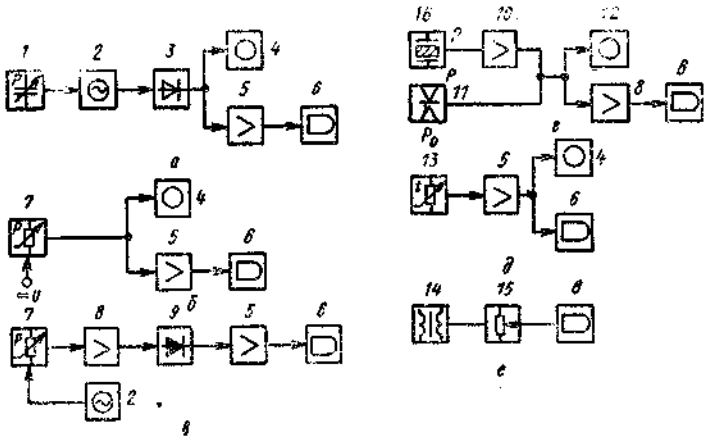


Рис. IX—17. Системы для измерения быстроменяющихся величин:
а — с емкостным датчиком давления; *б* и *в* — с резистивными датчиками давления; *г* — с пьезодатчиком давления; *д* — с датчиком температуры; *е* — для измерения пусковых токов; *1* — емкостный датчик давления; *2* — генератор; *3* — частотный детектор; *4* — электронно-лучевой осциллограф с усилителем постоянного тока; *5* — усилитель постоянного тока; *6* — светолучевой осциллограф; *7* — тензорезистивный датчик давления и измерительный мост; *8* — усилитель переменного тока; *9* — амплитудный демодулятор; *10* — усилитель с высоким входным сопротивлением; *11* — отметчик равных давлений; *12* — электронно-лучевой осциллограф с усилителем переменного тока; *13* — датчик температуры; *14* — трансформатор тока; *15* — регулируемый шунт; *16* — пьезоэлектрический датчик давления

осуществляется усилителем осциллографа *4*. Для воспроизведения постоянной составляющей усилитель вертикального отклонения, ЭЛО должен быть усилителем постоянного тока, т. е. полоса пропускания нижних частот должна быть от 0 Гц. Верхняя частота усилителя в этом варианте, как правило, выходит далеко за требуемые пределы.

В случае применения светолучевого осциллографа *6* перед ним включается усилитель *5*. Требования к этому усилителю по частотному диапазону те же: от 0 Гц снизу до предельной частоты, необходимой для воспроизведения процесса, сверху. В связи с тем что нагрузкой этого усилителя является рамка осциллографического гальванометра СЛО, выходная ступень усилителя должна рассчитываться на сравнительно низкоомную нагрузку. При этом, чем ниже собственная частота гальванометра, тем меньше внутреннее сопротивление он имеет и тем больший ток требуется для его раскачки. Важным для этого класса усилителей является требование малого дрейфа нуля. Дрейф нуля усилителя снижает стабильность воспроизведения постоянной составляющей и вызывает дополнительные погрешности.

Осциллографический гальванометр СЛО является элементом, который с высокой точностью воспроизводит постоянную составляющую и имеет ограниченное воспроизведение верхних частот (частотная характеристика типа *А*). Выпускаемые гальванометры

имеют собственные частоты от единиц герц до десятков килогерц. Можно выбрать гальванометр с заведомо более широкой полосой воспроизведения. Однако это требует более мощных оконечных ступеней усилителей с достаточно линейными статическими характеристиками. Для упрощения усилителей стараются применять гальванометры с возможно более низкой собственной частотой.

В связи с этим часто гальванометр является элементом, определяющим частотную характеристику всей измерительной цепи в целом. В соответствии с рекомендациями (см. п. IX.2.3) собственная частота гальванометра должна быть в 5—10 раз выше, чем расчетная предельная частота процесса, или в 50—100 раз выше основной частоты процесса. Так, для компрессоров с частотой вращения 1500 об/мин собственная частота гальванометра должна быть не ниже 1200—2400 Гц.

Особенность рассмотренной системы состоит в том, что на начальном ее участке от датчика до частотного детектора в цепи циркулируют токи с частотой порядка нескольких мегагерц. Во избежание влияния паразитных емкостей применяют коаксиальные кабели. Расстояние между элементами обычно не превышает 1 м, что требует специального конструктивного исполнения генератора.

Система с тензодатчиками давления. Системы этого типа различаются токами питания моста: в схеме (рис. IX—17, *б*) мост *7* питается постоянным током напряжением U, в схеме (рис. IX—17, *в*) мост питается переменным током повышенной частоты.

В связи с этим в первой схеме на выходе моста имеют место колебания с основной частотой, равной частоте исследуемого процесса, и постоянная составляющая. Усилители в этой схеме должны пропускать постоянную составляющую (частотная характеристика типа A_2, см. рис. IX—4, *а*). Если используется ЭЛО *4*, то усилитель вертикального отклонения должен иметь полосу пропускания от 0 Гц. Такую же полосу должен иметь усилитель *5* при использовании СЛО *6*. Выбор осциллографического гальванометра производят так же, как в системе с емкостными датчиками.

В схеме (см. рис. IX—17, *в*) для питания моста используют генератор *2* с частотой ультразвукового диапазона 10—100 кГц. В этом случае мост *7* выполняет роль амплитудного модулятора. На его выходе имеют место напряжение или ток с частотой генератора, огибающая которых соответствует форме измеряемого давления. Через усилитель *8* модулированный сигнал подается на демодулятор *9*, где выделяются основной сигнал и постоянная составляющая. Если их мощности недостаточны для работы гальванометра СЛО *6*, то применяют дополнительный усилитель постоянного тока *5*.

Особенность этой системы в том, что предварительное усиление малых сигналов от моста осуществляют в усилителе *8* переменного тока, который в принципе более прост и стабилен, чем усилитель постоянного тока, и не имеет дрейфа нуля. Вместе с тем повышенная частота питания несколько усложняет балансирование моста, так как требует уравновешивания не только активной, но и реактивной составляющей.

Система с пьезодатчиками давления. В этой системе (рис. IX—17, *г*) датчик *16* не воспроизводит постоянную составляющую. Однако из-за особых свойств пьезодатчиков они должны быть нагружены усилителями *10* с весьма высоким входным сопротивлением (10^9—10^{12} Ом). Таким сопротивлением обладают специальные

усилители постоянного тока. Действия последующих элементов этой системы аналогичны рассмотренным выше. Регистрация может производиться как ЭЛО, так и СЛО.

Отсутствие постоянной составляющей позволяет использовать усилитель *8* с частотной характеристикой типа *Б* (см. рис. IX—4, *б*), что упрощает его конструкцию. Такую же характеристику может иметь и усилитель осциллографа *12*. Как указывалось, выше, система с пьезодатчиками требует создания реперных линий или точек, соответствующих опорным давлениям. Реперы могут быть выполнены несколькими методами. В частности, можно применить отметчик равных давлений *11*, позволяющий сделать метки на осциллограмме, когда давление в цилиндре p становится равным внешнему опорному давлению p_0 [14].

Система с датчиками температуры. Эта система (рис. IX—17, *д*) содержит датчик температуры *13*, измерительный мост, питаемый обычно постоянным током, усилитель *5* с характеристикой типа *А* (см. рис. IX—4, *а*) и осциллограф *4* или *6*. Действие схемы аналогично действию рассмотренной выше схемы (см. рис. IX—17, *б*).

Система для измерения пусковых токов. В схему (рис. IX—17, *е*) входит трансформатор тока *14*, к которому подключается регулируемый шунт *15*, и далее — гальванометр осциллографа СЛО *6*. В этой схеме усилитель не требуется. Подбор гальванометра ведут на воспроизводимую частоту порядка 100—150 Гц. С помощью шунта добиваются нужного размера изображения.

IX.5. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО ОСЦИЛЛОГРАФАМ

Осциллографы, применяемые для наблюдения и регистрации быстроменяющихся величин при испытаниях холодильных компрессоров, подразделяются на две основные группы: светолучевые и электронно-лучевые.

Светолучевой осциллограф — это электромеханическое устройство, позволяющее получать осциллограммы на движущейся светочувствительной ленте. Процесс можно наблюдать на специальном экране.

Электронно-лучевой осциллограф — это электронное устройство, в котором изображение осциллограммы проецируется для наблюдения на экране электронно-лучевой трубки. Для регистрации осциллограмм необходима специальная приставка с фотоаппаратом.

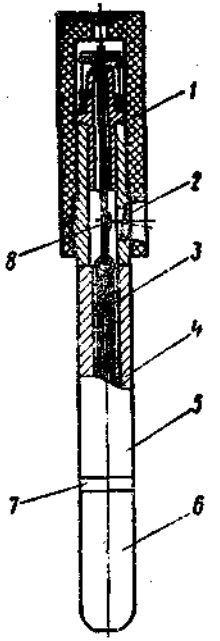
В практике измерений быстроменяющихся величин светолучевые осциллографы получили преимущественное распространение, в то время как электронно-лучевые используются значительно реже и в основном для наладочных работ. Ниже приводятся справочные данные только по светолучевым осциллографам.

IX.5.1. ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ГАЛЬВАНОМЕТРЫ (ОГ)

Осциллографические гальванометры (ОГ) представляют собой измерительный механизм магнитоэлектрической системы (рис. IX—18), к подвижной системе *3* которого прикреплено зеркальце *8*.

Рис. IX—18. Осциллографический гальванометр:

1 — крышка; *2* — линза; *3* — подвижная система; *4* — вставка полюсная; *5* — корпус; *6* — токопровод; *7* — изолирующая вставка; *8* — зеркальце



Зеркальце и линза *2* входят в оптическую систему осциллографа. При колебаниях подвижной системы луч, падающий на зеркальце от внешнего источника света, соответственно отклоняется от среднего положения. Осциллографический гальванометр не имеет собственного постоянного магнита. Необходимое магнитное поле создается внешним магнитом, заключенным в магнитный блок осциллографа, куда вставляется *ОГ*. Взаимодействие рамки *ОГ* с магнитным полем осуществляется через полюсную вставку *4*, выполненную из соответствующего магнитного материала. Узлы *ОГ* смонтированы в корпусе *5*. Осциллографический гальванометр предназначен для работы в термостатированном магнитном блоке при температуре 40±1 °С (для модификаций с индексом «А» —55±3 °С). Основные технические характеристики *ОГ* приведены в табл. IX—3.

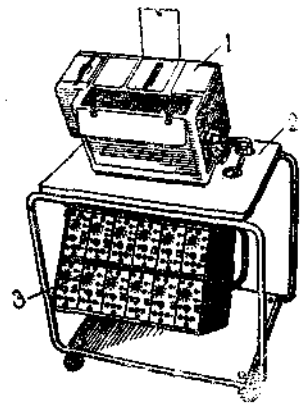


Рис. IX—19. Осциллограф светолучевой комплексный К121:

1 — осциллограф Н117/1; *2* — передвижная тележка; *3* — блок избирателей и калибраторов

IX.5.2. ОСЦИЛЛОГРАФЫ

Светолучевой осциллограф представляет собой многоканальный регистрирующий прибор, в котором используются магнитоэлектрические осциллографические гальванометры. Регистрация осуществляется на фотобумагу, которая может быть самопроявляющейся (если применяют ртутную лампу) и с химическим проявлением (при любых источниках света). Осциллографы имеют устройства, позволяющие изменять скорость протяжки ленты от единиц до нескольких тысяч миллиметров в секунду, автоматическую сигнализацию о движении и об окончании ленты.

Кроме того, предусмотрено нанесение на осциллограмму временных меток, отметок событий, продольное графление осциллограмм.

