



М. В. Бодров, В. Ю. Кузин

Теплотехнические измерения и приборы

Учебное пособие

Нижний Новгород
2015

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

М. В. Бодров, В. Ю. Кузин

Теплотехнические измерения и приборы

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Нижний Новгород
ННГАСУ
2015

ББК 31.3
Т 34
УДК 53.08:681.2.08

Рецензенты:

- А. Г. Аверкин* – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»
Е. Г. Ионычев – кандидат технических наук, генеральный директор ЗАО «Проект-промвентиляция»

Бодров М. В. Теплотехнические измерения и приборы [Текст]: учеб. пособие / М. В. Бодров, В. Ю. Кузин; Нижегород. гос. архитектур. - строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2015. – 176 с. ISBN 978-5-528-00053-4

Приведены общие сведения о метрологических основах измерений и способах оценки их погрешностей. Рассмотрены принципы действия и особенности устройства современных средств измерения температуры, давления, скорости, количества и расхода жидкостей и газов, контроля уровня, состава и свойств веществ.

Предназначено для магистрантов, обучающихся по направлениям подготовки 08.04.01 Строительство, профили «Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений» и «Возобновляемые источники энергии и энергоэффективность в зданиях», 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Тепломассообменные процессы и установки» и студентов бакалавриата, проходящих обучение по направлениям подготовки 13.03.01. Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Промышленная теплоэнергетика» и 08.03.01 Строительство, профиль «Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение зданий, сооружений, населенных пунктов».

ББК 31.3

ISBN 978-5-528-00053-4

© М.В. Бодров, В.Ю. Кузин, 2015
© ННГАСУ, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Теплотехнические измерения и приборы» предназначено для формирования общих и специальных знаний о методах измерения теплотехнических параметров, получения общих сведений о современных технических средствах измерений и овладения методами оценки погрешностей измерений и точности измерительных устройств.

Учебное пособие разработано и предназначено для магистрантов, обучающихся в ННГАСУ по направлению подготовки магистратуры 08.04.01 Строительство, профиль «Возобновляемые источники энергии и энергоэффективность в зданиях» в соответствии с Международным проектом *TEMPUS* 530793 «Магистерские программы по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности в зданиях в Центральной Азии и России» (*MAPREE*).

Данное учебное пособие может быть успешно использовано для обучения студентов по направлениям подготовки магистратуры – 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Тепломассообменные процессы и установки», 08.04.01 Строительство, профиль «Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений» и бакалавриата – 08.03.01 Строительство, профиль «Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение зданий, сооружений, населенных пунктов» и 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Промышленная теплоэнергетика».

Теплотехнические измерения служат для нахождения значений многих физических величин, связанных с процессами выработки и потребления тепловой энергии: температуры, относительной влажности, тепловой энергии, давления, расхода, количества, уровня и состава веществ.

В энергетической промышленности теплотехнические измерения используются для повседневного контроля и наблюдения за работой и состоянием установленного оборудования. Большую роль измерения играют в устройствах автоматизации (автоматическое регулирование и управление, технологическая защита, сигнализация). Надежность и экономичная эксплуатация современных систем обеспечения параметров микроклимата, наружных тепловых сетей, ко-

тельных и технологического оборудования предприятий немислима без применения значительного количества разнообразного по устройству, назначению и принципу действия измерительного оборудования.

Широкое применение в настоящее время в теплотехнических измерениях получили автоматические электронные измерительные приборы, отличающиеся высокой точностью, чувствительностью и быстродействием.

Сведения, приведенные в учебном пособии, тесно связаны с содержанием специальных технических дисциплин, изучающих вопросы отопления, вентиляции, теплогазоснабжения, теплотехники, технической термодинамики, строительной теплофизики, кондиционирования воздуха и холодоснабжения, теоретических основ создания микроклимата в помещениях гражданских и промышленных зданий, и других базовых курсов.

Учебное пособие можно структурно разделить на две части. В первой рассматриваются общие основы метрологии, положенные в основу методологии проведения современных измерений (глава 1). Во второй части рассматриваются методы и принципы работы, которые положены в основу современных методов и средств современных теплотехнических измерений (главы 2...7).

Развернутая информация об измерительных приборах для проведения теплотехнических измерений, в том числе их подробные технические характеристики, содержится в технических паспортах и инструкциях по эксплуатации, разработанных заводами-изготовителями.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам учебного пособия: доктору технических наук, профессору А.Г. Аверкину (Пензенский государственный университет архитектуры и строительства); кандидату технических наук, генеральному директору ЗАО «Проектпромвентиляция» Е.Г. Ионычеву. Авторы учли при редактировании ценные советы и замечания, сделанные при рецензировании рукописи учебного пособия.

Глава 1. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Общие сведения об измерениях физических величин

Отраслью науки, изучающей измерения, является метрология («метрон» – мера, «логос» – учение, «метрология» – учение о мерах, греч.).

Метрология – это наука об измерениях, методах и средствах их обеспечения и способах достижения требуемой точности [1].

Величина – это свойство чего либо, что может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно [8].

Величины делятся на идеальные и реальные. Идеальные величины применяются для описания идеализированных моделей и изучаются в математике. Реальные величины подразделяются на физические и нефизические. Физическая величина является характерной для реальных объектов, относящихся к техническим отраслям науки. Физические величины можно измерить (выразить количественно в виде некоторого числа единиц измерения) или оценить (при невозможности ввести единицу измерения). Для нефизических величин в принципе не могут быть введены единицы измерения, они могут быть только оценены.

Физические величины классифицируются по видам описываемых характеристик: физические и физико-химические свойства веществ, материалов и изделий (вещественные величины); процессы преобразования передачи и использования энергии (энергетические величины); спектральные характеристики, корреляционные функции и т.п. (величины, характеризующие протекание процессов во времени).

Физические величины по их принадлежности к различным группам физических процессов могут быть пространственно-временными, механическими, тепловыми, электрическими и магнитными, акустическими, световыми, физико-химическими, ионизирующих излучений, атомной и ядерной физики.

По степени условной независимости от других величин физические величины подразделяются на основные, производные и дополнительные. К основным физическим величинам относятся: длина l , м; масса m , кг; время t , с; сила тока I , А; температура T , К; количество вещества n , моль; сила света, I_v , кд.

Производные физические величины могут быть напрямую или косвенно выражены через основные физические величины, к ним относятся площадь, объем, скорость, ускорение и др. Дополнительными физическим величинами являются плоский и телесный угол. Кроме того, физические величины делятся на размерные (имеющие размерность) и безразмерные.

Измерение – это совокупность операций, выполняемых для определения количественного значения величины путем её сравнения с некоторым значением, принятым за единицу измерения. Под единицей измеряемой величины понимается значение измеряемой величины, которому присвоено числовое значение, равное «единице». Результат измерения x описывается основным уравнением измерения и имеет следующий вид [31, 33]:

$$x = Au, \quad (1.1)$$

где A – числовое значение измеряемой величины в принятой единице; u – единица измерения параметра.

Из формулы (1.1) видно, что для перехода от результата измерения A , выраженного в единице измерения u , к результату A_1 , выраженному в другой единице u_1 , требуется выполнить расчет по формуле

$$A_1 = A \frac{u}{u_1}. \quad (1.2)$$

Провести измерения физической величины значит сравнить её с однородной физической величиной, принятой за единицу меры. В ходе проведения измерений используются измерительные приборы, сверенные с эталоном. Общая классификация измерений приведена на рис. 1.1 [39].

В зависимости от количества измерений они подразделяются на однократные и многократные. Измерение является однократным, если для получения значения некоторой физической величины в опыте достаточно одного измерения. В том случае, если для получения значения физической величины требуется несколько измерений, проводимых одним и тем же прибором в одинаковых условиях, то измерения называют многократными. Измерения также подразделяются по способу получения результатов измерения на прямые, косвенные, совокуп-

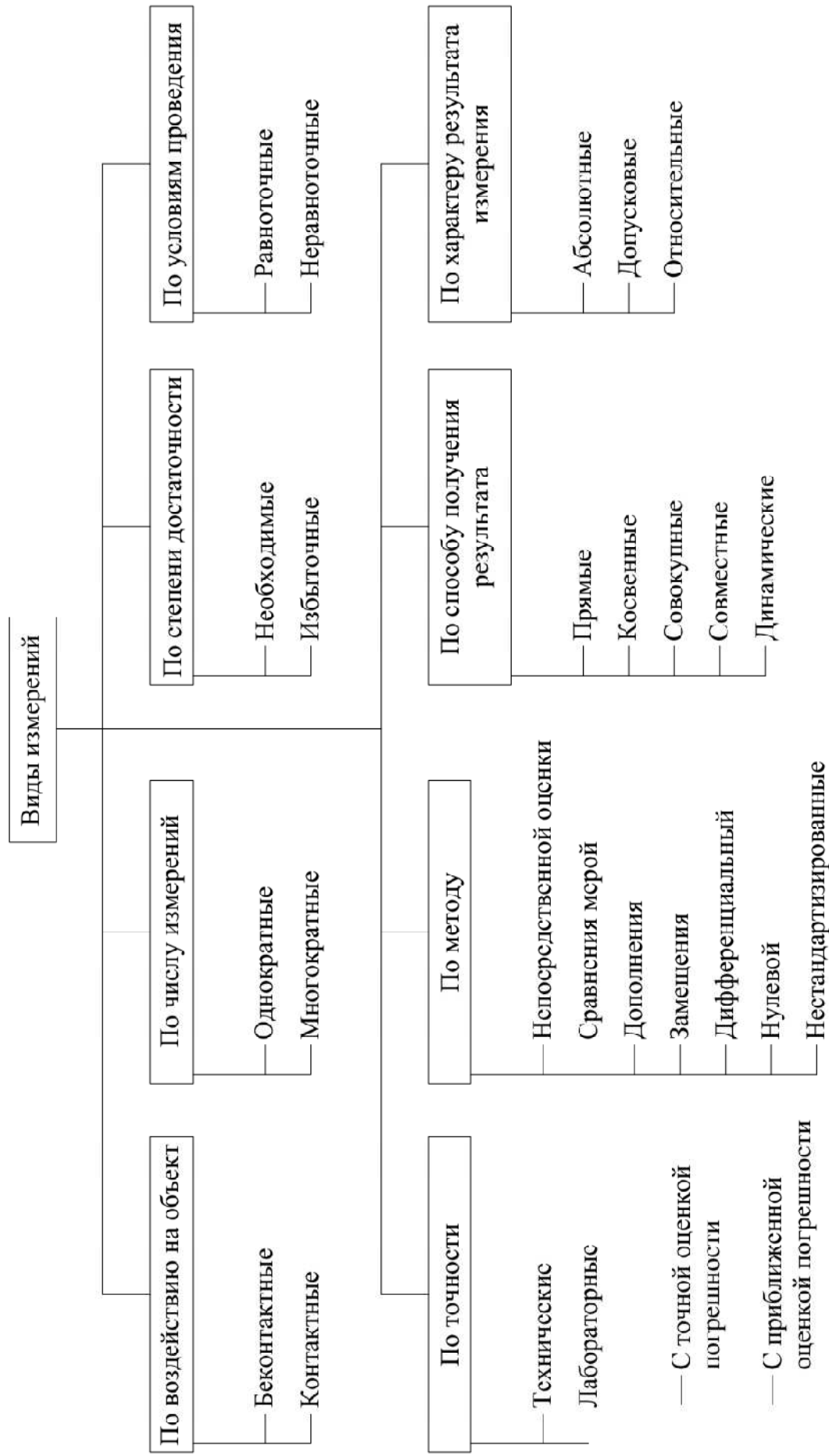


Рис. 1.1. Классификация измерений

ные, совместные и динамические. К **прямым** относятся такие измерения, результат которых получается непосредственно из опытных данных. Значение искомой величины определяется либо путем непосредственного сравнения её с мерами, либо с помощью измерительных приборов, градуированных в соответствующих единицах. При прямых измерениях их результат выражается в той же единице, что и измеряемая величина. Измеряемая величина z и результат измерения x связаны следующим соотношением:

$$z = x. \quad (1.3)$$

Примерами прямых измерений являются измерения: длины – метром; температуры – термометром; давления – манометром и др.

Косвенными измерениями являются такие измерения, результат которых получается путем прямых измерений нескольких величин, связанных с искомой величиной z определенной зависимостью. Искомая величина z в данном случае определяется функциональной зависимостью:

$$z = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n), \quad (1.4)$$

где $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ – значения величин, измеряемых прямым способом.

Примером косвенных измерений является определение расхода жидкости, газа и пара по перепаду давления в сужающем устройстве. Косвенные измерения применяются в том случае, когда искомую величину невозможно или сложно измерить прямым измерением или когда косвенное измерение даст более точный результат.

Совокупные измерения – это одновременные измерения нескольких одноименных величин для нахождения зависимостей между ними.

Совместные измерения – это одновременные измерения нескольких неоднородных величин для нахождения зависимостей между ними.

Динамическими называются измерения, измеряемая величина при которых изменяется по времени. В противовес динамическим выделяют статические измерения, когда измеряемая величина постоянна по времени.

По точности оценки измерения подразделяются на **технические** и **лабораторные**. Лабораторные измерения делятся на измерения максимально возможной

точности при существующем уровне техники (с точным оцениванием погрешности) и контрольно-поверочные измерения (с приближенным оцениванием погрешности). К первым относятся эталонные измерения, измерения универсальных физических констант (абсолютного значения ускорения свободного падения, гиромагнитного отношения протона и др.). Контрольно-поверочными называются измерения, погрешность которых с определенной вероятностью не превышает установленного значения. Техническими называются измерения, погрешность результатов которых определена характеристиками средства измерения, например, измерения, проводимые контрольно-измерительными приборами при натурных обследованиях параметров микроклимата помещений, теплового контура зданий, показаний контрольно-измерительных приборов в индивидуальных тепловых пунктах и пр.

По условиям проведения измерения подразделяются на **равноточные** и **неравноточные**. Равноточными являются измерения, выполненные одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях. Неравноточные измерения – это измерения, выполненные разными по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

По степени достаточности разделяют **необходимые** и **избыточные** измерения. К необходимым измерениям относятся необходимые для достижения задач измерения, например, при измерении углов треугольника нужно определить значения только двух из них, измерение же третьего угла будет являться избыточным, т.к. может быть определено расчетом.

В зависимости от характера результата измерения подразделяются на **абсолютные**, **относительные** и **допусковые**. Абсолютные измерения основаны на прямых измерениях одной или нескольких основных величин или использовании значений физических констант. В ходе относительных измерений измеряется отношение величины к одноименной величине, принимаемой за единицу. Допусковые (пороговые) – это такие измерения, при которых результатом является логическая величина «да/нет», равная единице при попадании значения контролируемой величины в установленное заранее поле допуска, в противном случае

результат равен нулю. Допусковые измерения часто называют **допусковым контролем** и рассматривают как частный случай относительных измерений.

По методу измерений различают следующие методы: непосредственной оценки; сравнения с мерой; дополнения; дифференциальный; нулевой; замещения; нестандартизированные. Метод непосредственной оценки заключается в определении значения величины непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора. При сравнении с мерой сравнивают измеряемую величину с воспроизводимой величиной (например, взвешивание на рычажных весах). Метод дополнения состоит в дополнении измеряемой величины мерой этой же величины с целью воздействия на измерительный прибор их суммы, равной заданному значению. Дифференциальный метод характеризуется измерением разности между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой. Если измеряемая величина и мера равны друг другу, то такой метод называется нулевым. При использовании метода замещения измеряемая величина заменяется известной величиной, воспроизводимой мерой. К нестандартизированным методам относятся методы противопоставления и совпадения. В методе противопоставления измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения. При применении метода совпадения разность между сравниваемыми величинами измеряют, используя совпадение отметок шкал либо периодических сигналов.

Основными характеристиками измерений являются: принцип измерений, метод измерений, погрешность, точность, правильность и достоверность [1].

Принцип измерений – физическое явление или совокупность физических явлений, положенных в основу измерений.

Метод измерений – совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Под средствами измерений понимаются технические средства, имеющие нормированные метрологические свойства.

Погрешность измерений – это разность между полученным при измерении и истинным значениями измеряемой величины.

Точность измерений – характеристика измерений, отражающая близость их результатов к истинному значению измеряемой величины.

Правильность измерений – это качество измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей результатов, т.е. степени правильности использованных средств измерений.

Сходимость измерений – близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных одними и теми же средствами измерений с использованием одного метода в одинаковых условиях.

Воспроизводимость измерений – близость результатов измерений, полученных разными методами, средствами измерений, операторами, в различные периоды времени в одинаковых условиях измерения.

Достоверность – это характеристика измерений, характеризующая доверие к их результатам. Результаты измерений, достоверность которых неизвестна, не представляют ценности и могут служить источником дезинформации.

Измерение должно проводиться в соответствии с установленной методикой, которая является совокупностью конкретно описанных операций, их выполнение обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности.

Показатель точности измерений – это установленная характеристика точности любого результата измерений, полученного при соблюдении требований и правил данной методики измерений. В качестве показателя точности методики измерений используются: характеристики погрешности измерения; показатели неопределенности измерений; показатели точности.

Методика измерения может излагаться как в отдельном документе, так и в отдельном его разделе и должна содержать: её наименование; назначение; область применения; условия выполнения измерений; методы измерений; допускаемую и (или) приписанную неопределенность измерений или норму погрешности и приписанные характеристики погрешности измерений; применяемые средства измерений, стандартные образцы с указанием их метрологических характеристик и сведений об утверждении их типов. Методика измерений также

должна содержать сведения: о подготовке к выполнению измерений; о последовательности проводимых операций; об обработке и оформлении результатов измерений; о процедуре и периодичности контроля точности результатов; о необходимой квалификации персонала; о требованиях к экологической безопасности; о безопасности труда и иные при их необходимости.

Методики измерений, включенные в проекты нормативно-правовых актов и документов в области стандартизации, в обязательном порядке проходят метрологическую экспертизу в государственных научных метрологических институтах (ФГУП «ВНИ ИМС», ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», ФГУП «УНИИМ», ФГУП «ВНИИОФИ», ФГУП «ВНИИР» и др.).

Метрологическая экспертиза заключается в анализе и оценке выбора методов и средств измерений, операций и правил проведения измерений, а также обработки их результатов в целях установления соответствия методики измерений предъявляемым к ней метрологическим требованиям.

Методики измерения, применяемые вне сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений, могут пройти аттестацию в добровольном порядке. Аттестация методик измерений состоит в исследовании и подтверждении соответствия методик измерений установленным метрологическим требованиям к измерениям.

1.2. Точность измерений. Погрешности измерений

При проведении многократных технических измерений, вследствие неточности измерительных приборов, несовершенства органов чувств наблюдателя, отсутствия абсолютной полноты знаний об объекте исследования, а также невозможности учета всех факторов окружающей среды, результатами измерения, как правило, являются разные числовые значения определяемого параметра. Данный факт требует определения точности проведенных измерений.

Точность измерений зависит от качества применяемых измерительных приборов, монтажа и способа установки прибора, условий работы измерителя и индивидуальных особенностей наблюдателя (его опыта).

Точность измерений характеризуется величиной погрешности показаний прибора. Отклонение результата измерения от действительного значения измеряемой величины называется погрешностью измерения. Общепринятая в метрологии классификация погрешностей измерений по форме представления и характеру проявления приведена на рис. 1.2 [39].

По характеру своего проявления погрешности проводимых измерений подразделяются на случайные, систематические и грубые («промахи»).

Случайные погрешности являются результатом воздействия большого числа факторов, не зависящих один от другого. Каждый из этих факторов оказывает малое влияние на результаты измерения, однако суммарное влияние всех факторов может быть значительным. К числу этих факторов относятся влияние температуры на те или иные части измерительного прибора, вибрация, трение в опорах измерительных приборов и т.п. Предсказать величину случайной погрешности для одного измерения невозможно, требуется проведение повторных измерений до определенного предела, с последующей обработкой полученных данных с использованием методов математической статистики и теории вероятности, которые составляют теорию погрешностей. Случайные погрешности подразделяются на предельные, средние квадратические (стандартные), вероятные, средние, средние арифметические.

Систематические погрешности – это постоянные или подчиняющиеся определенному закону ошибки. Данные погрешности возникают вследствие неправильной установки либо износа деталей измерительных приборов.

По виду источника систематические погрешности подразделяются на методические (вызванные несовершенством метода измерений, ограниченной точностью эмпирических зависимостей, применяемых для описания физического процесса, положенного в основу измерения, и используемых в уравнениях физических констант), инструментальные (связанные с несовершенством измерительной аппаратуры) и субъективные (вызванные индивидуальными особенностями наблюдателя, например, запаздывание или опережение в регистрации момента сигнала, неправильная интерполяция при отсчитывании показаний).

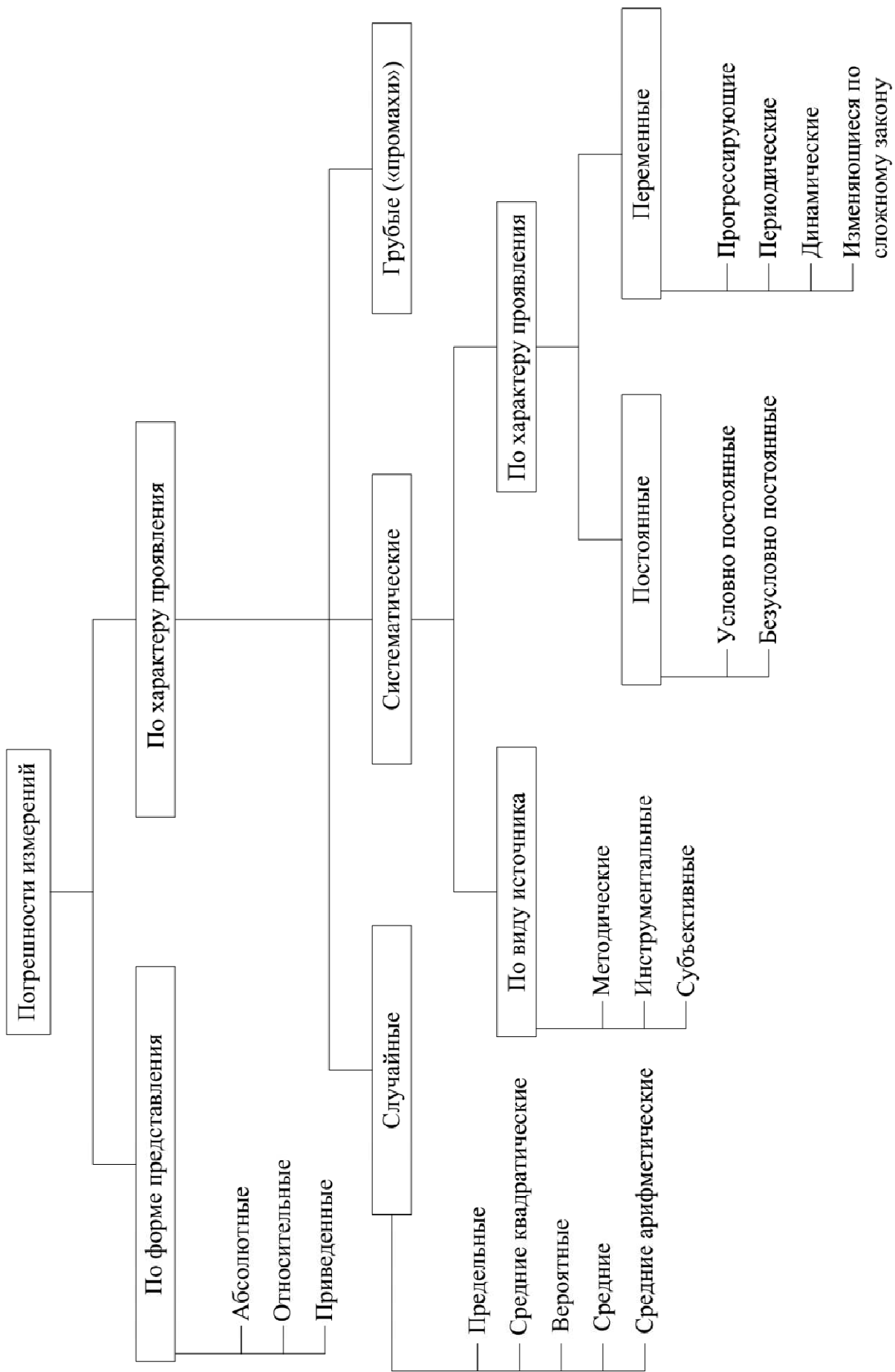


Рис. 1.2. Классификация погрешностей измерений

По характеру проявления систематические погрешности делятся на **постоянные** и **переменные**. Постоянные погрешности длительное время сохраняют свое значение в процессе измерения.

Безусловно постоянные систематические погрешности неизменны при любом измерении данной величины данным методом с заданной точностью. Условно постоянные систематические погрешности остаются неизменными при каждом наблюдении в пределах данного измерения, однако могут изменяться при разных измерениях одной и той же величины данным методом.

Переменные систематические погрешности изменяются в процессе измерения. К ним относятся прогрессирующие, периодические, динамические и изменяющиеся по сложному закону погрешности.

Прогрессирующие погрешности в первую очередь связаны с процессами старения или износа элементов средств измерения. Периодические погрешности находятся в периодической функциональной зависимости от времени измерения либо положения стрелки измерительного прибора (смещение стрелки циферблата часов относительно предусмотренного положения).

Динамические погрешности возникают вследствие изменения скорости изменения измеряемой величины. При влиянии на точность измерения нескольких систематических погрешностей, которые в результате описываются сложной функциональной зависимостью, погрешность называется переменной систематической погрешностью, изменяющейся по сложному закону.

Систематические погрешности исключаются путем внесения в результаты измерения поправок. Поправкой называется значение величины, одноименной с измеряемой, прибавляемой к полученному при измерении значению величины с целью исключения систематических погрешностей.

Грубые погрешности («промахи») – это погрешности измерений, существенно превышающие ожидаемые погрешности при данных условиях.

Грубые погрешности могут возникнуть в результате ошибочных отсчетов показаний приборов, данные погрешности, как правило, не следует учитывать при обработке результатов измерений.

По форме представления погрешности делятся на абсолютные, относительные и приведенные [8, 25]. Погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины, называется абсолютной погрешностью измерения Δx :

$$\Delta x = x - x_0, \quad (1.5)$$

где x_0 – действительное (истинное) значение измеряемой величины.

Взятая с обратным знаком абсолютная погрешность называется абсолютной поправкой измерения. Отношение абсолютной погрешности измерения к действительному значению измеряемой величины называется относительной погрешностью измерения δ , %, которая равна:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_0} 100. \quad (1.6)$$

В зависимости от класса точности и качества изготовления каждый прибор имеет свои погрешности. Измерительные приборы часто характеризуются приведенной погрешностью γ , %, которая определяется как отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к нормирующему значению x_H . За нормирующее значение часто принимается диапазон измерения прибора D .

Приведенная погрешность, определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_H} 100 = \frac{\Delta x}{D} 100. \quad (1.7)$$

Допустимая погрешность может быть абсолютной и относительной. Относительная допустимая погрешность δ_d , %, определяется по формуле:

$$\delta_d = \frac{\Delta x_d}{\eta_v - \eta_n} 100, \quad (1.8)$$

где Δx_d – абсолютная допустимая погрешность; $(\eta_v - \eta_n)$ – разность верхнего и нижнего предельных значений шкалы прибора.

Основной характеристикой средства измерения является его класс точности K , называемый обобщенной характеристикой средства измерений [9, 10].

В соответствии с ГОСТ [10] класс точности прибора K определяет предельные значения допускаемых абсолютных $\Delta_{пр}$, относительных $\delta_{пр}$ и приведенных $\gamma_{пр}$ приборных погрешностей.

1.3. Средства измерений.

Метрологические характеристики средств измерений

Средство измерений – техническое средство, предназначенное для проведения измерений. Средства измерений имеют нормированные метрологические характеристики, т.е. определенные численные значения величин и свойств, определяющих точность и достоверность проводимого измерения.

По конструктивному исполнению средства измерений подразделяются на меры, измерительные приборы, измерительные устройства, измерительные преобразователи; измерительные установки; измерительные системы.

Мерой является средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения физической величины одного или нескольких заданных параметров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. Меры подразделяются на однозначные, многозначные, наборы мер, магазины мер, стандартный образец.

Под **измерительным прибором** подразумевается средство измерений, предназначенное для определения значения измеряемой физической величины. Измерительные приборы включают в себя устройства для преобразования измеряемой величины в сигнал для последующего его преобразования в наиболее наглядном для наблюдателя виде. По степени индикации измеряемой величины измерительные приборы делятся на показывающие и регистрирующие. Измерительные приборы подразделяются на приборы прямого действия (измеряемое значение определяется без сравнения с известной одноименной величиной) и сравнительные (предназначенные для сравнения измеренного значения с известной одноименной величиной).

Измерительные устройства являются частью измерительных приборов, установок и систем, с которыми устройства связаны измерительным сигналом, но имеют обособленную от них конструкцию.

Измерительный преобразователь – средство измерения, предназначенное для преобразования измеряемой величины в другую величину или сигнал измерительной информации. Измерительные преобразователи являются со-

ставной частью измерительных приборов, устройств и систем. По характеру преобразования различают: аналоговые; цифро-аналоговые; аналого-цифровые преобразователи. По месту в измерительной цепи измерительные преобразователи бывают: первичными (на которые напрямую воздействует объект измерений); передающими (используемыми для дистанционной передачи информации); масштабными (применяемыми с целью измерения величины в заданное число раз). Первичные преобразователи также называют датчиками. Элемент датчика, находящийся под непосредственным воздействием измеряемой величины, называется чувствительным элементом (сенсором).

Измерительная установка является совокупностью мер, измерительных приборов, устройств и преобразователей, расположенных в одном месте и предназначенных для определения одного или нескольких параметров. Установки, предназначенные для поверки, называются поверочными, а входящие в эталон – эталонными установками.

Измерительная система – это совокупность объединенных мер, измерительных приборов, устройств и преобразователей, размещенных в разных частях (местах) системы (объекта), с целью контроля за его параметрами.

Основными метрологическими характеристиками средств измерений являются: погрешность; градуировочная характеристика; чувствительность; порог чувствительности; цена деления шкалы; диапазон измерений; вариация показаний; вариация выходного сигнала; динамическая характеристика.

Существует более широкий перечень нормируемых метрологических характеристик средств измерений, основанный на применении вероятностно-статистических характеристик, а именно: математического ожидания; среднеквадратического отклонения; предела допускаемого значения среднеквадратического отклонения. Нормирование перечисленных характеристик, с одной стороны, позволяет получить наиболее вероятные значения результатов измерений, близкие к действительным значениям, а с другой – требует значительных материальных затрат на их получение и подтверждение, в связи с чем в настоящее время они получили ограниченное распространение.

Номенклатура нормируемых метрологических характеристик должна быть достаточна для оценки инструментальной погрешности измерения.

С целью характеристики погрешностей средств измерений используется класс точности K , %, который определяется в зависимости от следующих показателей: основных и дополнительных погрешностей, вариации и порога чувствительности. Класс точности определяет пределы допускаемых основных абсолютных, относительных и приведенных погрешностей.

Класс точности K , %, определяется как отношение абсолютной приборной погрешности средства измерения $\Delta x_{\text{п}}$ к верхнему пределу измерения шкалы Π , выраженное в процентах [19, 22]:

$$K = \frac{\Delta x_{\text{п}}}{\Pi} 100. \quad (1.9)$$

Предел допускаемой абсолютной основной погрешности в единицах измеряемой величины или условно в делениях шкалы записывается:

$$\Delta x = \pm(a + bx), \quad (1.10)$$

где a , b – положительные числа; x – значение измеряемой величины на входе средств измерений или число делений отсчитанных по шкале.

Например, для медных термопреобразователей «ТПС-Взлет» значение класс допуска A по пределу допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры составляет $\Delta t = \pm(0,15 + 0,002|t)$.

Предел допускаемой относительной основной погрешности устанавливаются по формуле следующего вида:

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{x}{\Pi_{\text{к}}} \right| \right) - 1 \right], \quad (1.11)$$

где c , d – положительные числа; $\Pi_{\text{к}}$ – больший по модулю из пределов измерений.

Градуировочная характеристика представляет собой зависимость величины на входе и на выходе средства измерения.

Градуировочная характеристика определяется экспериментальным путем и выражается аналитически, графически либо в табличной форме.

Чувствительность средства измерения определяется как отношение изменения его выходного сигнала Δx к вызвавшему его изменению измеряемой величины Δz . Чувствительность может быть абсолютной и относительной. Абсолютная чувствительность средства измерения $S_{\text{абс}}$ равна

$$S_{\text{абс}} = \frac{\Delta x}{\Delta z}. \quad (1.12)$$

Относительная чувствительность средства измерения $S_{\text{отн}}$ равна

$$S_{\text{отн}} = \Delta x \frac{z}{\Delta z}, \quad (1.13)$$

где z – измеряемая величина.

Минимальное значение изменения входного сигнала, при котором происходит видимое измерение выходного сигнала, называется порогом чувствительности. Порог чувствительности указывается в документации на прибор в виде процента от его диапазона измерений.

Аналоговые измерительные приборы имеют отсчетные устройства, состоящие из шкалы и указателя (стрелочного, светового и т.д.).

На рис. 1.3 показана схема шкалы измерительного прибора. Отметки 5 шкалы, на которых указано их числовое значение, называются числовыми (оцифрованными) отметками. Промежуток 4 между двумя соседними отметками является делением шкалы. Разность между значениями двух соседних отметок называется ценой деления шкалы. Шкала является равномерной, если цена её делений постоянна на всем пределе её измерений. Значение измеряемой величины определяется по указателю (отсчетному устройству). Наименьшее значение измеряемой величины называется начальным, а наибольшее значение – конечным, область шкалы, ограниченная данными значениями, является диапазоном показаний. Диапазоном измерений прибора является область значений измеряемого параметра, для которого нормированы допустимые погрешности.

Шкалы приборов подразделяются на односторонние, двусторонние и безнулевые [26]. **Односторонняя шкала** – это шкала, в которой один из пределов измерения равен нулю (тахометры, манометры и др.).

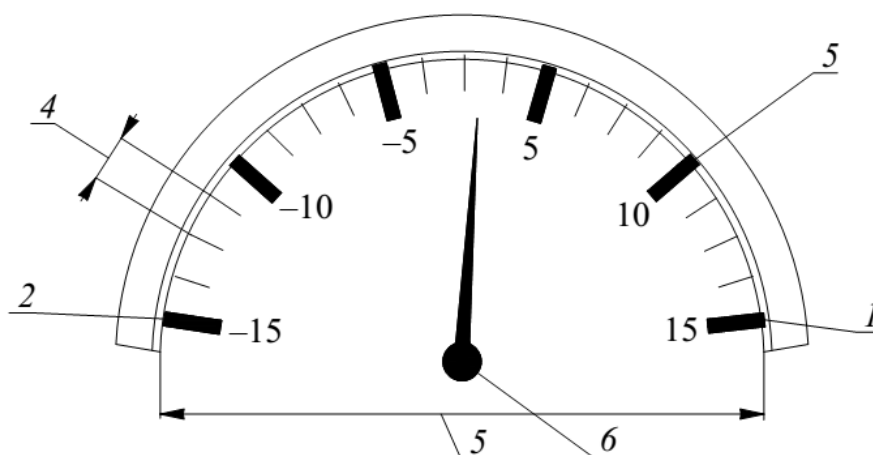


Рис. 1.3. Схема шкалы измерительного прибора: 1 – верхний предел измерения; 2 – нижний предел измерения; 3 – отметка шкалы; 4 – деление шкалы; 5 – диапазон измерения; 6 – стрелочный указатель

Двусторонняя шкала измерительного прибора – это шкала, в которой нулевое значение расположено в пределах шкалы (термометры, амперметры и др.). **Безнулевая шкала** прибора – это шкала, в пределах которой нет нулевого значения шкалы (медицинский термометр и др.).

Вариация показаний – это наибольшая разность между выходными сигналами средства измерения, соответствующими одному и тому же выходному сигналу при неизменных внешних условиях. Вариацией выходного сигнала называется наибольшая разность между выходными сигналами средства измерений, соответствующими одному и тому же значению входной величины.

Динамические характеристики средства измерения характеризуют зависимость выходного сигнала от изменения по времени следующих величин: параметров входного сигнала; внешние факторы (температура, давление) и пр.

Средства измерения также характеризуются надежностью их работы. Критериями надежности являются вероятность и средняя продолжительность безотказной работы. Вероятность безотказной работы определяется вероятностью отсутствия отказов прибора в течение заданного промежутка времени. Средняя продолжительность безотказной работы является отношением времени работы прибора к числу отказов за установленный промежуток времени.

В зависимости от степени защищенности средства делятся на обыкновенные, виброустойчивые, пылезащищенные, водозащищенные и др.

1.4. Оценка случайных погрешностей равноточных измерений

В ходе проведения инструментальных натурных и лабораторных обследований на точность полученных результатов влияют случайные факторы, не относящиеся ни к объекту, ни к средству измерения. Данные факторы приводят к появлению случайных погрешностей, которые нельзя устранить, однако при достаточно большом количестве измерений всегда можно определить доверительный интервал, в котором находится истинное значение измеряемой величины, применяя при обработке результатов измерений теорию вероятностей.

1.4.1. Свойства случайных величин

Под случайными величинами понимаются величины, которые в ходе проведения равноточных измерений принимают различные числовые значения. Случайные погрешности измерений являются частным случаем случайных величин. Рассмотрим некоторые свойства случайных величин, полученных в результате проведения многократных равноточных измерений (n – число измерений) физической величины $x_1, x_2 \dots x_n$. Для полученных результатов измерений может быть построена гистограмма выборки, приведенная на рис. 1.4. По оси абсцисс откладывается диапазон значений измеренной величины, разбитый на некоторое количество равных интервалов Δx . Каждому интервалу соответствует число попавших в него результатов измерений $m_1, m_2 \dots m_k$. На оси ординат откладывается относительная частота попадания результатов измерений в каждый конкретный интервал, равная $m_i/(n\Delta x)$.

Величина $m_i/(n\Delta x)$ представляет вероятность, которая приходится на единичный интервал Δx и может быть представлена в виде функции $f(x_i)$, называемой плотностью вероятности, или плотностью распределения, при $n \rightarrow \infty$:

$$f(x_i) = \frac{m_i}{n\Delta x}. \quad (1.14)$$

При увеличении числа интервалов до ∞ длина интервала $\Delta x \rightarrow 0$. Гистограмма выборки в данном случае примет вид гладкой кривой $f(x)$, пример которой приведен на рис. 1.5.

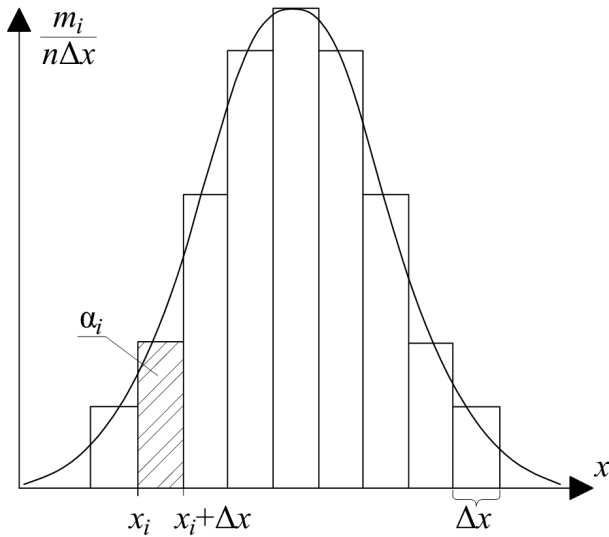


Рис. 1.4. Гистограмма выборки

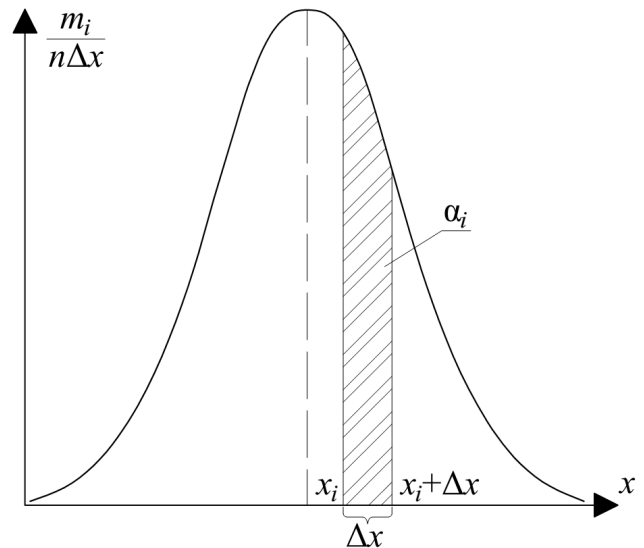


Рис. 1.5. Кривая плотности распределения

В данном случае вероятность $\alpha(x_i)$ попадания результата измерения величины x в интервал от x_i до $x_i + \Delta x$ равна площади под кривой функции плотности вероятности, определяемой по формуле

$$\alpha(x_i) = \int_{x_i}^{x_i + \Delta x} f(x) dx. \quad (1.15)$$

Таким образом, чем больше выделенный интервал Δx , тем выше вероятность попадания в него истинного значения измеряемой величины. При бесконечном размере интервала от $-\infty$ до ∞ вероятность будет равна $\alpha = 1$. При бесконечно малой ширине интервала $\Delta x \rightarrow 0$ вероятность $\alpha \rightarrow 0$.

Функция плотности вероятности характеризуется математическим ожиданием, дисперсией, средним квадратичным отклонением и модой [22].

Математическое ожидание непрерывной случайной величины определяется по общепринятой зависимости

$$x_M = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx. \quad (1.16)$$

Дисперсия является параметром характеризующим степень рассеяния значения случайной величины относительно среднего значения:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x_M - x)^2 f(x) dx. \quad (1.17)$$

Среднеквадратичное отклонение характеризует абсолютное среднее отклонение случайной величины от среднего значения и равно $\sqrt{\sigma^2}$.

Модой называют случайную величину, имеющую максимальную вероятность, которая для непрерывной случайной величины совпадает с экстремумом функции плотности вероятности $f(x)$.

При обработке результатов многократных измерений наиболее широко применяют закон нормального распределения Гаусса и распределение Стьюдента, а при однократных измерениях – равномерное распределение.

1.4.2. Определение случайной погрешности многократных измерений

При проведении многократных измерений для определения их доверительного интервала чаще всего используют закон нормального распределения Гаусса. Число измерений в данном случае должно быть достаточно велико, не менее $n = 50$. Нормальное распределение было получено немецким математиком Карлом Фридрихом Гауссом. Случайная величина x с нормальным распределением может принимать любое значение в интервале от $-\infty$ до ∞ , а её функция плотности вероятности подчиняется закону Гаусса:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x_m - x}{2\sigma^2}}. \quad (1.18)$$

Нормальное распределение Гаусса имеет следующие свойства. Распределение является симметричным относительно точки $x = x_m$. Математическое ожидание определяется по формуле (1.16) и равно максимальному значению плотности вероятности $f(x) = 1/(\sigma\sqrt{2\pi})$. Дисперсия определяется по формуле (1.17).

При обработке результатов измерений важно определить вероятность того, что измеренные значения находятся в интервале $(x_m - \Delta x; x_m + \Delta x)$ вблизи x_m . Значения вероятности α того, что результат измерения принимает значение из интервала Δx , пропорционального σ , приведены в табл. 1.1.

На рис. 1.6, а и 1.6, б приведена функция плотности нормального распределения Гаусса схематично и с указанием вероятностей для интервалов $\pm\sigma$, $\pm 2\sigma$, $\pm 3\sigma$ соответственно [22].

Погрешность серии измерений в общем случае равна

$$\Delta x = k\sigma, \quad (1.19)$$

где k – коэффициент, $k = 1$, при $\alpha = 68,1 \%$; $k = 2$, при $\alpha = 95,5 \%$.

Исходя из равенства среднего арифметического значения x_{cp} и математического ожидания x_m результатов измерений в распределении Гаусса, среднеквадратичное отклонение σ можно определить по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{cp} - x_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (1.20)$$

Результат многократных измерений с указанием доверительного интервала записывается так: $x = x_{cp} \pm \Delta x$, с доверительной вероятностью $\alpha, \%$. При технических измерениях доверительная вероятность считается равной $\alpha = 95 \%$.

Таблица 1.1

Зависимость вероятности от выбранного интервала

Интервал	Вероятность $\alpha, \%$
от $-\sigma$ до σ	68,3
от $-1,96\sigma$ до $1,96\sigma$	95,0
от -2σ до 2σ	95,5
от $-2,58\sigma$ до $2,58\sigma$	99,0
от -3σ до 3σ	99,7

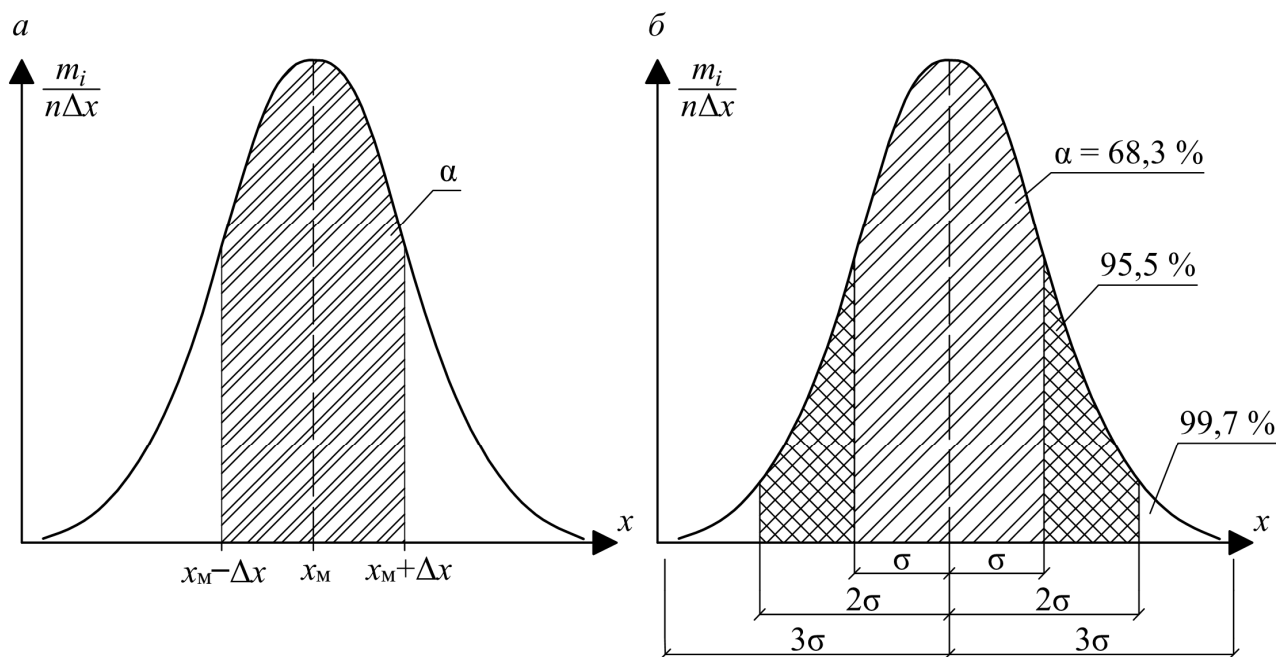


Рис. 1.6. Кривая функции плотности распределения Гаусса: a – показанная условно; b – с указанием вероятностей для интервалов $\pm\sigma, \pm 2\sigma, \pm 3\sigma$

При малом числе измерений ($2 \leq n \leq 10$), когда среднее арифметическое значение результатов измерений не равно математическому ожиданию $x_M \neq x_{cp}$ (рис. 1.7), пользоваться распределением Гаусса недопустимо.

В данном случае доверительный интервал определяется с помощью закона распределения Стьюдента (Уильяма Сили Госсета), являющегося распределением случайной величины t :

$$t = \frac{x_M - x_{cp}}{\sigma}. \quad (1.21)$$

Закон Стьюдента не что иное, как закон распределения ошибок измерений нормальных гауссовских случайных величин. В распределении Стьюдента, являющемся функцией плотности вероятности $S_n(t)$ (рис. 1.8), доверительная вероятность попадания значения t в интервал от $-t_{ct}$ до $+t_{ct}$ равна

$$\alpha = \int_{-t_{ct}}^{+t_{ct}} S_n(t) dt, \quad (1.22)$$

где t_{ct} – коэффициент Стьюдента, принимаемый по табл. 1.2 [22].

Погрешность серии измерений в данном случае равна

$$\Delta x = t_{ct} \sigma. \quad (1.23)$$

При значительном числе измерений $n \geq 50$ число Стьюдента будет равно коэффициенту пропорциональности k , приведенному в формуле (1.19).

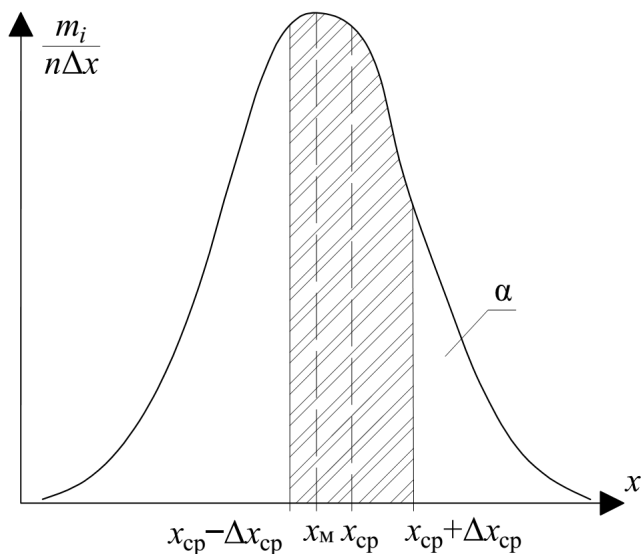


Рис. 1.7. Кривая плотности распределения при малом числе измерений

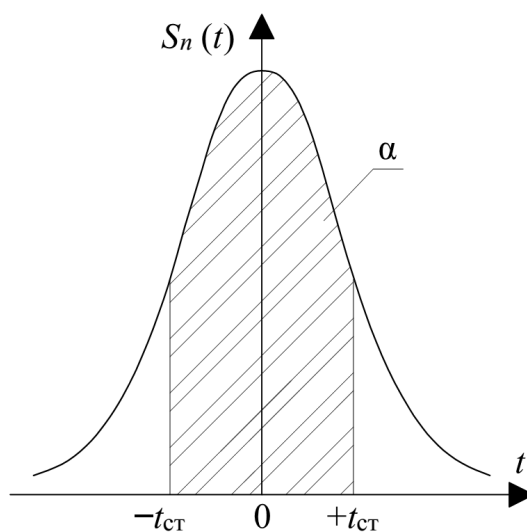


Рис. 1.8. Распределение Стьюдента

Коэффициенты Стьюдента при доверительных вероятностях α

n	$\alpha = 0,9$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,99$
2	6,31	12,7	636,6
3	2,92	4,30	31,6
4	2,35	3,18	12,9
5	2,13	2,78	8,61
6	2,02	2,57	6,37
7	1,94	2,45	5,96
8	1,89	2,36	5,41
9	1,86	2,31	5,04
10	1,83	2,26	4,78
∞	-	1,96	3

1.4.3. Определение случайной погрешности однократных измерений.

Учёт случайной ошибки многократных и однократных измерений

В ходе проведения однократных измерений существует вероятность получения неточных результатов, связанная с точностью применяемых измерительных приборов. Однократные измерения случайных величин подчиняются равномерному распределению. Для нахождения погрешности однократных измерений используют общепринятую зависимость:

$$\Delta x_{\text{ои}} = \alpha d, \quad (1.24)$$

где α – доверительная вероятность, для технических измерений принимается $\alpha = 0,95$; d – параметр равномерного распределения.

Параметр равномерного распределения d в зависимости от конструкции средства измерения может быть определен следующими путями [22]:

- 1) при указании цены деления Π на устройстве, $d = \Pi$;
- 2) при указании класса точности, по которому возможно установить приборную погрешность $\Delta x_{\text{п}}$, $d = K \cdot \Pi / 100$;
- 3) при отсутствии сведений о цене деления и классе точности: $d = \Pi$ – если конструкция прибора не предусматривает промежуточного положения измерительной стрелки между делениями (например, циферблат часов); $d = \Pi / 2$ – если перемещение стрелки либо указателя осуществляется плавно и может находиться между делениями (термометр, манометр и пр.);

4) в том случае, если в процессе измерений существует параметр, значение которого задано, а не определено опытным путем, параметр d будет приниматься равным половине единицы разряда числа ($x = 3,12$, округление велось до сотых долей, $d = 0,01/2 = 0,005$);

5) при проведении многократных измерений одной величины (например, измерение расстояния между двумя точками путем прикладывания средства измерения k -раз) $d = kЦ$.

При многократных измерениях некоторой одной величины каждое отдельное измерение рассматривается как однократное. При оценке погрешности учитывается случайная ошибка как однократных, так и многократных измерений. Общая абсолютная погрешность $\Delta x_{об}$ измеряемой величины

$$\Delta x_{об} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta x_{ои}^2}. \quad (1.25)$$

Общая относительная погрешность может быть рассчитана как общая относительная погрешность измерения, равная $\delta_{об} = 100 \cdot \Delta x_{об}/x_{ср}$.

С целью обобщения сведений, приведенных в п. 1.4.1...1.4.3, рассмотрим расчет погрешности прямых равноточных измерений.

Пример 1.1. Проведены многократные измерения, в результате которых получено: $x_1 = 10,5$; $x_2 = 10,7$; $x_3 = 11,1$; $x_4 = 10,9$; $x_5 = 10,8$. Доверительная вероятность $a = 0,95$. Параметр равномерного распределения $d = 0,1$. Требуется определить абсолютную и относительную погрешность измерений.

Среднее арифметическое значение измеряемой величины равно

$$x_{ср} = \frac{10,5 + 10,7 + 11,1 + 10,9 + 10,8}{5} = 10,8.$$

Среднеквадратичное отклонение результатов измерений равно

$$\sigma = \sqrt{\frac{(10,8 - 10,5)^2 + (10,8 - 10,7)^2 + (10,8 - 11,1)^2 + (10,8 - 10,9)^2 + 0^2}{5(5 - 1)}} = 0,1.$$

Случайная погрешность измерений равна

$$\Delta x = 2,78 \cdot 0,1 = 0,278.$$

Погрешность однократных измерений равна

$$\Delta x_{ои} = 0,95 \cdot 0,1 = 0,095.$$

Общая погрешность измерений равна

$$\Delta x_{\text{об}} = \sqrt{0,278^2 + 0,095^2} = 0,294.$$

Результат измерений имеет вид $x = 10,8 \pm 0,294$.

Относительная погрешность измерений равна

$$\delta = \frac{0,294}{10,8} \cdot 100 = 2,72 \%$$

1.4.4. Определение случайной погрешности косвенных измерений

Часто в практике технических измерений большую ценность имеют не непосредственно измеренные параметры, а полученные на их основе расчетные результаты. В таких случаях считается, что искомая величина получена косвенным путем, а измерения называются косвенными.

При расчете погрешности результатов косвенных измерений учитывается структура расчетной формулы для определения искомой величины. Теоретические основы расчета относительных погрешностей косвенных измерений изложены в теории погрешностей [36]. Для проведения большинства технических расчетов достаточно применения зависимостей, приведенных в табл. 1.3 [21].

Пример 1.2. Определите результат косвенных измерений, если известно следующее: абсолютные погрешности измерений $\Delta A = 0,55$, $\Delta B = 0,3$, $\Delta C = 0,2$; среднеарифметические значения измеряемых величин $A = 10,3$; $B = 17$; $C = 8,5$.

Искомая величина определяется по формуле $Y = (A + B)/C$.

Относительная погрешность для действия сложения равна

$$\delta_{A+B} = \frac{0,55 + 0,3}{10,3 + 17} = 0,311.$$

Относительная погрешность для действия деления имеет вид

$$\delta_Y = \frac{0,311}{10,3 + 17} + \frac{0,2}{8,5} = 0,035.$$

Приближенное значение результата измерений равно

$$Y = \frac{10,3 + 17}{8,5} = 3,212.$$

Абсолютная погрешность косвенных измерений равна

$$\Delta Y = 0,035 \cdot 3,212 = 0,112 .$$

Результат косвенных измерений имеет вид $Y = 3,212 \pm 0,112$.

Таблица 1.3

Зависимости для определения относительной погрешности косвенных измерений

Расчетная формула	Относительная погрешность
$x = A \pm B$	$\delta = \frac{\Delta A + \Delta B}{A \pm B}$
$x = AB$	$\delta = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$
$x = \frac{A}{B}$	$\delta = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$
$x = A^n$	$\delta = n \frac{\Delta A}{A}$
$x = \sqrt[n]{A}$	$\delta = \frac{\Delta A}{nA}$
$x = \frac{1}{A} \pm \frac{1}{B}$	$\delta = \frac{\frac{\Delta A}{A^2} + \frac{\Delta B}{B^2}}{\frac{1}{A} \pm \frac{1}{B}}$
$x = \sin A$	$\delta = \Delta A \operatorname{ctg} A$
$x = \cos A$	$\delta = \Delta A \operatorname{tg} A$
$x = \operatorname{tg} A$	$\delta = \frac{2\Delta A}{\sin 2A}$

1.5. Контрольные вопросы и задания для практических занятий и самостоятельной работы

Контрольные вопросы.

1. Что такое величина?
2. Приведите классификацию измерений.
3. Какие факторы влияют на появление случайных, систематических и грубых погрешностей?
4. Абсолютная, относительная, приведенная и допустимая погрешности.

5. Перечислите основные характеристики средств измерений.
6. Приведите классификацию шкал средств измерения.
7. Назовите основные свойства случайных величин.
8. Закон Гаусса. Распределение Гаусса.
9. Закон Стьюдента. Распределение Стьюдента.
10. При каком числе равноточных измерений коэффициент пропорциональности распределения Гаусса будет равен коэффициенту Стьюдента?
11. Какие способы определения параметров равномерного распределения равноточных измерений Вы знаете?
12. Как рассчитывается общая абсолютная случайная погрешность многократных и однократных измерений?
13. Запишите зависимость для расчета относительной погрешности косвенных измерений при определении искомого значения путем суммирования двух измеренных величин.

Задания для практических занятий.

1. Определите абсолютную и относительную погрешность многократных измерений. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 1.4.
2. Определите результат косвенных измерений. Исходные данные для проведения расчетов указаны в табл. 1.5.

Задания для самостоятельной работы.

Подготовить доклад в формате презентации с использованием средств Microsoft Office PowerPoint на следующие темы.

1. Эталон. Классификация эталонов. Эталоны системы СИ.
2. Поверка и калибровка средств измерений.
3. Локальные и государственные поверочные схемы.
4. Системы физических величин и их единиц.
5. Информационно-измерительные системы.
6. Метрологическое обеспечение технических измерений.

Таблица 1.4

Исходные данные для определения абсолютной и относительной погрешностей
многократных измерений

Номер варианта	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
1	10,3	10,9	10,4	10,7	10,7	10,1	10,3	10,3	10,4
2	11,2	11,0	11,9	11,5	12,0	11,9	11,3	11,0	
3	20,1	20,0	20,1	20,0	20,9	20,6	20,1		
4	30,9	30,9	30,3	30,2	30,6	30,6			
5	17,5	17,8	17,1	17,1	17,3				
6	10,5	10,2	10,0	11,0					
7	31,1	31,8	31,5	31,4	31,5	31,7	31,5	31,0	31,4
8	11,0	10,3	10,7	10,1	10,6	10,2	10,7	10,1	
9	60,1	60,7	60,4	60,2	60,9	60,6	61,0		
10	10,8	10,6	10,1	10,9	10,8	10,6			
11	17,2	17,1	17,3	17,0	17,5				
12	10,1	11,0	10,3	10,6					
13	11,0	11,0	11,0	10,7	10,1	10,8	10,6	11,0	10,1
14	20,2	20,7	20,4	20,9	20,5	21,0	20,7	20,3	
15	10,9	10,0	10,6	11,0	10,5	10,9	10,5		
16	30,9	30,1	30,1	30,0	30,4	30,4			
17	10,9	10,1	10,5	10,9	10,3				
18	20,2	21,0	20,8	20,0					
19	98,1	98,1	98,6	98,7	98,0	98,9	98,7	99,0	98,2
20	11,0	10,8	10,3	10,4	10,5	10,6	10,0	10,6	
21	17,3	17,4	17,2	17,4	17,8	17,9	17,9		
22	10,6	10,2	10,2	10,1	10,2	10,0			
23	20,1	20,2	20,2	20,6	20,2				
24	10,6	10,4	11,0	10,9					
25	65,9	65,3	65,1	65,9	66,0	65,1	65,3	65,6	65,0
26	11,0	10,9	10,3	10,3	10,7	10,6	10,7	10,8	
27	45,5	45,1	45,6	46,0	45,2	45,1	45,6		
28	10,8	10,1	10,9	11,0	10,3	10,9			
29	30,8	30,7	30,5	30,8	30,8				
30	10,6	10,1	10,7	10,2					

Примечание. $d = 0,1$; $a = 0,95$

Таблица 1.5

Исходные данные для определения результата косвенных измерений

Номер варианта	A	B	C	ΔA	ΔB	ΔC	Формула: $Y = \dots$
1	20,7	20,1	16,9	0,17	0,28	0,40	$A + B/C$
2	27,2	25,8	13,5	0,33	0,30	0,30	$A^2 + B^3 - C$
3	15,3	19	20,6	0,23	0,21	0,29	ABC
4	20,7	14,6	20,7	0,17	0,19	0,23	$1/(ABC)$
5	28,7	21,2	25,9	0,39	0,16	0,17	$A - C + (1/B)$
6	12,8	13,2	27,7	0,38	0,36	0,38	$A + B + C$
7	20,5	24	26,1	0,28	0,39	0,30	$B - C - A$
8	10,1	27,7	16,4	0,26	0,11	0,21	$A/B - 1/C$
9	29,1	11,9	28,8	0,37	0,39	0,17	$A^3 B^4 C^2$
10	19,7	24,9	10,9	0,30	0,23	0,34	$C - B + A$
11	22	28,5	15,1	0,36	0,22	0,36	$A + B + C$
12	20,1	29,7	14,4	0,11	0,29	0,36	$A^2 - B^2 + C$
13	20,1	12,1	26,4	0,20	0,39	0,38	AB/C
14	18	12,2	16,7	0,21	0,35	0,16	$A - BC$
15	18,3	15,3	24,8	0,10	0,11	0,18	$B^3 - A/C$
16	25,1	20	17	0,32	0,25	0,22	$A + C - B$
17	23,3	28,4	29,5	0,40	0,23	0,37	$A^4 - B^2 + C$
18	28,8	29,8	26,8	0,26	0,31	0,12	$B - C + A$
19	10,6	28	26,4	0,12	0,37	0,13	CA/B
20	12,7	21,9	26,2	0,19	0,14	0,35	$A^2 B^3 C$
21	26,4	29	28,7	0,26	0,30	0,35	$A/(B+C)$
22	25,3	16,4	21,8	0,13	0,21	0,38	$A^3/(BC)$
23	10,8	14,5	14,7	0,39	0,40	0,14	$(A - C)/B$
24	17	13,7	20,9	0,34	0,23	0,36	CB/A
25	29,1	11,9	25,4	0,22	0,24	0,13	$C/(A - B)$
26	27,2	22,2	30	0,27	0,35	0,27	$B - C + A$
27	14,1	14	19,4	0,21	0,37	0,28	$A^{1,5} - BC$
28	27,9	21,7	28,6	0,20	0,14	0,14	$(1/A)+(1/B)+(1/C)$
29	22	24,4	30	0,37	0,14	0,39	$C/(AB)$
30	29,7	26,2	23,4	0,16	0,17	0,12	$C - AB$

Глава 2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

2.1. Общие сведения об измерениях температуры

Температура T , К, является условной статистической величиной, прямо пропорциональной средней кинетической энергии частиц:

$$T = \frac{2}{3} Ek, \quad (2.1)$$

где E – кинетическая энергия поступательного движения молекул, Дж; k – постоянная Больцмана, $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Измерение температуры тела на практике возможно только путем сравнения нагретости объекта и средства измерения. Для количественной оценки температуры тела существуют температурные шкалы, которые являются функцией изменения физического свойства вещества от температуры.

Единицей измерения температуры в системе СИ по термодинамической температурной шкале принят градус Кельвина, который является 1/273,16 части интервала между температурой тройной точки воды (температуры равновесного состояния водяного пара, жидкой воды и льда) и абсолютным нулем температуры (самой низкой возможной температуры в природе).

В настоящее время существуют альтернативные температурные шкалы, применяемые в узких областях науки и техники, перевод единиц температуры в которых проводится следующим образом:

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,16 = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32) = \frac{100}{33} ^{\circ}\text{N} = \frac{5}{4} ^{\circ}\text{R}, \quad (2.2)$$

где $^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$, $^{\circ}\text{N}$, $^{\circ}\text{R}$ – градусы Цельсия, Фаренгейта, Ньютона и Реомюра.

Для проведения технических измерений температур предназначены термометры. Первая практическая конструкция термометра была предложена Галилео Галилеем в 1595 г. По характеру взаимодействия средства и объекта измерения термометры подразделяются на контактные и бесконтактные.

Для контактных термометров необходим тепловой контакт первичного преобразователя с измеряемой средой. Бесконтактным термометрам достаточно измерений собственного либо оптического излучения.

Контактные термометры делятся на термометры расширения, манометрические термометры, термопары и термометры сопротивления. Бесконтактные термометры подразделяются на пирометры и тепловизоры.

2.2. Термометры расширения

Термометр расширения – это прибор, измеряющий температуру объекта, принцип работы которого основан на свойствах тел увеличивать свой объем при нагревании. К термометрам расширения относятся жидкостные, биметаллические и стержневые термометры.

Работа **жидкостного термометра** (рис. 2.1, *a*) основана на объемном расширении жидкости, заключенной в закрытом стеклянном резервуаре 1. Резервуар соединен с капилляром 2. В процессе нагревания резервуара жидкость, находящаяся в нем, расширяется и поднимается вверх по капилляру. Высота столба жидкости указывает на величину измеренной температуры среды по шкале 3. Чем тоньше капиллярная трубка, тем чувствительнее термометр. В качестве рабочей жидкости жидкостного термометра служат ртуть или спирт.

Шкала жидкостного термометра справедлива, когда глубина его погружения равна высоте столбика ртути. Если столбик ртути выступает над уровнем погружения термометра, то температура этой части будет отличаться от температуры погруженного термометра, таким образом, при отличии температуры внутреннего воздуха от измеряемой среды показания термометра могут быть занижены или завышены. Для исключения ошибок при снятии показаний таких термометров вводят поправку Δt , °С, к показаниям термометра на температуру выступающего столбика, определяемую по следующей формуле [6]:

$$\Delta t = \alpha n(t_{гр} - t_{в}), \quad (2.3)$$

где α – коэффициент линейного расширения столбика жидкости в капилляре, $\alpha = 0,00016$, значения коэффициентов α для других термометрических жидкостей приведены в табл. 2.1; n – высота выступающей части столбика ртути по шкале, дел., °С; $t_{гр}$ – температура градуировки термометра, °С; $t_{в}$ – температура внутреннего воздуха или окружающей среды в момент измерения, °С.

В табл. 2.2. приведены значения пределов допускаемой абсолютной погрешности измерений технического жидкостного термометра ТТЖ-М.

Таблица 2.1
Значения коэффициентов линейного расширения термометрических жидкостей

Термометрическая жидкость	Коэффициенты линейного расширения термометрической жидкости α	Сокращенное название термометрической жидкости
Толуол	0,00120	Т
Керосин	0,00093	К
Ртуть	0,00016	Р
Метилкарбитол	0,00093	М

Таблица 2.2
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений термометра ТТЖ-М

Диапазон измерений температуры, °С	Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений термометра при цене деления шкалы, °С					
	0,5	1	2	5	10	20
Свыше –50 до –38	±1	±2	-	-	-	-
Свыше –38 до 0	±1	±1	-	-	-	-
Свыше 0 до 100	±1	±1	±2	±5	±5	±10
Свыше 100 до 200	-	±2	±3	±5	±5	±10
Свыше 200 до 300	-	-	±4	±5	±5	±10
Свыше 300 до 400	-	-	±5	±10	±10	±20
Свыше 400 до 500	-	-	-	±10	±10	±20
Свыше 500 до 600	-	-	-	±10	±10	±20

Пример 2.1. Требуется определить поправку на температуру выступающего столбика Δt и действительные показания t_d жидкостного термометра. Исходные данные: высота выступающего столбика $n = 10$ дел.; температура градуировки $t_{гр} = 20$ °С; температура окружающей среды $t_b = 40$ °С; показания температуры по термометру $t = 55$ °С; термометрическая жидкость – ртуть.

Определим величину поправки Δt , °С, по формуле

$$\Delta t = 0,00016 \cdot 10 \cdot (20 - 40) = - 0,03 \text{ °С.}$$

Действительная температура равна

$$t_d = t + \Delta t = 55 + (- 0,03) = 49,97 \text{ °С.}$$

В настоящее время изготавливают термометры расширения для измерения температур от -100 до 600 °С. Для защиты от механических повреждений термометры помещаются в защитную арматуру.

Достоинством жидкостных термометров является их простота и дешевизна изготовления при удовлетворительной точности. К недостаткам следует отнести неудобство отсчета, запаздывание показаний вследствие большой тепловой инерции, отсутствие возможности автоматической регистрации и передачи показаний на расстоянии, малая точность.

Стержневые (дилатометрические) термометры являются средствами измерения, работа которых заключается в преобразовании изменения температуры исследуемой среды в разность удлинений двух твердых тел, вызванную различием их коэффициентов температурного расширения.

Принцип работы стержневого термометра, приведенного на рис. 2.1, б, основан на разности удлинения трубки 5 и стержня 6. Трубку изготавливают из материала с малым коэффициентом линейного расширения (из кварца, инвара и пр.), а стержень с большим (из алюминия, латуни, меди, стали и пр.). Стержень располагается внутри трубки, один его конец жестко скреплен с дном трубки. Трубка и стержень при нагреве удлиняются на разную величину. Измерение разности этих удлинений характеризует температуру нагрева, которая визуализируется на шкале измерительного прибора посредством механической передачи 7, 8 с помощью измерительной стрелки 9.

Изменение длины твердого тела от температуры имеет вид

$$l_k = l_n(1 + \alpha(t_k - t_n)), \quad (2.4)$$

где α – средний коэффициент линейного расширения, K^{-1} ; t_k , t_n – конечная и начальная температуры стержня, °С; l_n , l_k – начальная и конечная длины стержня, м.

Диапазон измерения дилатометрических термометров составляет от -30 до 1000 °С, с относительной погрешностью $1,5 \dots 2,5$ %. Термометры данной конструкции обладают высокой надежностью и используются в релейных схемах.

Принцип работы **биметаллических термометров** основан на свойстве его биметаллических (изготовленных из двух материалов с разными темпера-

турными коэффициентами расширения) пластин, спиралей и пружин изгибаться, раскручиваться и скручиваться при изменении температуры среды.

Вертикальное перемещение $h_{пл}$, м, незакрепленного конца закрепленной с одной стороны биметаллической пластины при изменении температуры равно

$$h_{пл} = \frac{\gamma_{пл} l_{пл}}{\delta_{пл}} (t_k - t_n), \quad (2.5)$$

где $\gamma_{пл}$ – удельный изгиб пластины, $1/^\circ\text{C}$; $l_{пл}$, $\delta_{пл}$ – длина и толщина пластины, м.

Угол поворота $\varphi_{сп}$ биметаллической спирали при изменении температуры находится по формуле

$$\varphi_{сп} = \frac{360}{\pi} \frac{\gamma_{сп} l_{сп}}{\delta_{сп}} (t_k - t_n), \quad (2.6)$$

где $\gamma_{сп}$ – удельный изгиб спирали, $1/^\circ\text{C}$; $l_{сп}$, $\delta_{сп}$ – длина и толщина спирали, м.

Рассмотрим принцип работы биметаллических термометров на примере термометра ТБ-1 (рис. 2.1, в), который состоит из термобаллона и показывающей приставки. Термобаллон является трубкой 10, в которой находится биметаллическая пружина 11, рассчитанная на определенный диапазон измерений. Пружина приварена к оси 12, которая вращается при раскручивании и скручивании пружины при изменении её температуры под действием измеряемой среды. Стрелка 19 располагается непосредственно на оси термобаллона. Термобаллон крепится к штуцеру 14, который, в свою очередь, присоединяется к корпусу 22 с помощью винтов 15. Ось 12 передает раскручивание (скручивание) пружины стрелке 19, которая, изменяя свое положение, отображает измерение температуры на шкале 21.

Диапазон измерений биметаллических термометров составляет от -100 до 600 $^\circ\text{C}$ с относительной погрешностью $1 \dots 3$ %.

Биметаллические и стержневые термометры применяются в качестве сигнализаторов и регуляторов температуры, а не для визуализации показаний температуры среды. Они используются для замыкания или размыкания электрических контактов, включаемых в электрические цепи средств автоматизации аппаратуры систем отопления, вентиляции, теплоснабжения, холодоснабжения.