Таблица IX—3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ГАЛЬВАНОМЕТРОВ

Тип гальванометра	Собственная частота, Гц	Рабочая полоса частот, Гц	Чувствительность к току, мм/(мА·м)	Сопротивление, Ом		Максимально допустимый ток, мА	Вид успокоения
				внешнее	внутреннее		
1	2	3	4	5	6	7	8
М012.1 М012.2	10	0—6	74000	2300	175	0,008	Магнитоиндукционное обмоточное
М010-20	20	0—12	60000	3500	150	0,007	То же
М010-40	40	0—24	14000	1800	150	0,027	»
М010А-40	40	0—24	14000	250	50	0,027	»
М010-80	80	0—48	7000	500	70	0,080	»
М017-150	150	0—115	4000	150	45	0,100	»
М017-300	300	0—225	810	70	30	0,400	»
М017-400	400	0—300	450	45	30	1,000	»
М014-1200 М014А-1200	1200	0—750	30	120	21	10	»
М014-2500 М014А-2500	2500	0—1600	6,0	100	21	50	Жидкостное
М014-3500 М014А-3500	3500	0—2200	2,5	50	21	85	»
М014-7000 М014-700	7000	0—5000	0,7	Любое	23	50	»
М014-10000 М014А-10000	10000	0—7000	0,6	»	18		»
М018-15000 М018А-15000	15000	0—9000	2,0	»	230	30	»
М018-20000 М018А-20000	20000	0—12000	1,0	»	230	30	»
М1005-600	600	0—300	80	300	50	5	»
М1005-1200	1200	0—600	20	120	50	15	»
М1005-2500	2500	0—1250	4	30	50	50	»

Примечания: 1. Чувствительность к току обозначает отклонение луча в мм при изменении тока на 1 мА на экране, удаленном на 1 м. 2. Внешнее сопротивление, указанное в таблице, обеспечивает наиболее равномерную частотную характеристику типа A_2 (см. рис. IX—4, *а*).

Таблица IX–4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ СВЕТОЛУЧЕВЫХ ОСЦИЛЛОГРАФОВ

Характеристика	Тип осциллографа		
	Н117/1	Н115	Н043
Число каналов	18	12	6; 12; 24
Ширина фотоленты, мм	35; 60; 100; 120	35; 60; 100; 120	200
Длина ленты в кассете, м	25	25	50
Скорость движения фотоленты, мм/с	0,5; 1; 2,5; 5; 10; 25; 50; 100; 250; 500; 1000; 2500; 5000; 10000	То же, что для Н117/1	1; 2; 5; 10; 25; 50; 100; 200; 500; 1000; 2500; 5000
Допустимое отклонение скорости от номинальной, %			
при скорости до 5000 мм/с	±15	То же	±20
» » 10 000 мм/с	—20	»	—
Интервал между отметками времени, с	0,002; 0,02; 0,2; 2	»	0,01; 0,02; 0,1; 0,2; 1; 2; 10
Типы осциллографических гальванометров	М010; М014; М017; М1005	»	М010; М014; М017; М018
Типы источников света			
ртутная лампа лампа накаливания	ДРШ100-2; ОП6,8-11,5; ОП7-0,5	»	ДРШ100-2
Тип фотоленты	Фотобумага УФ67 Фотобумага чувствительностью 1000	»	Фотобумага УФ67
Комплект	Осциллограф, блок питания П133	»	Осциллограф
Питание от сети 50 Гц напряжением В	127; 220	115; 127; 200; 220; 240	220
Потребляемая мощность, В·А			
с ртутной лампой	450	450	750
с лампой накаливания	250	450	—
Габаритные размеры, мм			
осциллографа	535×290×320	528×280×313	480×286×476
блока питания	205×265×390	205×265×390	—
Масса, кг			
осциллографа	33	35	45
блока питания	17	17	—

Н117/1, Н115 и Н043 представляют собой осциллографы настольного исполнения, в то время как К115 и К121 являются передвижными комплексами, в состав которых входят собственно осциллографы (соответственно Н115 и Н117/1), а также избиратели пределов Р009, Р010 и калибратор П029.

Избиратели пределов Р009 и Р010 предназначены для выбора диапазона регистрации тока и напряжения и защиты гальванометров от токовых перегрузок. Избиратель Р009 служит для ОГ с магнитоиндукционным успокоением, а Р010 — для ОГ с жидкостным успокоением. Калибратор П029 предназначен для создания электрических сигналов, позволяющих осуществить с помощью избирателей пределов выбор динамических и статического режимов работы ОГ.

Основные технические характеристики светолучевых осциллографов приведены в табл. IX—4. Общий вид комплекса К121 показан на рис. IX—19.

Глава X

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

X.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В процессе испытаний холодильных машин и установок проводят многочисленные измерения теплотехнических, механических, электрических и других величин. Измерения и последующая обработка экспериментальных данных требуют значительных затрат времени и труда. В связи с этим разработан ряд методов частичной и полной автоматизации этих работ [4, 84, 92].

К методам **частичной автоматизации** относят применение автоматизированных средств измерений, систем автоматического сбора данных, использование ЭВМ для обработки данных [19].

Под автоматизированными средствами измерений понимают приборы, снабженные быстродействующими цифровыми отсчетными устройствами, устройствами для записи или цифровой печати данных, многоточечные измерительные приборы. Применение автоматических средств может существенно ускорить процесс измерений и уменьшить его трудоемкость. Автоматизированные средства были описаны в предыдущих главах.

Системы автоматического сбора данных являются более высокой ступенью автоматизации. С их помощью измеряемые величины после первичных преобразователей последовательно проходят через многоканальный коммутатор, аналого-цифровой преобразователь и выводятся на регистрирующее устройство. Совокупность перечисленных устройств называется **информационно-измерительным комплексом (ИИК)**. Такие системы существенно ускоряют процесс сбора данных, что особенно сказывается при значительном числе точек измерений.

Использование ЭВМ для обработки данных возможно при любом способе измерений. Предполагается, что собранные данные вручную вводятся в ЭВМ и обрабатываются по соответствующим программам.

В отличие от перечисленных методов системы **с полной автоматизацией** сочетают в себе автоматический сбор данных и передачу их для обработки в ЭВМ [83, 84, 92].

Совокупность устройств сбора данных и ЭВМ для их обработки называют измерительно-вычислительным комплексом (ИВК). Измерительно-вычислительные комплексы входят составной частью в полностью автоматизированные системы [37].

При соответствующем оборудовании объектов исследований или испытаний (стендов, агрегатов, машин) ИВК могут выполнять также функции управления объектами исследования, осуществляя автоматическое поддержание заданных режимов.

В данной главе рассматриваются структуры и технические средства *автоматизированных систем.*

Как указано выше, в зависимости от степени автоматизации системы подразделяются на два класса:

системы сбора и регистрации данных (частичная автоматизация);

системы сбора и обработки данных (полная автоматизация).

Принципиальное различие между ними состоит в том, что последние включают в себя ЭВМ, которые осуществляют необходимые математические операции по расчету параметров и характеристик испытуемых машин, используя для этого измеренные величины, а также вспомогательные зависимости и константы.

Структура системы сбора и регистрации данных представлена на рис. X—1. Состояние испытуемого объекта *Об* характеризуется измеряемыми величинами $x_1, x_2, \ldots, x_N$, которые могут изменять свои значения в некоторых пределах. По своему характеру — это различные тепловые, механические или электрические величины.

Измеряемые величины воспринимаются измерительными преобразователями $ИП_1, ИП_2, \ldots, ИП_N$. Число преобразователей может быть равно числу измеряемых величин, если используются индивидуальные преобразователи, либо быть меньше его, если применяют групповые преобразователи. В задачу измерительных преобразователей входит преобразование измеряемых величин в стандартизованные электрические сигналы в аналоговой или дискретной форме. Устройство и технические характеристики наиболее часто встречающихся измерительных преобразователей приведены в главах IV—VIII.

Преобразованные сигналы $a_1, a_2, \ldots, a_N$ с выходов измерительных преобразователей по линии связи передаются на вход информационно-измерительного комплекса *ИИК*.

В общем случае *ИИК* состоит из следующих основных устройств:

устройства связи с объектом *УСО*, в котором осуществляются измерение преобразованных величин и преобразование их в цифровой код;

периферийного, в данном случае регистрирующего, устройства *ПУ* (пишущая машинка, перфоратор и т. п.), с помощью которого измеренные величины в заданной последовательности регистрируются на бумаге или перфоленте в виде результатов измерений X;

управляющего устройства *УУ*, которое осуществляет автоматическое управление работой *УСО* и *ПУ* по заданной программе.

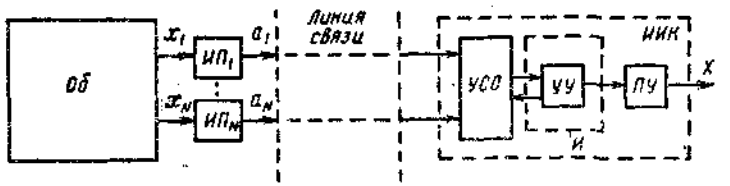


Рис. X—1. Структурная схема системы сбора и регистрации данных

Связь указанных устройств между собой осуществляется через *интерфейс И, который представляет собой совокупность специальных* аппаратных средств и способов соединения.

Структура системы сбора и обработки данных показана на рис. X—2, *а*. В этой системе сбор и обработка данных производятся измерительно-вычислительным комплексом *ИВК*, в состав которого входят *УСО*, *ЭВМ* и периферийные устройства *ПУ*.

Устройство связи с объектом *УСО*, как и в предыдущем случае, осуществляет измерение преобразованных величин и их преобразование в цифровой код. Через интерфейс *И* измерительная информация в виде кодированных сигналов *b* подается на вход *ЭВМ*.

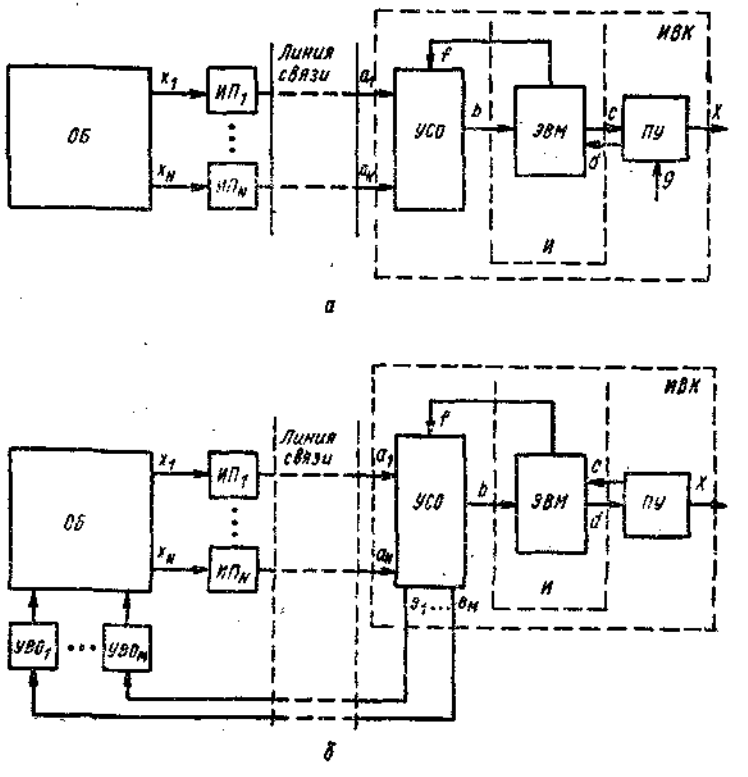


Рис. X—2. Структурная схема системы сбора и обработки данных (*а*) и той же системы с автоматическим управлением объектом испытаний (*б*)

Электронная вычислительная машина (ЭВМ) предназначена для математической обработки поступающей измерительной информации, а также для управления работой *УСО* (сигнал *f*) и периферийных устройств (сигналы *c*).

Периферийные устройства *ПУ* предназначены для выдачи и регистрации результатов измерений и расчетов *X*, ввода управляющей и вспомогательной информаций от оператора (сигналы *g*) и передачи их в ЭВМ (сигналы *d*). В задачи периферийных устройств входит также долговременное хранение данных.

Структура системы, изображенная на рис. X—2, *б*, отличается тем, что *ИВК* выполняет задачи не только сбора и обработки данных, но и управления работой объекта, например испытательного стенда. Для этого применяют устройства воздействия на объект $УВО_1$, $УВО_2$, ..., $УВО_м$, имеющее в своем составе исполнительные и регулирующие органы. Управление ими осуществляет *УСО* (сигналы e_1, e_2, ..., $e_м$) по соответствующим командам, вырабатываемым ЭВМ.

X.2. ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Электронная вычислительная машина — это комплекс технических средств, имеющих общее управление и предназначенных для автоматизации процесса вычислений и обработки информации по заранее составленной программе. Современная вычислительная техника располагает различными ЭВМ. Условно их делят на большие, мини-ЭВМ, микро-ЭВМ. Они отличаются не только своими размерами, но имеют различные принципы построения, управления, программирования [47, 49, 50].

Большие ЭВМ, например серии ЕС, из-за сложности и избыточности функциональных возможностей практически не используются в системах сбора и обработки данных, поэтому ниже приводятся сведения, касающиеся лишь мини- и микро-ЭВМ.

Основными узлами ЭВМ являются процессор, запоминающие устройства и схемы сопряжения с периферийными устройствами. Структура ЭВМ представлена на рис. X—3.

X.2.1. ПРОЦЕССОР

Процессором называют центральное устройство ЭВМ, выполняющее заданные программой преобразования информации и осуществляющее управление всем вычислительным процессом и взаимодействием узлов машины. Процессор *Пр* (см. рис. X—3) включает в себя устройство управления *УУ* и арифметико-логическое устройство *АЛУ*.

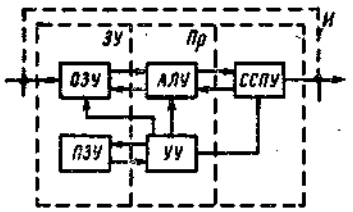


Рис. X—3. Структурная схема ЭВМ:

ЗУ — запоминающие устройства (ОЗУ — оперативное, ПЗУ — постоянное); *Пр* — процессор; *АЛУ* — арифметико-логическое устройство; *УУ* — устройство управления; *ССПУ* — схемы сопряжения с периферийными устройствами; *И* — интерфейс

Устройство управления контролирует взаимодействие различных частей ЭВМ, так как все операции, выполняемые ЭВМ, должны быть синхронизированы и осуществляться в соответствии с командами программы. Это устройство является организующей частью ЭВМ. В зависимости от поступающих команд устройство управления определяет, как и когда должны быть выполнены соответствующие операции.

Арифметико-логическое устройство выполняет собственно вычисления. Это устройство осуществляет арифметические операции, такие, как сложение, вычитание, умножение, деление, а также логические операции «И» и «ИЛИ». Составными частями *АЛУ* являются сумматоры и регистры. Последние осуществляют хранение исходных и результирующих чисел в двоичном коде. *АЛУ* характеризуются временем выполнения операции. В современных ЭВМ это время составляет от нескольких десятков наносекунд до долей микросекунды.

Процессоры ЭВМ базируются на современных элементах электронной техники. В мини-ЭВМ основными являются элементы малой и средней интеграции, или микросхемы. В микро-ЭВМ процессоры строятся на базе больших интегральных схем (БИС). Такие процессоры, включающие одну или несколько БИС, называются микропроцессорами [64, 76, 88].

X.2.2. ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Запоминающим называют устройство для записи, хранения и воспроизведения информации в дискретной форме. Запоминающие устройства характеризуются объемом памяти. Объем памяти принято определять в байтах и словах. Один **байт** составляют 8 двоичных разрядов. **Слово** — 16 двоичных разрядов, или 2 байта. Килобайт равен 1024 байт. Килослово равно 1024 слов.

Запоминающие устройства *ЗУ* (см. рис. X—3) включают в себя оперативное запоминающее устройство *ОЗУ* и постоянное запоминающее устройство *ПЗУ*.

Оперативное запоминающее устройство предназначено для временного хранения данных, промежуточных результатов и программ. Структура ЭВМ построена с расчетом, что процессор имеет быстрый и частый доступ к информации, хранящейся в *ОЗУ*. Возможности ЭВМ в значительной степени зависят от объема памяти *ОЗУ*: недостаточность объема памяти ограничивает объем перерабатываемой информации.

Постоянное запоминающее устройство предназначено для хранения программ, которые постоянно используются. *ПЗУ* отличается небольшим объемом и предназначено, например, для хранения так называемых сервисных программ: программ загрузки операционной системы с различных носителей (дисков, лент), теста оперативной памяти и т. д. Постоянное запоминающее устройство обеспечивает также хранение микропрограмм, посредством которых осуществляется управление процессором.

X.2.3. СХЕМЫ СОПРЯЖЕНИЯ С ПЕРИФЕРИЙНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Схемы сопряжения с периферийными устройствами включают схемы для хранения данных, которыми ЭВМ обменивается с ПУ и команд, поступающих из ЭВМ; узлы дешифрации адреса и команд; блоки преобразования информации (в частности, преобразования параллельного кода в последовательный и наоборот), а также схемы, выполняющие функции управления и (синхронизации) указанными узлами. Кроме того, ССПУ формируют сигналы, различные по уровню, длительности, скважности, частоте и т. д. для согласования ПУ с каналом ЭВМ, к которому это устройство подключено.

X.3. ПЕРИФЕРИЙНЫЕ УСТРОЙСТВА

Периферийными называют устройства, обеспечивающие длительное хранение больших массивов информации, ввод и вывод данных, а также передачу данных в другие ИВК [60]. К периферийным устройствам относят внешние запоминающие устройства, устройства для связи оператора с ЭВМ, устройства передачи данных.

X.3.1. ВНЕШНИЕ ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Внешние запоминающие устройства (ВЗУ) предназначаются для хранения больших объемов данных или программ. К таким устройствам относятся ВЗУ на магнитных лентах и дисках [60].

Запоминающее устройство на магнитной ленте имеет принципиальную схему, подобную схеме обычного магнитофона. Однако при записи информации в это устройство в отличие от магнитофона работают с магнитным материалом в состоянии насыщения, что позволяет при считывании получать одинаковую амплитуду импульсов. Магнитное вещество (окисел железа) нанесено на полистироловую ленту. Небольшой участок поверхности ленты может быть намагничен записывающей головкой в том или ином направлении (ноль или единица). Запись и воспроизведение производятся считывающей головкой. Наиболее распространенная ширина ленты 12,7 мм. На ленте располагается несколько дорожек, каждая из которых имеет свою головку записи-считывания. Информация на ленте записывается блоками, которые содержат по нескольку слов. Цикл обращения к магнитной ленте определен скоростью движения ленты, размещением информации, временем пуска и останова.

К устройствам памяти на магнитной ленте также относятся кассетные ВЗУ. Лента шириной 3,81 мм размещается в кассете. Кассетное устройство на магнитной ленте часто используется в мини- и микро-ЭВМ для ввода данных.

Запоминающие устройства на магнитных дисках — это устройства, в которых для запоминания информации используются вращающиеся с большой скоростью диски с магнитным покрытием. Запись и считывание информации осуществляют плавающие магнитные головки. Расстояние от головок до дисков несколько микрометров. Различают сменные и фиксированные диски. Сменные диски можно снимать и хранить отдельно. Существуют ВЗУ с одним, двумя или с пакетами дисков. В отечественных мини-ЭВМ применяют ВЗУ с одним и двумя дисками (один сменный, другой фиксированный).

В последние годы широкое распространение получили ВЗУ на гибких магнитных дисках. Гибкий диск внешне похож на граммофонную пластинку, помещенную в квадратный пластмассовый корпус. Диск выполнен из полистирола, покрытого окислом железа. Диаметр диска 198 мм, толщина 0,12 мм. Пластмассовый корпус имеет в середине круглое отверстие для привода диска и продольное отверстие, через которое осуществляется постоянный контакт головки записи-считывания с поверхностью диска. Головка записи-считывания перемещается радиально по отношению к диску. Это перемещение задается микрометрическим винтом, который непосредственно связан с осью шагового двигателя.

X.3.2. УСТРОЙСТВА ДЛЯ СВЯЗИ ОПЕРАТОРА С ЭВМ

X.3.2.1. Устройство считывания с перфолент и перфокарт, перфораторы

Устройства считывания преобразуют вводимые данные, представленные на перфоленте или перфокарте, в электрические сигналы, которые могут восприниматься ЭВМ [60].

Перфолента разделена на некоторое количество дорожек (от 5 до 8) и перемещается с помощью лентопротяжного механизма. Преобразование пробивок на перфоленте в электрические сигналы, т. е. считывание, осуществляется с помощью 5 или 8 оптических приемников. Оптический приемник, облучаемый световым потоком через пробивки, генерирует импульс, соответствующий логической единице.

Перфокарта имеет 80 столбцов и 12 колонок (строк). Каждая информационная позиция на карте может быть либо перфорирована, либо нет. Обычно одна колонка содержит перфокод, соответствующий одной цифре, букве или символу. Срезанный угол перфокарты упрощает проверку правильной установки их в считывающее устройство. Ввод информации с перфокарт осуществляется также с помощью фотоэлементов, но так как ввод происходит по колонкам перфокарт, то считывающий орган имеет 12 фотоэлементов.

Ленточный перфоратор регистрирует информацию на перфоленту пробивкой в соответствующих дорожках одной строки. Перфораторы работают в старт-стопном режиме, т. е. пробивают отверстия на неподвижной ленте. После пробивки строки перфолента перемещается на один шаг и пробивается следующая строка.

Карточный перфоратор регистрирует информацию на перфокарты. В перфорационном механизме перфокарта движется старт-стопно и останавливается на каждой из 12 позиций, которые совпадают с номерами строк.

Устройства считывания и перфораторы могут выполняться в виде отдельных устройств, но применяются также и комбинированные устройства, встраиваемые в стойки, где размещены блоки ЭВМ.

X.3.2.2. Алфавитно-цифровые печатающие устройства

Функция алфавитно-цифрового печатающего устройства (АЦПУ) — вывод на бумагу информации из ЭВМ в виде букв, цифр или иных символов. Наиболее распространены устройства последо-

вательной и параллельной печати. Устройства последовательной печати схожи с обычной пишущей машинкой, где текст печатается в строчку знак со знаком.

АЦПУ параллельной, или построчной, печати имеет значительно большую скорость. Они печатают целую строку текста одновременно. Наиболее распространенным является АЦПУ параллельной печати с вращающимся цилиндром. На поверхности цилиндра (на отдельных знаковых дорожках) расположены алфавитно-цифровые знаки или символы. Между молоточками и постоянно вращающимся барабаном проходят одновременно бумажная и красящая ленты. Отдельные молоточки воспроизводят удары в момент прохождения соответствующего знака. Вся строка отпечатывается в течение одного оборота барабана.

X.3.2.3. Видеотерминалы (дисплеи)

Видеотерминалом, или дисплеем, называется устройство визуального отображения алфавитно-цифровой и графической информаций [49, 60, 76]. Различают алфавитно-цифровые и графические дисплеи.

Алфавитно-цифровые дисплеи предназначены для ввода с клавиатуры и отображения на экране символьной информации. В режиме диалога с ЭВМ осуществляются выбор и редактирование данных, передача данных и текста программ в память машины.

Графические дисплеи предназначены для вывода графической информации. Их можно разделить на устройства вывода точечных изображений и устройства универсального типа для представления сложной графической и символьной информации. Первые строят изображения по координатам точки, выдаваемых из ЭВМ. Вторые имеют в своем составе микропроцессор для увеличения эффективности работы и набор функциональных генераторов для формирования символов и различных типов линий. В качестве индикаторных элементов в дисплеях применяют одно- и двухлучевые электронно-лучевые трубки одно- и многоцветного изображения.

X.3.3. УСТРОЙСТВА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Устройства передачи данных (УПД) используются для связи ИВК с удаленными устройствами ввода-вывода, с ЭВМ более высокого уровня иерархии, а также в разветвленных системах автоматизации — для связи ЭВМ между собой. Для передачи данных используются в основном телефонные и телеграфные линии различного типа.