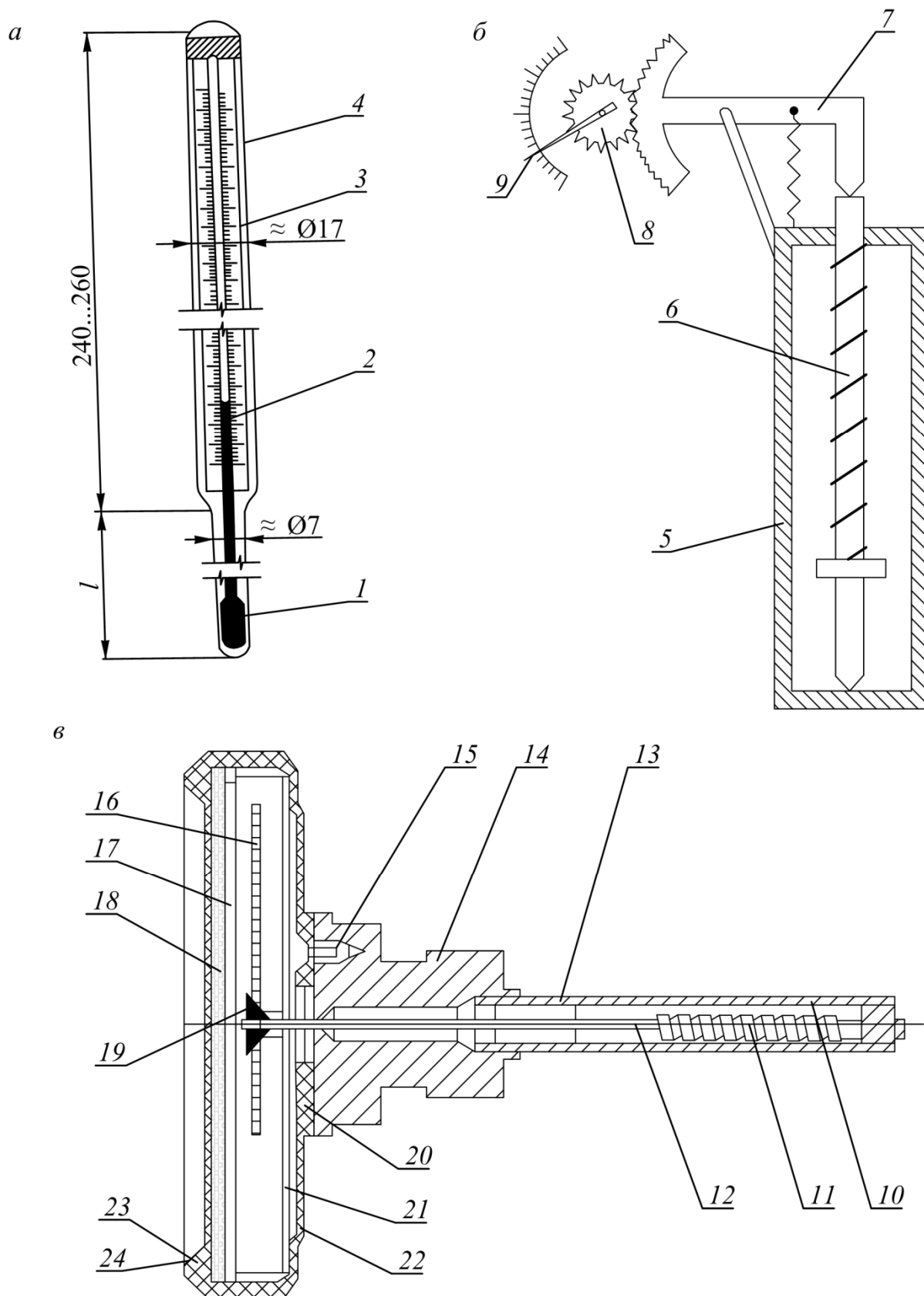


Рис. 2.1. Термометры расширения (а – жидкостный; б – стержневой; в – биметаллический): 1 – стеклянный резервуар; 2 – капилляр; 3, 21 – шкала; 4 – стеклянная оболочка; 5 – трубка; 6 – стержень; 7 – передача; 8 – шестерня; 9 – измеритель; 10 – труба; 11 – биметаллическая пружина; 12 – ось; 13, 22 – корпус; 14 – штуцер; 15 – винт; 16 – пружинное кольцо; 17, 20 – прокладка; 18 – стекло; 19 – стрелка; 23 – резиновое кольцо; 24 – обечайка

2.3. Манометрические термометры

Принцип работы манометрических термометров основан на использовании зависимости между температурой и давлением рабочего вещества в замкнутой герметической системе.

Схема устройства и внешний вид показывающего манометрического термометра представлена на рис. 2.2 [30]. Термосистема термометра состоит из термобаллона *1*, погружаемого в среду, температура которой измеряется, капилляра *2* и манометрической пружины *3*. Один конец пружины впаян в держатель *4*, канал которого соединяет полость манометрической пружины через капилляр с термобаллоном. Другой конец пружины герметизирован и соединен с сектором *6* с помощью поводка *5*. Сектор соединен с трибкой *7*, на оси которой находится указательная стрелка *8*. В передаточном механизме установлена предназначенная для выбора зазора спираль *9*, конец внутреннего витка которой закреплен на оси трибки.

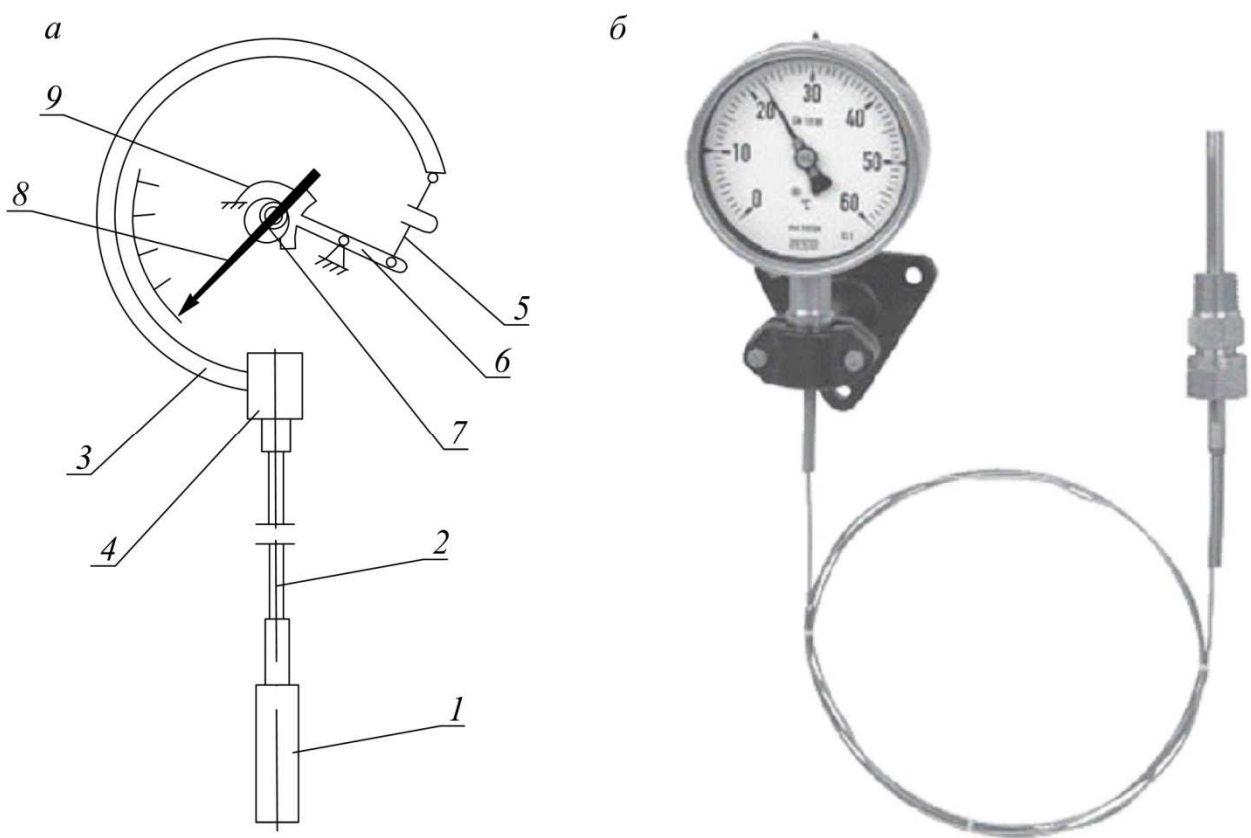


Рис. 2.2. Манометрический термометр (*а* – принципиальная схема; *б* – внешний вид): *1* – термобаллон; *2* – капилляр; *3* – манометрическая пружина; *4* – держатель; *5* – поводок; *6* – сектор; *7* – трибка; *8* – указывающая стрелка; *9* – спираль

При нагревании термобаллона в замкнутой герметизированной системе увеличивается давление газа, в результате чего пружина раскручивается и её свободный конец перемещается. Движение свободного конца пружины передаточным механизмом (поводком, сектором и трибкой) преобразуется в перемещение указателя относительно шкалы прибора. Меняется положение указателя на шкале термометра, которое указывает на значение температуры среды.

Манометрические термометры в зависимости от агрегатного состояния рабочего вещества, применяемого в термосистеме, подразделяются на газовые, конденсационные (парожидкостные) и жидкостные.

В газовых манометрических термометрах в качестве наполнителя, как правило, используют азот, аргон или гелий. Зависимость давления газа от температуры при постоянном объеме имеет вид

$$p_k = p_n [1 + \beta(t_k - t_n)], \quad (2.7)$$

где t_k, t_n – конечная и начальная температуры, °С; p_k, p_n – давления газа при температурах t_k и t_n , Па; β – коэффициент температурного расширения газа, K^{-1} , для идеального газа – $\beta = 0,003661 K^{-1}$; для азота $\beta = (0,003661 - 0,000013p_0)$.

Уравнение шкалы газового манометрического термометра согласно формуле (2.7) будет выглядеть следующим образом:

$$p_k - p_n = p_n \frac{\beta(t_k - t_n)}{1 + \beta t_n}, \quad (2.8)$$

где p_k, p_n – давление газа при температурах, соответствующих измеряемой температуре и началу шкалы термометра соответственно, Па.

Максимальная длина капиллярной трубки газовых термометров может достигать 60 м, так как в них отсутствует погрешность от дополнительного гидростатического давления.

Конденсационные манометрические термометры имеют термобаллон, заполненный ориентировочно на 3/4 жидкостью с низкой температурой кипения и на 1/4 насыщенным паром этой жидкости. Капилляр и манометрическая пружина также заполнены жидкостью. Количество жидкости должно быть таким, чтобы при максимальной температуре не вся жидкость переходила в пар.

В качестве заполнителя данных термометров применяют ацетон, хлористый метил, хлористый этил, спирт, толуол, фреон-22 и пр. Давление в термосистеме будет равно давлению насыщенного пара наполнителя, определяемому температурой измеряемой среды, в которой находится термобаллон. Если измеряемая температура ниже критического значения, зависимость давления насыщенного пара от температуры определяется однозначно. На показания данных термометров не будет оказывать влияние температура окружающей среды, однако для данных термометров существует гидростатическая погрешность, вызываемая разностью высот термобаллона и измерительного прибора. Для снижения влияния данной погрешности на результаты измерения длину капилляра принимают не более 10...25 м в зависимости от типоразмера прибора.

Жидкостные манометрические термометры заполняются пропиловым алкоголем, метансиолом, силиконовыми жидкостями и пр. Для жидкостных термометров устанавливается минимальная из манометрических термометров длина капилляра 0,6...10 м. Данные термометры существенно отличаются от газовых и конденсационных, так как в них применяются практически несжимаемые жидкости. Объем термобаллона таких термометров должен быть определен для конкретной рабочей жидкости, согласован с диапазоном измерения прибора, с изменением объема внутренней полости манометрической пружины при рабочем ходе её свободного конца и с изменением давления в термосистеме. При нагреве термобаллона от t_n до t_k жидкость расширяется, термобаллон увеличивает свой объем, рабочей жидкостью вытесняется в объеме:

$$\Delta V = V(\beta - 3\alpha)(t_k - t_n), \quad (2.9)$$

где V – внутренний объем термобаллона, м^3 ; β – объемный коэффициент расширения жидкости, K^{-1} ; α – коэффициент линейного расширения материала, K^{-1} ; t_k, t_n – конечная и начальная температуры жидкости соответственно, $^{\circ}\text{C}$.

Манометрические термометры могут выпускаться как показывающими, так и дополнительно оснащенными электронными устройствами для фиксации результатов измерений, они могут работать в условиях вибрации, взрывоопасных и пожароопасных помещениях.

2.4. Термопреобразователи сопротивления

Термопреобразователи сопротивления (ТС) являются наиболее распространенными преобразователями температуры, используемыми в цепях измерения и регулирования (системы регулирования расхода и температуры теплоносителя в автоматизированных индивидуальных тепловых пунктах, узлах смешения теплообменного оборудования приточных и приточно-вытяжных установках систем вентиляции и пр.). Принцип работы термопреобразователя сопротивления основан на зависимости электрического сопротивления R_t , Ом, термопреобразователя от измеряемой температуры t , °С.

Схема устройства термопреобразователя представлена на рис. 2.3, *а*. Чувствительный элемент (ЧЭ) *1* погружается в измеряемую среду, после чего измеряется его величина сопротивления. Результаты измерений изменения сопротивления чувствительного элемента передаются через выводы *3* к кабелю *10*, который присоединяется к вторичному устройству, где записывается и показывается численное значение измеренной температуры, определяемое по функциональной зависимости $R_t = f(t)$.

Чувствительный элемент представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки или пленки, с выводами для крепления соединительных проводов, имеющих известную зависимость $R_t = f(t)$. Чувствительные элементы термопреобразователей сопротивления могут изготавливаться из платины, меди и никеля [12]. Наибольшее распространение в настоящее время получили чувствительные элементы из меди и платины. Классификация термопреобразователей сопротивления в зависимости от типа чувствительного элемента представлена в табл. 2.3, где указаны классы допуска, регламентируемые ГОСТ [12], и температурный коэффициент α , °С⁻¹, термопреобразователя. Особенности конструкции чувствительных элементов в зависимости от изготавливаемого материала представлены на рис. 2.3 [16, 23].

Платиновый чувствительный элемент (рис. 2.3, *б*) состоит из двух спиралей *1* в каналах керамического каркаса *2*, заполненных порошком *3*. Порошок является изолятором и улучшает тепловой контакт проволоки с каркасом. Спи-

рали присоединены к контактам из платиновой или иридиевой проволоки 4. Торцы каркаса герметизируются специальной глазурью 5, каркас помещается в металлическую оболочку, которая заполняется порошком.

Медный чувствительный элемент состоит из медной изолированной проволоки, которая может быть либо намотана на каркас (рис. 2.3, в), либо быть бескаркасной (рис. 2.3, з), в этом случае отдельные слои проволоки скрепляются лаком и обертываются защитной фторопластовой пленкой. К недостаткам медных ТС и ЧЭ можно отнести интенсивную окисляемость и малое удельное сопротивление, что ограничивает диапазон измеряемых ими температур и требует большего расхода проволоки, а это увеличивает размеры ЧЭ.

Зависимость $R_t = f(t)$ чувствительного элемента (или термопреобразователя сопротивления) называется номинальной статической характеристикой [12].

Номинальная статическая характеристика R_t , Ом, для ТС или ЧЭ из платины рассчитывается по формуле

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3], \quad (2.10)$$

где t – температура чувствительного элемента (или измеряемой среды), °С; R_0 – номинальное сопротивление ТС (ЧС) при $t = 0$ °С, Ом; R_t – то же, при температуре t , Ом; A – постоянный коэффициент, °С⁻¹; B – то же, °С⁻²; C – то же, °С⁻⁴.

Номинальная статическая характеристика R_t , Ом, для ТС или ЧЭ из меди описывается следующей зависимостью:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt(t + 6,7) + Ct^3], \quad (2.11)$$

где A , B – то же, что и в формуле (2.10); C – постоянный коэффициент, °С⁻³.

Номинальная статическая характеристика R_t , Ом, для ТС или ЧЭ из никеля имеет следующий вид

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^2], \quad (2.12)$$

где A , B – то же, что и в формуле (2.10); C – постоянный коэффициент, °С⁻³.

Для измерения температур в диапазоне от –200 до 850 °С применяются платиновые ТС, от –200 до 200 °С – медные ТС; от –60 до 180 °С – никелевые ТС. В отдельных случаях ТС используют для измерения температур до 1000 °С.

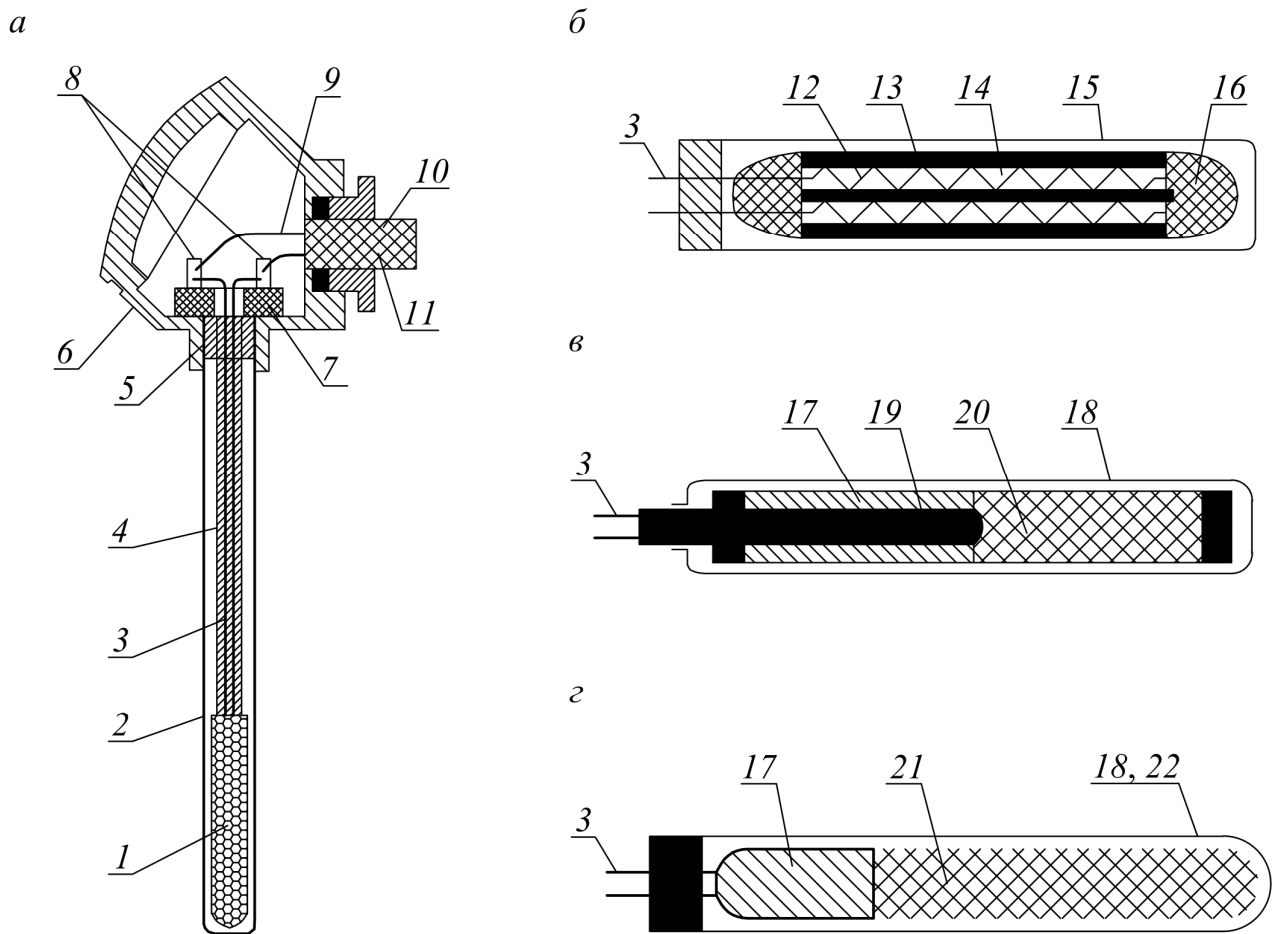


Рис. 2.3. Термопреобразователь сопротивления (*а* – общая схема; *б* – чувствительный элемент платинового термопреобразователя; *в* – то же медного термопреобразователя с каркасной обмоткой; *г* – то же медного термопреобразователя с бескаркасной обмоткой): 1 – чувствительный элемент; 2 – защитная арматура; 3 – выводы; 4 – изоляция; 5 – герметик; 6 – головка; 7 – клеммная сборка; 8 – зажимы; 9 – жилы кабеля; 10 – кабель; 11 – гайка; 12 – платиновая спираль; 13 – керамический каркас; 14 – изоляционный порошок; 15 – металлическая оболочка; 16 – глазурь; 17 – намотка; 18 – защитная оболочка; 19 – каркас; 20 – слой лака; 21 – фторопластовая оболочка; 22 – изолирующий порошок

Таблица 2.3

Классификация термопреобразователей сопротивления

Тип ТС	Обозначение	$\alpha, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Класс допуска		
			Проволочный ЧЭ	Пленочные ЧЭ	ТС
Платиновый	Pt	0,00385	W 0.1, W 0.15, W 0.3, W 0.6	F 0.1, F 0.15, F 0.3, F 0.6	AA, A, B, C
	П	0,00391	AA, A, B, C	AA, A, B, C	AA, A, B, C
Медный	М	0,00428	A, B, C	-	A, B, C
Никелевый	Н	0,00617	С	-	С

2.5. Термоэлектрические преобразователи

Термоэлектрический метод измерения температуры основан на зависимости термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС), развиваемой термопарой, от температуры её рабочего конца. Данные термопреобразователи являются одними из самых распространенных средств измерения температуры наряду с термопреобразователями сопротивления. Возникающая в цепи термопары ЭДС является результатом действия эффектов Зеебека и Томпсона. Эффект Зеебека связан с появлением ЭДС в месте спая двух разнородных проводников, величина ЭДС в данном случае будет зависеть от температуры спая. Эффект Томпсона связан с возникновением ЭДС в однородном проводнике при наличии разности температур на его концах.

Термоэлектрические преобразователи подразделяются на термопреобразователи общепромышленного и специального назначения. На рис. 2.4, *а* [16] представлена схема устройства термоэлектрических преобразователей общепромышленного назначения. Электроды 1 термопреобразователя выполняют из проволоки, обеспечивающей пренебрежимо малое сопротивление термопары и достаточную механическую прочность. Для изоляции термоэлектродов используются кварцевые или фарфоровые трубки 3. Рабочий спай 2 защищается механическим наконечником 5. Защитная арматура 4 присоединяется к головке 7, в которой располагается сборка 8 и зажимы 9. К зажимам 9 подводятся электроды термопары с одной стороны и термоэлектродные удлиняющие провода 10 через герметизированный ввод 11.

Специальные термопреобразователи изготавливаются на основе кабельных термопреобразователей, которые предназначены для измерения температур от -50 до 1000 °С и в основном используются в реакторной термометрии.

Схема устройства кабельного термопреобразователя представлена на рис. 2.4, *б*. Для измерения температуры в нескольких точках используются кабельные многозонные термопреобразователи (рис. 2.4, *в*).

Термопара – это два проводника из разнородных материалов, соединенных на одном конце и образующих часть устройства, использующих термо-

электрический эффект для измерения температуры. Общепринятые обозначения термопар в зависимости от наименования промышленного термопреобразователя представлены в табл. 2.4 [11].

Основными техническими характеристиками термопар являются номинальная статическая характеристика (НСХ), диапазон преобразований температур термопары и допусаемое отклонение от НСХ.

Номинальная статическая характеристика – это номинально приписываемая термопаре данного типа зависимость термо-ЭДС от температуры рабочего конца t при постоянно заданной температуре свободных концов, выраженная в милливольтгах и имеющая вид [11]

$$E = \sum_{i=0}^n A_i t^i, \quad (2.13)$$

где E – термо-ЭДС, мВ; A_i – безразмерный коэффициент.

Диапазон преобразований температур термопары – это установленный интервал температур термопары, в котором температура преобразуется в термо-ЭДС. Допускаемое отклонение от НСХ является величиной максимального отклонения термо-ЭДС термопары от номинального значения, удовлетворяющего техническим требованиям на термопару. Пределы допустимых отклонений термо-ЭДС от НСХ преобразования, выраженные в температурном эквиваленте для разных типов термопар в зависимости от диапазона рабочих температур, представлены в нормативной литературе [11].

Важным показателем, характеризующим термопару, является коэффициент преобразования (чувствительностью) термопары S , мВ/°С, который показывает отношение изменения термо-ЭДС ΔE , мВ, к вызвавшему его перепаду температуры рабочего конца Δt , °С. Чувствительность определяется по формуле

$$S = \frac{\Delta E}{\Delta t}. \quad (2.14)$$

Современные термопреобразователи сопротивления изготавливаются для проведения измерений в диапазоне от -270 до 2200 °С.

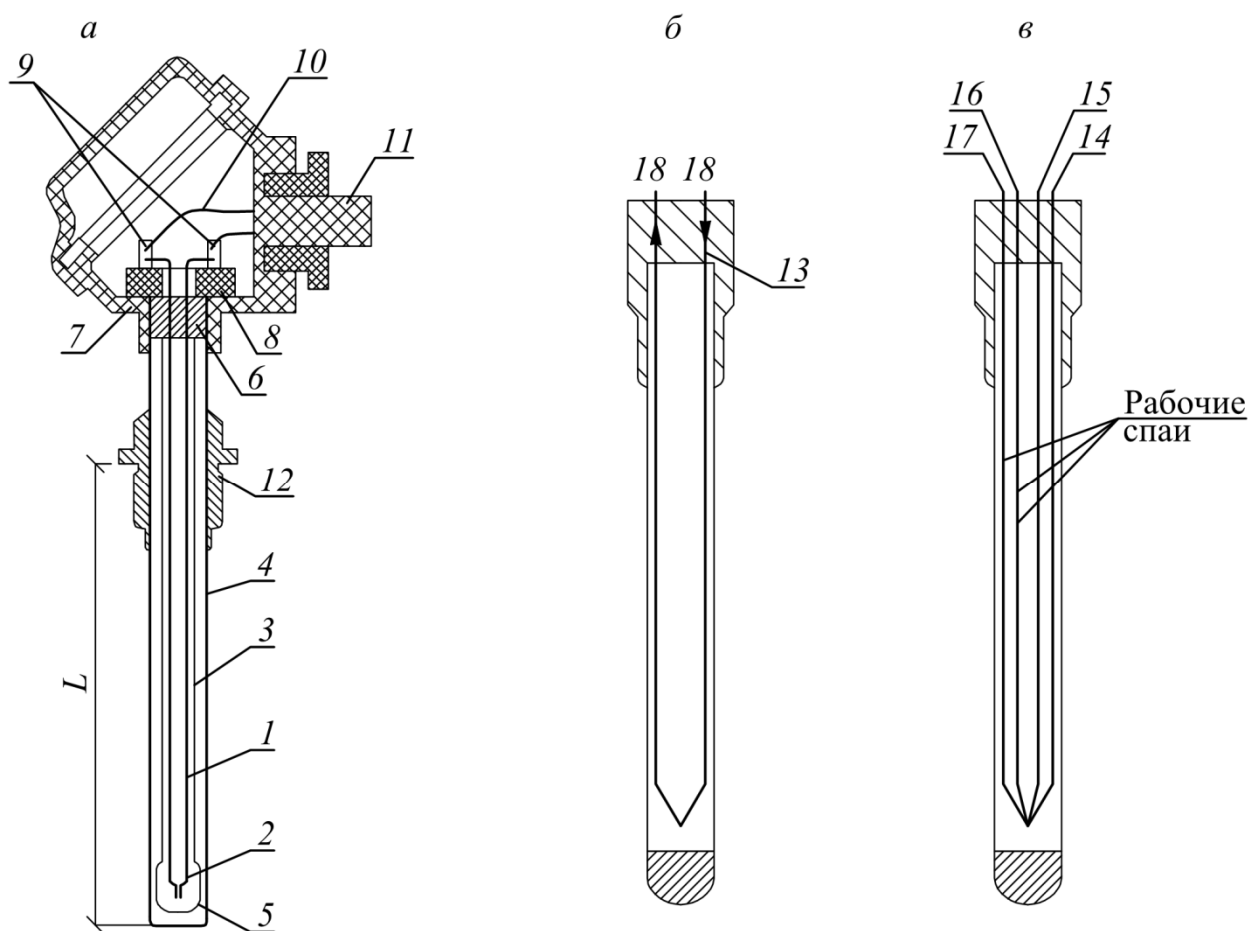


Рис. 2.4. Термоэлектрический преобразователь (*а* – общая схема; *б* – однозонный термоэлектрический преобразователь; *в* – многозонный термоэлектрический преобразователь): 1 – электроды; 2 – рабочий пай; 3 – трубка; 4 – защитная арматура; 5 – керамический накопечник; 6 – заливка; 7 – головка; 8 – сборка; 9 – зажимы; 10 – удлиняющий провод; 11 – герметизированный ввод; 12 – элементы крепления; 13 – герметик; 14, 15, 16, 17, 18 – жилы кабельного преобразователя

Таблица 2.4

Обозначения термопары в зависимости от наименования термопреобразователя

Обозначение типа термопары	Наименование промышленного термопреобразователя
R	ТПП (платина – 13 %; родий/платина)
S	ТПП (платина – 10 %; родий/платина)
B	ТПР (платина – 30 %; родий/платина – 6 %; родий)
J	ТЖК (железо/медь – никель (железо/константан))
T	ТМК (медь/медь – никель (медь/константан))
E	ТХКн (никель – хром/медь – никель (хромель/константан))
K	ТХА (никель – хром/никель – алюминий (хромель/алюминий))
N	ТНН (никель – хром – кремний/никель – кремний (нихросил/нисил))
A	ТВР (вольфрам – рений/вольфрам – рений)
L	ТХК (хромель-копель)
M	ТМК (медь/копель)

2.6. Дилатометрические термографы

Измерение температуры дилатометрическими термометрами основано на явлении теплового расширения твердых тел при нагревании. Приемником дилатометрических термометров служит биметаллическая пластина, состоящая из двух сваренных или спаянных разнородных металлических полосок с разными термическими коэффициентами расширения. При изменении температуры данные пластины изгибаются, а при закреплении одного из их концов другой конец будет перемещаться. Величина изгиба или перемещения пластинки показывает фактическую температуру окружающей среды. Данный способ широко используется в самописцах, регистрирующих изменение температуры наружного воздуха (термографах) на метеостанциях [13].

Схема дилатометрического термографа представлена на рис. 2.5. Термограф состоит из корпуса 7, закрывающегося крышкой 1. К стенке корпуса прикрепляется консоль 2, в вилку которой вставлена колодка 4 с биметаллической пластинкой 5. К биметаллической пластинке прикреплен рычаг 8, который, проходя через щель корпуса, шарнирно соединяется с тягой 12. Тяга соединена с осью 6, на которой закреплена стрелка 11 с пером 9. При изменении температуры свободный конец пластинки при помощи рычажной системы перемещает перо по ленте, которая закреплена на барабане 10. Барабан вращается вокруг своей оси с помощью часового механизма. Начальное положение пера относительно ленты устанавливается винтом 3. Перо представляет собой призму, заполненную специальными чернилами.

Термограф предназначен для регистрации плавных изменений температуры, так как при резких температурных колебаниях он за счет инерции может давать большие погрешности. Одним из преимуществ прибора является его безотказность и простота эксплуатации.

Прибор не является точным, что требует для получения более достоверных измерений вводить поправки на основании определения температуры воздуха (не менее четырех раз в сутки) по психрометрическому или любому другому точному термометру.

Обработка записей термографа проводится в такой последовательности: записи на ленте разбивают на часовые интервалы; определяются ежемесячные значения температуры; рассчитываются поправки для ежемесячных значений; вычисляют значения температур с учетом введенных поправок.

Результатом замеров температуры является нанесение температур с учетом поправок на ленту термографа, с указанием объекта, где проводились замеры, места установки прибора, даты и часа начала и окончания измерений, а также номера самописца.

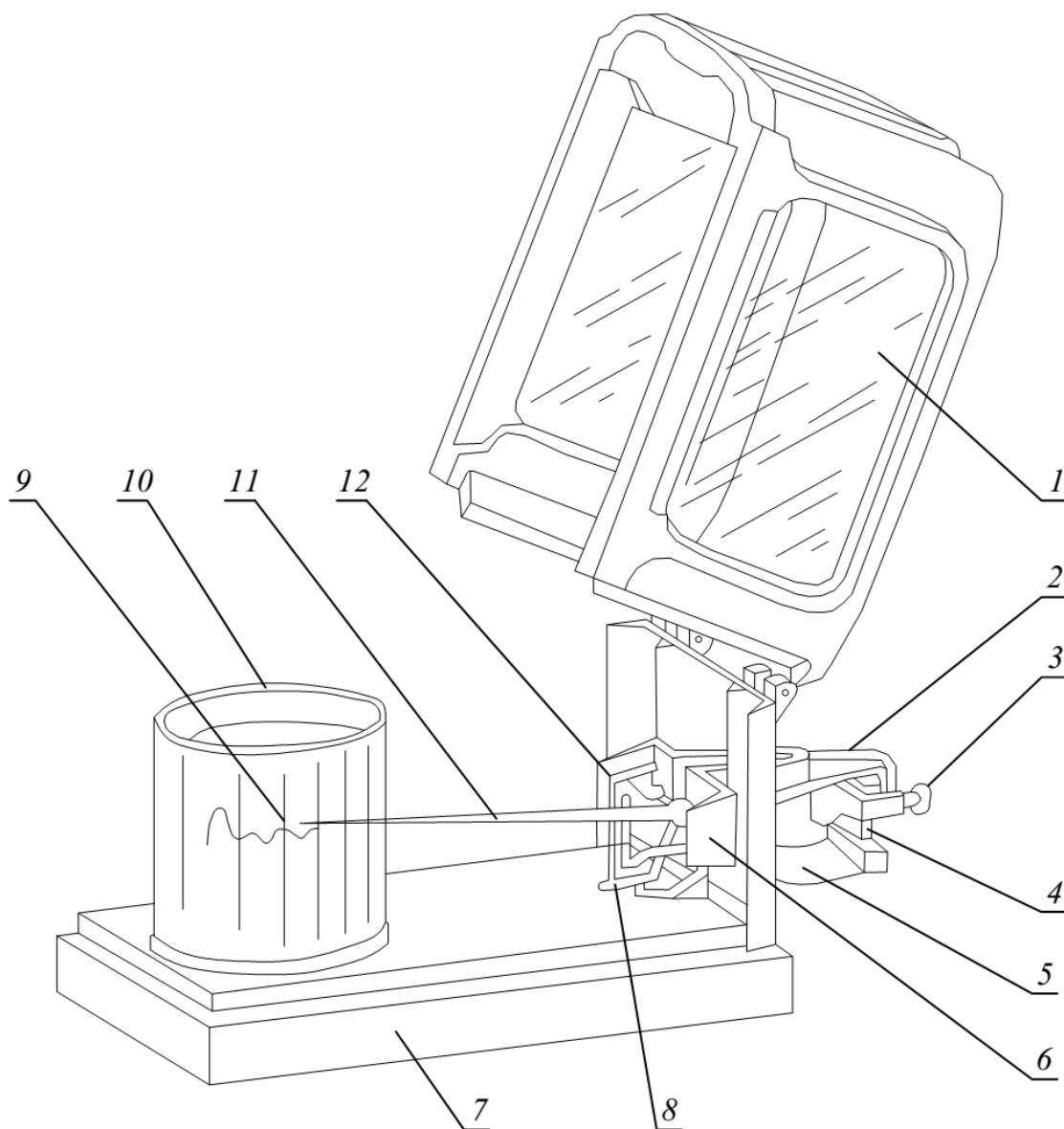


Рис. 2.5. Дилатометрический термограф: 1 – крышка; 2 – консоль; 3 – винт; 4 – колодка; 5 – биметаллическая пластина; 6 – ось; 7 – корпус; 8 – рычаг; 9 – перо; 10 – барабан; 11 – стрелка; 12 – тяга

2.7. Пирометры

Пирометры – это приборы для измерения температуры, действие которых основано на измерении теплового излучения.

Пирометры предназначены для контроля температур от 100 до 6000 °С. К главным достоинствам пирометров следует отнести возможность проведение дистанционного контроля за температурой объектов, находящихся на значительном расстоянии от прибора, а также отсутствие влияния измерительного прибора на объект исследования. Пирометры подразделяются на пирометры частичного и полного излучения и спектрального отношения.

Пирометры частичного излучения измеряют яркостную температуру объекта. Яркостной температурой нечерного тела, имеющего температуру T , К, называется такая температура $T_{я}$, К, абсолютно черного тела, при которой его яркость (светимость) для узкой области спектра равна яркости (светимости) исследуемого тела в той же спектральной области при температуре T .

Действительная температура объекта измерений находится в следующей зависимости от яркостной температуры измеряемой пирометром [43]:

$$T = \left(\frac{1}{T_{я}} - \frac{\lambda}{b} \ln \frac{1}{\varepsilon} \right), \quad (2.15)$$

где λ – длина волны монохроматического излучения, м; b – постоянная Вина, $b = 0,002897$ м·К; ε – степень черноты тела для данной длины волны.

К данному типу пирометров относятся оптические и фотоэлектрические пирометры. Рассмотрим наиболее распространенный тип данных приборов – оптический пирометр с исчезающей нитью (рис. 2.6 [29]).

Принцип действия данного пирометра основан на сравнении яркости монохроматического излучения эталонного тела (лампы накаливания) и объекта измерений. Оптическую систему прибора наводят на тело и передвигают объектив с целью получения четкого изображения объекта и нити лампы. Затем включают источник тока и регулируют яркость нити с помощью реостата до тех пор, пока её средняя часть не сольется с освещенным телом. С милливольтметра снимают показания, соответствующие яркостной температуре $T_{я}$.

Максимальная температура, измеряемая оптическими пирометрами, как правило, составляет 1400 °С, что связано с распылением вольфрамовой нити лампы при более высоких температурах. При установке серого светофильтра, обеспечивающего максимальную температуру нагрева нити не более 1400 °С, верхний предел измерений прибора может быть значительно увеличен. В современном приборостроении выпускаются пирометры с диапазоном измеряемых температур до нескольких тысяч градусов.