В состав УПД входят модемы (модуляторы — демодуляторы), устройства преобразования сигналов (УПС), адаптеры и мультиплексоры передачи данных (АПД и МПД). Модемы и УПС предназначены для преобразования двоичной информации, поступающей из ЭВМ в форму, которая необходима для передачи по линиям связи, а также для обратного преобразования. АПД и МПД служат для присоединения модемов и УПС к системным интерфейсам. Как правило, МПД в отличие от АПД обеспечивает выход ЭВМ на несколько каналов связи.

X.4. УСТРОЙСТВА СВЯЗИ С ОБЪЕКТОМ

Устройства связи с объектом (УСО) предназначаются для приема измерительной информации от объекта испытаний и передачи ее к ЭВМ, для вывода команд от ЭВМ к объекту испытаний с целью управления им, а также для выполнения вспомогательных функций, например управления работой групповых измерительных преобразователей.

В связи с этим *УСО* в общем виде выполняют следующие операции (см. рис. X—2):

ввод аналоговых сигналов от измерительных преобразователей;

ввод дискретных (кодированных) сигналов от измерительных преобразователей;

вывод аналоговых сигналов для управления внешними устройствами, например объектом испытаний;

вывод дискретных сигналов для управления внешними устройствами (объект испытаний, групповые преобразователи и др.).

Конкретный набор операций, выполняемых УСО, зависит от задач, решаемых ИВК, и определяется наличием соответствующих функциональных элементов.

Устройства ввода аналоговых сигналов. Устройства ввода аналоговых сигналов включают в себя нормализаторы, коммутаторы и аналого-цифровые преобразователи. В некоторых случаях в них входят дополнительные усилительные и управляющие устройства. Действие устройств ввода аналоговых сигналов рассматривается на примере схемы (рис. X—4, *а*).

Нормализаторы представляют собой пассивные элементы, состоящие из резисторов и конденсаторов. С их помощью токовый сигнал от первичных преобразователей превращается в стандартный сигнал постоянного напряжения. Как видно из схемы (см.

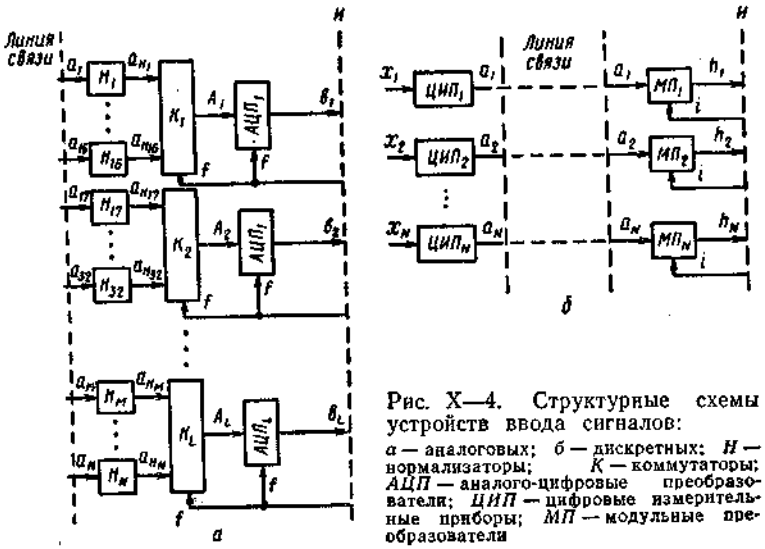


Рис. X—4. Структурные схемы устройств ввода сигналов:
а — аналоговых; *б* — дискретных; *Н* — нормализаторы; *К* — коммутаторы; *АЦП* — аналого-цифровые преобразователи; *ЦИП* — цифровые измерительные приборы; *МП* — модульные преобразователи

рис. X—4, *а*), нормализаторы H_1, H_2, ..., H_N являются индивидуальными: к ним подводятся сигналы a_1, a_2, ..., a_N от всех первичных преобразователей с аналоговыми выходами. Кроме того, в нормализаторах происходит фильтрация сигнала с целью подавления помех промышленной частоты. Конструктивно нормализаторы объединяются в блоки (на схеме показаны блоки по 16 нормализаторов).

Коммутаторы представляют собой электронные переключатели, работающие под управлением сигналов, поступающих от ЭВМ (сигналы *f*). Коммутатор является групповым устройством, имеющим несколько входов и один выход (на схеме изображены коммутаторы с 16 входами). При работе, например, коммутатора K_1 к его выходу A_1 последовательно присоединяются сигналы $a_{н1}$, $a_{н2}$, ..., $a_{н16}$. Аналогично работают и другие коммутаторы: K_2, K_3, K_L. ЭВМ управляет не только работой одного коммутатора, но и последовательностью работы всей группы коммутаторов.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) представляют собой электронные устройства, преобразующие аналоговые сигналы A_1, A_2, ..., A_L после коммутаторов в цифровой код (сигналы *b*), поступающий через интерфейс *И* на вход ЭВМ. Как и коммутаторы, АЦП управляются командами от ЭВМ. Свойства АЦП характеризуются количеством двоичных разрядов *n* выходном коде (обычно от 10 до 14) и быстродействием, т. е. временем, затрачиваемым на одно преобразование (обычно от десятков микросекунд до единиц миллисекунд).

В некоторых типах УСО дополнительно к рассмотренным устройствам в схемы ввода аналоговых данных входят управляемые усилители и контроллеры. С их помощью создаются более гибкие схемы, позволяющие легко увеличивать число подключаемых точек измерения.

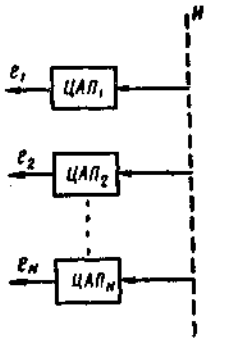
Устройства ввода аналоговых сигналов набираются из отдельных блоков и модулей либо конструктивно объединяются в единое целое.

Устройства ввода дискретных сигналов. Устройства ввода дискретных сигналов предназначаются для приема от первичных преобразователей цифровых кодов или двухпозиционных сигналов вида «1» и «0». Первичными преобразователями в этом случае являются цифровые измерительные приборы либо релейные приборы (рис. X—4, *б*). Для согласования коды преобразованных измерительных сигналов a_1, a_2, ..., a_N проходят через соответствующие модули преобразования $МП_1$, $МП_2$, ..., $МП_N$, после чего присоединяются к интерфейсу ИВК (сигнал *h*). От того же интерфейса модули получают управляющие сигналы *i*.

Устройства вывода аналоговых сигналов. Эти устройства предназначаются для преобразования цифрового кода в стандартный аналоговый сигнал и вывода его во внешние цепи для управления объектом испытания или другими устройствами. Схема присоединения цифроаналоговых преобразователей $ЦАП_1$, $ЦАП_2$, ..., $ЦАП_N$ к интерфейсу *И* показана на рис. X—5. С выходов аналого-цифровых преобразователей управляющие сигналы e_1, e_2, ..., e_N в виде стандартных токов или напряжений направляются к объектам управления.

Устройства вывода дискретных сигналов. Эти устройства предназначены для выдачи во внешние цепи дискретных сигналов в виде цифрового кода или двухпозиционных сигналов вида «0» и «1» для

Рис. X—5. Структурная схема устройства вывода аналоговых сигналов (*ЦАП* — цифроаналоговый преобразователь)



управления объектами испытаний или другими устройствами, например групповыми измерительными преобразователями.

Комплектные и комбинированные устройства ввода и вывода данных. Наряду с отдельными устройствами, из которых набираются схемы ввода и вывода данных, широко используются конструктивно объединенные комплектные и комбинированные устройства, выполняющие полностью функции ввода и вывода.

К ним относятся: комплектные устройства ввода аналоговых сигналов, вывода аналоговых сигналов; ввода дискретных сигналов; вывода дискретных сигналов; комбинированные устройства ввода-вывода дискретных сигналов; ввода-вывода аналоговых и дискретных сигналов. Структуры таких устройств и их конструктивные исполнения разнообразны и зависят от системы построения УСО и способов программирования. В тех случаях, когда комбинированные устройства охватывают все задачи связи с объектом, они фактически представляют собой полное УСО.

Примером таких УСО является аппаратура стандарта КАМАК (CAMAC — Computer Application for Measurements and Control), получившая в последние годы широкое распространение. На конструкции и интерфейс КАМАК разработан международный стандарт. Центральным конструктивным звеном КАМАК является каркас, или крейт, имеющий необходимые источники питания, посадочные места для модулей различного назначения и специальную магистраль, представляющую собой набор проводов для передачи информационных и управляющих сигналов, а также для подведения питания к модулям.

Аппаратура КАМАК характеризуется равнозначностью всех посадочных мест, допускающих произвольную компоновку функциональных модулей; возможностью расширения номенклатуры модулей в рамках стандарта, большой скоростью и точностью сбора информации.

Структурная схема УСО стандарта КАМАК представлена на рис. X—6. В одном крейте собраны все элементы УСО: коммутаторы аналоговых сигналов K_1, K_2, ..., K_L, аналого-цифровой преобразователь *АЦП*, счетчики импульсов СИ, предназначенные для приема дискретных сигналов g_1, g_2, ..., g_N и цифроаналоговые преобразователи *ЦАП*, служащие для управления внешними цепями $Ц_1$, $Ц_2$, ..., $Ц_N$.

Отличительной особенностью данного УСО является контроллер $K_т$, представляющий собой управляющее звено для связи интерфейса ЭВМ с внутренним интерфейсом $И_к$. Благодаря наличию внутреннего интерфейса в УСО этого типа можно увеличивать количество коммутаторов и других устройств, т. е. расширять возможности системы. На схеме — сигналы a_1, a_2, ..., a_N — измерительные сигналы после аналогового преобразования, A_1, A_2, ..., A_L —

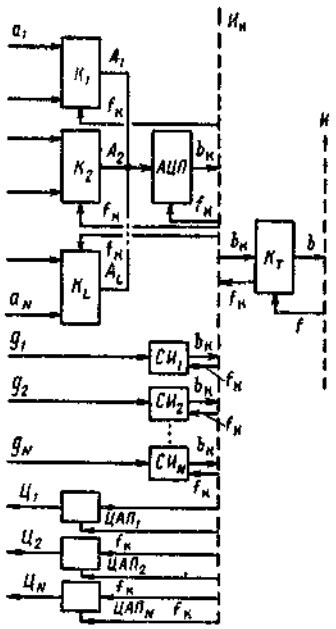


Рис. X—6. Структурная схема крейта УСО стандарта КАМАК

те же сигналы после коммутации, $b_к$ — измерительные сигналы в цифровой форме, передаваемые на интерфейс $И_к$, сигналы $f_к$ — управляющие сигналы от интерфейса $И_к$, b и f — измерительные и управляющие сигналы в системе интерфейса $И$.

X.5. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Работа ЭВМ, входящей в измерительно-вычислительный комплекс, заключается в выполнении последовательности команд, называемой программой. Команды соответствуют операциям, подлежащим выполнению ИВК. Комплекс необходимых программ, составляет программное обеспечение ИВК [73]. Программное обеспечение состоит из общего и специального.

Общее программное обеспечение должно удовлетворять следующим требованиям:

эффективно использовать аппаратные возможности ИВК;

осуществлять контроль функционирования ИВК, а в случае его неисправности проводить диагностику комплекса;

обеспечивать простоту и удобство обращения оператора (исследователя) с машиной;

располагать набором языков программирования, позволяющим иметь программы, наиболее эффективные как по ресурсам времени и памяти при их эксплуатации, так и по затратам на их создание.

Для написания программ используются машинно-ориентированные и проблемно-ориентированные языки. Примером машинно-ориентированного языка является АССЕМБЛЕР. Как правило, на этом языке создаются программы для работы с аппаратурой УСО. Проблемно-ориентированными (или языками высокого уровня) являются ФОРТРАН, БЕЙСИК, КОБОЛ, ПЛ/М. Этими языками пользуются при написании программ обработки информации.

Общее программное обеспечение ИВК включает:

операционные системы;

пакеты прикладных программ, ориентированных на проведение различных научных расчетов;

программные средства для работы с измерительной частью ИВК (УСО);

пакеты тестовых программ для проверки работоспособности ИВК и его отдельных компонентов (тестовое обеспечение ИВК);

программы определения метрологических характеристик измерительных каналов.

Важнейшей частью программного обеспечения является операционная система, которая предназначена для планирования решения задач и использования ресурсов ИВК, оперативного управления оборудованием ИВК, управления взаимодействием оператора с ИВК и обеспечения связи программиста со своей задачей.

В качестве примера можно привести широко используемую в ИВК операционную систему реального времени (ОС РВ). Эта система предназначена для работы с разнообразным оборудованием и для решения широкого круга задач. Ее версии используются как для небольших систем лабораторных исследований, так и для больших многопользовательских систем обработки данных и управления процессами и сложными объектами.

Применение ОС РВ обеспечивает решение многих задач в режиме реального времени, обслуживание нескольких устройств ввода-вывода; система включает средства, позволяющие вводить программы, написанные на языках ФОРТРАН, АССЕМБЛЕР и т. д.

В ИВК используются также операционные системы РАФОС, ФОБОС, RT-11 и др.

В состав пакета прикладных программ входят программы численного анализа и статистической обработки; программы, позволяющие оперативно регистрировать результаты обработки данных на экране графического дисплея и т. д.

Программные средства для работы с УСО представляют собой совокупность программ, обеспечивающих организацию обмена информацией между ЭВМ и УСО, а также решение общих задач управления модулями УСО. Тестовое обеспечение ИВК позволяет автоматизировать процесс проверки всех устройств ИВК. Метрологические программы дают возможность экспериментально определять и контролировать метрологические характеристики ИВК.

Специальное программное обеспечение предназначено для решения функциональных задач конкретного эксперимента и включает программы расчета параметров процесса, программы сбора и обработки входной информации, программы ввода и обновления нормативно-справочной информации и т. д.

Разработка специального программного обеспечения ведется на основе технических требований к программам, которые включают: вид представления входной и выходной информации; носитель, на который она записывается (диски, ленты и т. д.); язык программирования; модули, управление которыми должно осуществляться; быстродействие программ и т. д.

X.6. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Метрологическое обеспечение автоматизированных измерительных систем представляет собой комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на определение и поддержание в заданных пределах нормированных погрешностей [45, 68].

Все величины, получаемые при сборе и обработке экспериментальных данных, являются результатами прямых или косвенных измерений (прямые, если выводятся данные измерения отдельных величин, и косвенные, если выводятся данные после математической обработки результатов нескольких прямых измерений). В связи с этим определение погрешностей измерений, выполненных автоматизированными системами, базируется на тех же принципах, что и при обычных измерениях (см. п. I,4).

Вместе с тем такие системы обладают рядом особенностей, связанных с их построением и характеристиками. В автоматизированных системах функции средства измерения выполняет измерительный канал, т. е. совокупность устройств, осуществляющих преобразование, передачу, обработку и выдачу измерительной информации. Входной величиной измерительного канала является измеряемая величина x, выходной — ее отображение X, получаемое на бумаге или на экране дисплея. В состав измерительного канала (рис. X—7, *а*) входят измерительный преобразователь *ИП*, устройства связи с объектом *УСО*, ЭВМ и периферийное устройство *ПУ* для вывода информации. В данном случае величина X может условно рассматриваться как результат прямого измерения.

В отличие от этого косвенное измерение выполняется измерительным каналом, в который входят два или несколько измерительных преобразователей $ИП_1$, $ИП_2$, ..., $ИП_N$ (рис. X—7, *б*). Величина X в этом случае рассчитывается по заданным зависимостям и является косвенно измеренной.

Учитывая, что погрешности, вносимые ЭВМ при расчете величин косвенного измерения, невелики по сравнению с погрешностями других элементов канала, ниже будут рассматриваться лишь вопросы, связанные с каналами прямых измерений. При необходимости погрешности ЭВМ можно учесть, пользуясь правилами, изложенными в главе I.

X.6.1. УЧЕТ И УМЕНЬШЕНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Градуировочные характеристики измерительных каналов. Под градуировочной, или статической, характеристикой измерительного канала * понимают зависимость выходной измерительной величины X от фактического значения измеряемой величины x. Эта зависимость задается в виде

$$X = f(x). \qquad (X—1)$$

Градуировочная характеристика может быть задана через характеристики отдельных элементов канала:

$$X = f_{УСО}[f_{ИП}(x)], \qquad (X—2)$$

где $f_{ИП}$, $f_{УСО}$ — функции преобразования измерительного преобразователя и УСО. Градуировочную характеристику (X—1) получают экспериментальным путем. Характеристика (X—2) может быть рассчитана по исходным функциям преобразования отдельных элементов.

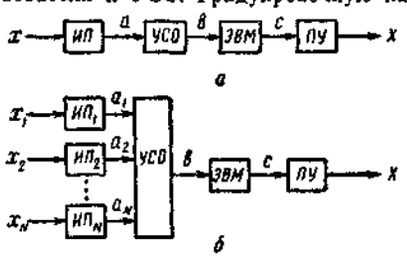


Рис. X—7. Схемы каналов прямого (*а*) и косвенного (*б*) измерений

* Здесь и далее имеется в виду канал прямого измерения.

Исходные функции преобразования берут из соответствующей документации (паспортные значения) или получают экспериментальным путем. В связи с этим следует подразделять градуировочные характеристики на паспортные и индивидуальные. Последние при соответствующей постановке экспериментов могут обеспечить более высокую точность измерений.

Функция преобразования измерительного преобразователя заносится в запоминающее устройство ЭВМ и используется для расчета выходного значения X.

Источники систематической погрешности. Систематическая погрешность представляет собой разность между действительной градуировочной характеристикой измерительного канала и характеристикой, принятой за номинальную [68].

С достаточной достоверностью можно принять, что основной вклад в погрешность измерительного канала вносят измерительный и аналого-цифровой преобразователи (последний входит в УСО). Если допустимые абсолютные погрешности этих элементов обозначить $\Delta_{ИП}$ и $\Delta_{УСО}$, то суммарную допустимую погрешность можно искать как среднее квадратическое значение (см. п. I.4.4.4):

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{ИП}^2 + \Delta_{УСО}^2}.$$

За величины $\Delta_{ИП}$ и $\Delta_{УСО}$ чаще всего принимают их паспортные значения.

Для каналов косвенного измерения во внимание должны приниматься допустимые погрешности всех измерительных преобразователей. Допустимая суммарная систематическая погрешность должна быть вычислена, исходя из зависимости, связывающей выходную величину X со входными x_1, x_2, ..., x_N. Способы расчета приведены в п. I.4.4.

Индивидуальная градуировка измерительных каналов. Как указывалось выше, индивидуальная градуировка измерительных каналов является действенным средством повышения точности измерений.

Индивидуальная градуировка является экспериментальной операцией, которая, как правило, охватывает весь канал (сквозная градуировка). При этом величине x даются некоторые заданные значения и регистрируются соответствующие значения X. Далее по полученным точкам строится функция, аппроксимируемая полиномом обычно не выше третьей степени.

Систематическая погрешность индивидуальной градуировочной характеристики складывается из погрешности, обусловленной несовершенством образцового средства, и погрешности аппроксимации.

Функция, аппроксимирующая градуировочную характеристику, заносится в запоминающее устройство ЭВМ и далее используется при обработке информации.

Поверка измерительных каналов. Поверки (периодические, внеочередные) проводят для контроля состояния измерительных каналов и поддержания фактических погрешностей в допустимых пределах. Поверки бывают сквозные и поэлементные. При сквозных поверках воспроизводится полностью или частично градуировочная характеристика (X—1) и сравнивается с номинальной. Разница между ними не должна превышать допустимой погрешности. При поэлементарных поверках исследуют функции преобразования от-

дельных элементов измерительного канала и сравнивают их с паспортными или индивидуальными характеристиками.

В автоматизированных системах применяют также специальные методы автоматического контроля, называемые тестовыми [70]. При этом через заданные интервалы времени ко входу измерительного канала подводится образцовый сигнал, имитирующий измеряемую величину. По команде ЭВМ выходная величина, соответствующая образцовому сигналу, сравнивается с номинальным значением. Если отклонение превышает допустимую погрешность, автоматически подается сигнал несоответствия. Тестовый метод может применяться как для сквозного, так и поэлементного контроля.

X.6.2. УМЕНЬШЕНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Случайные погрешности проявляются при многократных измерениях и оцениваются среднеквадратическим отклонением результата измерения и вероятностью появления погрешности (см. п. 1.4.3).

В автоматизированных системах многократные измерения осуществляют с помощью специальных программ, обеспечивающих повторные измерения в заданном количестве и через заданные интервалы времени. Эти же программы служат для нахождения среднего арифметического значения результатов измерений, отбрасывания грубых ошибок, а также для расчета среднеквадратического отклонения и ожидаемой погрешности для заданной вероятности.

Как результат измерений, так и ожидаемая случайная погрешность могут быть выведены через периферийные устройства.

X.7. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ О СРЕДСТВАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Системы автоматизации измерений и обработки данных содержат первичные преобразователи измеряемых величин и оборудование измерительных и измерительно-вычислительных комплексов. Справочные данные о первичных преобразователях измеряемых величин приведены в соответствующих главах настоящей книги (главы IV—VIII).

Ниже приводятся справочные данные об оборудовании измерительных и измерительно-вычислительных комплексов.

Измерительные комплексы. Измерительные комплексы могут набираться из отдельных устройств либо поставляются комплектно [35]. Технические характеристики некоторых комплексов приведены в табл. X—1. Как видно из табл. X—1, это, как правило, сравнительно медленно действующее оборудование: быстродействие выдачи информации составляет от единиц до сотен каналов в секунду. В основном оно предназначено для измерения постоянного напряжения в широком диапазоне. При этом входные сигналы не являются стандартизованными. Общее число каналов не превышает 100. Вывод информации осуществляется с помощью пишущих машинок или перфораторов.

Измерительно-вычислительные комплексы. Измерительно-вычислительные комплексы составляют, как правило, из отдельных видов оборудования, элементов и узлов, исходя из предъявляемых технических требований [38, 39, 72, 73, 74]. В табл. X—2 приведены перечень основных технических характеристик, используемых при выборе оборудования, а также варианты комплексов, условно обозначенные буквами А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, З. Видно, что данные комплексы позволяют создать системы с числом аналоговых измерительных каналов (входов) от 16 до 256 (при необходимости число каналов может быть увеличено), т. е. системы, которые предназначены для обслуживания объектов от самых простых с малым числом измеряемых величин до группы объектов с большим числом величин.

Возможности комплексов характеризуются также количеством дискретных входов с релейной двухпозиционной характеристикой и количеством аналоговых и дискретных выходов, которые используются для управления исполнительными устройствами объектов или внешними групповыми преобразователями (например, групповыми преобразователями температуры, приведенными в главе IV).

Диапазоны входных и выходных аналоговых сигналов соответствуют принятым в СССР стандартам и включают в себя как токовые сигналы, так и сигналы напряжения.

В строке «Класс точности» приведены величины, соответствующие допустимым приведенным погрешностям в % от диапазона измерений. Эта величина представляет собой суммарную погрешность в тракте от входа в ИВК до вывода информации на печать или экран дисплея.

Остальные характеристики дают информацию о существенных свойствах ИВК.

В табл. X—3 для тех же вариантов ИВК приведен состав оборудования и узлов. Цифры в графах показывают количество данного оборудования, входящее в комплекс. Оборудование и узлы разбиты на три основные группы: ЭВМ, устройства связи с объектом и периферийные устройства [79]. В графе «Шифр» особо отмечены устройства стандарта КАМАК. В табл. X—4 приведены технические характеристики мини- и микро-ЭВМ, входящих в состав указанных выше комплексов. В табл. X—5÷X—13 приведены сведения об основных устройствах связи с объектом, а в табл. X—14÷X—18 — о периферийных устройствах.