Пирометры спектрального отношения применяются для определения цветовой температуры объекта измерения. Цветовая температура $T_{ц}$, К, – это температура реального тела, при которой отношения плотностей потоков излучения абсолютно черного тела и реального тела будут равны при действительной температуре T для двух длин волн λ_1 и λ_2 . Зависимость действительной температуры тела T от цветовой $T_{ц}$, измеряемой пирометром, имеет вид [43]

$$T = \left(\frac{1}{T_{ц}} - \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}\right)}{b\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)} \right)^{-1}, \quad (2.16)$$

где; $\varepsilon_{\lambda_1}, \varepsilon_{\lambda_2}$ – степень черноты физического тела для лучей с длиной волны соответственно λ_1, λ_2 ; b – постоянная Вина.

Принципиальная схема пирометра спектрального отношения с фотоэлементом приведена на рис. 2.7 [26]. Измеряемое излучение через защитное стекло объектива попадает на фотоэлемент. Между объективом и фотоэлементом установлен вращающийся obtюратор. Obtюратор представляет собой диск с двумя отверстиями, одно из них закрыто красным светофильтром, а другое – синим. При вращении obtюратора на него попеременно попадают излучения, соответствующей спектральной энергетической яркости E_1 и E_2 , Вт/(м²·ср·нм), так как $E_1 = f(\lambda_1)$ и $E_2 = f(\lambda_2)$, то $T_{ц} = f(E_1/E_2)$. Вырабатываемые фотоэлементом попеременные импульсы электрического тока подаются на электронный усилитель и логарифмирующее устройство, где преобразуются в ток I , мА.

Значения напряжения U , мВ, электрического тока I выводятся на милливольтметр, который отградуирован на показание цветовой температуры $T_{ц}$. Определив значение $T_{ц}$, рассчитывают температуру T по формуле (2.16).

Предел измерения современных пирометров спектрального отношения составляет от 300 до 2800 °С с относительной погрешностью измерений ± 1 °С.

Пирометры полного излучения предназначены для измерения радиационной температуры объекта. Радиационная температура T_p , К, – это такая температура, при которой полная мощность абсолютно черного тела равна полной энергии излучения данного тела при действительной температуре T .

В пирометрах полного излучения (рис. 2.8 [6]) используется тепловое действие полного излучения нагретого тела. Чувствительным элементом в радиационных пирометрах является термобатарея из нескольких миниатюрных последовательно соединенных термопар. Рабочие спаи термопар нагреваются излучением, фокусируемым объектом измерения с помощью оптической системы. Возникающая термо-ЭДС измеряется с помощью милливольтметра, градуированного в градусах радиационной температуры T_p , К.

Для перевода действительной температуры тела через радиационную температуру, измеряемую пирометром, используют зависимость [43]

$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}, \quad (2.17)$$

где ε – степень черноты исследуемого объекта.

Пирометры полного излучения применяются для измерения объектов с невысокой температурой, при которых отсутствует видимое излучение, в том числе измерения температуры тел, более холодных, чем окружающая среда.

Современные пирометры полного излучения применяются для измерения температур объектов в диапазоне от -40 до 3500 °С.

Абсолютная погрешность измерения температуры с применением пирометров полного излучения возрастает с увеличением измеряемой действительной температуры t , °С, и составляет: при $t = 1000$ °С – $\Delta t = \pm 12$ °С; при $t = 2000$ °С – $\Delta t = \pm 20$ °С; при $t = 3000$ °С – $\Delta t = \pm 35$ °С.

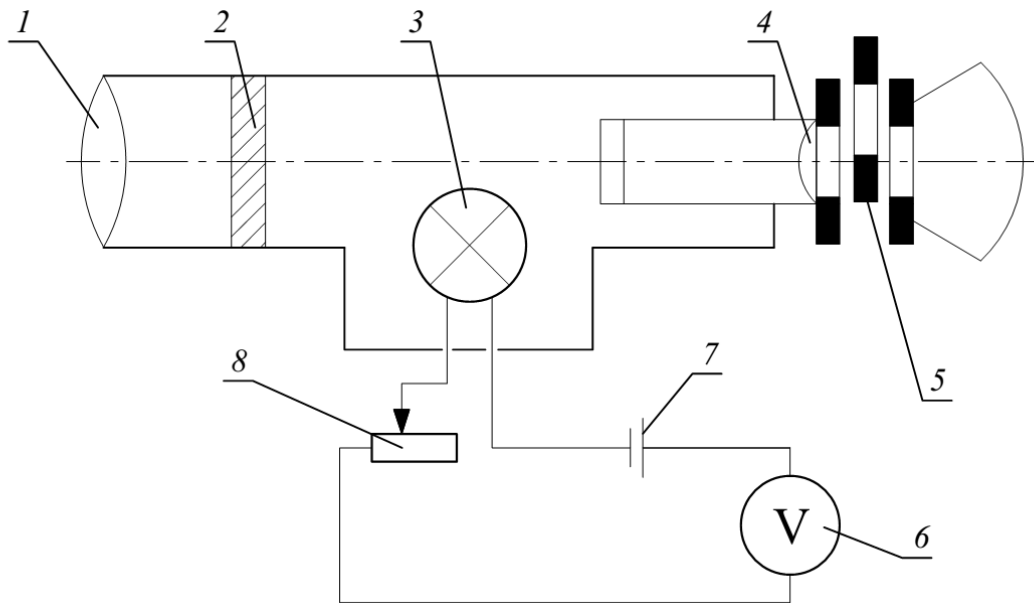


Рис. 2.6. Схема оптического пирометра с исчезающей нитью: 1 – линза; 2 – поглощающий светофильтр; 3 – лампа накаливания; 4 – линза окуляра; 5 – красный светофильтр; 6 – милливольтметр; 7 – источник тока; 8 – реостат

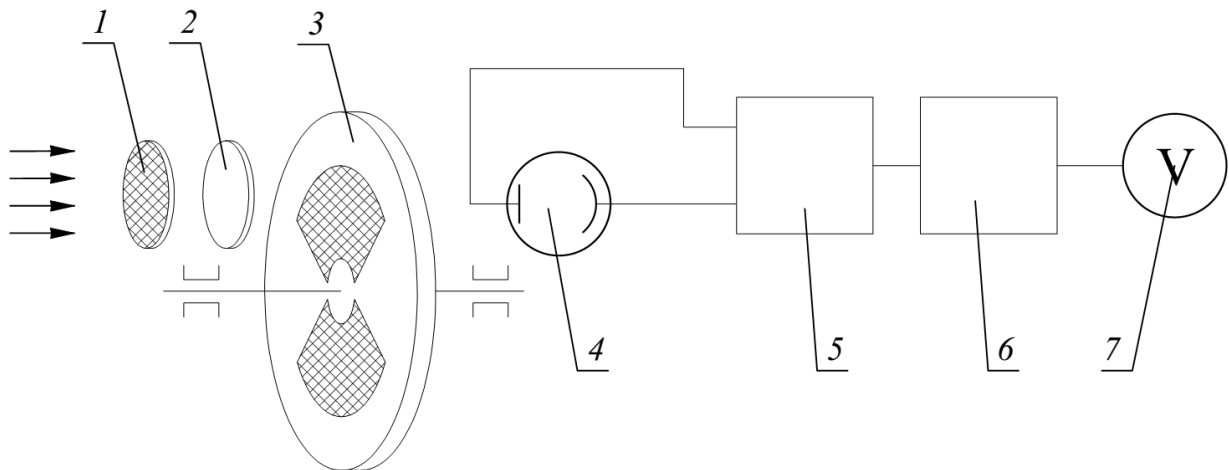


Рис. 2.7. Схема пирометра спектрального отношения с фотоэлементом: 1 – защитное стекло; 2 – объектив; 3 – obtюратор; 4 – фотоэлемент; 5 – электронный усилитель; 6 – логарифмирующее устройство; 7 – милливольтметр

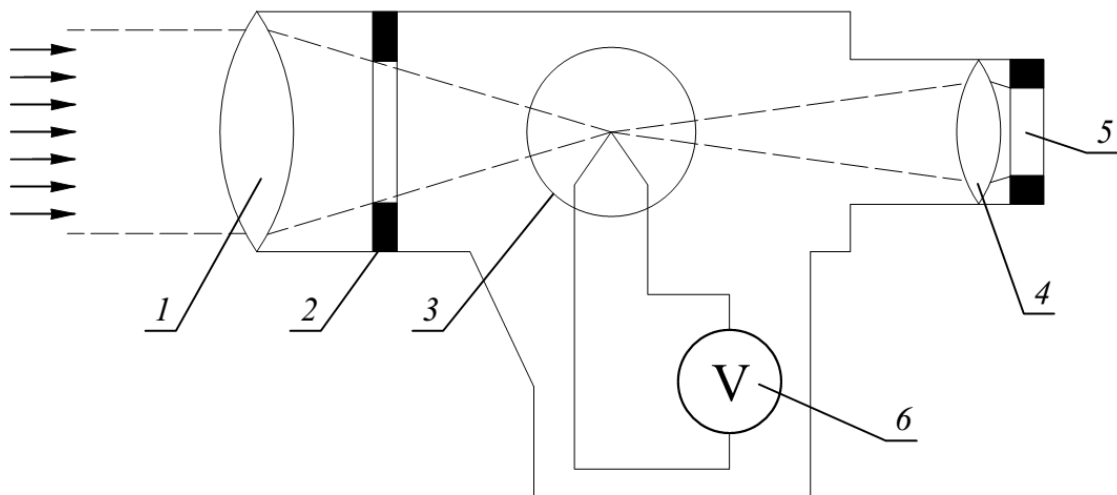


Рис. 2.8. Схема пирометра полного излучения: 1, 4 – линзы; 2 – диафрагма; 3 – термо-батарея; 5 – окуляр; 6 – милливольтметр

2.8. Тепловизоры

Тепловизоры – это оптико-электронные приборы пассивного типа, работающие в инфракрасном диапазоне спектра излучения. Тепловизоры предназначены для теплового неразрушающего контроля наружных ограждающих конструкций, оборудования и систем тепло- и электроэнергетики [3, 4].

Принцип работы тепловизоров заключается в принятии и обработке инфракрасного излучения объекта исследования с преобразованием его в видимое изображение теплового поля (термограмму).

По способу получения изображения тепловизоры подразделяются на сканирующие (оптико-механические) и матричные.

В зависимости от спектрального диапазона тепловизоры делятся на коротковолновые (длина волны от 3 до 5 мкм соответствует средневолновому инфракрасному диапазону) и длинноволновые (длина волны от 8 до 14 мкм).

Оптико-механические тепловизоры производятся с 50-х годов XX века. Наибольшее распространение получили два типа оптико-механического сканирования: использование вращающихся во взаимно перпендикулярных направлениях кремниевых призм; использование колеблющихся зеркал.

Схема работы оптико-механического тепловизора приведена на рис. 2.9. Излучение объекта попадает в объектив, в котором происходит его сканирование по кадрам с помощью плоского колеблющегося зеркала, а по строке – вращающейся пропускающей призмой. Затем излучение направляется через плоское зеркало и систему линз в одноэлементный приемник. С целью поддержания рабочей температуры приемника его охлаждают жидким азотом. От приемника полученный сигнал направляется к блоку, в котором происходят усиление, аналого-цифровое преобразование, корректировки и формирование изображения термограммы, выводимой на дисплей.

В конце XX века были разработаны матричные фотодетекторы, не имеющие движущихся механических частей. Современные матрицы используют фотонные и тепловые ИК-приемники. Наибольшее распространение в настоящее

время получили фотонные матрицы на основе таких соединений, как силицид платины PtSi, антимонид индия IsSb и арсенид галлия GaAs.

Принципиальная схема работы **матричного тепловизора** приведена на рис. 2.10. Принцип его работы заключается в фокусировке инфракрасного излучения исследуемого объекта, попавшего в область зрения тепловизора, с помощью оптической системы линз объектива на матричный фотодетектор, выполненный из кристаллов кремния, в котором происходит изменение электрического сопротивления или напряжения. Изменения обрабатываются в блоке аналого-цифрового преобразования. Сформированное изображение распределения температуры отображается на дисплей.

Температуры, отображаемые на дисплее тепловизора $T_{\text{теп}}$, К, находятся в следующей зависимости от фактической температуры объекта T , К [3]:

$$T_{\text{теп}} = \left[\varepsilon T^n + (1 - \varepsilon) T_{\text{отр}}^n \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (2.18)$$

где ε – коэффициент излучения объекта измерения; $T_{\text{отр}}$ – отраженная температура, К; T – температура объекта измерения, К; n – показатель степени, характеризующий зависимость функции Планка при изменении температуры.

Отраженной температурой $T_{\text{отр}}$ является средняя температура окружающей среды и объектов излучения, определяемая по методу диффузно отражающей алюминиевой фольги. Отраженная температура является важным показателем, который вводится в интерфейс тепловизора при проведении измерений.

Современные тепловизоры изготавливаются в стационарном и переносном исполнении с функцией аудиозаписи и видеотермографирования.

Диапазон измерений тепловизоров, применяемых для решения профессиональных задач теплового неразрушающего контроля заданий, сооружений и инженерных систем, составляет от -30 до 650 °С с абсолютной и относительной погрешностью ± 2 °С и ± 2 % соответственно.

К наиболее известным отечественным и зарубежными производителям тепловизионного оборудования следует отнести «Иртис», Fortuna, RGK, Fluke, FLIR Systems, «Инфратех», Testo и др.

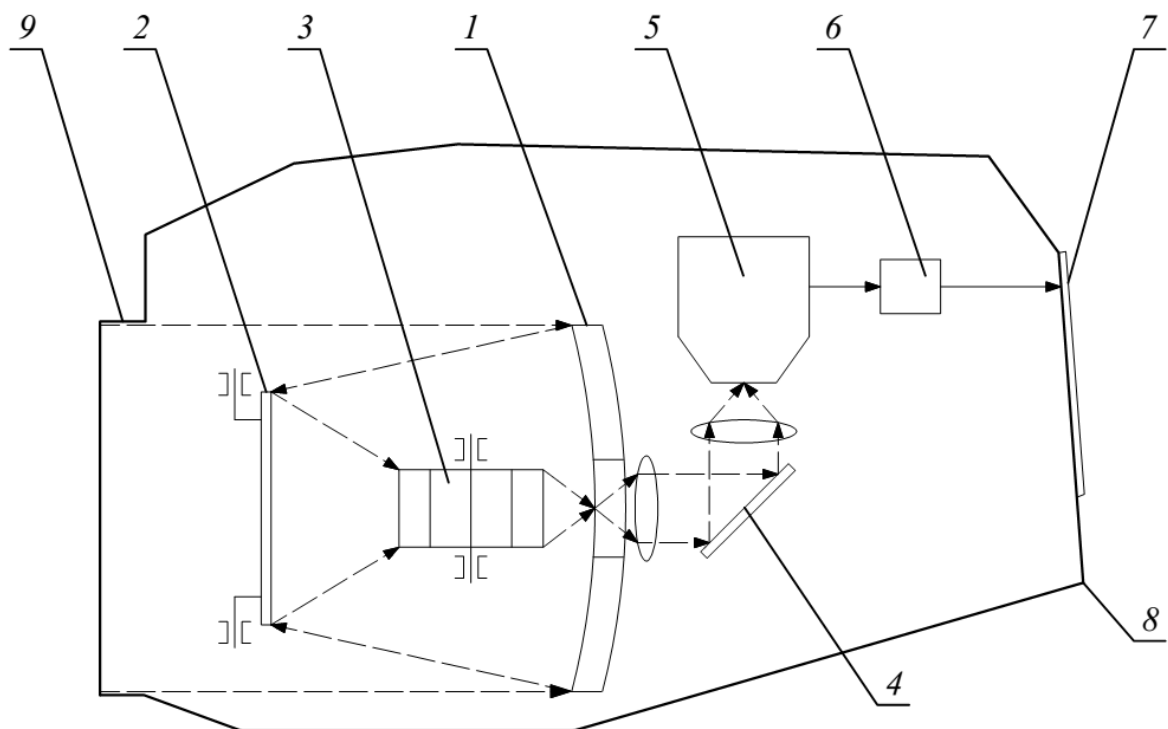


Рис. 2.9. Принципиальная схема оптико-механического тепловизора: 1 – зеркальный объектив; 2 – плоское колеблющееся зеркало; 3 – вращающаяся призма; 4 – плоское зеркало; 5 – приемник; 6 – блок усиления, аналого-цифрового преобразования, корректировки и формирования изображения; 7 – дисплей; 8 – корпус; 9 – вход объектива

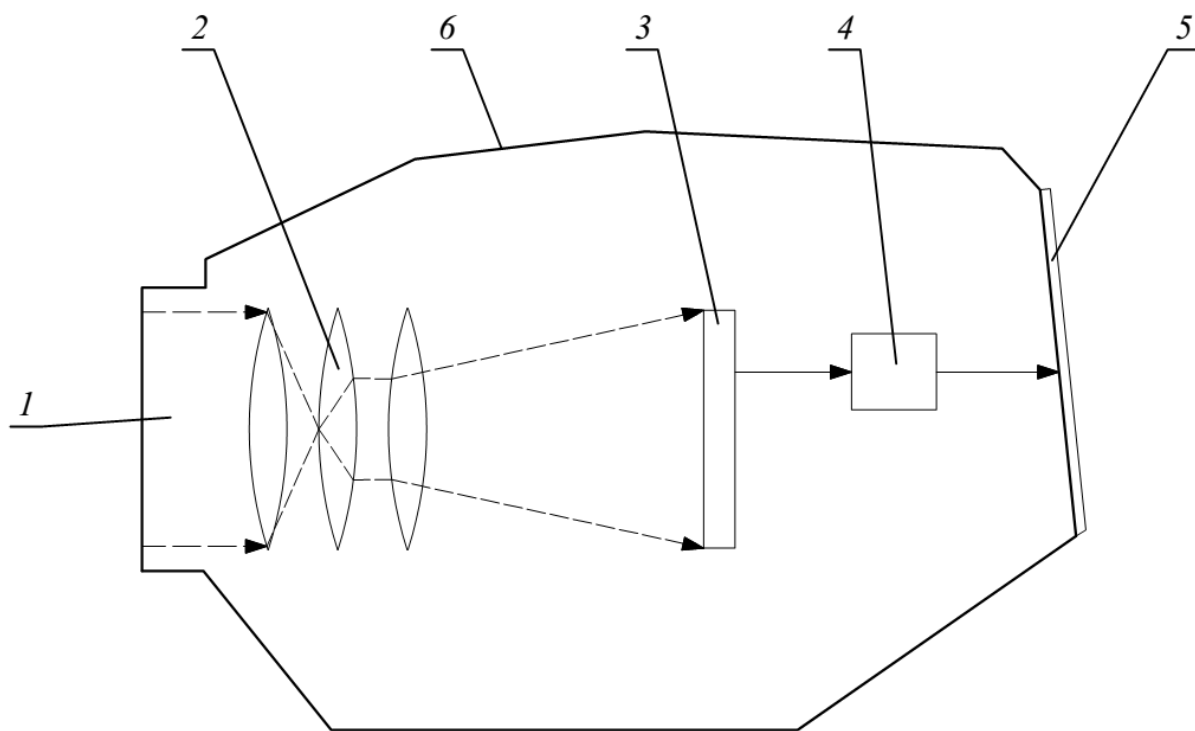


Рис. 2.10. Принципиальная схема матричного тепловизора: 1 – объектив; 2 – система линз объектива; 3 – матричный фотодетектор; 4 – блок аналого-цифрового преобразования, корректировки и формирования изображения; 5 – дисплей; 6 – корпус

2.9. Контрольные вопросы и задания для практических занятий и самостоятельной работы

Контрольные вопросы.

1. Что такое температура?
2. Опишите принцип работы жидкостных термометров.
3. Перечислите основные конструкции биметаллических термометров.
4. Физический смысл номинальной статической характеристики термопреобразователя сопротивления.
5. В чем заключается принцип работы манометрических термометров?
6. Из каких термоэлектрических материалов изготавливаются термопары?
7. Что такое номинальная статическая характеристика и чувствительность термопары термоэлектрического преобразователя?
8. Для каких целей применяются дилатометрические термографы?
9. Приведите классификацию пирометров.
10. Что такое тепловизор. Приведите классификацию тепловизоров по способу получения изображения (термограммы).
11. Принцип работы оптико-механических тепловизоров.

Задание для практической работы.

Требуется определить поправку на температуру выступающего столбика Δt и действительные показания t_d жидкостного термометра ТТЖ-М. Исходные данные приведены в табл. 2.5.

Задания для самостоятельной работы.

Подготовить доклад в формате презентации с использованием средств Microsoft Office PowerPoint на следующие темы.

1. Эталон температуры в системе СИ.
2. Контактные термометры. Устройство и принцип работы.
3. Измеритель плотности тепловых потоков.
4. Тепловизионное обследование наружных ограждающих конструкций.

Таблица 2.5

Исходные данные для определения поправки и действительной температуры,
измеренной термометром расширения

Номер варианта	Высота выступающего столба n , дел.	Температура градуировки $t_{гр}$, °С	Температура окружающей среды $t_{в}$, °С	Температура по термометру t , °С
1	67	24	39	167
2	61	25	39	116
3	67	23	30	149
4	42	23	34	157
5	65	25	33	158
6	57	24	35	119
7	57	22	36	167
8	62	24	39	126
9	48	20	34	80
10	69	21	38	179
11	49	25	32	164
12	65	24	32	157
13	63	21	34	181
14	64	24	40	94
15	41	21	34	124
16	60	22	32	120
17	41	21	32	152
18	54	22	37	96
19	41	21	38	105
20	51	23	38	99
21	55	25	30	126
22	45	23	35	146
23	70	20	40	94
24	48	24	34	125
25	47	20	39	166
26	61	24	38	181
27	53	21	38	116
28	48	25	35	83
29	40	23	30	77
30	60	22	34	170

Примечание. Термометрическая жидкость – ртуть

Глава 3. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

3.1. Общие сведения об измерении давления

Давление p , Па, – это физический параметр, равный отношению перпендикулярного поверхности тела вектора силы F , Н, к площади данной поверхности S , м² и определяемый по формуле

$$p = \frac{F}{S}. \quad (3.1)$$

При проведении измерений определяют следующие виды давлений:

- 1) абсолютное – измеряемое относительно абсолютного нуля давления;
- 2) барометрическое p_b , Па, – абсолютное давление земной атмосферы;
- 3) избыточное, вакуумметрическое – давления, измеряемые относительно барометрического давления, т.е. давления большие либо меньшие, чем оно.
- 4) дифференциальное – разность между двумя измеряемыми значениями давлений, каждое из которых не является атмосферным.

Абсолютное давлением p_a , Па, находится в следующей зависимости от избыточного $p_{изб}$, Па, и атмосферного $p_{ат}$, Па, давлений:

$$p_a = p_{изб} + p_{ат}. \quad (3.2)$$

Понятие вакуумметрического давления $p_{вак}$, Па, вводится при измерении давления, величина которого ниже атмосферного $p_{вак} < p_{ат}$. Избыточное давление, напротив, больше атмосферного $p_{изб} > p_{ат}$.

Дифференциальное давление $p_{диф}$, Па, определяется по формуле

$$p_{диф} = p_2 - p_1, \quad (3.3)$$

где p_1, p_2 – давление в двух точках замера, не равные атмосферному, Па.

В системе СИ единицей измерения давления является паскаль, Па, определяемый как отношение Н/м². В практике технических измерений часто применяют более удобные для конкретного типа измерений единицы, в том числе внесистемные, зависящие друг от друга следующим образом:

$$1 \text{ ат} = 0,97 \text{ атм} = 0,98 \text{ бар} = 10 \text{ м вод. ст} = 735 \text{ мм рт. ст} = 0,98 \cdot 10^{-5} \text{ Па}. \quad (3.4)$$

Погрешность расчетов по формуле (3.4) не превышает 0,5 %.

Техническая атмосфера, ат, – единица измерения, равная давлению, производимому силой в 1 кгс, равномерно распределённой по перпендикулярной к ней плоской поверхности площадью 1 см², 1 ат = 98 066,5 Па.

Единица измерения, называемая баром, является внесистемной и в ранее используемой системе СГС составляла 1 дин/см².

Метр водяного столба, м в. ст, равен гидростатическому давлению столба воды высотой 1 м и температурой 4 °С (1 м вод. ст = 9806,65 Па).

Миллиметр ртутного столба, мм рт. ст, равен гидростатическому давлению столба ртути высотой 1 мм и плотностью $\rho = 13,595 \cdot 10^3$ кг/м³ при ускорении свободного падения $g = 9,806$ м/с².

В практике проведения измерений также выделяют нормальную (физическую) атмосферу, атм, равную давлению столба ртути высотой 760 мм на его горизонтальное основание при её плотности $\rho = 13,595 \cdot 10^3$, температуре 0 °С и ускорении свободного падения $g = 9,806$ м/с² (1 атм = 101 325 Па = 1,03 ат).

Приборы для измерения давления обобщенно называют манометрами. Существует большое разнообразие данных приборов, основным элементом которых является измерительный преобразователь давления (датчик давления).

Приборы для измерения давления подразделяются:

1) по принципу действия на жидкостные (*U*-образные, чашечные), деформационные (трубчатые, мембранные, сильфонные), электрические (резистивные, емкостные, пьезоэлектрические) и грузопоршневые;

2) по виду измеряемого давления на манометры; вакуумметры; барометры; мановакуумметры; дифманометры; микроманометры; тягомеры и напоромеры;

3) по области применения на общепромышленные, или технические, лабораторные, образцовые, специальные и эталонные;

4) по способу отображения результатов измерения на показывающие, сигнализирующие и регистрирующие.

5) по выходному сигналу преобразователя давления на аналоговые (пневматические, взаимной индуктивности, электрические) и цифровые.

3.2. Жидкостные манометры

Жидкостные манометры подразделяются на *U*-образные и чашечные. Данные приборы отличаются относительной простотой конструкции, обеспечивающей достаточную относительную погрешность для технических и лабораторных измерений, которая обычно не превышает 1 %.

Принципиальная схема двухтрубного дифференциального ***U*-образного манометра** представлена на рис. 3.1. Две вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки *1, 2* закреплены на металлическом или деревянном основании *3*, к которому прикреплена пластина с нанесенной шкалой *4*. Трубки заполнены рабочей жидкостью до нулевой отметки. Трубка *1* находится под измеряемым давлением, а трубка *2* сообщается с атмосферой. При измерении разности давлений к трубкам *1, 2* подводят патрубки с измеряемыми давлениями.

Величина измеряемого давления, или перепада давлений Δp , Па, определяется по следующим зависимостям с учетом разности уровней жидкости в стеклянных трубках h , м:

$$\Delta p = p_a - p_b = \rho g h, \quad (3.5)$$

$$h = \frac{(p_a - p_b)}{\rho g}, \quad (3.6)$$

где ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

В качестве рабочей жидкости может использоваться вода, ртуть, спирт, трансформаторное масло и др.

Двухтрубные манометры с водяным заполнением применяются для измерения давления, разрежения, разности давлений воздуха и неагрессивных газов в интервале ± 10 кПа, при использовании в качестве рабочей жидкости ртути – верхний предел измерения может быть увеличен до 0,1 МПа.

Чашечные манометры (рис. 3.2) состоят из стеклянной трубки *2*, соединенной с сосудом в виде чашки *1*. В конструкции чашки имеется измерительный патрубок *4* для подключения к измеряемой среде. В связи с тем что площадь живого сечения чашки значительно больше площади живого сечения трубки, отсчет по шкале *3* проводится только по перепаду высоты в трубке.

Погрешность измерений при этом зависит от соотношения площадей сечения трубки f_1 , м², и чашки f_2 , м², и чем оно меньше, тем больше погрешность измерений. В конструкциях чашечных манометров обычно $S_1/S_2 \leq 1/400$.

Давление при измерении чашечным манометром определяется по следующей общепринятой зависимости:

$$\Delta p = p_a - p_6 = \rho g h_2 \left(1 + \frac{f_1}{f_2} \right), \quad (3.7)$$

где ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³.

Для измерения давления и разности давлений до 3 кПа, как правило, используются микроманометры. Известны различные конструкции микроманометров: дифференциальный манометр Рекнагеля, тягомер Крелля, микроманометр Фюсса и др.

Наибольшее распространение в нашей стране получили лабораторные **микроманометры** типа ММН с наклонной измерительной трубкой, принципиальная схема, которых представлена на рис. 3.3.

Показания манометра определяются высотой столбика рабочей жидкости по шкале измерительной трубки l . Трубка имеет наклон, под углом α . Величина измеряемого давления определяется по формуле [7]

$$\Delta p = p_a - p_6 = \rho g n \left(\frac{f}{F} + \sin \alpha \right), \quad (3.8)$$

где f , F – площади поперечного сечения широкого сосуда и трубки, м²; n – отсчет по шкале прибора; α – угол наклона шкалы прибора.

При определенной плотности рабочей жидкости ρ , в качестве которой используют спирт, и нормальном ускорении свободного падения g разность давлений определяется по формуле

$$\Delta p = p_a - p_6 = n K k, \quad (3.9)$$

где K – коэффициент, соответствующий пяти фиксированным положениям измерительной трубки относительно сектора 4 от 0,2 до 0,8, которые соответствуют пределам измерения от 0,6 до 2,5 кПа; k – коэффициент, учитывающий фактические значения температуры и крепости спирта.

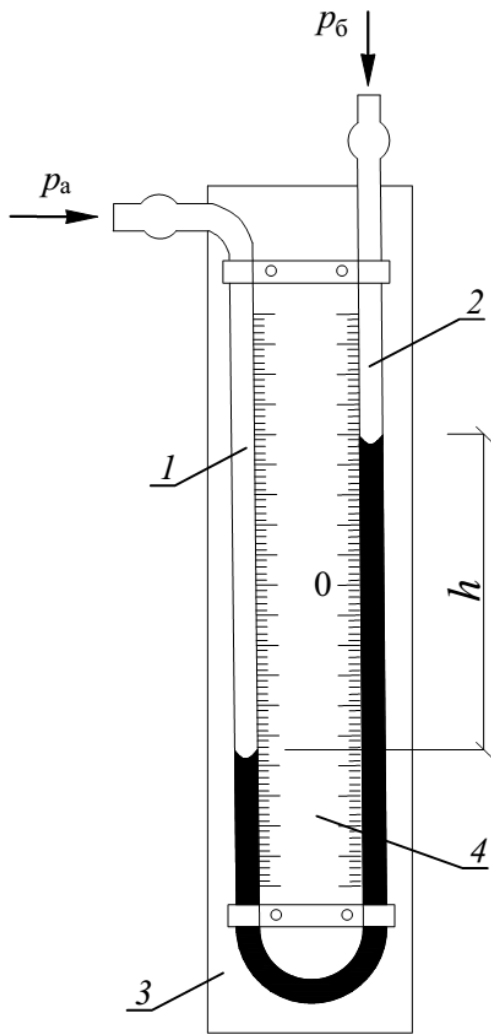


Рис. 3.1. U-образный манометр:
1, 2 – стеклянные трубки; 3 – основание;
4 – шкальная пластина

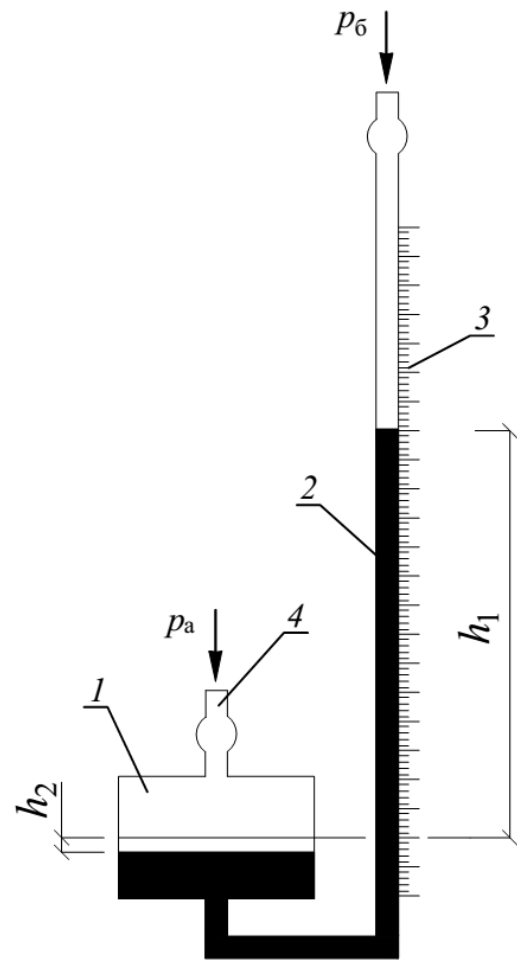


Рис. 3.2. Чашечный манометр: 1 – чашка;
2 – стеклянная трубка; 3 – шкальная
пластина; 4 – измерительный патрубок

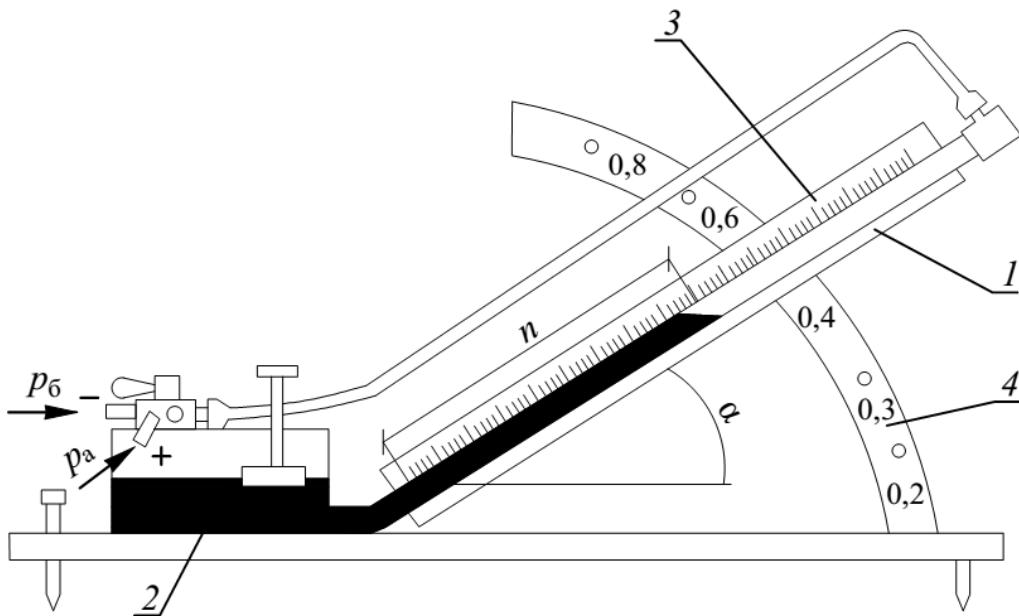


Рис. 3.3. Микроманометр многодиапазонный с наклонной трубкой:
1 – измерительная трубка; 2 – сосуд; 3 – кронштейн; 4 – сектор

3.3. Деформационные манометры

Принцип работы деформационных манометров заключается в определении деформации чувствительного элемента под действием измеряемого давления. В зависимости от конструкции чувствительного элемента деформационные манометры подразделяются на трубчатые, мембранные и сильфонные.

Внешний вид трубчатого манометра приведен на рис. 3.4.

Трубчатые манометры являются измерительными приборами прямого преобразования, в которых давление последовательно преобразуется в перемещение чувствительного элемента и связанного с ним механически показывающего, регистрирующего или контактного устройства.

Схема работы трубчатого манометра приведена на рис. 3.4 и 3.5 [35]. Одновитковая трубчатая пружина 1 с одного конца приварена к держателю 2, прикрепленному к корпусу манометра. Нижняя часть держателя заканчивается шестигранной головкой и штуцером, с помощью которого к манометру подсоединяется трубка, подводящая давление. Свободный конец пружины присоединяется к пробке 3, соединенной с поводком 4 шарниром. Под действием подведенного давления пружина 1 перемещается, приводя в движение поводок 4. При перемещении свободного конца пружины поводок поворачивает зубчатый сектор 5 относительно оси 8, поворачивая шестерню 6 и сидящую на одной оси с ней показывающую стрелку 7, которая отображает результаты измерения давления на шкале измерительного прибора.

Величина измеряемого давления p , Па, находится в пропорциональной зависимости от перемещения трубки l , мм:

$$p = lk, \quad (3.10)$$

где k – коэффициент пропорциональности, Па/мм.

При достижении определенного давления, называемого пределом пропорциональности p_p , Па, данная зависимость перестает быть линейной. В трубке также возникают остаточные деформации, из-за которых прибор выходит из строя. Для увеличения срока службы измерительной трубки рекомендуется принимать наибольшее рабочее давления $p_{\text{раб}}$, Па, в 1,35...2,5 раза меньше p_p .

Современные трубчатые манометры применяются для измерения давлений до 1000 МПа. Схожий принцип работы имеют металлические барометры (анероиды), работающие аналогично барометрам Види и Бурдона, которые предназначены для измерения величины атмосферного давления

Конструкция **мембранного манометра** показана на рис. 3.6. Данные приборы имеют чувствительный элемент в виде мембраны и предназначены для измерения избыточных давлений, разрежений и перепадов давлений.