Таблица X—1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Тип комплекса	Состав комплекса	Пределы измерений			Погрешность измерения, %	Количество каналов	Быстродействие, каналов в секунду	Тип кода выходных информационных сигналов
		Постоянное напряжение, В	Переменное напряжение, В	Постоянный ток, мА				
К-734	Коммутатор Ф7100, преобразователь цифровой многофункциональный типа Ф7121, пребразователь переменного напряжения Ф7132, таймер Ф7141, устройство программное Ф7143, преобразователь последовательного вывода Ф7160, устройства связи Ф7161 и Ф7162, пишущая машинка ЭУМ-23, перфоратор ПЛ-150	$\pm 1 \div \pm 10$	$0{,}5 \cdot 10^{-3} \div 50$	± 10	0,06—0,35	10—100	0,5—200	8—4—2—1
К-484/1	Коммутатор, цифровой вольтметр Ф4830, таймер, цифропечатающее устройство МПУ16-2	$5^{-4}—10^{3}$	—	—	0,06—0,15	30	25	8—4—2—1
К-200	Коммутатор Ф240/1 или Ф240/1Б, цифровой вольтметр Ф203 или Ф2000, усилитель-согласователь Ф270, устройство сигналов времени Ф260, транскриптор Ф250, блок управления Ф253, дискриминатор П-215, пишущая машинка ЭУМ-23 или перфоратор ПЛ-150	0,1—1000	—	—	0,1—0,2	40	10	8—4—2,1

Таблица X—2. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Характеристика	Варианты комплексов							
	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З
Количество аналоговых входов	288	256	256	96	64	32	64	16
Количество дискретных входов	32	64	32	124	8	2	6	32
Количество аналоговых выходов	10	64	32	6	4	4	6	4
Количество дискретных выходов	16	64	32	124	8	2	6	32
Диапазон входного аналогового сигнала	$-10 \div +10$ В	$-10 \div +10$ мВ; $-5 \div +5$ В; $-5 \div +5$ мА	$-5 \div +5$ В	$-1 \div +1$ В; $0 \div +10$ В; $-5 \div +5$ В	$0{,}1 \div +10$ В	0,1—10 В; $-7 \div +7$ В	0,1—10 В; $-7 \div +7$ В	$-5 \div +5$ В
Диапазон выходного аналогового сигнала	$-10 \div +10$ В	0—5 В; 0—5 мА	0—10 В 0—24 В	0—10 В $-5 \div +5$ В	0—5 В	0—5 В	0—5 В	0—10 В; 0—24 В
Класс точности	0,2	0,1—1	0,2	0,25—0,4	0,5	0,06—0,5	0,06—0,5	0,2
Быстродействие, тыс. операций в секунду	400	800	800	1000	1000	1000	1000	400
Объем оперативной памяти, Кслов	128	128	128	128	64	64	128	64
Объем внешнего запоминающего устройства на магнитных дисках, М байт	12,4	4,8	4,8	11	11	11	11	1,6
Объем внешнего запоминающего устройства на магнитных лентах, М байт	20	20	20	10	10	10	10	—
Максимальный коммутируемый ток дискретных выходов, мА	300	200	200	100	40	40	40	200
Занимаемая площадь, м²	25	25	25	25	25	25	25	10

Таблица X—3. СОСТАВ ОБОРУДОВАНИЯ И УЗЛОВ

Элемент ИВК	Наименование устройства	Шифр	Количество устройства в ИВК							
			А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З
ЭВМ	Мини-ЭВМ	СМ-2	1							
	То же	СМ-4		1	1					
	»	СМ-1420				1	1	1	1	
	Микро-ЭВМ	СМ-1800								1
Устройства связи с объектом	Нормализатор	А613-11/5	30							
		А613-11/2	2							
	Аналого-цифровой преобразователь	А611-19/1	9							
		Типа 712 (КАМАК)					2	1	1	
		ADC-14 (КАМАК)						1	1	
	Устройство ввода аналоговых сигналов	СМ 9104.02		1						
		СМ 9104.06		3						
		СМ 1800.9201			16					1
	Коммутатор	А612-11	18							
		Типа 750 (КАМАК)					2	1	2	
	Цифроаналоговый преобразователь	А631-6	10							
		DAC (КАМАК)					2	2	3	
	Устройства вывода аналоговых сигналов	СМ 9104.11		1						
		СМ 1800.9202			8					1
	Устройства ввода дискретных сигналов	А611-15	16							
		СМ 1800.9302			2					2
		Типа 305 (КАМАК)					4	1	3	
	Устройства вывода дискретных сигналов	СМ 1800.9303			2					
		Типа 350 (КАМАК)					4	1	3	
Устройства связи с объектом	Устройство ввода-вывода дискретных сигналов	А641-12	1							
		СМ 9104.12		1						
	Комбинированное устройство ввода-вывода аналоговых и ввода-вывода дискретных сигналов	УКБ-200			1					
Периферийные устройства	Устройство внешней памяти на магнитных дисках	А322-3/2	1							
		СМ 5402.09		1	1					
		СМ 1420.5410				1	1	1	1	
		СМ 1800.5602								1
	Устройство внешней памяти на магнитных лентах	А311-7/1	1							
		СМ 5301.10		1	1					
		СМ 5301.09				1	1	1	1	
	Алфавитно-цифровое печатающее устройство	А522-5	1							
		СМ 6305		1	1	1	1	1	1	
		СМ 6302								1
	Дисплей алфавитно-цифровой	А544-2	1							
		СМ 7204		1	1	1	1	1	1	
		СМ 7202								1
	Дисплей графический	А543-11	1							
		СМ 7300		1	1	1	1			
		СМ 7301						1		

Таблица X—4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИНИ- И МИКРО-ЭВМ

Основные параметры	СМ-2	СМ-4	СМ-1420	СМ-1800
Максимальный объем оперативной памяти, кбайт	256	248	5840	64
Разрядность процессора, двоичных разрядов	16	16	16	8
Формат данных, бит	16; 32	16; 32	16; 32; 64	8
Быстродействие, тыс. операций в секунду	400	800	1000	400
Тип системного интерфейса	2К	Общая шина		И41

Таблица X—5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Основные параметры	Шифр		
	А611-19/1	Тип 712 (КАМАК)	Тип ADC-14 (КАМАК)
Разрядность, бит	10	10	14
Быстродействие, мкс	30	24	$2 \cdot 10^3$
Диапазон входного сигнала, В	$-5 \div +5$	$+0{,}1 \div +10$	$-7 \div +7$

Таблица X—6. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВА ВВОДА АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ

Основные параметры	Шифр	
	СМ 9104. 02; СМ 9104. 06	СМ 1800.9201
Количество входных каналов	64	16
Основная погрешность преобразования, %	$\pm 0{,}4 \div \pm 1{,}0$	$\pm 0{,}2$
Диапазон входного сигнала	$-0{,}01 \div +5{,}0$ В; $-5 \div +5$ мА	$-5 \div +5$ В

Примечание. Устройство СМ 9104.06 используется только совместно с СМ 9104.02 для расширения количества входных каналов.

Таблица X—7. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОММУТАТОРОВ

Основные параметры	Шифр	
	А612-11	Тип 750 (КАМАК)
Количество входных двухполюсных каналов	16	32
Количество выходных каналов	1	4
Диапазон входного коммутируемого сигнала, В	$-10 \div +10$	$0 \div +10$

Таблица X—8. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Основные параметры	Шифр	
	А631-6	DAC (КАМАК)
Разрядность, бит	10	10
Диапазон выходного сигнала	$0 \div +5$ мА	$0 \div +5$ В
Время преобразования, мкс, не более	20	10

Таблица X—9. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВА ВЫВОДА АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ

Основные параметры	Шифр	
	СМ 9104.11	СМ 1800.9202
Диапазон выходного сигнала		
В	$0 \div +5$	$0 \div +10$; $0 \div +24$
мА	$0 \div +5$	
Количество выходных каналов	16	4
Погрешность нелинейности, %	0,2	0,2—0,3

Таблица X—10. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВА ВВОДА ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ

Основные параметры	Шифр	
	СМ 1800.9302	Входной регистр 305 (КАМАК)
Количество входных каналов	16	2
Уровень входного сигнала, В	«0»—(0÷+9,6); «1»—(+9,6÷+57,6)	—
Нагрузочная способность, мА	—	1

Таблица X—11. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВА ВЫВОДА ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ

Основные параметры	Шифр	
	СМ 1800.9303	Выходной регистр 350 (КАМАК)
Количество выходных каналов	16	2
Коммутируемый ток, А	0,2	0,025

Таблица X—12. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВА ВВОДА — ВЫВОДА ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ

Основные параметры	Шифр	
	А 641-12	СМ 9104.12
Количество входных каналов	16	64
Уровни входных сигналов, В	«0»—(0÷+1,8)	«0»—(0÷+1,2); (0÷+2,4); (0÷+4,8); (0÷+9,6)
	«1»—(6±1,8)	«1»—(6±1,2); (12±2,4); (24±4,6); (48±9,6)
Количество выходных каналов	16	64
Коммутируемый ток, А	0,3	0,2

Таблица X—13. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВА КОМБИНИРОВАННОГО БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ТИПА УКБ-200

Наименование модуля	Основные характеристики	Значения
Модуль ввода аналоговых сигналов	Диапазоны входного сигнала, В: —1÷+1; —0,1÷+0,1; 0÷+10; —5÷+5	
	Количество каналов	32
	Основная погрешность, %	0,25
Модуль вывода аналоговых сигналов	Диапазоны выходных сигналов, В	0—10; —5÷+5
	Количество каналов	2
	Основная приведенная погрешность, %	0,2
Модуль вывода дискретных сигналов	Количество каналов	48
	Напряжение на закрытом ключе, В, не более	24
	Ток открытого ключа, мА, не более	100
Модуль ввода частотно-временны́х сигналов	Количество каналов	8
	Уровни входных сигналов, В	—(0÷+5)
	Вид преобразования	Частота, период
	Максимальная входная частота	
	при преобразовании частоты, МГц	1
	при преобразовании периода, кГц	100
Модуль ввода дискретных сигналов	Количество каналов	48
	Уровни входного сигнала, В	«0»—(0÷+6); «1»—(+8÷+16,5)

Таблица X—14. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВ ВНЕШНЕЙ ПАМЯТИ НА МАГНИТНЫХ ДИСКАХ

Основные параметры	Шифр			
	А322-3/2	СМ 5409.02	СМ 1420, 5410	СМ 1800.5602
Объем, Мбит	102	54,4	92	12,8
Среднее время доступа, мс	45	30	50	30
Скорость передачи, Мбит/с	9,7	2,5	1,44	0,24

Таблица X—15. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВ ВНЕШНЕЙ ПАМЯТИ НА МАГНИТНЫХ ЛЕНТАХ

Основные параметры	Шифр		
	А311-7/1	СМ 5301.10	СМ 5301.09
Объем, Мбит	100	200	100
Плотность записи			
строк на 1 мм	32	—	—
бит/мм	—	32	32
Ширина ленты, мм	12,7	12,7	12,7

Таблица X—16. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛФАВИТНО-ЦИФРОВЫХ ПЕЧАТАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Основные параметры	Шифр		
	А522-5	СМ 6305	СМ 6302
Скорость печати			
строк в минуту	253	500	
знаков » »	—	—	180
Длина строки, знаков	80	132	132
Набор символов, знаков	96	96	128

Таблица X—17. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛФАВИТНО-ЦИФРОВЫХ ДИСПЛЕЕВ

Основные параметры	Шифр	
	СМ 7202, СМ 7204	А544-2
Емкость экрана, символов	1920	1920
Размер символа, мм	4×2	4×3

Таблица X—18. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАФИЧЕСКИХ ДИСПЛЕЕВ

Основные параметры	Шифр		
	А543-11	СМ 7300	СМ 7301
Количество символов на экране	86400	2880	1920
Число адресуемых точек на экране	320×270	1024×1024	512×236