Мембрана манометра 9 представляет собой диск, помещенный в измерительный блок (фланцы 8, 10). Под действием давления мембрана изменяет свое положение, воздействуя на тягу 6, которая приводит в движение зубчатый сегмент 4, перемещающий измерительную стрелку 2.

В зависимости от применяемого материала мембраны делятся на упругие и вялые. Упругие мембраны изготавливают из тонких металлических пластин (бронзовых, латунных, стальных), а вялые – из прорезиненных тонких тканей (капроновых, шелковых, полотняных). Мембраны, имеющие ребра жесткости, называются гофрированными, а без ребер жесткости – плоскими.

Положение мембраны находится в функциональной зависимости от измеряемого давления и определяется её формой и материалом, наличием гофр и другими факторами. Выбор конструкции диафрагмы мембранного манометра удобнее проводить опытным путем.

В зависимости от величины измеряемого давления (при малых давлениях или разрежениях) мембраны могут собираться в мембранные коробки (на сварке), а мембранные коробки – в мембранные блоки.

Схема **сильфонного манометра** изображена на рис. 3.7. Принцип работы сильфонного манометра аналогичен мембранному. Рабочим органом манометра служит сильфон, представляющий собой тонкостенную металлическую камеру с гофрированными боковыми поверхностями.

Измеряемое давление p_1 (перепад давлений $p_1 - p_2$) в приведенных манометрах зависит от величины прогиба мембраны и изменения положения сильфона, пропорциональных перемещению тяги зубчатого сегмента h (рис. 3.7).

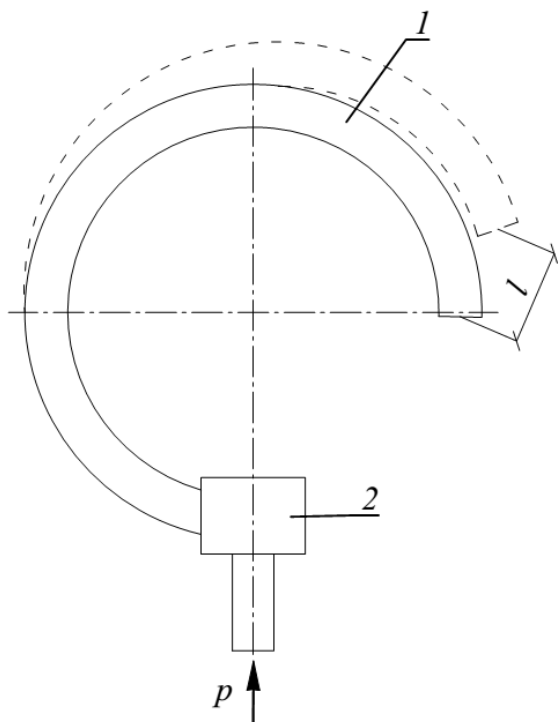


Рис. 3.4. Трубочатая пружина Бурдо:
1 – трубка; 2 – держатель

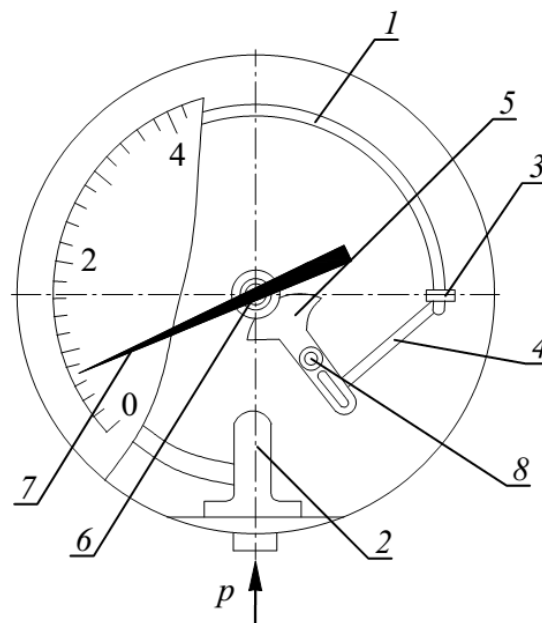


Рис. 3.5. Схема трубчатого манометра:
1 – трубчатая пружина; 2 – держатель;
3 – пробка; 4 – поводок; 5 – зубчатый сектор;
6 – шестерня; 7 – измерительная стрелка;
8 – ось вращения зубчатого сектора

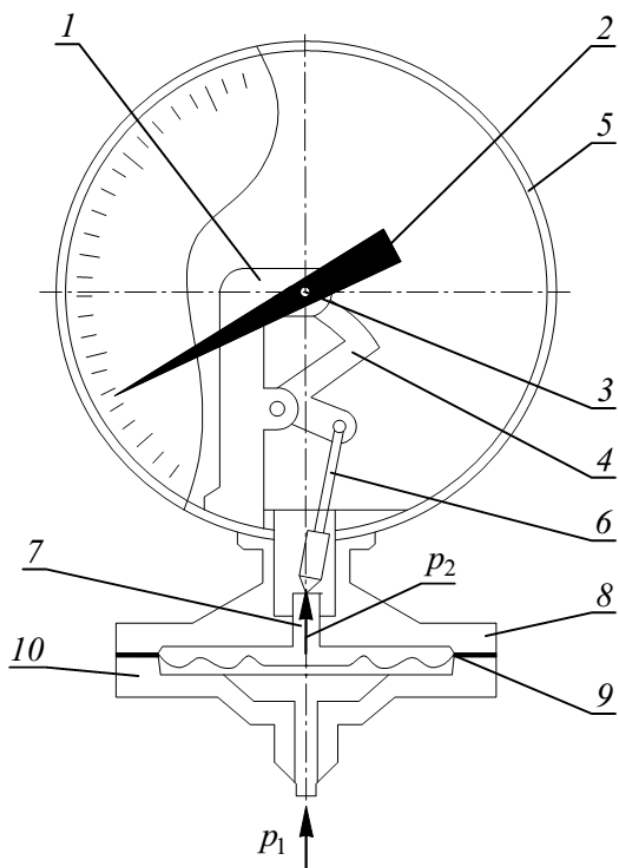


Рис. 3.6. Схема мембранного манометра:
1 – стойка; 2 – измерительная стрелка;
3 – ось; 4 – зубчатый сегмент; 5 – корпус;
6 – тяга; 7 – жесткий центр; 8, 10 – фланцы;
9 – мембрана

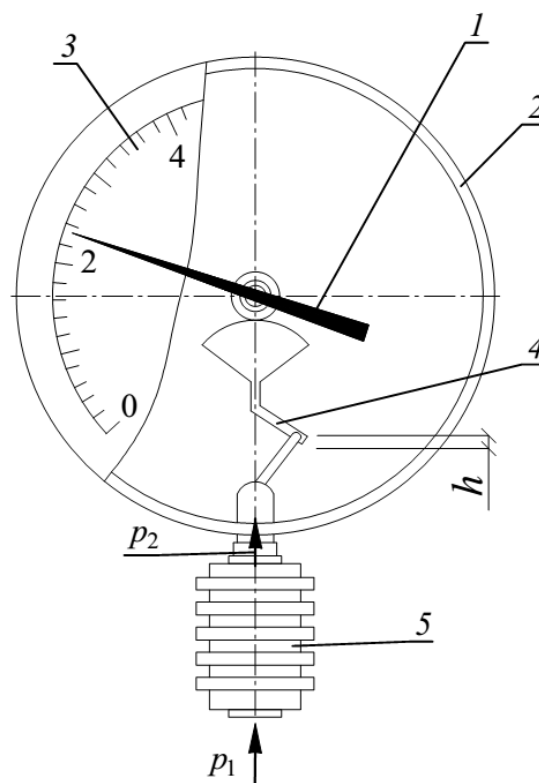


Рис. 3.7. Схема сифонного манометра:
1 – измерительная стрелка; 2 – корпус;
3 – шкала; 4 – зубчатый сектор;
5 – сиффон

3.4. Электрические манометры

Принцип действия электрических манометров основан на использовании зависимости измеряемого давления от электрических характеристик (активное сопротивление, емкость и др.). По типу преобразователя электрические манометры подразделяются на емкостные, пьезоэлектрические и тензорезисторные.

Емкостные манометры – это приборы, принцип действия которых заключается в определении емкости конденсатора, зависящей от величины измеряемого давления. По конструкции преобразователя давления емкостные конденсаторы подразделяются на датчики (рис. 3.8): с изменяющейся величиной зазора δ , м, между пластинами конденсатора; с изменяющейся площадью S , м², взаимного перекрытия пластин, зависящей от длины перекрытия l , м, и ширины пластин b , м; с изменяющейся диэлектрической проницаемостью материала между пластинами конденсатора.

Емкость конденсатора C , Ф, определяется по формуле [2]

$$C = \frac{ES}{\delta}, \quad (3.11)$$

где E – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды между пластинами, Ф/м; S – площадь перекрытия пластин, м².

Емкостные манометры имеют следующие преимущества: простота конструкции; компактность; высокая точность и стабильность показаний; высокая чувствительность. Следует отметить основные недостатки прибора: потребность в источнике напряжения высокой частоты; необходимость в усилении сигнала первичного преобразователя; большое внутреннее сопротивление; экранирование с целью снижения влияния паразитных емкостей.

Пьезоэлектрические манометры – это приборы для измерения давления, работа которых основана на свойствах кристаллических веществ (кварц, турмалин, титанат бария и др.) создавать электрические заряды в результате механического воздействия на них. Данные приборы применяются для измерения давлений в быстропротекающих процессах, так как возникновение электрического заряда происходит мгновенно при приложении силы.

Наиболее распространенным материалом для изготовления пьезоэлектрических датчиков является кварц, который имеет ряд конкурентных преимуществ: низкая стоимость; высокие пьезоэлектрические свойства; механическая прочность; удовлетворительные изоляционные свойства; независимость пьезоэлектрической характеристики от температуры измеряемой среды до 500 °С.

На рис. 3.9 [26] приведена схема образования электрических зарядов на гранях кварцевого кристалла, при его сжатии в определенном направлении.

В конструкции кристалла можно выделить три оси симметрии: z – продольная (оптическая); x – поперечная (электрическая) ось, проходящая через ребра призмы перпендикулярно оси z ; y – поперечная (механическая, нейтральная) ось, проходящая через грани призмы перпендикулярно им и осям z , x .

В зависимости от величины силы сжатия либо растяжения меняется количество образованных зарядов, а следовательно, и разность потенциалов между гранями. Заряд q , Кл, образующийся на гранях:

$$q = kpS, \quad (3.12)$$

где k – пьезоэлектрическая постоянная, Кл/Н; p – измеряемое давление, Н/м²; S – площадь грани, на которую действует измеряемое давление, м².

Пьезоэлектрический датчик работает по принципу электрического конденсатора. Количество электричества q , появляющееся под воздействием механической силы, заряжает грани пьезоэлемента и соединенные с ним проводники до напряжения U , В, рассчитываемого по формуле

$$U = \frac{q}{C}, \quad (3.13)$$

где C – емкость между проводниками, Ф.

Устройство пьезоэлектрического манометра показано на рис. 3.10.

Измеряемое давление равномерно распределяется по поверхности кварцевых пластин. Кварцевые пластины 1 крепятся между металлическими электродом $б$, который соединен с электрическим выводом 3 , проходящим через экранированную гайку 2 из диэлектрика. Кварцевые пластины обычно расположены таким образом, что в измерительную схему подается отрицательный по-

тенциал. Положительный потенциал подается на корпус. Для уменьшения утечки зарядов применяется качественная изоляция, для достижения которой поверхность кварцевых пластин тщательно полируют.

Пьезоэлектрические манометры используются для измерения давлений до 100 МПа при температуре измеряемой среды до 500 °С в быстропротекающих процессах. Пьезоэлектрическая постоянная кварца не зависит от температуры до 500 °С, при температурах в интервале от 500 до 570 °С кварцевые кристаллы теряют пьезоэлектрические свойства, а по достижении температуры 570 °С их пьезоэлектрическая постоянная $k = 0$.

Тензорезисторные манометры – это приборы для измерения давления, принцип работы которых основан на явлении тензоэффекта, который заключается в изменении активного сопротивления R , Ом, некоторых материалов при их механической деформации.

В зависимости от способа крепления чувствительных элементов к датчику тензорезисторные манометры подразделяются на наклеиваемые и неклеиваемые. По конструктивному исполнению тензопреобразователя они делятся на проволочные, фольгированные и полупроводниковые [17, 43].

Проволочный тензопреобразователь, принципиальная схема которого приведена на рис. 3.11, *а*, представляет собой отрезок тонкой проволоки диаметром от 0,02 до 0,05 мм, наклеенной в виде зигзага на тонкую целлофановую подложку и закрытой сверху клеевым либо лаковым составом. Активное сопротивление R проволочных тензопреобразователей составляет от 10 до 1000 Ом.

Фольгированные тензопреобразователи (рис. 3.11, *б–г*) изготавливаются в виде решетки из фольги толщиной от 0,004 до 0,012 мм. Они имеют большую площадь поперечного сечения проводника и большую теплоотдачу, что позволяет им пропускать больший ток по сравнению с проволочными. По форме решетки фольгированные тензопреобразователи подразделяются на круговые, короткобазовые и типовые. Активное сопротивление составляет 30...250 Ом.

Основным недостатком проволочных и фольгированных тензопреобразователей является низкий диапазон рабочих температур от –40 до 70 °С.

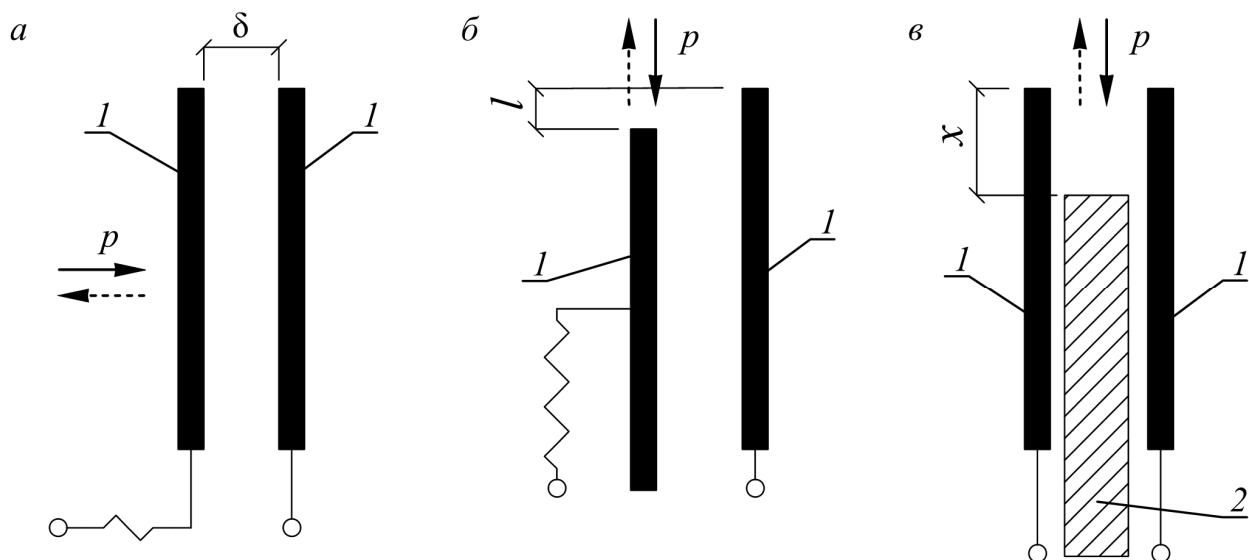


Рис. 3.8. Емкостные датчики давления (*а* – с изменяющейся величиной зазора; *б* – с изменяющейся площадью; *в* – с изменяющейся диэлектрической проницаемостью): *1* – пластины конденсатора; *2* – диэлектрик

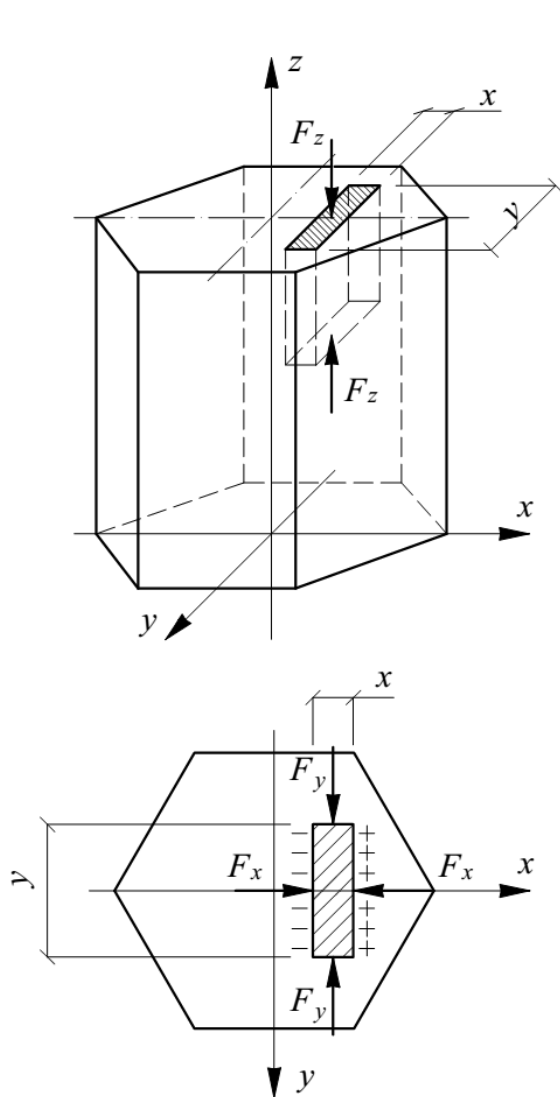


Рис. 3.9. Схема кристалла кварца

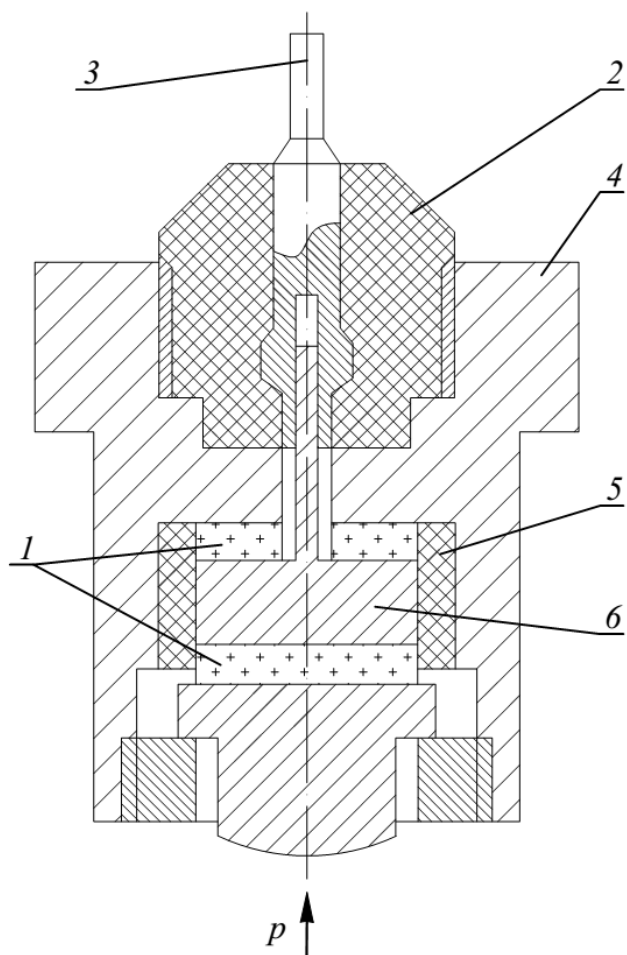


Рис. 3.10. Схема устройства пьезоэлектрического манометра: *1* – пьезопластины; *2* – гайка из диэлектрика; *3* – электрический вывод; *4* – корпус; *5* – изолятор; *6* – металлический электрод

Внешний вид чувствительного элемента полупроводникового тензопреобразователя приведен на рис. 3.12. Он состоит из сапфировой подложки 3, на которой нанесены тензорезисторы 4. Подложка присоединена серебросодержащим припоем 3 к титановой мембране 1.

Чувствительный элемент является составной частью измерительного преобразователя давления (рис. 3.13 [42]). Мембранный тензопреобразователь 3 помещен внутрь основания 9. Внутренний канал 4 тензопреобразователя заполнен кремнийорганической жидкостью и отделен от измеряемой среды металлической гофрированной мембраной 6, присоединенной к основанию 9. Полость 10 сообщается с атмосферным воздухом. Измеряемое давление действует на мембрану тензопреобразователя 3, вызывая ее прогиб и изменение сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя передается в электронный блок 1 по проводам через гермовывод 2.

Изменение активного сопротивления ΔR , Ом, тензопреобразователей при их деформации Δl , мм, характеризуется безразмерным параметром, называемым коэффициентом тензочувствительности по сопротивлению m :

$$m = \frac{\Delta R}{R} \frac{l}{\Delta l}, \quad (3.14)$$

где R – активное сопротивление полупроводника, Ом; ΔR – изменение активного сопротивления полупроводника, Ом; l – характерный размер полупроводника в направлении деформации, мм; Δl – величина деформации, соответствующая измерению активного сопротивления ΔR , мм.

Коэффициент тензочувствительности для германия и кремния имеет наибольшие значения ($m = 140...175$). Большой тензочувствительностью обладают полупроводниковые соединения GaSb, InSb, PbTe и пр.

Основными преимуществами полупроводниковых тензопреобразователей являются высокий диапазон рабочих температур от -160 до 1500 °С и защищенность чувствительного элемента от агрессивных сред. К недостаткам тензопреобразователей следует отнести малую механическую прочность, нелинейность характеристики, малую гибкость и нестабильность параметров.

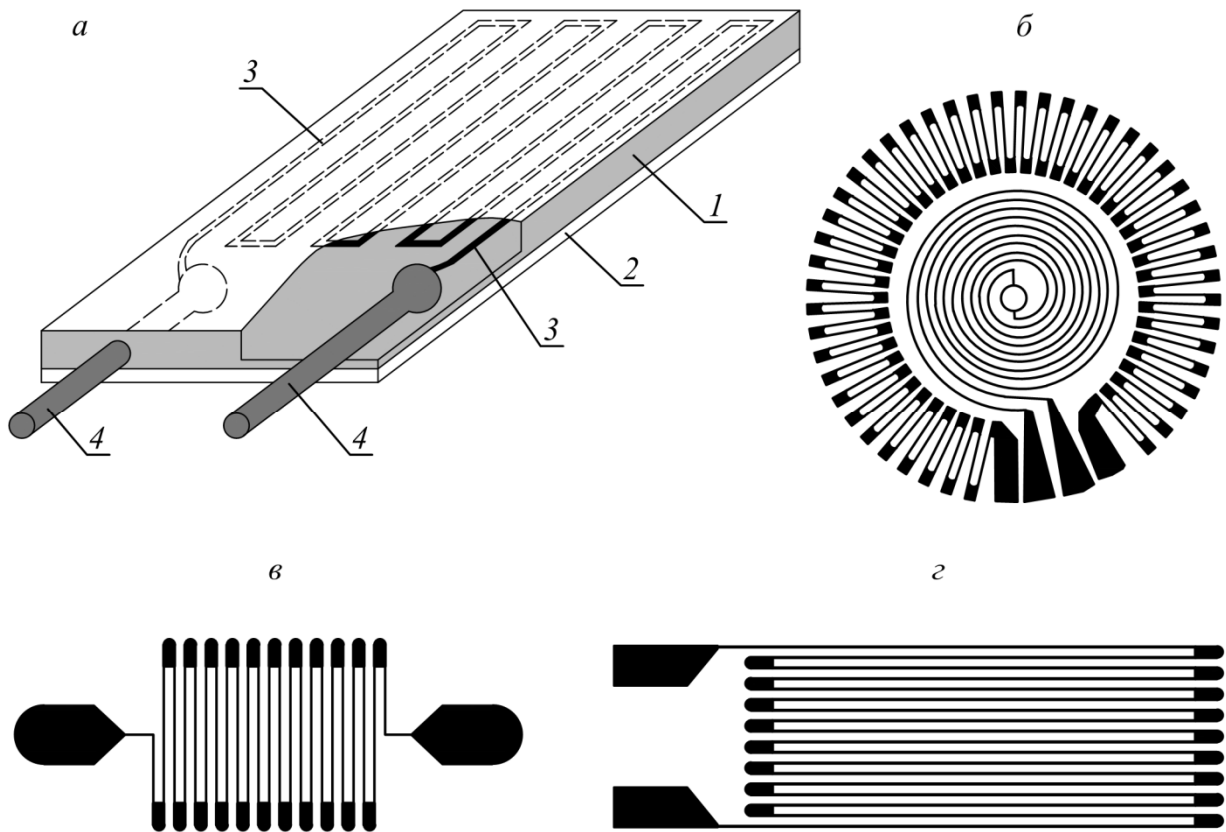


Рис. 3.11. Проволочные и фольгированные тензопреобразователи: *а* – наклеиваемый проволочный тензопреобразователь (*1* – клей, либо лак; *2* – подложка из целлофана; *3* – тензочувствительная проволока; *4* – медные выводы); *б* – фольгированный круговой; *в* – то же короткобазовый; *г* – то же типовой конструкции

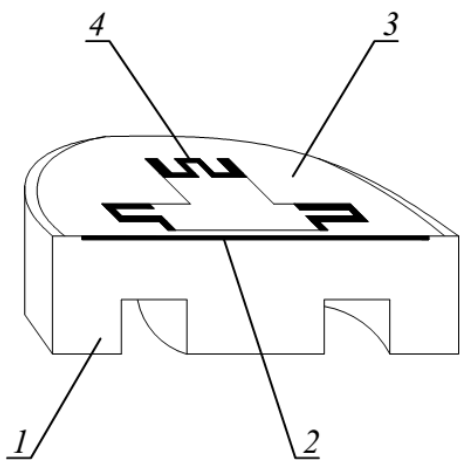


Рис. 3.12. Принципиальная схема чувствительного элемента полупроводникового тензопреобразователя: *1* – титановая мембрана; *2* – серебросодержащий припой; *3* – сапфировая подложка; *4* – тензорезисторы

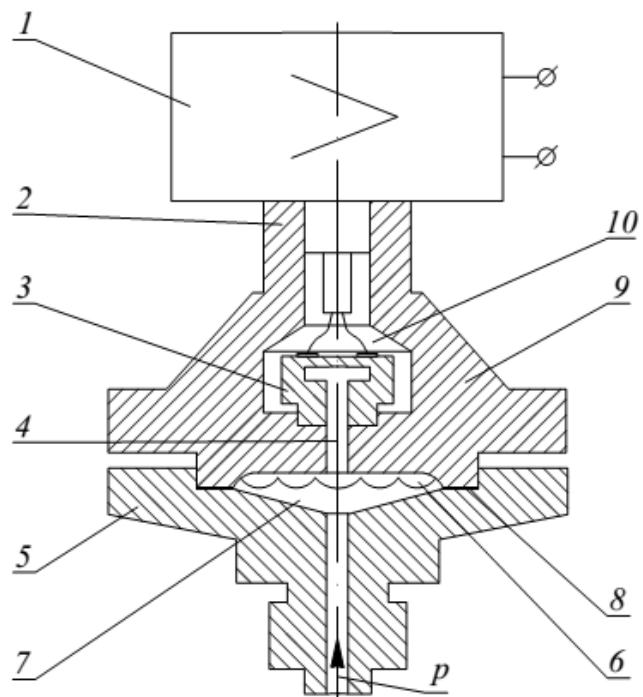


Рис. 3.13. Конструкция измерительного преобразователя: *1* – электронный блок; *2* – гермовывод; *3* – тензопреобразователь; *4* – канал; *5* – фланец; *6* – измерительная мембрана; *7* – измерительная камера; *8* – прокладка; *9* – основание; *10* – внутренняя полость.

3.5. Грузопоршневые манометры

Принцип действия грузопоршневого манометра основана на уравнивании сил, создаваемых измеряемым давлением, и грузов, которые действуют на поршень, расположенный в цилиндре.

Схема грузопоршневого манометра приведена на рис. 3.14 [17, 43]. Манометр условно разделен на грузовую и поршневую части. Система манометра заполняется рабочей жидкостью (как правило, трансформаторным, вазелиновым или касторовым маслом) через воронку (бачок) 8.

Грузовая часть представляет собой колонку 7 с полированным цилиндрическим каналом, в который вставляется поршень 6. На поршень установлена тарелка 4, на которую помещаются контрольные грузы 5. Канал колонки подключен к горизонтальному каналу, который соединен со штуцерами 3 поверяемого и образцового манометра, бачком с рабочей жидкостью 8 и прессовой частью.

Прессовая часть состоит из цилиндра с поршнем 1, оборудованного маховиком 9. Поршень 1 предназначен для обеспечения погружения поршня 6 не менее чем на $2/3$ своей высоты в цилиндрическую колонку 7.

На поршень 6 действуют две противодействующие силы: сила, создаваемая давлением жидкости, и сила тяжести поршня и грузов. При равенстве этих сил поршень уравнивается и поднимается на определенную высоту.

При равновесии поршня величина измеряемого давления p , Па:

$$p = \frac{G}{S}, \quad (3.15)$$

где G – вес поршня и грузов, Н; S – площадь поперечного сечения поршня, м^2 .

Площадь поперечного сечения поршня, как правило, равна 1 см^2 , поэтому создаваемое давление равно весу поршня и груза. Масса поршня с тарелкой 1 кг. Масса отдельных грузов указывается на них.

Грузопоршневые манометры предназначены для измерения давлений до 10^3 МПа и градуировки и поверки манометров других типов.

Внешний вид грузопоршневого манометра МП-600 приведен на рис. 3.15. Диапазон измерений данного манометра составляет от 1 до 60 МПа.

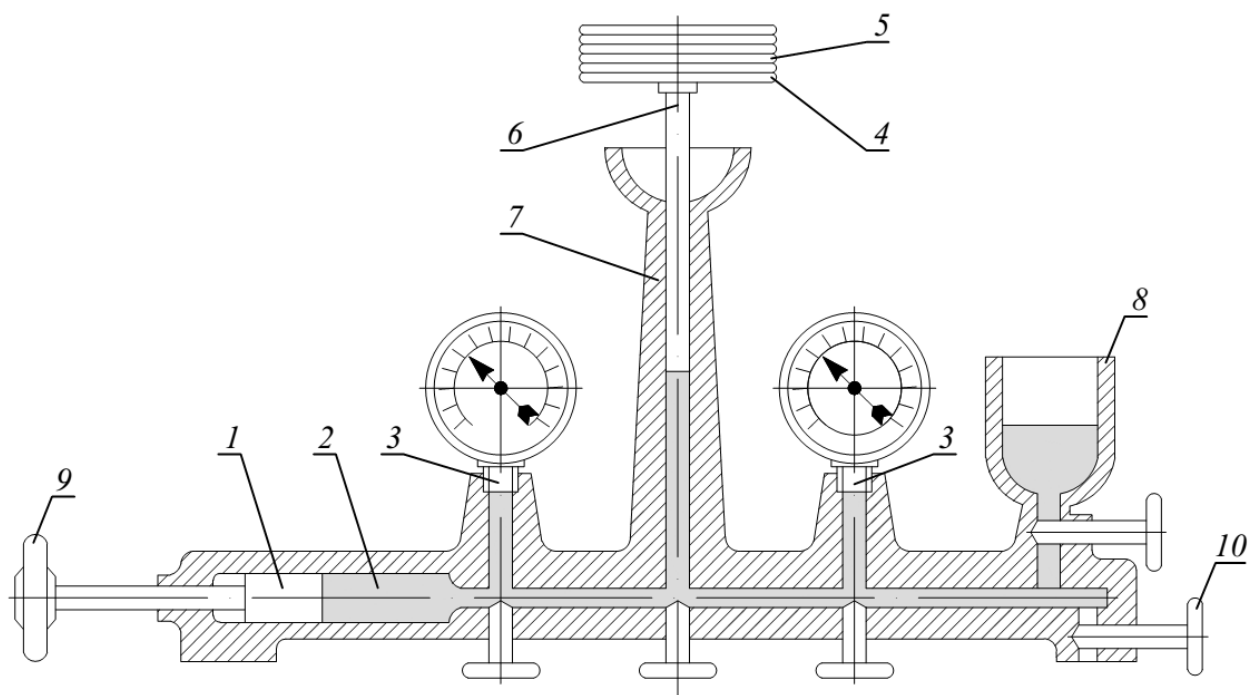


Рис. 3.14. Принципиальная схема грузопоршневого манометра: 1, 6 – поршни; 2 – камера; 3 – штуцеры; 4 – тарелка; 5 – грузы; 7 – колонка; 8 – воронка; 9 – маховик; 10 – вентиль



Рис. 3.15. Внешний вид грузопоршневого манометра МП-600

Если для измерения давления недостаточно грузов, входящих в комплект манометра, допускается использовать дополнительные грузы, погрешность массы которых не превышает 20 % от класса точности манометра.

Расчет измеряемого давления p , Па, проводится по формуле

$$p = \frac{mg_M}{A \left(1 + \frac{\rho_B}{\rho_M} \right) (1 + p_{cp} \beta)}, \quad (3.16)$$

где m – масса дополнительных грузов, кг; g_M – местное ускорение свободного падения, м/с^2 ; ρ_B , ρ_M – плотности воздуха и материала дополнительного груза соответственно, кг/м^3 ; p_{cp} – давление, равное 50 % верхнего предела измерений манометра, Па; β – коэффициент деформации измерительной поршневой системы, $1/\text{Па}$; A – эффективная площадь поршня, м^2

Данная зависимость может быть приведена к виду

$$p = \frac{mg_M}{A} K, \quad (3.17)$$

где K – индивидуальный коэффициент, величина которого зависит от модели грузопоршневого манометра при расчете измеренного давления в МПа, для манометра МП-600 коэффициент $K = 9,998 \cdot 10^{-6}$.

При отличии температуры окружающей среды t , °С, от рекомендуемого значения t_p , °С, более чем на 1 °С вводится поправка Δp_t , Па:

$$\Delta p_t = a p_{\text{ном}} (t_p - t), \quad (3.18)$$

где a – коэффициент температурного расширения материала измерительной поршневой системы, К^{-1} (для МП-600 – $a = 8 \cdot 10^{-6}$), $t_p = 20$ °С; $p_{\text{ном}}$ – номинальное значение давления, создаваемое грузом, МПа.

Дополнительно учитывают погрешность Δp_H , МПа, вызываемую разностью H , см, между уровнем нижнего среза поршня измерительной поршневой системы и штуцером поверяемого прибора, по формуле

$$\Delta p_H = H g_M K_1, \quad (3.19)$$

где K_1 – коэффициент учета плотности трансформаторного масла, м/с^2 , для манометра МП-600 $K_1 = 8,95 \cdot 10^{-6}$ при расчете давления в МПа.

При отклонении величины местного ускорения свободного падения g_m , от номинального значения $g_{ном}$, $м/с^2$, указанного в свидетельстве о поверке, давление создаваемое грузами $p_{п}$, МПа, определяется по формуле

$$p_{п} = p_{ном} \frac{g_m}{g_{ном}}. \quad (3.20)$$

Пример 3.1. Требуется определить поправки грузопоршневого манометра МП-600 Δp_t и Δp_H . Исходные данные для расчета: температура окружающей среды $t = 25$ °С; номинальное давление создаваемое грузом $p_{ном} = 0,1$ МПа; разность уровней $H = 50$ см; месторасположение – г. Н. Новгород (местное ускорение свободного падения составляет $g_m = 9,82$ $м/с^2$).

Поправка Δp_t составляет:

$$\Delta p_t = 8 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot (20 - 25) = -4 \cdot 10^{-4} \text{ МПа.}$$

Определим поправку Δp_H :

$$\Delta p_H = 50 \cdot 9,82 \cdot 8,95 \cdot 10^{-6} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ МПа.}$$

3.6. Контрольные вопросы и задания для практических занятий и самостоятельной работы

Контрольные вопросы.

1. Перечислите основные единицы измерений давлений.
2. Какие виды давлений Вы знаете?
3. Физический смысл единицы измерения «паскаль» (1 Па).
4. Приведите классификацию манометров.
5. Что общего и в чем заключаются отличия между U -образными, чашечными и манометрами с наклонной трубкой?
6. Опишите принцип работы трубчатых, мембранных и сильфонных манометров. В чем заключается отличие конструкции чувствительных элементов данных манометров?
7. Какие конструкции емкостных датчиков давления Вы знаете?
8. Принцип работы пьезоэлектрических манометров.

9. В чем состоят отличия конструкции чувствительных элементов проволочных, фольгированных и полупроводниковых тензопреобразователей?

10. Опишите схему образования электрических зарядов на гранях кварцевого кристалла при его сжатии в определенном направлении.

11. По какой зависимости определяется коэффициент тензочувствительности тензопреобразователя по сопротивлению?

12. На каком принципе основана работа грузопоршневых манометров?

13. Опишите конструкцию грузопоршневого манометра. Для каких целей предусмотрена прессовая часть данных манометров?

14. Допустимо ли использовать дополнительные грузы, не входящие в комплект грузопоршневого манометра?

15. Какие поправки учитываются при проведении измерений с использованием грузопоршневых манометров?