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Агарев Е. М., Медовар Л. Е., Тимохин А. А.** Электронные индикаторы давления с малогабаритными пьезокерамическими датчиками.— Холодильная техника, 1967, № 7, с. 9—14.
2. **Агарев Е. М., Медовар Л. Е.** Малоинерционный термометр сопротивления для измерения температур в рабочих полостях холодильных компрессоров.— Холодильная техника, 1969, № 4, с. 9—16.
3. **Агарев Е. М., Медовар Л. Е.** Приборы и методы электрических измерений при исследовании холодильных компрессоров.— В сб.: Важнейшие работы в области холодильной техники и технологии.—М.: ВНИХИ, 1970, с. 47—61.
4. **Аппаратура** и приборы для научных исследований. Каталог СССР, выставка «Наука-83». М., 1983, с. 10—22.
5. **Афанасьев Б. П. и др.** Теория линейных электрических цепей.— М.: Высшая школа, 1973.—592 с.
6. **Бадылькес И. С.** Свойства холодильных агентов.— М.: Пищевая промышленность, 1974.—175 с.
7. **Баранчук Е. И.** Динамические ошибки приборов, предназначенных для измерения быстроизменяющихся величин.— Автоматика и телемеханика, 1950, т. XI, № 3, с. 1—17.
8. **Безкоровайный П. М., Широков Н. Г.** Электрические измерения.— М.: Машиностроение, 1971.—360 с.
9. **Берлинер М. А.** Измерения влажности.—М.: Энергия, 1973.—400 с.
10. **Бойков Н. А., Звездин П. С., Резник Л. Б.** Измерение давлений при быстропротекающих процессах.— М.: Энергия, 1970.—64 с.
11. **Бошняк Л. Л., Бызов Л. Н.** Измерение малых расходов жидкостей.— М.; Л.: Машгиз, 1961.—80 с.
12. **Бошняк Л. Л.** Измерения при теплотехнических исследованиях.— Л.: Машиностроение, 1974.—448 с.
13. **Бурдун Г. Д., Марков Б. Н.** Основы метрологии.— М.: Изд-во стандартов, 1975.—336 с.
14. **Е. Вашны.** Динамика измерительных цепей.— М.: Энергия, 1969.—288 с.
15. **Вейнберг Б. С.** Поршневые компрессоры холодильных машин.— М.: Госторгиздат, 1960.—343 с.
16. **Винник В. И., Артемьев Б. Г.** Метрологический надзор.— М.: Изд-во стандартов, 1980.—200 с.
17. **Воробьев Ю. М., Ужанский В. С.** Применение турбинных расходомеров для хладагентов.— Холодильная техника, 1979, № 12, с. 6—8.

18. **Воробьев Ю. М., Ужанский В. С., Милованов В. И.** Применение ротаметров для измерения расхода жидкого фреона.— Холодильная техника, 1981, № 9, с. 4—11.

19. **Н. Н. Евтихиев, Вострокнутов Н. Г.** Основы информационно-измерительной техники.— М.: Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, 1972.—332 с.

20. **ГОСТ 8001—80.** ГСИ. Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений.

21. **ГОСТ 8.002—71.** ГСИ. Организация и порядок проведения поверки ревизии и экспертизы средств измерений.

22. **ГОСТ 8.009—72.** ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

23. **ГОСТ 8.010—72.** ГСИ. Общие требования к стандартизации и аттестации методик выполнения измерений.

24. **ГОСТ 8.011—72.** ГСИ. Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений.

25. **ГОСТ 8.061—80.** ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение.

26. **ГОСТ 8.207—76.** Государственная система измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений.

27. **ГОСТ 8.221—76.** ГСИ. Влагометрия и гигрометрия. Термины и определения.

28. **ГОСТ 8.326. 78.** ГСИ. Метрологическое обеспечение разработки, изготовления и эксплуатации нестандартизованных средств измерений. Основные положения.

29. **ГОСТ 8.417—81.** Единицы физических величин.

30. **ГОСТ 15.001—73.** Разработка и постановка продукции на производство. Основные положения.

31. **ГОСТ 3044—77.** Преобразователи термоэлектрические. Номинальные статические характеристики преобразования.

32. **ГОСТ 6651—78.** Термопреобразователи сопротивления ГСП. Общие технические условия.

33. **ГОСТ 13019—77.** Компрессоры поршневые холодопроизводительностью не менее 3,5 кВт (3000 ккал/ч). Правила приемки и методы испытаний.

34. **ГОСТ 16263—70.** ГСИ. Метрология. Термины и определения.

35. **Гуткин Б. С., Магер В. Е., Недашковский А. И.** ИИС К200. Исследование быстроизменяющихся периодических процессов.— Приборы и системы управления, 1978, № 11. с. 10—19.

36. **Захаров В. С.** Применение ротаметра для измерения малых расходов фреона.— Холодильная техника, 1973, № 12, с. 6—10.

37. **Измерительно-вычислительные** комплексы для научных исследований. ЦНИИТЭИ приборостроения. Обзорная информация, 1980, вып. 2.—100 с.

38. **Измерительно-вычислительные** комплексы на базе СМ-3 и СМ-4.— Отраслевой каталог. ЦНИИТЭИприборостроения, 1983, вып. 6, 7.

39. **Кавалеров Г. И.** Измерительно-вычислительные комплексы.— Приборы и системы управления, 1977, № 11, с. 23—27.

40. **Козлов В. Н., Фролов Е. С.** Измерение температуры рабочего тела в цилиндре тепловой машины.— Холодильная техника, 1960, № 4, с. 27—33.

41. **Кошарский Б. Д.** Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины.— Л.: Машиностроение, 1969.— 879 с.

42. **Кремлевский П. П.** Расходомеры и счетчики количества.— Л.: Машиностроение, 1975.—776 с.

43. **Крылов А. Н.** Лекции о приближенных вычислениях. Изд. 4.—М.; Л.: Гостехиздат, 1950. 455 с.

44. **Ланис В. А., Левина Л. Е.** Техника вакуумных испытаний. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963.—264 с.

45. **Лесова А. М. и др.** Современное состояние метрологического обеспечения измерительно-вычислительных комплексов.— Измерения, контроль, автоматизация/[А. М. Лесова, И. В. Модягин, В. М. Хрумало, М. И. Штенберг], 1982, № 2, с. 15—22.

46. **Логинов В. Н.** Электрические измерения механических величин.— М.: Энергия, 1976.—104 с.

47. **Малые** ЭВМ и их применения/под ред. Б. Н. Наумова.— М.: Статистика, 1980.— 148 с.

48. **Международный** стандарт ИСО 917—74. Компрессоры холодильные. Методы испытаний.

49. **Микро-ЭВМ**/под ред. А. Дирксена.— М.: Энергоиздат, 1982.—237 с.

50. **Мини-ЭВМ.** Принципы построения и проектирования/[А. В. Палагин, В. П. Денисенко, В. А. Иванов, А. Ф. Кургаев].— Киев: Наукова думка, 1975.—178 с.

51. **Михайлов И. Т., Перепелицын О. П.** Состояние и перспективы развития первичных преобразователей давления, температуры и регуляторов на их основе.— Обзорная информация. ЦНИИТЭИприборостроения, 1983, вып. 6.— 58 с.

52. **Мясников Н. А., Ужанский В. С., Воробьев Ю. М.** Измерение температуры обмоток электродвигателей герметических компрессоров.— Холодильная техника, 1970, № 2, с. 25—28.

53. **Г. П. Нуберт.** Измерительные преобразователи неэлектрических величин.— Л.: Энергия, 1970.—358 с.

54. **Оносовский В. В., Налимова М. Ю.** Применение ротаметра для измерения расхода жидкого холодильного агента.— Холодильная техника, 1967, № 1, с. 15—17.

55. **Основы** автоматического регулирования/под ред. В. В. Солодовникова.— М.: Машгиз, 1954.—950 с.

56. **ОСТ 26-03-2011—79.** Агрегаты и машины стационарные компрессионные холодильные одноступенчатые. Общие технические условия.

57. **ОСТ 26-03-2019—81.** Оборудование холодильное. Конденсаторы. Испарители. Воздухоохладители. Объем и методы испытаний опытных образцов.

58. **Паперный Е. А., Эйдельштейн И. Л.** Погрешности контактных методов измерения температур.— М.; Л.: Энергия, 1966.—96 с.

59. **Перельштейн Е. Л.** Метрологическая служба промышленного предприятия.— М.: Изд-во стандартов, 1982.—192 с.

60. **Периферийные** устройства СМ ЭВМ. ЦНИИТЭИприборостроения, 1980, вып. 1.—23 с.

61. **Плужников В. М., Семенов В. С.** Пьезокерамические твердые схемы.— М.: Энергия, 1971.—168 с.

62. **Повх И. Л.** Аэродинамический эксперимент в машиностроении.— Л.: Машиностроение, 1974, с. 164—210.

63. **Правила** измерения расхода газов и жидкостей стандарт-

ными служащими устройствами. РД50-213.80.—М.: Изд-во стандартов, 1982.—23 с.

64. **Прангишвили И. В.** Микропроцессоры и микро-ЭВМ.—М.: Энергия, 1979.—374 с.

65. **Преображенский В. П.** Теплотехнические измерения и приборы.— М.: Энергия, 1978.—704 с.

66. **Приборы** для измерения температуры контактным способом/под общей редакцией Р. В. Бычковского.— Львов: Высшая школа, 1978.— 208 с.

67. **Психрометрические** таблицы.— Л.: Гидрометеоиздат, 1981.— 18 с.

68. **Расчет** метрологических характеристик измерительных каналов ИИС по метрологическим характеристикам компонентов. Методика.— Л.: ВНИИЭП, 1978.—31 с.

69. **Розенблит Г. Б. и др.** Датчики с проволочными преобразованиями для исследования двигателей внутреннего сгорания.— М.: Машиностроение, 1966.—136 с.

70. **Семко Ю. И., Асташкин Н. Н., Синельников Г. А.** Опыт автоматизации метрологических испытаний УВК АСУ ТП (Приборы и системы управлений), 1982, № 2, с. 3—4.

71. **Сернов А. Н., Цапенко М. П.** Методы уменьшения влияния помех в термометрических цепях.— Е.: Энергия, 1968.— 72 с.

72. **Система** малых ЭВМ. Комплексы СМ-3, СМ-4. Устройство связи с объектом. Отраслевой каталог. ЦНИИТЭИприборостроения, 1983, вып. 2.— 110 с.

73. **Система** малых ЭВМ. Комплексы СМ-3 и СМ-4. Программное обеспечение (операционная система ОС РВ).— ЦНИИТЭИприборостроения. Отраслевой каталог, 1982, вып. 3, 4, 5.

74. **Система** малых ЭВМ. Общее описание.— Отраслевой каталог. ЦНИИТЭИприборостроения, 1983, вып. 8, 9.

75. **Соков И. А., Вайняр Г. Д.** Метрологическое обеспечение гигрометрии. М., 1983.—52 с. (Серия «Метрологическое обеспечение измерений», вып. 5, ВНИИКИ).

76. **Соботка З., Стары Я.** Микропроцессорные системы.— М.: Энергоиздат, 1981.

77. **Сосновский А. Г., Столярова Н. И.** Измерение температур.— М.: Изд. Госстандарта СССР, 1970.—257 с.

78. **Справочник** по электроизмерительным приборам/под ред. К. К. Илюнина.— Л.: Энергоатомиздат, 1983.—784 с., ил.

79. **Справочник** по цифровой вычислительной технике (электронные вычислительные машины и системы)/под ред. Б. Н. Малиновского.— Киев.: Техника, 1980.—541 с.

80. **Средства** измерения расхода. Отраслевой каталог ГСП. Т. 2, вып. 8. М., 1981, № 12.

81. **Стандарт** СЭВ 665—77. Оборудование холодильное. Компрессоры. Методы испытаний.

82. **Стандарт** СЭВ 1573—79. Оборудование холодильное. Компрессоры. Сравнительные температурные режимы.

83. **Ступин Ю. В.** Методы автоматизации физических экспериментов и установок на основе ЭВМ.—М.: Энергоатомиздат, 1983.— с. 127.

84. **Таршиш М. С., Лопаткина Т. А.** Измерительно-информационные системы с ЭВМ для автоматизации испытаний газотурбинных двигателей.— Измерение, контроль, автоматизация, 1977, № 1, с. 32—46.

85. **Теумин И. И.** Экспериментальный анализ переходных процессов в линейных электрических цепях.— Советское радио, 1956, с. 18—22.