Задание для практических занятий.

Определите поправки грузопоршневого манометра МП-600 Δp_t и Δp_H . Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.1.

Задания для самостоятельной работы.

Подготовить доклад в формате презентации с использованием средств Microsoft Office PowerPoint на следующие темы.

1. Внесистемные единицы измерения давления.
2. История развития средств измерения давления.
3. Обзор современных приборов для измерения давления.
4. Современные конструкции электрических манометров.
5. Физический смысл тензоэффекта и его практические применения.
6. Пьезоэлектрический эффект, теоретические основы и применение в современной измерительной технике.
7. Технические характеристики современных грузопоршневых манометров (например, МП-6, -60, -100, -250, -400, -600).

Таблица 3.1

Исходные данные для определения поправок грузопоршневого манометра МП-600

Номер варианта	$t, ^\circ\text{C}$	$g_M, \text{м/с}^2$	$H, \text{см}$	$p_{\text{ном}}, \text{МПа}$
1	25	9,84	48	0,1
2	18	9,79	80	0,2
3	36	9,74	93	0,5
4	25	9,89	41	1,0
5	29	9,77	18	5,0
6	20	9,73	70	0,1
7	18	9,81	62	0,2
8	21	9,81	49	0,5
9	26	9,70	67	1,0
10	32	9,89	37	5,0
11	33	9,77	94	0,1
12	30	9,73	93	0,2
13	33	9,90	76	0,5
14	19	9,88	69	1,0
15	26	9,79	61	5,0
16	33	9,78	28	0,1
17	24	9,79	82	0,2
18	34	9,80	65	0,5
19	28	9,79	56	1,0
20	30	9,84	99	5,0
21	26	9,70	20	0,1
22	40	9,79	81	0,2
23	35	9,90	59	0,5
24	24	9,70	45	1,0
25	29	9,72	43	5,0
26	34	9,72	40	0,1
27	28	9,74	90	0,2
28	19	9,88	19	0,5
29	32	9,74	17	1,0
30	38	9,86	15	5,0

Глава 4. ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

4.1. Измерение влажности воздуха и материалов

4.1.1. Общие сведения о влажности воздуха и материалов

Влажность воздуха является важным параметром, определяющим эффективность технологических процессов, сроки службы оборудования, систем и ограждающих конструкций, а также комфортность микроклимата помещений.

Влажный воздух является смесью сухого воздуха и водяного пара. Водяной пар находится под парциальными давлением $e_{\text{п}}$, Па, определяемым по уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$e_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}} RT}{V \mu_{\text{п}}}, \quad (4.1)$$

где $m_{\text{п}}$ – масса водяного пара, кг; R – универсальная газовая постоянная, равная $R = 8314,41$ Дж/(кмоль·К); T – температура влажного воздуха, К; V – объем влажного воздуха, м³; $\mu_{\text{п}}$ – молекулярный вес газа, кг/моль, для водяного пара $\mu_{\text{п}} = 18,01528$ кг/моль.

Барометрическое давление влажного воздуха $p_{\text{б}}$, Па, составляет

$$p_{\text{б}} = e_{\text{п}} + e_{\text{св}}, \quad (4.2)$$

где $e_{\text{св}}$ – парциальное давление сухого воздуха, Па.

Относительная влажность воздуха $\varphi_{\text{в}}$, %, определяется по формуле:

$$\varphi_{\text{в}} = \frac{e_{\text{п}}}{E} 100, \quad (4.3)$$

где E – парциальное давление насыщенного водяного пара, Па, при постоянном давлении $p_{\text{б}}$ является функцией только его температуры, $E = f(T)$.

Абсолютная влажность воздуха $f_{\text{в}}$, кг/м³, равна

$$f_{\text{в}} = \frac{m_{\text{п}}}{V} 100. \quad (4.4)$$

Для определения влажности воздуха применяются приборы, обобщенно называемые гигрометрами. Данные приборы разделяют на весовые, волосяные, плёночные, конденсационные, психрометрические (психрометры), электролитические и электронные (оптические, емкостные и пр.) и др.

В строительных материалах, находящихся в естественной воздушной среде, всегда присутствует некоторое количество химически несвязанной влаги.

Влажность материала по массе ω_m , %, определяется по формуле

$$\omega_m = \frac{m_1 - m_2}{m_2} 100, \quad (4.5)$$

где m_1 – масса влажного материала, кг; m_2 – масса высушенного материала, кг.

Объемная влажность материала ω_o , %, определяется по формуле

$$\omega_o = \frac{V_1}{V_2} 100, \quad (4.6)$$

где V_1 – объем влаги в материале, м³; V_2 – объем материала, м³.

Влажность по массе и объемная влажность материала находятся в следующей зависимости друг от друга:

$$\omega_o = \frac{\omega_m \rho}{1000}, \quad (4.7)$$

где ρ – плотность материала в сухом состоянии, кг/м³.

Методы определения влажности твердых материалов делятся на прямые и косвенные. При использовании прямых методов влажность определяется путем разделения массы влаги и сухого вещества, а при использовании косвенных – по функциональной зависимости влажности от характерного параметра материала. В натуральных теплотехнических измерениях применяют исключительно косвенные (неразрушающие) методы, наибольшее распространение из которых получили электрические методы.

4.1.2. Измерение влажности воздуха

Гигрометр – прибор для измерения влажности воздуха. Наиболее простую конструкцию имеют весовые, волосяные и пленочные гигрометры.

Весовой гигрометр – это прибор для определения абсолютной влажности воздуха, г/м³ (рис. 4.1, а [32]). Весовой гигрометр состоит из газовых часов 1 и ряда U-образных стеклянных трубок 2, которые соединены между собой и заполнены хлористым кальцием или другим гигроскопическим веществом 3.

Перед определением влажности трубки с гигроскопическим веществом взвешиваются, после этого при помощи насоса, присоединенного к патрубку 4, через трубки пропускают измеряемый воздух. Объем пропущенного воздуха $V_{\text{вх}}$, м³, измеряется газовыми часами. При прохождении воздуха через трубки его водяной пар поглощается хлористым кальцием. Трубки взвешиваются вторично.

Абсолютная влажность воздуха $f_{\text{в}}$, г/м³, определяется по формуле

$$f_{\text{в}} = \frac{\Delta m}{V_{\text{вх}}}, \quad (4.8)$$

где Δm – изменение массы трубок до и после прохождения воздуха, г.

Волосной гигрометр (рис. 4.1, б [7]) – это прибор для определения относительной влажности воздуха. Принцип его работы заключается в следующем. При увеличении относительной влажности воздуха обезжиренный волос 5 удлиняется и приводит в движение поворотный механизм 6, который поворачивает стрелку 7 прибора вправо, меняя показания шкалы 8 относительной влажности воздуха. Цена деления шкалы, как правило, составляет 1 %.

Пленочный гигрометр (рис. 4.1, в [7]) также предназначен для определения относительной влажности воздуха. Чувствительным элементом гигрометра является гигроскопическая пленка 9, натянутая на металлическое кольцо. Изменение упругих свойств пленки в результате изменения относительной влажности приводит к движению тяги 10 и к перемещению стрелки 7 по шкале 8.

Груз 11 предназначен для обеспечения постоянного натяжения пленки. В показания пленочного и волосного гигрометров требуется вносить поправки после сравнения их результатов измерений с данными психрометра.

Несколько более сложную конструкцию имеют **конденсационные гигрометры** – приборы, предназначенные для определения абсолютной влажности воздуха по температуре точки росы.

Принцип работы прибора состоит в понижении температуры исследуемого в приборе воздуха до точки росы при постоянной упругости водяных паров.

Упругость водяного пара при выпадении конденсата и будет являться абсолютной влажностью измеряемого воздуха.

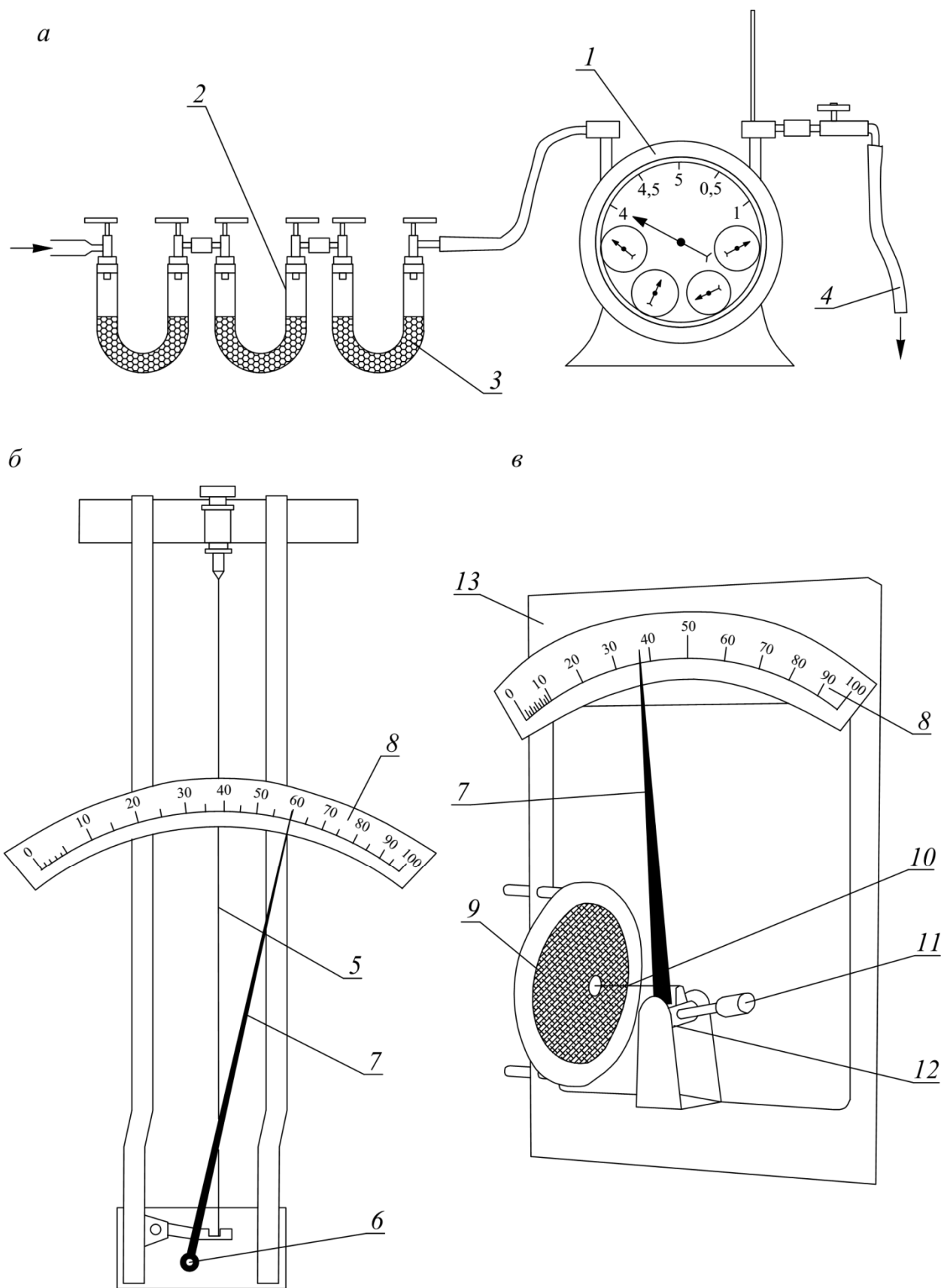


Рис. 4.1. Гигрометры (*а* – весовой; *б* – волосяной; *в* – пленочный): 1 – газовые часы; 2 – U-образные трубки; 3 – гигроскопическое вещество; 4 – патрубок насоса; 5 – обезжиренный волос; 6 – поворотный механизм; 7 – указывающая стрелка; 8 – шкала; 9 – гигроскопическая пленка; 10 – соединительная тяга; 11 – груз; 12 – ось; 13 – корпус

По расчетным зависимостям либо табличным или графическим данным можно определить относительную влажность воздуха, зная его абсолютную влажность и температуру.

Одним из примеров конденсационного гигрометра является **гигрометр Крова** (рис. 4.2), который состоит из металлической коробки 1, через которую пропущена трубка 2, снабженная на одном конце окуляром 3, а на другом матовым стеклом 4. Исследуемый воздух грушей 5 подается из трубки 7, снабженной термометром, и затем продувается через налитый в коробку серный эфир, который охлаждает трубку. На внутренней стенке трубки выпадает конденсат. В процессе испарения эфира можно добиться установления температуры выпадения конденсата с точностью 0,1 °С. Появление росы наблюдается на пластине 4 через окуляр 3. По показанию термометра 8 определяют температуру точки росы для исследуемого воздуха. После этого продолжается наблюдение через окуляр до момента исчезновения росы, температуру исчезновения росы снимают с термометра 8. Среднее из полученных значений температуры точки росы и принимается за измеренное.

Аналогичный принцип работы имеет конденсационный гигрометр Аллюра, отличающийся большей компактностью.

Одной из наиболее распространенных конструкций гигрометров являются **психрометры** – приборы, предназначенные для измерения температуры и относительной влажности воздуха. В настоящее время известны различные конструкции психрометров: психрометр Августа; психрометр Крелля; пращевидный психрометр и др. Наиболее удачную конструкцию на данный момент имеет аспирационный психрометр Ассмана, позволяющий определять относительную влажность с достаточной точностью.

Схема **психрометра Ассмана** приведена на рис. 4.3 [7]. Ртутные резервуары его термометров 6 и 7 заключены в металлические трубки, которые защищают их от лучистой теплоты и дают возможность равномерно пропускать через них исследуемый воздух с помощью аспирационного вентилятора 3. Влажный термометр 6 обтянут батистом и смачивается водой при помощи пипетки 9.

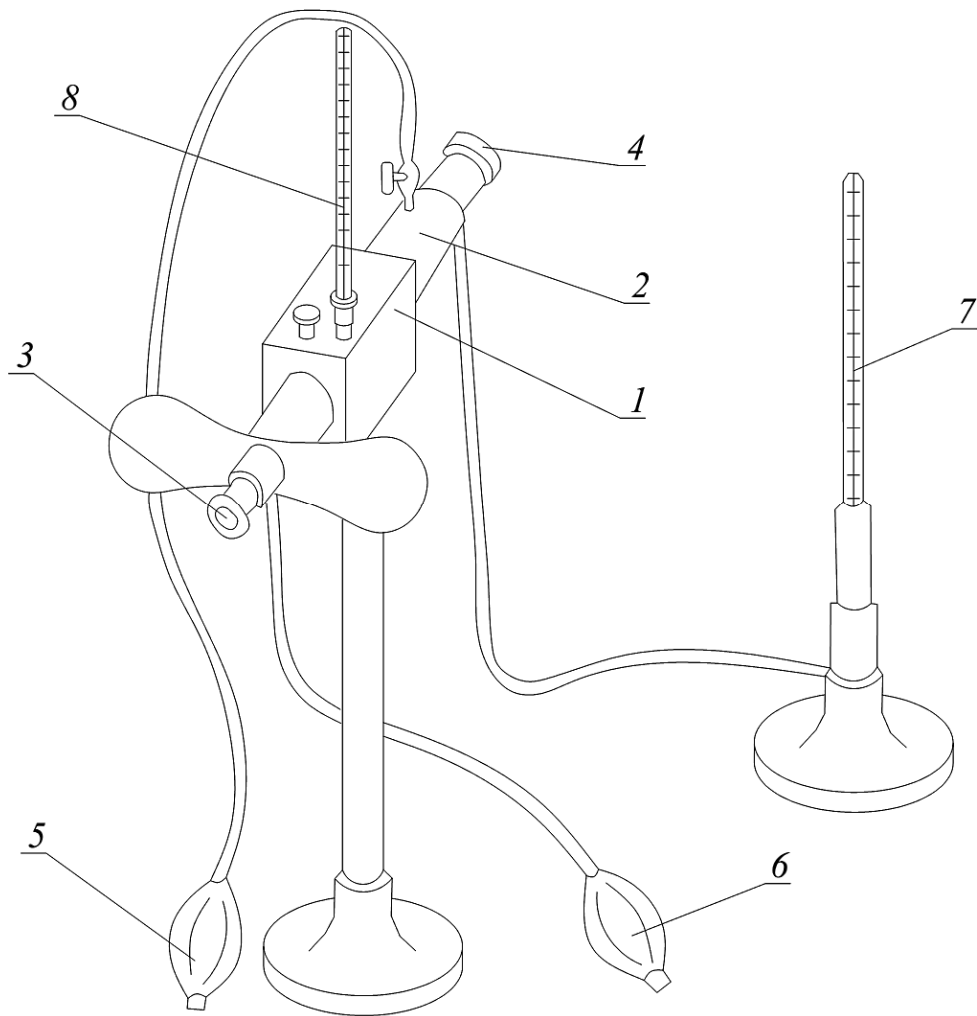


Рис. 4.2. Гигрометр Крова: 1 – металлическая коробка; 2 – трубка; 3 – окуляр; 4 – матовое стекло; 5, 6 – резиновые груши; 7 – всасывающая трубка с термометром; 8 – термометр для измерения температуры точки росы

Измерения температур проводится через 5...15 минут после пуска в ход вентилятора, при этом чем ниже температура, тем дольше устанавливается температура по влажному термометру.

Абсолютная влажность воздуха при данной температуре, выраженная в мм рт. ст, определяется по формуле Реньо-Шпрунга:

$$A = f_{\text{вл.вл}} - 0,5(t_c - t_{\text{вл}}) \frac{B}{755}, \quad (4.9)$$

где $f_{\text{вл.вл}}$ – максимальное напряжение водяных паров при температуре отображаемой на влажном термометре, мм рт. ст (табл. 4.1); 0,5 – психрометрический коэффициент; t_c , $t_{\text{вл}}$ – температуры сухого и влажного термометров соответственно, °С; B – барометрическое давление, мм рт. ст.

Относительная влажность φ_B , %, определяется по формуле

$$\varphi_B = \frac{A}{f_{\text{вп.с}}} \cdot 100, \quad (4.10)$$

где $f_{\text{вп.с}}$ – максимальное напряжение водяных паров при температуре сухого термометра, мм рт. ст (табл. 4.1 [5]).

Таблица 4.1

Максимальное напряжение водяных паров при температуре, отображаемой на влажном термометре $f_{\text{вп}}$, мм рт. ст.

$t_{\text{вл}}, ^\circ\text{C}$	$f_{\text{вп}}, \text{мм рт. ст}$	$t_{\text{вл}}, ^\circ\text{C}$	$f_{\text{вп}}, \text{мм рт. ст}$	$t_{\text{вл}}, ^\circ\text{C}$	$f_{\text{вп}}, \text{мм рт. ст}$
1	4,585	15	12,79	29	30,06
2	4,929	16	13,64	30	31,84
3	5,296	17	14,54	31	33,72
4	5,686	18	15,48	32	35,69
5	6,102	19	16,48	33	37,75
6	7,016	20	17,54	34	39,93
7	7,516	21	18,66	35	42,20
8	8,048	22	19,84	36	44,59
9	8,612	23	21,08	37	47,10
10	9,212	24	22,39	38	49,73
11	9,848	25	23,77	39	52,48
12	10,52	26	25,22	40	55,37
13	11,24	27	26,75	41	58,38
14	11,99	28	28,37	42	61,55

Пример 4.1. Определите относительную влажность воздуха φ_B по аспирационному психрометру Ассмана. Исходные данные: температура сухого термометра $t_c = 25 ^\circ\text{C}$, температура влажного термометра $t_{\text{вл}} = 22 ^\circ\text{C}$; барометрическое давление $B = 743$ мм рт. ст.

Определим абсолютную влажность воздуха:

$$A = 19,84 - 0,5(25 - 22) \frac{743}{755} = 16,89 \text{ мм рт. ст.}$$

Определим относительную влажность воздуха:

$$\varphi_B = \frac{16,89}{23,77} \cdot 100 = 71 \%$$

К психрометру прилагаются таблицы для нахождения относительной влажности по показаниям сухого и влажного термометров, что позволяет исключить необходимость расчетов по формулам (4.9), (4.10).

Кроме измерения относительной влажности, аспирационный психрометр Ассмана можно использовать для более точного, чем термометрами расширения, измерения температуры воздуха. Создаваемое аспирационным вентилятором принудительное движение воздуха относительно термометра практически полностью исключает погрешность замеров, возникающую из-за того, что солнечная радиация повышает коэффициент теплоотдачи.

Для систематических наблюдений за колебаниями относительной влажности воздуха пользуются самопишущими волосяными гигрометрами (гигрографами, рис. 4.4, *а*). Сокращение пучка волос *1* передается системой рычагов *2* перу *3*, которое выписывает на барабане кривую изменения относительной влажности. Заправка бумагой, пуск барабана *4* и регулировка прибора производятся аналогично термографам.

Гигрограф может быть составной частью термогигрографа, которой фиксирует температуру и относительную влажность воздуха, в этом случае запись перечисленных параметров проводится на одном барабане (рис. 4.4, *б*).

Для измерения влажности воздуха и газов также применяются:

1) **абсорбционные гигрометры** – устройства для измерения влажности воздуха, принцип работы которых заключается в связи физических свойств гигроскопических веществ с количеством поглощенной ими влаги, зависящей от влажности анализируемого газа;

2) **оптические гигрометры** – аппараты, принцип работы которых основан на измерении изменения интенсивности инфракрасного излучения за счет его поглощения парами воды, содержащимися и исследуемом воздухе;

3) **емкостные гигрометры** – приборы для определения влажности воздуха, работа которых основана на измерении изменения емкости полимерного или металлоксидного конденсатора при изменении влажности воздуха;

4) **резистивный гигрометр** – прибор для измерения влажности воздуха, работа которого основана на принципе изменения электрической проводимости солей или проводящих полимеров от влажности воздуха.

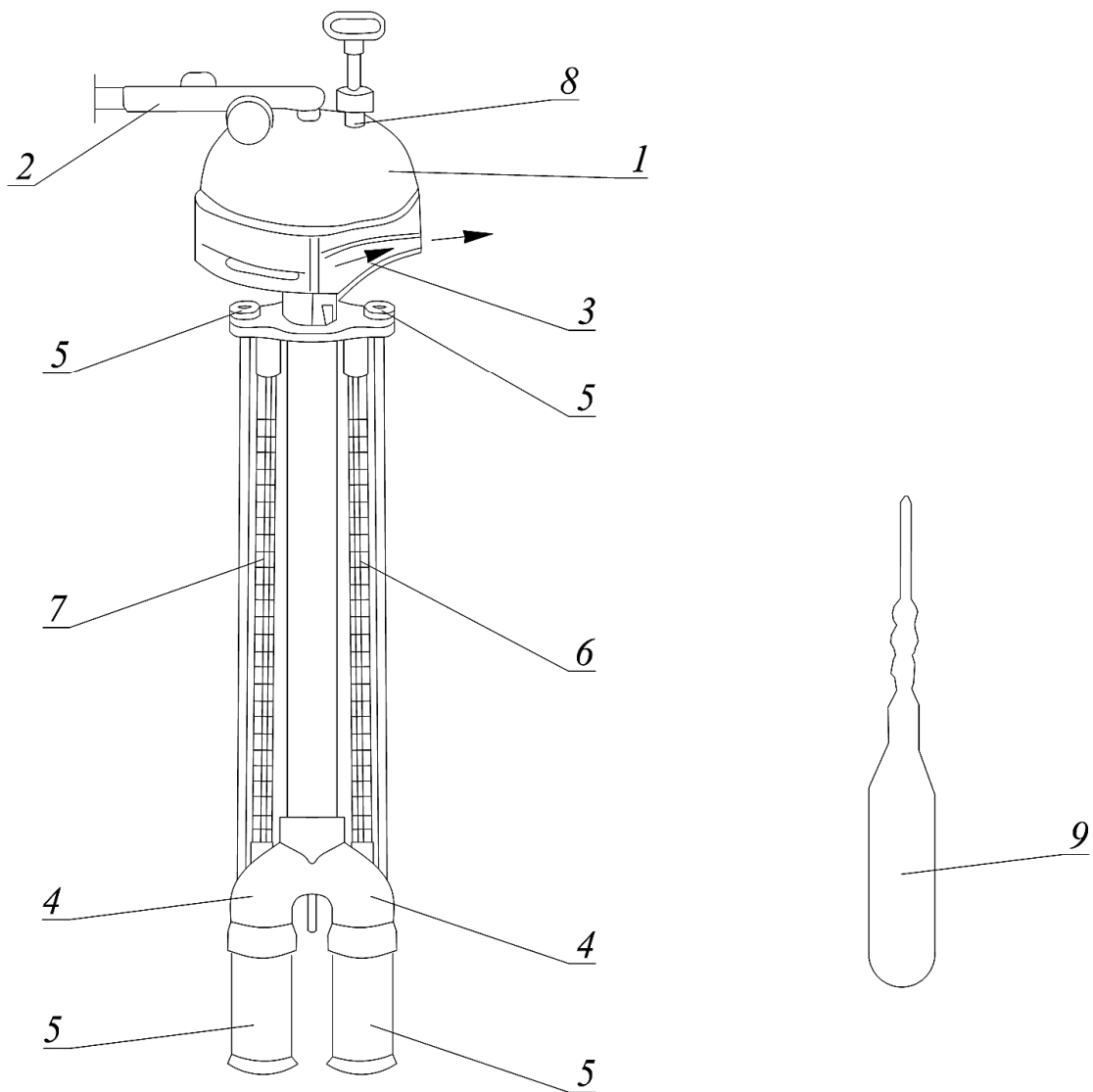


Рис. 4.3. Аспирационный психрометр Ассмана: 1 – колпак; 2 – рукоятка; 3 – щель у крыльев вентилятора; 4 – кольца; 5 – наружные цилиндры; 6 – ртутный влажный термометр; 7 – ртутный сухой термометр; 8 – заводной механизм вентилятора; 9 – пипетка для смачивания батиста влажного термометра

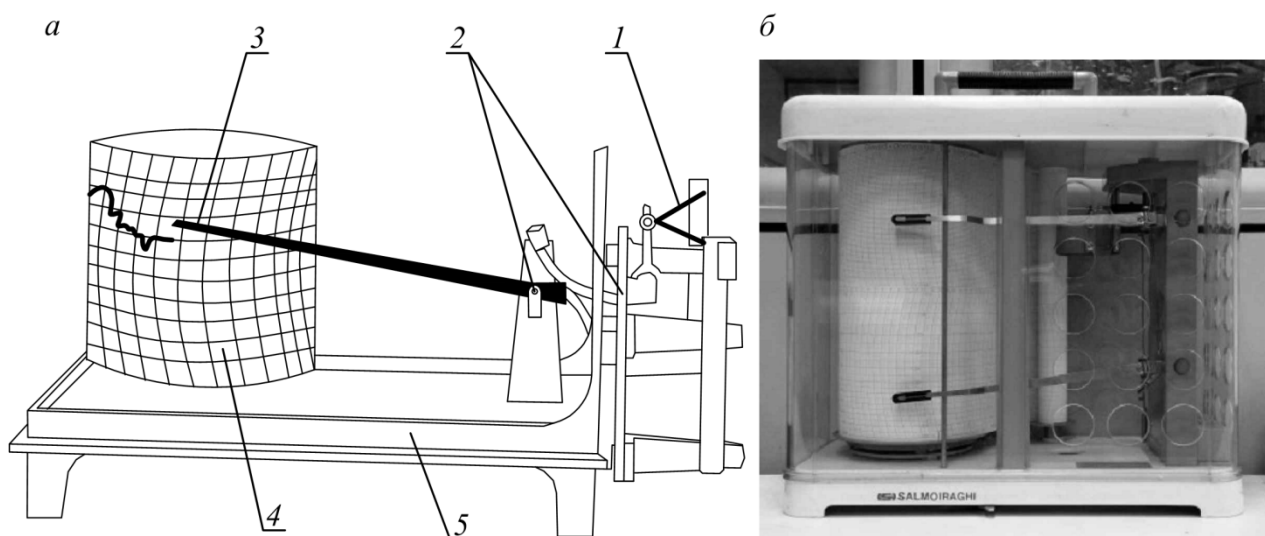


Рис. 4.4. Гигрограф (а – принципиальная схема; б – внешний вид термогигрографа): 1 – пучок волос; 2 – система рычагов; 3 – пишущее перо; 4 – барабан; 5 – подставка

4.1.3. Измерение влажности материалов

При измерении влажности материалов и строительных конструкций широко применяют электрические косвенные методы измерений, не требующие взятия пробы (неразрушающий контроль).

Зависимость активного электрического сопротивления строительного материала R , Ом, от его влажности ω_m , %, имеет вид

$$R = C\omega_m^{-n}, \quad (4.11)$$

где C , n – постоянные коэффициенты, определяемые для каждого типа материалов экспериментальным путем.

Наиболее распространенным электрическим методом является емкостный метод измерений, который основан на зависимости диэлектрической проницаемости ϵ твердых тел от изменения их влажности. У сухих твердых тел проницаемость $\epsilon = 1 \dots 6$, а у воды $\epsilon = 81$. Изменение диэлектрической проницаемости по изменению емкости конденсатора C , Ф, между обкладками которого находится исследуемый материал, подчиняется зависимости

$$C = k\epsilon, \quad (4.12)$$

где k – постоянная, определяемая конструкцией конденсатора.

Погрешность большинства емкостных измерителей влажности строительных материалов составляет от 0,2 до 0,5 %. Точность измерений в большой степени зависит от однородности обследуемого строительного материала.

Работа современных приборов, определяющих влажность строительных материалов (влагомеров), основана на измерениях методом поля рассеивания. Данный метод базируется на способности молекул воды увлажнять материалы, и, как следствие, влиять на протекающие через них электромагнитные поля. Измерения проводятся с помощью контактных электродов или пластин, создающих магнитное поле, проходящее через материал на глубину примерно 5 см (рис. 4.6, 4.7). Полученные измерителями данные в большинстве случаев могут использоваться для определения дефектов в строительных конструкциях, а не для получения точных значений влажности.

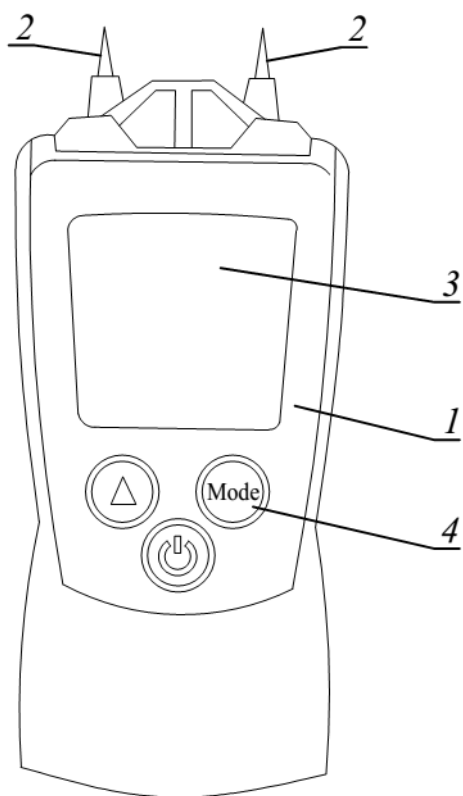


Рис. 4.6. Измеритель влажности с контактными электродами: 1 – корпус; 2 – контактные электроды; 3 – дисплей; 4 – клавиатура

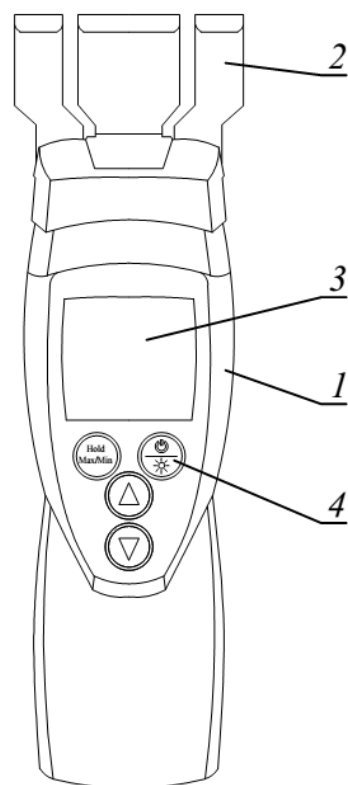


Рис. 4.7. Измеритель влажности с контактными пластинами: 1 – корпус; 2 – контактные пластины; 3 – дисплей; 4 – клавиатура

4.2. Определение состава газов

Газоанализаторы – это измерительные приборы, применяемые в различных отраслях промышленности (включая тепловую энергетику) для анализа составов газов (в том числе воздуха).

Газоанализаторы, как правило, представляют собой сложные установки, имеющие в своей конструкции ряд устройств для отбора, подготовки и транспортирования проб газа через прибор.

Большинство газоанализаторов предназначено для измерения концентрации одного компонента в смеси газов. В зависимости от назначения газоанализаторы могут градуироваться в % по объему, г/м³, мг/л и т.п.

В зависимости от положенных в основу измерения физико-химических свойств газоанализаторы делятся на механические, тепловые, магнитные, оптические, электрические, хроматографические и масс-спектрометрические.

4.2.1. Объемные химические газоанализаторы

Объемные химические газоанализаторы являются наиболее распространенными приборами механического типа. Они предназначены для измерения концентрации в смеси газов диоксида углерода, сероводорода, диоксида серы, кислорода, оксида углерода, водорода, непредельных и предельных углеводородов и азота. О содержании измеряемого компонента судят по изменению объема газовой смеси в результате избирательного поглощения, каталитического окисления или сжигания определенного компонента. Для поглощения водорода и оксида углерода используется щелочной раствор полухлористой меди. Кислород поглощается щелочным раствором пирогаллола.

Принципиальная схема объемного химического газоанализатора, предназначенного для измерения двух компонентов газовой смеси CO_2 и O_2 , приведена на рис. 4.8 [16]. Прибор состоит из измерительной бюретки 1, соединенной с гребенкой 2, к которой подключаются два поглотительных сосуда 3, 4.

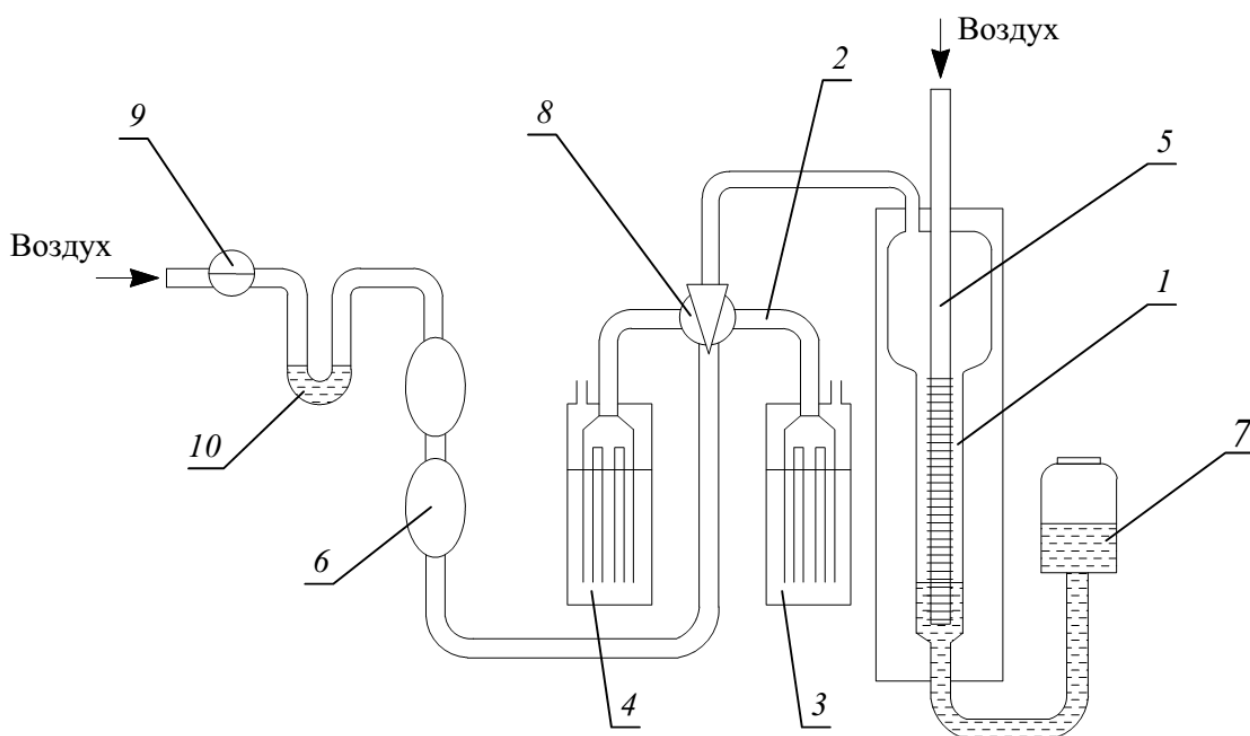


Рис. 4.8. Схема объемного химического газоанализатора GXH-2: 1 – измерительная бюретка; 2 – гребенка; 3, 4 – поглотительные сосуды; 5 – трубка; 6 – резиновая груша; 7 – напорный сосуд; 8, 9 – краны; 10 – фильтр

Сосуд 3 заполнен раствором едкого калия и используется для поглощения CO_2 , сосуд 4 содержит щелочной раствор пирогаллола для поглощения O_2 .

Так как второй раствор поглощает CO_2 , в процессе замеров в первую очередь определяют именно содержание CO_2 и только потом кислорода. Внутри мерной бюретки находится сообщающаяся с атмосферой трубка 5, которая используется для контроля давления пробы газа после поглощения определяемого компонента. Отбор пробы при открытом кране 9 и прокачивание газа через прибор осуществляется резиновой грушей 6.

Напорный сосуд 7 с запирающей жидкостью опущен, газ через трубку 5 выталкивается в атмосферу. При подъеме напорного сосуда 7 запирающая жидкость при достижении конца трубки 5 отсекает от атмосферы пробу газа необходимого объема. В двух других положениях крана 8 проба газа в мерной бюретке 1 сообщается с сосудами 3, 4. Фильтр 10 служит для очистки газа.

В качестве запирающей используется жидкость, не поглощающая компоненты анализируемой газовой смеси. Для этого применяются насыщенные растворы поваренной соли или хлористого кальция.

Преимуществами данной методики измерения является возможность измерения широкого круга компонентов газовых смесей, анализа многокомпонентных газовых смесей и простота устройства прибора.

Недостатками метода являются низкая точность результатов анализа, периодичность действия, необходимость частой замены реактивов и сложность создания автоматических приборов.

4.2.2. Термокондуктометрические газоанализаторы

Термокондуктометрические газоанализаторы – это приборы для анализа состава газовых смесей путем измерения их теплопроводности.

Термокондуктометрические газоанализаторы относятся к группе тепловых газоанализаторов, к которым также относятся термохимические. Для измерения теплопроводности газовой смеси используется нагреваемый ток проводник, помещенный в камеру, заполненную анализируемой смесью.

Если теплоотдача от проводника стенкам камеры в основном осуществляется в результате теплопроводности, то имеет место следующая зависимость:

$$Q = \frac{2\pi l \lambda (t_n - t_c)}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}, \quad (4.13)$$

где Q – количество теплоты, отдаваемое проводником, Вт; l, d – длина и диаметр проводника, м; D – диаметр камеры, м; λ – теплопроводность смеси газов, Вт/м·°С; t_n, t_c – температуры проводника и стенок камеры соответственно, °С.

При постоянных и известных значениях отдаваемой проводником теплоты Q и температуры стенок камеры t_c , зависящей от температуры окружающей среды, теплопроводность газовой смеси будет однозначно определять температуру проводника и как результат его сопротивление. В качестве проводника используют проволоку из металла с высоким температурным коэффициентом электрического сопротивления и химической стойкостью (платина, вольфрам, никель, тантал и др.). Схемы двух наиболее распространенных типов чувствительного элемента представлены на рис. 4.9. В стеклянном корпусе 1 к платиновым токопроводам 2 подпаяна платиновая спираль 3 открытая или остеклованная 4 . Чувствительный элемент второго типа защищен от агрессивных воздействий среды, однако имеет большую инерцию.

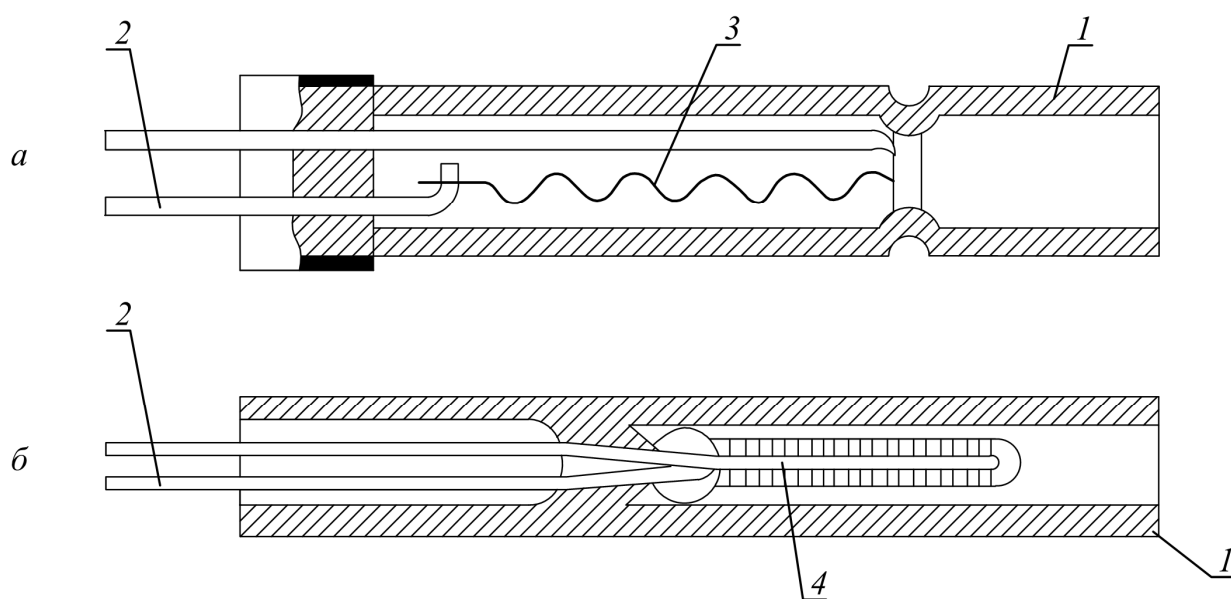


Рис. 4.9. Схема чувствительного элемента термокондуктометрического газоанализатора (а – с открытой платиновой спиралью; б – с остеклованной платиновой спиралью): 1 – стеклянный корпус; 2 – платиновый токопровод; 3, 4 – платиновые спирали

4.2.3. Магнитные газоанализаторы

Магнитные газоанализаторы – это приборы для анализа состава газов, в которых концентрация определяемого компонента измеряется по изменению магнитных свойств смеси, её магнитной восприимчивости.

Данные газоанализаторы применяют для определения содержания кислорода в объеме газовых смесей, т. к. он обладает наибольшей магнитной восприимчивостью, т. е. относится к парамагнитным газам. Магнитная восприимчивость кислорода зависит от давления и снижается с ростом температуры.

Изменение объемной магнитной восприимчивости газовой смеси $\alpha_{\text{см}}$ позволяет определить объемную концентрацию кислорода $c_{\text{к}}$ при постоянной температуре и давлении по формуле

$$\alpha_{\text{см}} = \sum_{i=1}^{i=n} c_i \alpha_i = c_{\text{к}} \alpha_{\text{к}} + (1 - c_{\text{к}}) \alpha_{\text{н}}, \quad (4.14)$$

где α_i , $\alpha_{\text{к}}$, $\alpha_{\text{н}}$ – объемные магнитные восприимчивости i -го компонента смеси, кислорода и неопределяемых компонентов соответственно; c_i , $c_{\text{к}}$, $c_{\text{н}}$ – объемная концентрация i -го компонента, кислорода и неопределяемых компонентов.

Наиболее распространенным методом измерения магнитной восприимчивости смеси газов является метод, основанный на термомагнитной конвекции.

На рис. 4.10 [16] показана схема чувствительного элемента кислородомера и его размещение между полюсами магнита в преобразователе с внешней магнитной конвекцией. Чувствительный элемент представляет собой платиновую проволоку 1, намотанную на стеклянный капилляр 2, покрытую остеклением 3. Концы спирали подпаяны к токовводам 4. Кислородосодержащий газ, протекающий по трубке 7, втягивается в магнитное поле и нагревается от резистора R_1 , при этом его магнитная восприимчивость снижается. Холодный газ выталкивает нагретый, создавая поток магнитной конвекции, охлаждающий резистор R_1 . Для обеспечения одинаковых условий теплоотдачи резистор R_2 размещен внутри немагнитного медного блока б.

К преимуществам магнитных газоанализаторов следует отнести отсутствие необходимости удаления неопределяемых компонентов газа.

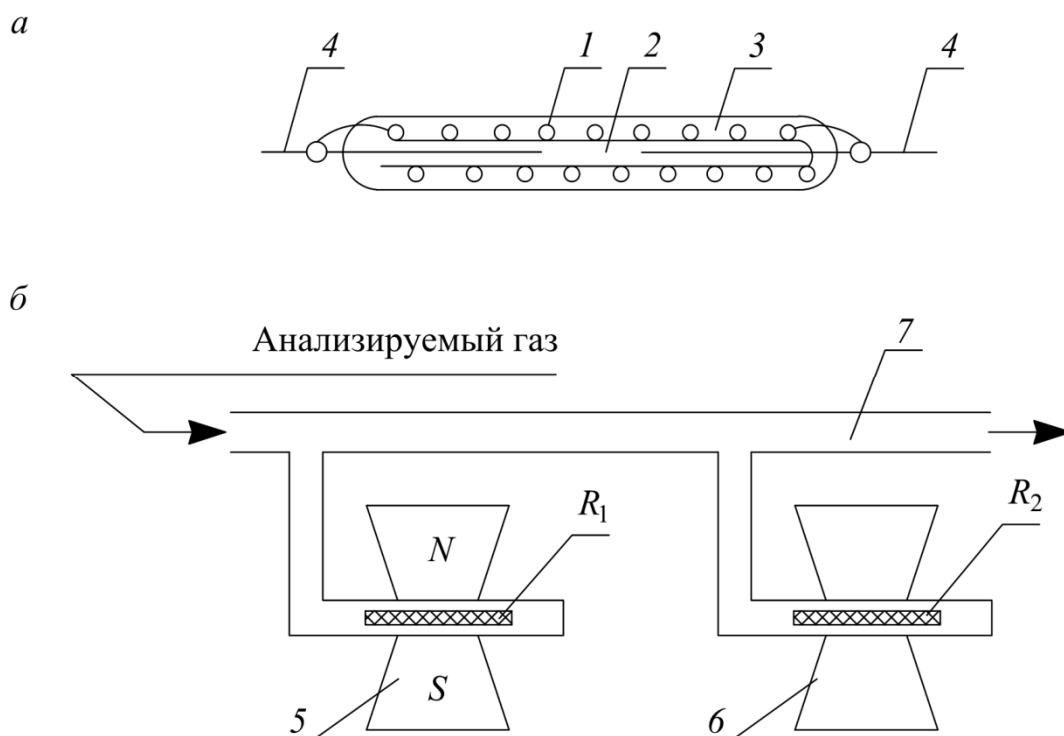


Рис. 4.10. Магнитный газоанализатор (*а* – схема чувствительного элемента; *б* – размещение чувствительного элемента между полюсами магнита в магнитном газоанализаторе): *1* – платиновая проволока; *2* – стеклянный капилляр; *3* – стеклянное покрытие; *4* – токоввод; *5* – магнит; *б* – медный блок; *7* – труба

4.2.4. Оптические газоанализаторы

Оптические газоанализаторы – это измерительные приборы, в которых концентрация определяемого компонента находится путем измерения оптических свойств газовой смеси. К основным свойствам относятся показатели преломления, спектрального поглощения и излучения, спектральная плотность и пр.

Оптические газоанализаторы по принципу действия классифицируются на приборы: инфракрасного и ультрафиолетового поглощения; фотокolorиметрические; люминесцентные; ослабления видимого излучения.

Рассмотрим метод инфракрасного поглощения, основанный на зависимости ослабления монохроматического излучения при прохождении через камеру, заполненную газом, от концентрации компонента (закон Ламберта – Бера):

$$\Phi_2 = \Phi_1 e^{-\epsilon c l}, \quad (4.15)$$

где Φ_1, Φ_2 – интенсивности монохроматического излучения на входе и выходе из заполненной газом камеры, Вт/м²; ϵ – коэффициент спектрального поглощения исследуемого газа; c – объемная концентрация компонента; l – длина камеры, м.

Для применения данного метода необходимо, чтобы определяемый компонент имел спектр поглощения, отличающийся от спектров поглощения других компонентов исследуемой газовой смеси.

Принципиальная схема оптико-акустического приемника инфракрасного излучения представлена на рис. 4.11 [16]. Источником *1* создается постоянное излучение, которое с помощью вращающегося диска с отверстиями (обтюратора) *2* и светофильтром *3* преобразуется в пульсирующее монохроматическое излучение. Анализируемый компонент, находящийся в камере *4*, поглощает излучение, при этом в камере возникают пульсации температуры и, как следствие, давления. Пульсации давления воспринимаются микрофонным чувствительным элементом *5*, являющимся конденсатором, образованным подвижной мембраной и неподвижной пластиной. Под действием давления мембрана перемещается, вызывая из-за колебаний зазора δ , мм, изменение емкости конденсатора *C*. Данные об изменении емкости передаются на вторичный преобразователь, на котором отображается концентрация компонента смеси.

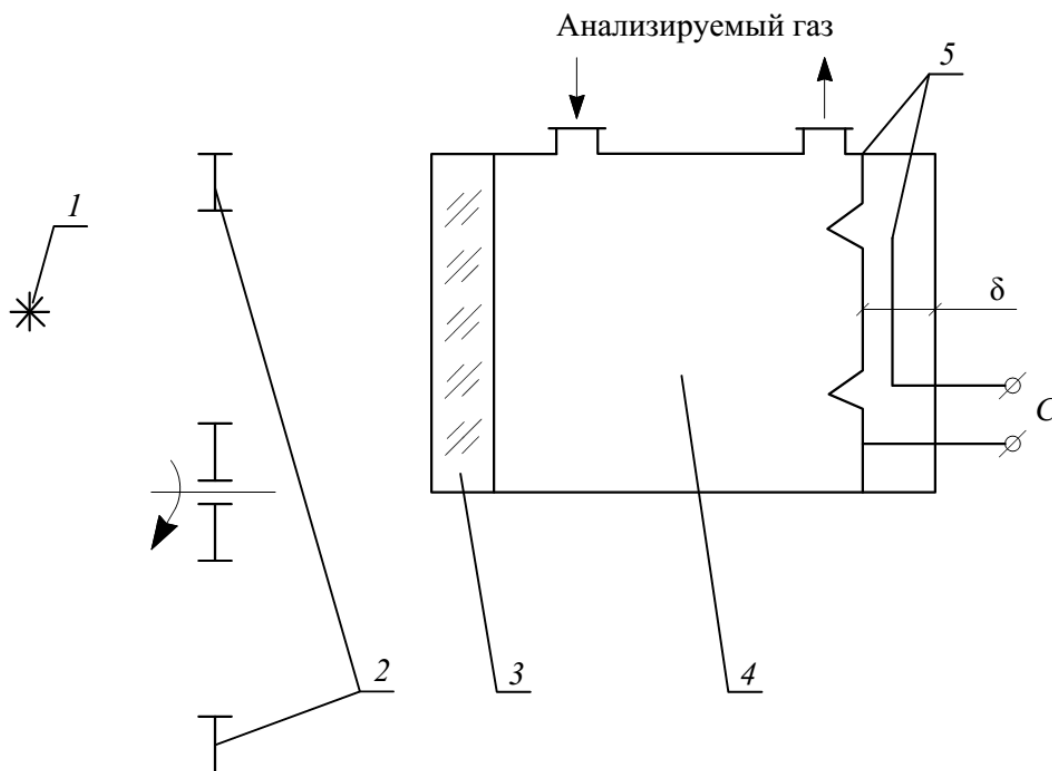


Рис. 4.11. Схема оптико-акустического лучеприемника: *1* – источник постоянного излучения; *2* – обтюратор; *3* – светофильтр; *4* – камера; *5* – чувствительный элемент

4.2.5. Электрические газоанализаторы

Электрические газоанализаторы – это приборы для измерения концентрации компонента газовой смеси в зависимости от изменения её электрических свойств в результате реакции с определяемым компонентом.

Электрические газоанализаторы подразделяются на амперометрические, кулонометрические и электрохимические.

В **амперометрических газоанализаторах** используется фоновый раствор электролита с погруженными в нем двумя электродами, на которых создается разность напряжений U , В. Состав электролита и материал электродов подбирается так, чтобы при отсутствии в электролите определяемого компонента газа происходила поляризация только одного электрода и ток в цепи отсутствовал ($I \approx 0$). При введении определяемого компонента на поверхности поляризованного электрода протекают электрохимические реакции. В растворе возникает электрический ток, который находится в функциональной зависимости от концентрации определяемого компонента: чем выше концентрация компонента и больше площадь электрода, тем больше ток I . Зависимость тока I от напряжения U называется поляризационной кривой, которая характеризует концентрацию определяемого компонента газовой смеси.

Принцип работы **кулонометрического газоанализатора** основан на измерении количества электроэнергии, израсходованной при электролизе количества вещества m , г, определяемого по формуле

$$m = \frac{MIt}{96492n}, \quad (4.16)$$

где M – молекулярная масса выделившегося вещества, г/моль; I – сила тока, А; t – время электролиза, с; 96492 Кл/моль – число Фарадея; n – число электронов, участвующих в электродном процессе, шт.

Работа **электрохимических газоанализаторов** основана на измерении тока между электродами в электрохимической ячейке, заполненной электролитом. Анализируемый газ вступает в химическое взаимодействие с электролитом, в результате из электролита выделится какой-либо элемент.

4.2.6. Хроматографические газоанализаторы

Хроматографические газоанализаторы – это приборы, предназначенные для анализа многокомпонентных газовых смесей. Измерение состава смеси проводится путем разделения его на отдельные компоненты за счет различной скорости движения газов вдоль слоя сорбента, зависящей от характера внешних и внутренних межмолекулярных взаимодействий.

Принципиальная схема хроматографического газоанализатора приведена на рис. 4.12 [28, 29]. Газ-носитель поступает из баллона 1 в детектор 3. Постоянный расход газа поддерживается регулятором 2. Проба анализируемого газа вносится в газ-носитель с помощью дозатора 4. В разделительной колонке 5 происходит разделение смеси на компоненты А, Б и В, каждый из которых образует бинарную смесь с газом-носителем. Бинарные смеси исследуются по отдельности в детекторе. Результаты отображаются на дисплее 8 и ленте регистратора 9.

Хроматографическое разделение является сложным процессом, связанным с сорбцией, десорбцией и диффузией. Диффузия может снизить качество процесса разделения. Для улучшения разделения компонентов в колонке 5 предусмотрен терморегулятор 6.

К основным показателям эффективности процесса хроматографического разделения следует отнести следующие [16]:

1. Время удерживания компонента газа t_k , с, – интервал времени между вводом пробы газа в детектор (хроматограф) и моментом определения максимальной концентрации данного компонента.

2. Удерживаемый компонентом объем газа-носителя V_k , м³, – это объем газа-носителя, равный произведению объемной скорости газа-носителя v , м³/с на t_k .

3. Эффективность N хроматографической колонки:

$$N = 5,545 \left(\frac{t_k}{\tau_k} \right)^2, \quad (4.17)$$

где τ_k – интервал времени прохождения компонента смеси, соответствующий половине его концентрационного пика, с.

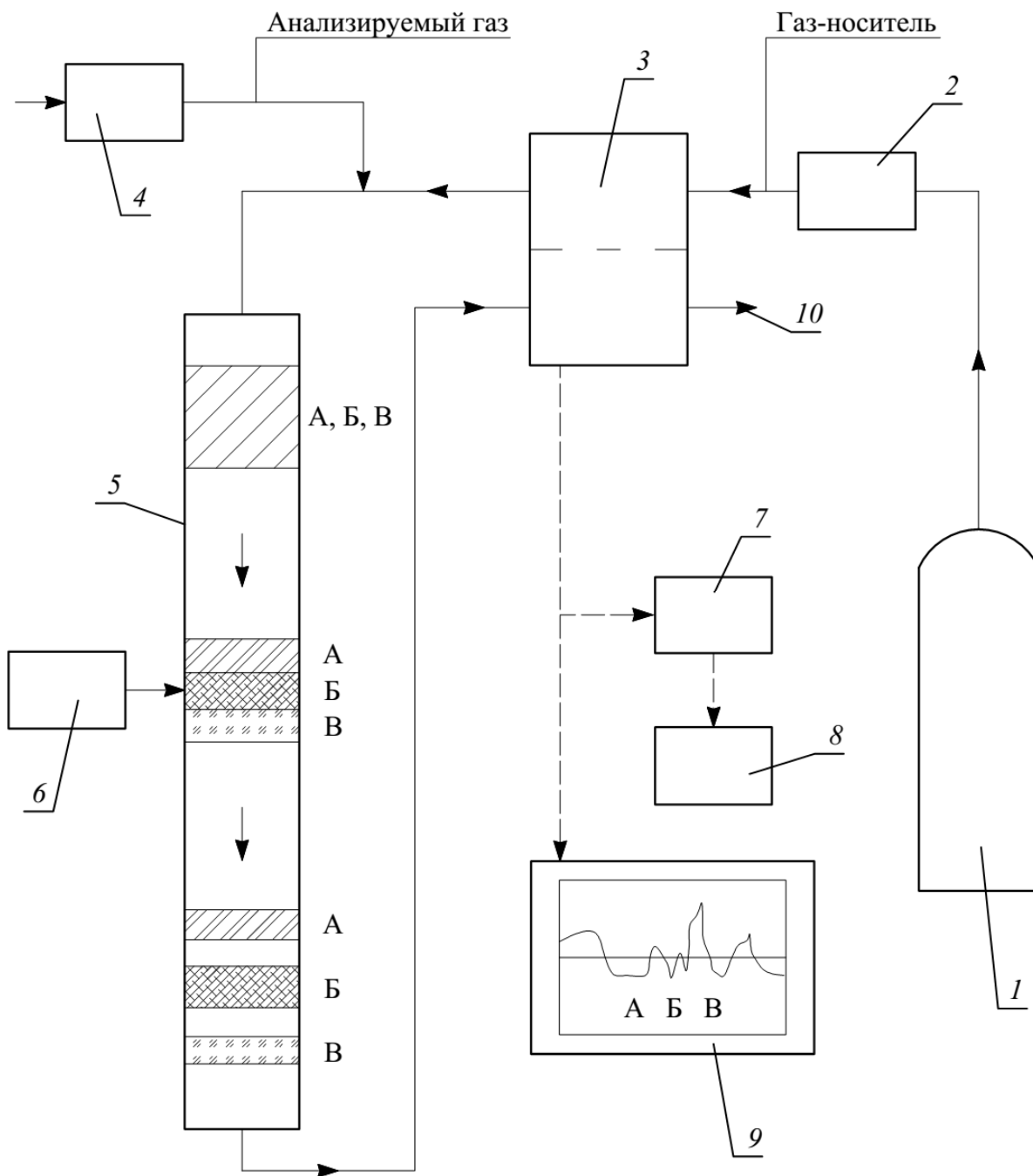


Рис. 4.12. Схема работы хроматографического газоанализатора: 1 – баллон; 2 – регулятор; 3 – детектор; 4 – дозатор; 5 – разделительная колонка; 6 – терморегулятор; 7 – микропроцессор; 8 – дисплей; 9 – регистрирующий прибор; 10 – сброс

Эффективность разделения компонентов Б и А газа R определяется так:

$$R = \frac{t_{кБ} - t_{кА}}{\tau_{кБ} - \tau_{кА}}, \quad (4.18)$$

где $t_{кА}$, $t_{кБ}$ – время удержания компонентов смеси А и Б соответственно, с;
 $\tau_{кА}$, $\tau_{кБ}$ – интервалы времени прохождения компонентов смеси А и Б, соответствующие половине их концентрационного пика, с.

4.2.7. Масс-спектрометрические газоанализаторы

Принцип работы масс-спектрометрических газоанализаторов основан на ионизации анализируемого газа и разделении ионов на пучки по компонентам, отличающимся соотношением массы иона к его заряду.

В зависимости от способа разделения ионов масс-спектрометрические газоанализаторы подразделяются на магнитные, в которых разделение ионов происходит в магнитном поле; времяпролетные с разделением ионов по времени их пролета от источника до коллектора ионов; радиочастотные – разделение ионов происходит под воздействием высокочастотных электрических полей.

Рассмотрим схему работы масс-спектрометра с разделением ионов в однородном магнитном поле (рис. 4.13 [41]). Исследуемый газ направляется в вакуумную камеру 4. Катодом 1 испускает электроны, что приводит к образованию ионов, которые при помощи фокусирующей системы 3 направляются в магнитное поле электромагнита 5. Ионы разных компонентов, обладающие отличной массой m_i , под действием магнитного поля разделяются на отдельные пучки, описывающие траектории с различными радиусами r_i , м:

$$r_i = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2Um_i}{e}}, \quad (4.19)$$

где B – магнитная индукция магнитного поля, Тл; U – ускоряющее напряжение, В; e – электрический заряд, Кл.

В результате изменения магнитной индукции или ускоряющего напряжения пучки ионов с одинаковой массой направляются к коллектору ионного тока 6, напряжение которого через усилитель 7 подается на регистратор 8.

Запись показаний регистратора имеет вид кривой с характерными пиками, соответствующими ионам с определенной массой. Высота отдельных пиков пропорциональна ионному току, проходящему через активное сопротивление, и характеризует концентрацию компонентов в газовой смеси.

Во времяпролетных масс-спектрометрах ионы приобретают разную скорость и разделяются на отдельные пучки, создающие импульсы тока, соответствующие отдельным компонентам анализируемого вещества.

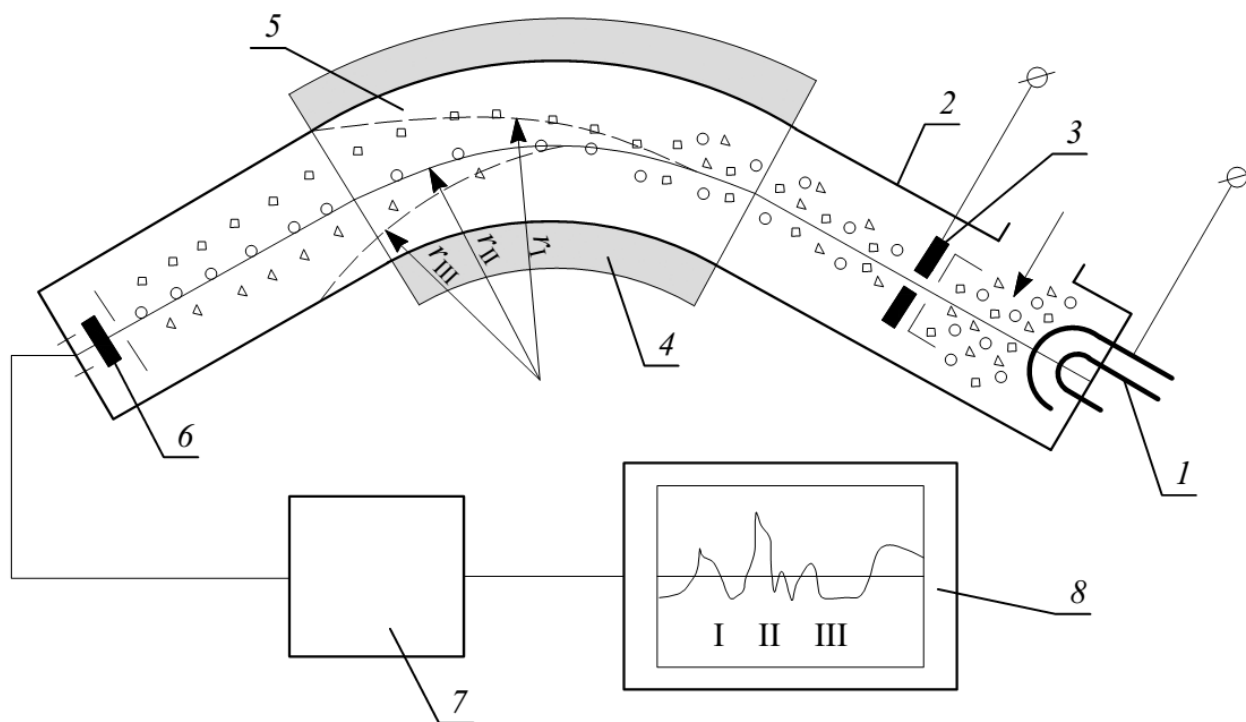


Рис. 4.13. Схема масс-спектрометрического газоанализатора: 1 – катод; 2 – корпус; 3 – фокусирующая система; 4 – магнит; 5 – вакуумная камера; 6 – коллектор ионного тока; 7 – усилитель сигнала; 8 – регистратор

4.3. Контрольные вопросы и задания для самостоятельной работы

Контрольные вопросы.

1. Перечислите основные единицы измерений влажности воздуха и материалов. Как они определяются?
2. Опишите конструкцию и принципы работы весового, волосяного и пленочного гигрометров.
3. Психрометр Ассмана. Конструкция, принцип работы, порядок расчета относительной влажности воздуха по результатам измерений.
4. Конденсационный гигрометр Крова.
5. Что такое газоанализатор? Приведите классификацию газоанализаторов в зависимости от физико-химических свойств, положенных в основу принципов их работы.
6. Опишите принцип работы и конструкцию объемных химических газоанализаторов. Перечислите их основные преимущества и недостатки.

7. На чем основан принцип работы термокондуктометрических газоанализаторов? С какой целью проводят остекление платиновой спирали их чувствительного элемента?

8. Принцип работы магнитных газоанализаторов.

9. Опишите принцип работы и конструкцию оптико-акустического приемника оптического газоанализатора.

10. Перечислите, на какие типы подразделяются электрические газоанализаторы по принципу их работы.

11. Опишите конструкцию хроматографических газоанализаторов. Какие показатели характеризуют эффективность проведения хроматографического разделения в разделительной колонке?

12. В чем заключается работа масс-спектрометрического газоанализатора с разделением ионов в магнитном поле?

Задание для практических занятий.

Определите относительную влажность воздуха φ_v по аспирационному психрометру Ассмана. Исходные данные для расчета приведены в табл. 4.2.

Задания для самостоятельной работы.

Подготовить доклад в формате презентации с использованием средств Microsoft Office PowerPoint на следующие темы.

1. Прямые методы определения влажности строительных материалов.
2. Методы анализа состава жидкостей.
3. Элементы газовых хроматографов.
4. Абсорбционные гигрометры.
5. Емкостные и резистивные гигрометры.
6. Оптический метод анализа состава жидкостей.
7. Закон Ламберта – Бера.
8. Электрохимические газоанализаторы.
9. Радиочастотные масс-спектрометры.
10. Конструкция и принцип работы рН-метров.

Таблица 4.2

Исходные данные для определения относительной влажности воздуха по аспирационному психрометру Ассмана

Номер варианта	Температура сухого термометра $t_c, ^\circ\text{C}$	Температура влажного термометра $t_{\text{вл}}, ^\circ\text{C}$	Барометрическое давление $B, \text{мм рт. ст}$
1	26	20	759
2	33	30	752
3	27	24	758
4	34	33	758
5	26	24	751
6	35	33	758
7	28	24	755
8	31	28	754
9	27	26	758
10	23	19	753
11	32	29	760
12	23	19	755
13	30	27	760
14	29	26	759
15	32	30	755
16	27	22	759
17	22	17	756
18	22	21	758
19	30	28	760
20	21	19	760
21	33	29	753
22	21	16	755
23	30	24	754
24	23	19	759
25	24	20	758
26	23	17	757
27	24	19	756
28	33	31	754
29	33	28	753
30	25	21	758

Глава 5. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

5.1. Общие сведения об измерении количества и расхода веществ

Количество вещества в практике технических измерений, как правило, выражают в единицах массы (кг, г, т и пр.) и объема (м^3 , л и др.).

Приборы для измерения количества вещества, протекшего через них за известный промежуток времени, называются счетчиками.

По принципу действия счетчики жидкостей и газов подразделяются на скоростные, объемные, барабанные и ротационные.

К основным характеристикам счетчиков относятся номинальный, характерный и минимальный расходы, а также их калибр. Номинальным называется наибольший длительный расход, при котором погрешность показаний не выходит за установленные пределы, а потеря напора не создает в приборе усилий, приводящих к быстрому износу трущихся деталей прибора. Минимальный расход – это расход, ниже которого значительно возрастает погрешность измерений. Характерный расход – это расход вещества, проходящего через счетчик в течение часа, при перепаде давления на нем 0,1 МПа. Условный диаметр входного патрубка счетчика называется его калибром.

Расход – это количество вещества, проходящее через сечения канала за единицу времени. Расход подразделяется на массовый (кг/ч, т/ч, кг/с и пр.) и объемный ($\text{м}^3/\text{ч}$, $\text{м}^3/\text{с}$, л/с, $\text{м}^3/\text{мин}$ и др.).

Объемный расход вещества L , $\text{м}^3/\text{ч}$, определяется по формуле

$$L = \nu f, \quad (5.1)$$

где ν – скорость потока, м/с; f – площадь поперечного сечения канала, м^2 .

Массовый расход вещества G , кг/ч, составляет

$$G = L\rho, \quad (5.2)$$

где ρ – плотность перемещаемого вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$.

По методу измерения расхода расходомеры подразделяются на расходомеры постоянного и переменного перепада давления, электромагнитные, ультразвуковые, расходомеры Кориолиса, вихревые и калориметрические.

5.2. Скоростные счетчики

Скоростные счетчики предназначены для измерения количества жидкостей. Принцип их работы основан на определении средней скорости движения жидкости v_{cp} , м/с. Прошедший через поперечное сечение счетчика объем жидкости V , м³, определяется по формуле

$$V = Lt = v_{cp} ft, \quad (5.3)$$

где f – площадь поперечного сечения потока, м²; t – время измерения, с.

Прошедший через прибор объем жидкости определяют в зависимости от числа оборотов винтовой вертушки n , об:

$$n = \frac{cV}{ft}, \quad (5.4)$$

где c – коэффициент пропорциональности, учитывающий механические и гидравлические свойства счетчика.

Принципиальная схема скоростного счетчика с винтовой вертушкой приведена на рис. 5.1 [42]. Корпус 1 счетчика присоединяется к трубопроводу с помощью фланцев. Внутри него располагается винтовая вертушка 2, вращение которой под действием потока жидкости передается через ось 11 передаче 3. Винтовая вертушка может изготавливаться как из полимерных материалов, так и из металлов, в зависимости от температуры перемещаемой среды. Через передаточный механизм 5 число оборотов n передается счетному механизму 6. Для выпрямления потока жидкости перед счетчиком предусмотрен струевыпрямитель 9. Регулирование счетчика осуществляется рычажным приводом 8.

Скоростные счетчики могут также изготавливаться с крыльчатými вертушками, располагаемыми перпендикулярно направлению потока жидкости.

К недостаткам данных счетчиков следует отнести создаваемое ими гидравлическое сопротивление, а также наличие минимальной скорости, при которой вертушка не будет вращаться.

Счетчики с винтовыми вертушками могут применяться для измерения количества жидкости при давлениях до 1,0 МПа и расходах до 600 м³/ч с относительной погрешностью около 2...3 %.

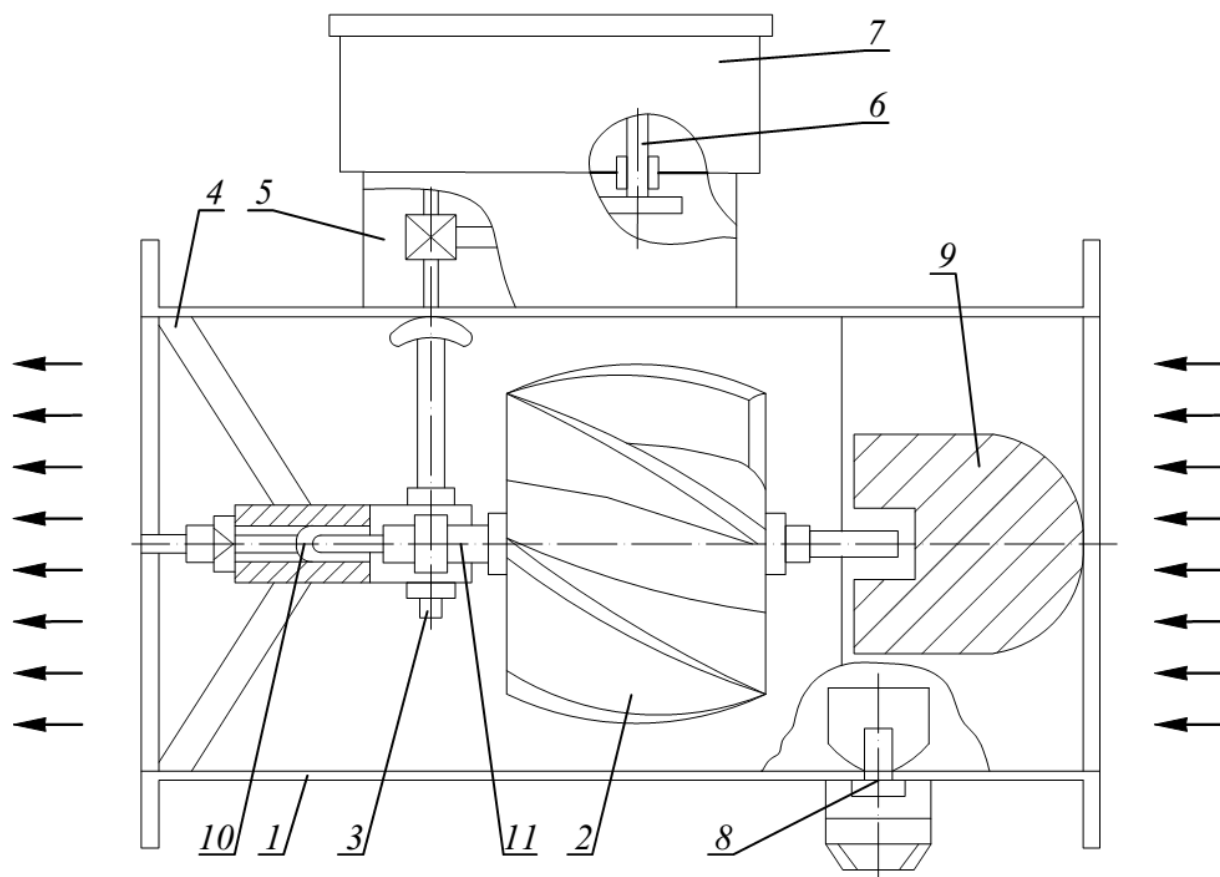


Рис. 5.1. Схема скоростного счетчика с винтовой вертушкой: 1 – корпус; 2 – вертушка; 3 – передача; 4 – крестовина; 5 – передаточный механизм; 6 – счетный механизм; 7 – крышка; 8 – рычажный привод; 9 – струевыпрямитель; 10 – подшипник; 11 – ось вращения

5.3. Объемные счетчики

Принцип работы объемного счетчика заключается в определении объема жидкости, который был вытеснен из измерительной камеры. Объемные счетчики бывают лопастными и с овальными зубчатыми колесами (рис. 5.2, 5.3).