86. **Туричин А. М.** Электрические измерения неэлектрических величин.— М.; Л.: Энергия, 1966.—688 с.

87. **Федяков Е. М. и др.** Измерение переменных давлений.— М.: Изд-во стандартов, 1982.— 216 с.

88. **Хилбурин Дж. Джунич П.** Микро-ЭВМ и микропроцессоры.— М.: Мир, 1979.—620 с.

89. **Холодильные** компрессоры. Справочник.— М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981.—337 с.

90. **Электрические** измерения/под ред. Е. Г. Шрамкова.— М.: Высшая школа, 1982.—520 с.

91. **Электроизмерительные** приборы цифровые. Номенклатурный справочник. ЦНИИТЭИприборостроения, 1979.

92. **Maclaren J. F. T., Kerr S. V., Crawford R. A.** A computer controlled high speed data acqusition system for experimental study of reciprocating compressors. XIV Congress International of refrigeration.

93. **Scientific** Research Equipment. Disa electronic C°. Complite Catalog, Denmark, 1970.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

ГЛАВА I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ 7

I.1. Классификация измерений 7
I.2. Средства измерений. Основные определения и классификация 8
I.3. Измерительные цепи и их характеристики 12
I.3.1. Измерительная цепь 12
I.3.2. Статические характеристики 12
I.3.3. Динамические характеристики 14
I.3.3.1. Способы представления динамических характеристик 15
I.3.3.2. Типовые динамические характеристики . . 17
I.3.3.3. Динамические характеристики измерительных цепей 24
I.4. Результаты и погрешности измерений 25
I.4.1. Основные определения 25
I.4.2. Систематические погрешности и методы их определения 26
I.4.2.1. Классификация систематических погрешностей 26
I.4.2.2. Методы определения и уменьшения систематических погрешностей 27
I.4.3. Случайные погрешности и методы их определения . 28
I.4.3.1. Определение грубых ошибок 29
I.4.3.2. Определение доверительных границ случайных погрешностей измерения 29
I.4.4. Результаты измерений и суммарные погрешности . 30
I.4.4.1. Нахождение результатов измерений . . . 30
I.4.4.2. Вычисление суммарных погрешностей . . . 32
I.4.4.3. Примеры вычисления суммарных погрешностей 36
I.4.5. Некоторые сведения о динамических погрешностях 40
I.5. Система обеспечения единства измерений 42
I.5.1. Структура метрологических служб 42
I.5.1.1. Государственная служба 42
I.5.1.2. Ведомственная служба 43
I.5.2. Организация поверок средств измерений . . . 44
I.5.3. Схема и методы поверки 45

ГЛАВА II. ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

II.1. Роль измерений в холодильной технике 47
II.2. Условия, влияющие на точность измерений и сопоставимость характеристик при сравнении изделий . . . 49

II.2.1. Условия, влияющие на точность измерений . . .
II.2.2. Условия сопоставимости характеристик при сравнении изделий 51

ГЛАВА III. ОСНОВНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, ПРОВОДИМЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

III.1. Холодильные компрессоры 61
III.1.1. Методы измерения холодопроизводительности . 70
III.1.2. Методы измерения потребляемой мощности . . 77
III.2. Испарители 81
III.3. Воздухоохладители 86
III.4. Конденсаторы 88
III.5. Холодильные машины 91

ГЛАВА IV. ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

IV.1. Общие сведения 92
IV.2. Физические основы первичных преобразователей температуры 92
IV.2.1. Преобразователи стеклянных жидкостных термометров 94
IV.2.2. Манометрические термопреобразователи 94
IV.2.2.1. Газовые манометрические термопреобразователи 95
IV.2.2.2. Парожидкостные манометрические термопреобразователи 96
IV.2.2.3. Жидкостные манометрические термосистемы 96
IV.2.3. Термоэлектрические преобразователи (термопары) 96
IV.2.3.1. Основные типы 97
IV.2.3.2. Схемы термоэлектрических преобразователей 101
IV.2.3.3. Способы измерения термо-ЭДС 103
IV.2.3.4. Коррекция по температуре свободных спаев 104
IV.2.4. Термопреобразователи сопротивления 104
IV.2.4.1. Основные типы 106
IV.2.4.2. Способы измерения температуры с помощью ТС 111
IV.3. Методы измерений и методические погрешности . . 114
IV.3.1. Измерения температуры жидкостей и газов при умеренных скоростях 118
IV.3.2. Измерения температуры газов при высоких скоростях 120
IV.3.3. Измерения температур газовых потоков при лучистом теплообмене со стенками 120
IV.3.4. Измерения температуры малоподвижного воздуха 121
IV.3.5. Измерения температур поверхностей 121
IV.4. Справочные данные о средствах измерения температуры 122
IV.4.1. Термометры стеклянные 128
IV.4.2. Манометрические термометры 128
IV.4.3. Термоэлектрические преобразователи и вторичные приборы к ним 129
IV.4.3.1. Термоэлектрические преобразователи . . . 135
IV.4.3.2. Вторичные приборы к термоэлектрическим преобразователям 135
IV.4.4. Термопреобразователи сопротивления и вторичные приборы к ним 135

IV.4.4.1. Термопреобразователи сопротивления (ТС) . 135
IV.4.4.2. Вторичные приборы к термопреобразователям сопротивления 151
IV.4.4.3. Термопреобразователи сопротивления с унифицированным выходом 154
IV.5. Средства поверки и градуировки 155

ГЛАВА V. ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЙ И РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ

V.1. Общие сведения 157
V.2. Физические основы первичных преобразователей давления 160
V.2.1. Классификация преобразователей давления . . 160
V.2.2. Силовые преобразователи 160
V.2.2.1. Жидкостные преобразователи 161
V.2.2.2. Деформационные преобразователи . . . 164
V.2.3. Косвенные преобразователи 166
V.3. Передающие преобразователи давления 167
V.3.1. Тензометрические преобразователи 168
V.3.2. Индуктивные преобразователи 170
V.3.3. Дифференциально-трансформаторные преобразователи 170
V.3.4. Преобразователи с магнитной компенсацией . . 171
V.3.5. Преобразователи с электросиловой компенсацией . 172
V.4. Методы измерений и методические погрешности . . 173
V.4.1. Отбор статического давления 173
V.4.2. Измерение давлений, близких к атмосферному . . 173
V.4.3. Измерения в диапазоне абсолютных давлений 0,06—13 кПа (0,5—100 мм рт. ст.) 175
V.4.3.1. Измерения с помощью вакуумметров . . 175
V.4.3.2. Измерения жидкостными преобразователями 176
V.4.3.3. Измерения манометрами с электрическими передающими преобразователями 176
V.4.3.4. Измерения тепловыми вакуумметрами . . 176
V.4.4. Измерение разностей давлений 177
V.4.5. Погрешность от разности высот отбора и измерения давления 177
V.5. Справочные данные о средствах измерения давления и разности давлений 178
V.5.1. Приборы прямого отсчета 179
V.5.1.1. Жидкостные приборы 179
V.5.1.2. Приборы с упругими элементами 181
V.5.2. Измерительные преобразователи 191
V.5.2.1. Преобразователи дифференциально-трансформаторной системы 191
V.5.2.2. Преобразователи со стандартным электрическим аналоговым сигналом ГСП 195
V.5.3. Вторичные приборы 207
V.5.3.1. Вторичные приборы дифференциально-трансформаторной системы 207
V.5.3.2. Показывающие и самопищущие миллиамперметры 210
V.5.4. Теплоэлектрический вакуумметр 211
V.6. Средства поверки и градуировки 211

ГЛАВА VI. ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

VI.1. Общие сведения 215
VI.2. Физические основы первичных преобразователей расхода 216
VI.2.1. Сужающие устройства 216
VI.2.1.1. Расчет стандартных сужающих устройств . 217
VI.2.1.2. Расчет нестандартных сужающих устройств 223
VI.2.2. Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления 224
VI.2.3. Тахометрические преобразователи 226
VI.2.3.1. Крыльчатые преобразователи 226
VI.2.3.2. Шариковые преобразователи 229
VI.2.4. Электромагнитные преобразователи 230
VI.2.5. Преобразователи объемных счетчиков 231
VI.3. Справочные сведения о средствах измерения расхода 233
VI.3.1. Расходомеры с сужающими устройствами . . 233
VI.3.2. Ротаметры 234
VI.3.2.1. Стеклянные ротаметры 234
VI.3.2.2 Ротаметры электрические 235
VI.3.2.3. Ротаметры пневматические 238
VI.3.3. Тахометрические расходомеры 240
VI.3.3.1. Крыльчатые (турбинные) расходомеры . . 240
VI.3.3.2. Шариковые расходомеры 243
VI.3.4. Электромагнитные расходомеры 243
VI.3.5. Объемные счетчики 248
VI.4. Средства поверки расходомеров 250

ГЛАВА VII. ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

VII.1. Общие сведения 252
VII.2. Физические основы первичных преобразователей . . 254
VII.2.1. Психрометрические преобразователи 254
VII.2.2. Конденсационные преобразователи 255
VII.2.3. Сорбционно-резистивные преобразователи . . 257
VII.2.4. Электролитические подогревные преобразователи 258
VII.2.5. Пьезосорбционные преобразователи 260
VII.2.6. Кулонометрические преобразователи 261
VII.3. Справочные данные о средствах измерения влажности воздуха 263

ГЛАВА VIII. ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

VIII.1. Общие сведения 276
VIII.2. Основные методы измерений и методические погрешности 278
VIII.2.1. Измерение постоянных токов и напряжений . 278
VIII.2.2. Измерение переменных токов и напряжений . 281
VIII.2.3. Измерение мощности 283
VIII.2.3.1. Измерение мощности в цепях постоянного и однофазного переменного тока 283
VIII.2.3.2. Измерение мощности в трехфазных цепях переменного тока 285
VIII.2.4. Измерение омических сопротивлений . . . 286
VIII.3. Справочные данные о средствах измерения электрических величин 290
VIII.4. Средства поверки электроизмерительных приборов . 297

ГЛАВА IX. ИЗМЕРЕНИЯ БЫСТРОМЕНЯЮЩИХСЯ ВЕЛИЧИН

IX.1. Общие сведения 301
IX.2. Общие схемы измерительных систем 301
IX.2.1. Измерение давлений и температур в рабочих полостях холодильных компрессоров 301
IX.2.2. Измерение токов в пусковых режимах электродвигателей 304
IX.2.3. Требования к измерительным цепям 304
IX.3. Физические основы и характеристики первичных преобразователей 307
IX.3.1. Датчики давления 307
IX.3.1.1. Датчики с постоянной составляющей . . 310
IX.3.1.2. Датчики без постоянной составляющей . . 316
IX.3.2. Датчики температуры 419
IX.3.3. Датчики положения и преобразователи хода поршня 321
IX.4. Усилительно-регистрирующая аппаратура 323
IX.5. Справочные данные по осциллографам 326
IX.5.1. Осциллографические гальванометры (ОГ) . . 326
IX.5.2. Осциллографы 327

ГЛАВА X. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

X.1. Общие сведения 333
X.2. Электронные вычислительные машины 336
X.2.1. Процессор 336
X.2.2. Запоминающие устройства 337
X.2.3. Схемы сопряжения с периферийными устройствами 338
X.3. Периферийные устройства 338
X.3.1. Внешние запоминающие устройства 338
X.3.2. Устройства для связи оператора с ЭВМ . . . 339
X.3.2.1. Устройство считывания с перфолент и перфокарт, перфораторы 339
X.3.2.2. Алфавитно-цифровые печатающие устройства 339
X.3.2.3. Видеотерминалы (дисплеи) 340
X.3.3. Устройства передачи данных 340
X.4. Устройства связи с объектом 341
X.5. Программное обеспечение 344
X.6. Метрологическое обеспечение 345
X.6.1. Учет и уменьшение систематических погрешностей 346
X.6.2. Уменьшение случайных погрешностей 348
X.7. Справочные данные о средствах автоматизации измерений и обработки экспериментальных данных . . . 348
Список использованной литературы 359