Рассмотрим работу лопастного счетчика. Через входной патрубок 2 в расходомер поступает вода, проходящий поток которой крутит крыльчатку 3. Крыльчатка приводит в движение ось 4, которая через шестеренки передает число оборотов крыльчатки на измерительный прибор.

Число оборотов крыльчатки соответствует количеству отсеченных объемов жидкости, заключенных в полостях I–IV между лопастями и корпусом счетчика. Счетчик суммирует показания измерительного прибора за период измерения. Изменение расхода воды фиксируется на приборной шкале.

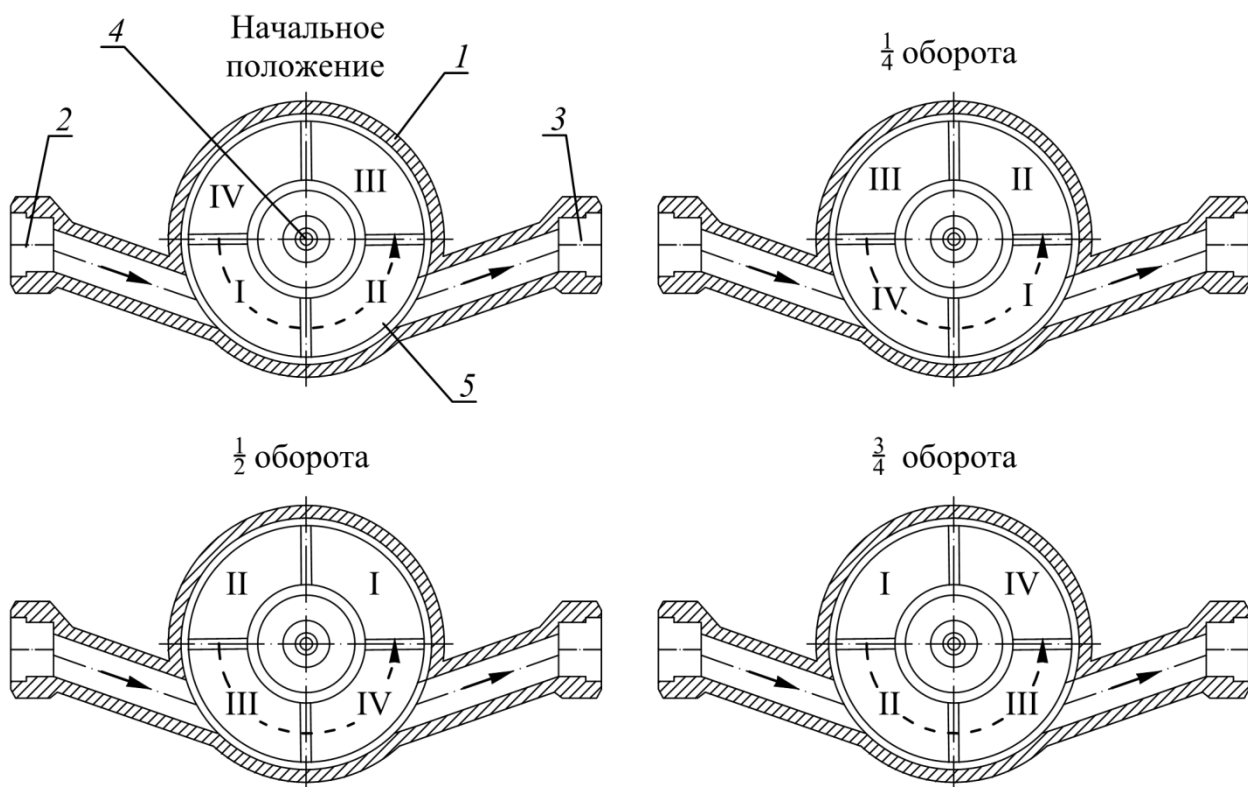


Рис. 5.2. Объемный лопастной счетчик: 1 – корпус; 2, 3 – патрубки; 4 – ось; 5 – крыльчатка

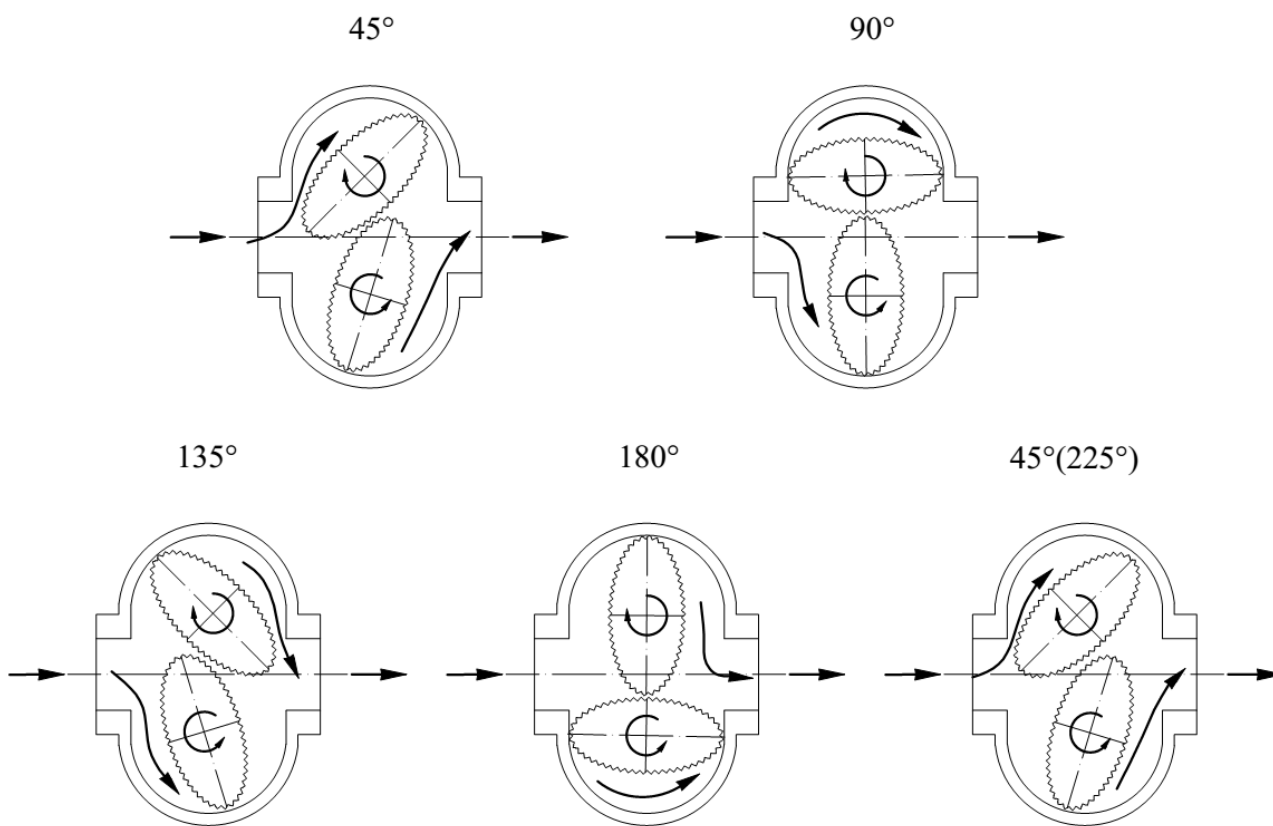


Рис. 5.3. Схема работы объемного счетчика с овальными зубчатыми колесами

Схожий принцип работы имеет объемный счетчик с овальными зубчатыми колесами. Овальные колеса счетчика расположены относительно друг друга таким образом, что каждое из них попеременно является ведущим и ведомым. При повороте одного овального колеса на 45, 90, 135 и 180° отсекается известный объем жидкости. Счетчики с овальными колесами предназначены для определения количества жидкости при рабочих давлениях до 1,57 МПа. Относительная погрешность измерений составляет $\pm 0,5$ %.

5.4. Барабанные счетчики

Барабанные счетчики предназначены для определения объема проходящего через него газа. Принципиальная схема барабанного счетчика приведена на рис. 5.4 [42]. Счетчик представляет собой кожух 3, который чуть более чем наполовину заполнен затворной жидкостью. В кожухе вращается барабан 4, разделенный четырьмя радиальными и одной цилиндрической перегородками на четыре внешних I–IV и одну внутреннюю V камеры. Во внутреннюю камеру V через входной патрубок 2 подается газ. Радиальные перегородки сконструированы таким образом, что газ попеременно заполняет камеры I–IV. Входные а–г и выходные д–з щели камер никогда не находятся выше уровня жидкости одновременно, что исключает прямой переток газа из патрубка 2 в патрубок 1.

При создании перепада давления между патрубками 1 и 2 возникает разница давлений, которая приводит в движение барабан. Вращение барабана приводит к поступлению и вытеснению объемов газа, равных объему из камер I–IV, в корпус счетчика через щели а–г и д–з. Один полный оборот барабана соответствует суммарному объему камер I–V.

В качестве запирающей жидкости применяется вода, а при отрицательных температурах – водные растворы хлорида магния или глицерин. Для контроля уровня жидкости кожух счетчик оборудуют смотровым стеклом.

Барабанные счетчики предназначены для измерения количества газа при небольших объемных расходах (до 3 м³/ч) с относительной погрешностью измерений, не превышающей 0,2 %.

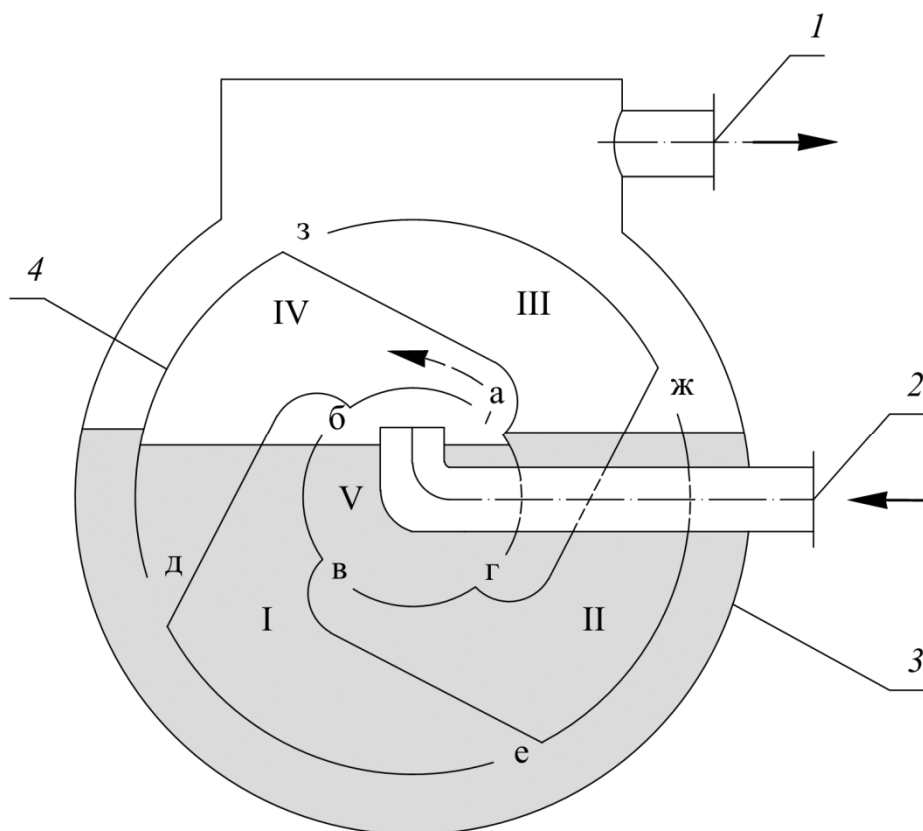


Рис. 5.4. Схема барабанного счетчика газа: 1 – выходной патрубок; 2 – входной патрубок; 3 – кожух; 4 – барабан

5.5. Ротационные счетчики

Ротационные счетчики – это измерительные приборы для определения объема проходящих через них газов.

Принципиальная схема ротационного счетчика приведена на рис. 5.5 [42]. Счетчик представляет собой кожух 2, внутри которого вращаются на параллельных горизонтальных валах роторы 1. Валы роторов связаны друг с другом зубчатыми колесами. Один из валов передает вращение счетному механизму. За один оборот обоих роторов объем газа, прошедшего через прибор, равен объему измерительной камеры счетчика.

Ротационные счетчики применяются для определения количества газа при расходах от 40 до 10 000 м³/ч с относительной погрешностью измерений ±2...3 %. Из-за большого интервала рабочих расходов данные счетчики получили наибольшее распространение.

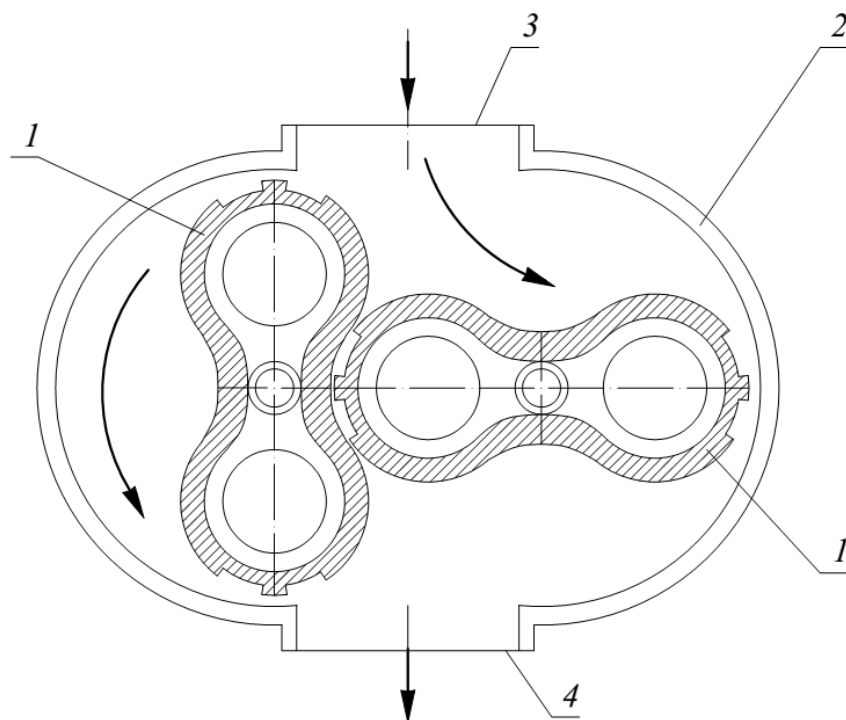


Рис. 5.5. Принципиальная схема ротационного счетчика газа: 1 – роторы; 2 – кожух; 3 – входной патрубок; 4 – выходной патрубок

5.6. Расходомеры переменного перепада давления

Работа расходомеров переменного перепада давления основана на изменении потенциальной энергии (статического давления) вещества, протекающего через сужающее устройство. В качестве сужающего устройства применяются диафрагмы, сопла, сопла с трубой Вентури.

Принципиальная схема работы расходомера переменного перепада давления с диафрагмой приведена на рис. 5.6, а [24]. Сужение потока начинается до диафрагмы в сечении I-I, и по достижении некоторого расстояния после неё в сечении II-II достигает максимального значения, вызванного силами инерции. Вблизи диафрагмы образуются зоны завихрений.

Давление потока около стенки трубопровода составляет максимальное значение p_1 , Па, за счет подпора перед диафрагмой. Минимальное давление p'_2 возникает в наиболее узком сечении потока II-II. По мере удаления от стенок диафрагмы давление увеличивается до некоторой величины, которая будет меньше p_1 на величину потерь давления $p_{\text{п}}$, Па. В связи с тем, что по конструктивным соображениям измерение давлений проводится вблизи стенок диафрагмы, измеряемый перепад составляет $p'_1 - p'_2$ вместо $p_1 - p_2$.

Для учета данного допущения вводится поправочный коэффициент, равный отношению рассмотренных перепадов давления $p'_1 - p'_2$ и $p_1 - p_2$.

Запишем уравнение Бернулли для несжимаемой жидкости при постоянной плотности и отсутствии обмена энергии с окружающей средой для сечений I и II горизонтального трубопровода:

$$\frac{p_1}{\rho} + \phi_1 \frac{v_1^2}{2} + \psi_1 \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \phi_2 \frac{v_2^2}{2} + \psi_2 \frac{v_2^2}{2} + \xi \frac{v_2^2}{2}, \quad (5.5)$$

где v_1, v_2 – средние скорости потока в сечениях I и II, м/с; ϕ_1, ϕ_2 – коэффициенты Кориолиса, равные отношению действительной кинетической энергии в сечениях потока I и II; ψ_1, ψ_2 – доли скоростного напора до и после сужающего устройства, учитывающие разность значений измеренного давления от давления в сечениях I и II; ξ – коэффициент местного сопротивления; ρ – плотность перемещаемого вещества, кг/м³.

Условие неразрывности потока имеет вид

$$f_1 v_1 = f_0 v_0 = f_2 v_2, \quad (5.6)$$

где f_1, f_0, f_2 – площади поперечного сечения трубопровода, отверстия диафрагмы и наименьшего сечения струи II, м².

Скорости потока v_1 и v_2 определяются по формулам

$$v_1 = \frac{f_0}{f_1} v_0 = \beta v_0; \quad (5.7)$$

$$v_2 = \frac{f_2}{f_0} v_0 = \mu v_0, \quad (5.8)$$

где β – относительный диаметр отверстия сужающего устройства; μ – коэффициент сужения потока.

Подставив уравнения (5.7) и (5.8) в формулу (5.5), получим выражение, подстановка которого в (5.1), при $t = 1$, даст следующее равенство:

$$L = f_0 \frac{\mu}{\sqrt{\phi_2 + \psi_2 + \xi - \phi_1 \beta^4 \mu^2 - \psi_1 \beta^4 \mu^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}, \quad (5.9)$$

где L – объемный расход, проходящий через диафрагму, м³/ч.

Для несжимаемых жидкостей уравнение (5.9) удобно привести к виду

$$L = f_0 \alpha \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}, \quad (5.10)$$

где α – коэффициент расхода, определяемый по формуле

$$\alpha = EC, \quad (5.11)$$

где E, C – коэффициенты скорости входа и истечения, соответственно равные:

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_0}{f_1}\right)^2}}; \quad (5.12)$$

$$C = \frac{\mu \sqrt{1 - \beta^4}}{\sqrt{\phi_2 + \psi_2 + \xi - \phi_1 \beta^4 \mu^2 - \psi_1 \beta^4 \mu^2}}. \quad (5.13)$$

Так как через сужающее устройство газы и пары проходят практически без обмена тепла с окружающей средой (адиабатически), то для них формула (5.10) может быть записана в виде

$$L = f_0 \alpha \varepsilon \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_1}}, \quad (5.14)$$

где ε – поправочный множитель на расширение измеряемой среды (называется коэффициентом расширения и приводится в справочной литературе); ρ_1 – плотность потока перед входом в отверстие сужающего устройства, кг/м³.

Зависимость (5.14) действительна при скоростях потока в сужающем устройстве меньше, чем скорость звука в данной среде.

Существуют различные конструкции сужающих устройств, однако наиболее распространенными являются диафрагмы [44]. Диафрагмы подразделяются на два типа: камерные (рис. 5.6, б, г) и бескамерные (рис. 5.6 в). Камерные диафрагмы изготавливаются условным диаметром от 50 до 500 мм, а бескамерные – от 300 до 1000 мм. Толщина диафрагмы не должна превышать 5 % от диаметра трубопровода. Диаметр отверстия не может быть меньше 12,5 мм. Конструкция диафрагмы должна соответствовать ГОСТ 8.586.2–2005. Отбор давлений проводится до и после диафрагмы в месте её сопряжения с каналом.

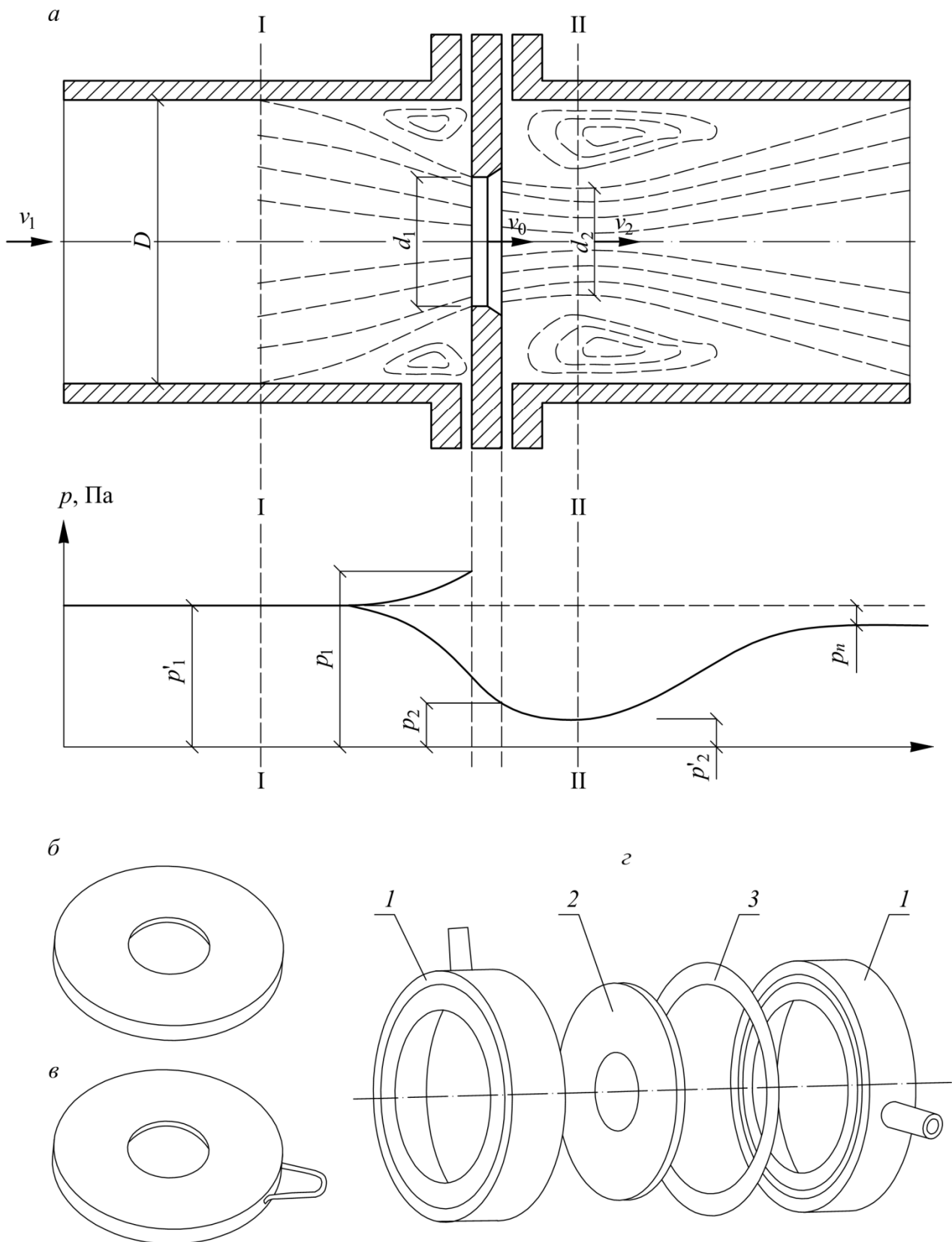


Рис. 5.6. Схема расходомера переменного перепада давления (*a* – изменение потока и давления при прохождении через сужающее устройство; *б* – камерная диафрагма; *в* – бескамерная диафрагма; *г* – конструкция камерной диафрагмы): *1* – кольцевые камеры; *2* – диск; *3* – уплотняющая прокладка

5.7. Расходомеры постоянного перепада давления

Наибольшее распространение среди расходомеров постоянного перепада давления получили ротаметры. Ротаметры – это расходомеры со свободно перемещающимся в корпусе поплавком.

Принцип работы ротаметра (рис. 5.7) заключается в следующем. Через коническую трубку 4 ротаметра снизу вверх проходит жидкость, которая поднимает поплавок 2 до тех пор, пока вес поплавка G_1 , Н, не уравновесится силами, действующими на него со стороны измеряемого потока G_2 , Н.

Вес поплавка G_1 определяется по формуле

$$G_1 = V_{\text{п}} g (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{с}}), \quad (5.15)$$

где $V_{\text{п}}$ – объем поплавка, м³; $\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{с}}$ – плотность поплавка и измеряемой среды, соответственно, кг/м³.

Определяется сила G_2 действующая на поплавок со стороны потока:

$$G_2 = (p_1 - p_2) f_{\text{п}}, \quad (5.16)$$

где p_1 , p_2 – давление среды до и после поплавка, Па; $f_{\text{п}}$ – наибольшее поперечное сечение поплавка, м².

Состояние равновесия поплавка описывается уравнением

$$p_1 - p_2 = \frac{V_{\text{п}} g (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{с}})}{f_0}. \quad (5.17)$$

Положение поплавка соответствует конкретному значению объемного расхода вещества L , м³/ч, определяемого по формуле

$$L = \alpha f_{\text{к}} \sqrt{\frac{2V_{\text{п}} g (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{с}})}{f_0 \rho_{\text{с}}}} = \alpha f_{\text{к}} k, \quad (5.18)$$

где α – коэффициент расхода, учитывающий особенности потока; $f_{\text{к}}$ – площадь кольцевого зазора между трубкой и боковой поверхностью поплавка, м²; k – коэффициент пропорциональности.

Зависимость (5.18) линейна, что говорит о равномерности шкалы ротаметра.

Трубка ротаметра изготавливается из стекла при давлениях, не превышающих 600 кПа, при больших значениях применяются металлические трубки.

Ротаметр может быть оборудован электрической дифференциально-трансформаторной системой передачи показаний (рис. 5.8). Трубка 1 данных ротаметров оборудована диафрагмой 2, внутри которой перемещается конусный поплавок 3. Поплавок соединен со штоком 4, на противоположном конце которого располагается сердечник 5 дифференциально-трансформаторного преобразователя. При перемещении поплавка меняется положение сердечника, что приводит к изменению напряжения на катушках 7 преобразователя. Изменение напряжения преобразуется в цифровой сигнал во вторичном преобразователе и выводится на дисплей ротаметра.

Ротаметры измеряют расход при рабочих давлениях до 6,2 МПа с погрешностью измерения, не превышающей 3 % верхнего предела измерений.

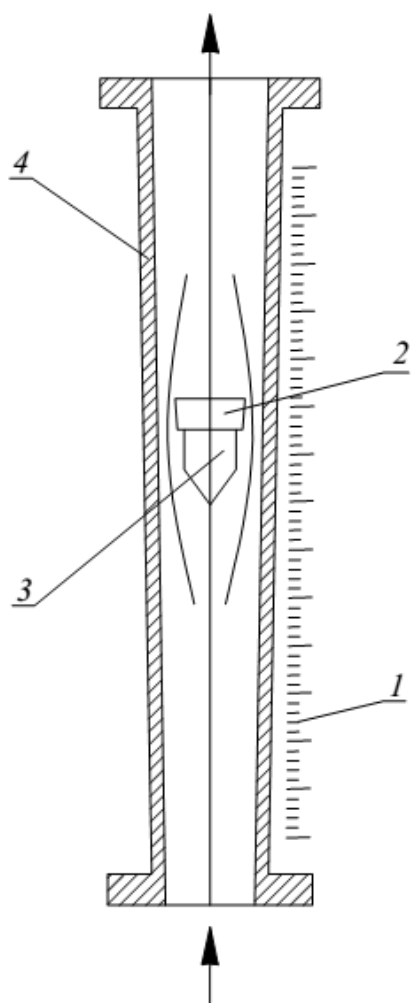


Рис. 5.7. Схема стеклянного ротаметра:
1 – шкала; 2 – поплавок; 3 – наконечник;
4 – коническая трубка

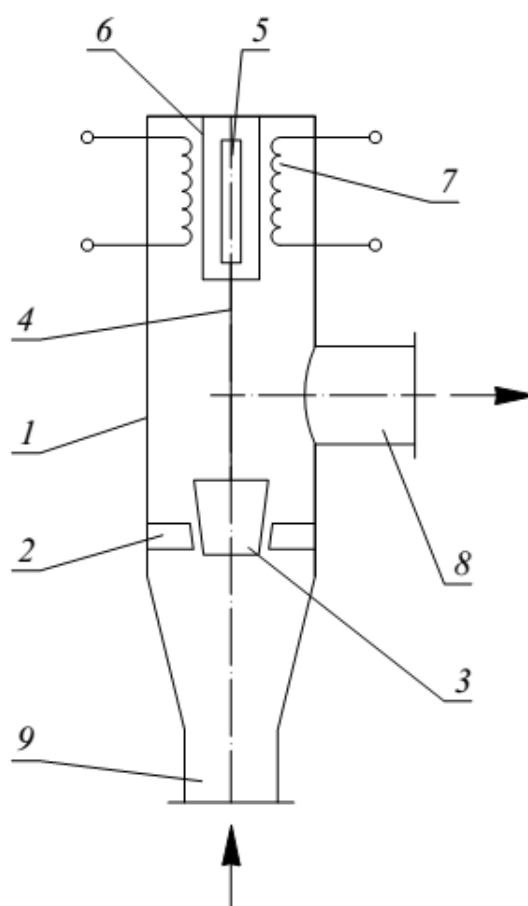


Рис. 5.8. Ротаметр, оборудованный электрической системой передачи показаний:
1 – трубка; 2 – диафрагма; 3 – поплавок;
4 – шток; 5 – сердечник; 6 – разделительная трубка; 7 – катушки; 8 – выходной патрубок;
9 – входной патрубок

5.8. Электромагнитные расходомеры

Электромагнитные расходомеры – это приборы для измерения расхода, принцип работы которых основан на взаимодействии движущейся жидкости с магнитным полем. Данный тип расходомеров является бесконтактным, в нем отсутствует прямой контакт измеряемой среды с чувствительным элементом.

Принципиальная схема электромагнитного расходомера приведена на рис. 5.9. По трубопроводу *1* протекает жидкость, попадающая в электромагнитное поле, создаваемое полюсами *5*, *6* магнита (либо катушками индуктивности).

В стенках трубопровода напротив друг друга установлены электроды *2*, *3*, образующие вместе с электропроводящей жидкостью и измерительным прибором *4* электрическую цепь. При осесимметричном профиле скоростей в жидкости между электродами наводится ЭДС, которая прямо пропорциональна объемному расходу жидкости, расчет значений которого проводится во вторичном преобразователе, получающем сигналы от измерительного прибора.

Корпус расходомера изготавливается из материалов-диэлектриков, таких как фторопласт, резина, эбонит и др.

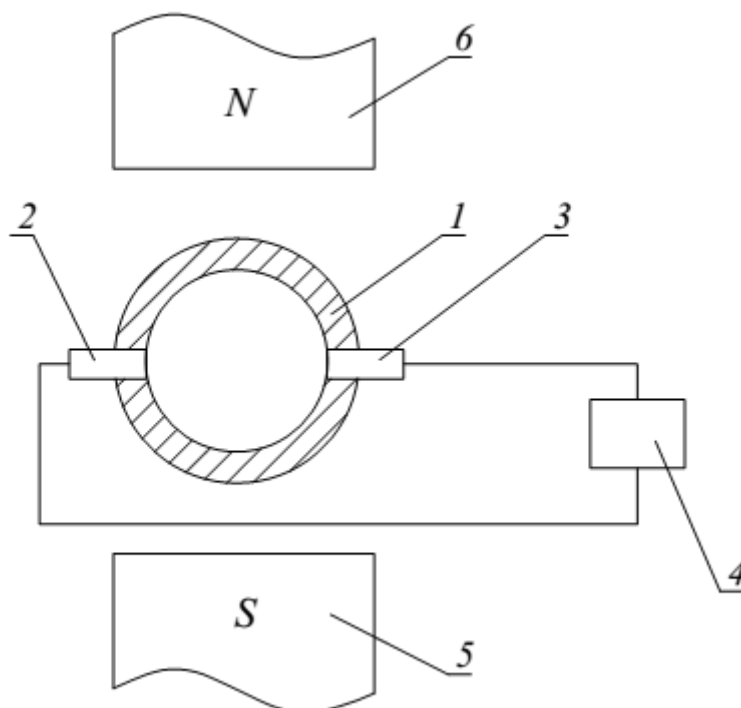


Рис. 5.9. Схема электромагнитного расходомера: *1* – трубопровод; *2*, *3* – электроды; *4* – измерительный прибор; *5*, *6* – полюса магнита

Электродвижущая сила E , В, индуцируемая в проводнике, пересекающем силовые линии постоянного магнитного поля, определяется по формуле

$$E = BDv_{\text{cp}}, \quad (5.19)$$

где B – магнитная индукция, Тл; D – внутренний диаметр трубопровода, м; v_{cp} – средняя скорость движения жидкости в трубопроводе, м/с.

Объемный расход L , м³/ч, равен

$$L = \frac{\pi ED}{4B}. \quad (5.20)$$

Использование электромагнитных расходомеров с постоянным магнитным полем имеет известные недостатки: трудность усиления постоянного тока; возникновение на электродах гальванической ЭДС и ЭДС поляризации, что приводит к неверным результатам измерения. В связи с этим распространение получили электромагнитные расходомеры с переменным магнитным полем.

Зависимость объемного расхода жидкость L от ЭДС для расходомеров с переменным магнитным полем имеет вид

$$L = \frac{\pi ED}{4B_{\text{max}} \sin \omega t}, \quad (5.21)$$

где B_{max} – амплитуда магнитной индукции, Тл; ω – круговая частота, с⁻¹; t – время изменения магнитного поля, с.

На точность измерений электромагнитных расходомеров с переменным магнитным полем влияют паразитные помехи от внешних цепей, емкостные от переменного тока питающего магнит, и индукционные от магнитного поля преобразователя. Данные помехи исключаются путем экранирования прибора и применения двух индукционных преобразователей с магнитными полями, направленными в противоположном направлении.

Электромагнитные расходомеры используются для измерений расходов в интервале от 0,002 до 300 000 м³/ч в трубопроводах от 3 до 3000 мм. Широкий диапазон измерений обусловлен безынерционностью данных расходомеров. Результаты измерений не зависят от физических свойств среды, наличия взвешенных частиц и пузырьков газа.

5.9. Ультразвуковые расходомеры

Ультразвуковые расходомеры – это приборы для определения расхода, их принцип работы основан на явлении смещения звукового колебания движущейся жидкой или газообразной средой.

Расход определяется путем косвенных измерений разности времени прохождения ультразвуковых импульсов по потоку и против него (временной импульсный метод), по разности фаз между ультразвуковыми колебаниями, распространяющимися по потоку и против него (фазовый метод), и по разности частот двух автогенераторов, в качестве элемента обратной связи которых используется контролируемая среда (частотный метод).

Рассмотрим принцип работы наиболее распространенных ультразвуковых расходомеров, работающих по временной импульсному методу (рис. 5.10).

Ультразвуковой сигнал, излучаемый электроакустическим приемопередающим преобразователем 1, проходит через движущуюся по трубе жидкость и воспринимается преобразователем 2. Преобразователи ультразвукового сигнала устанавливают под углом $\alpha = 20 \dots 70^\circ$.

При движении жидкости происходит снос ультразвуковой волны, который приводит к изменению времени распространения ультразвукового сигнала. При движении сигнала по потоку жидкости время прохождения сигнала уменьшается, а при движении против потока жидкости – увеличивается.

Разность показаний времени прохождения ультразвукового сигнала по потоку и против потока Δt , с, пропорциональна скорости движения жидкости, а при известном диаметре трубопровода и объемному расходу L , м³/ч:

$$\Delta t = t_{2-1} - t_{1-2} = \frac{2Lv}{a^2}, \quad (5.22)$$

где t_{2-1} , t_{1-2} – время распространения ультразвуковых колебаний соответственно против направления движения потока жидкости и по нему, с; v – скорость потока, м/с; a – скорость звука в данной среде, м/с.

Значения объемного расхода определяются по результатам расчетов во вторичном преобразователе 3, соединенном с преобразователями кабелем 4.

Ультразвуковые расходомеры предназначены для измерений расходов любых веществ, не имеющих твердых и газовых включений. Точность измерений не зависит от физических свойств измеряемой среды.

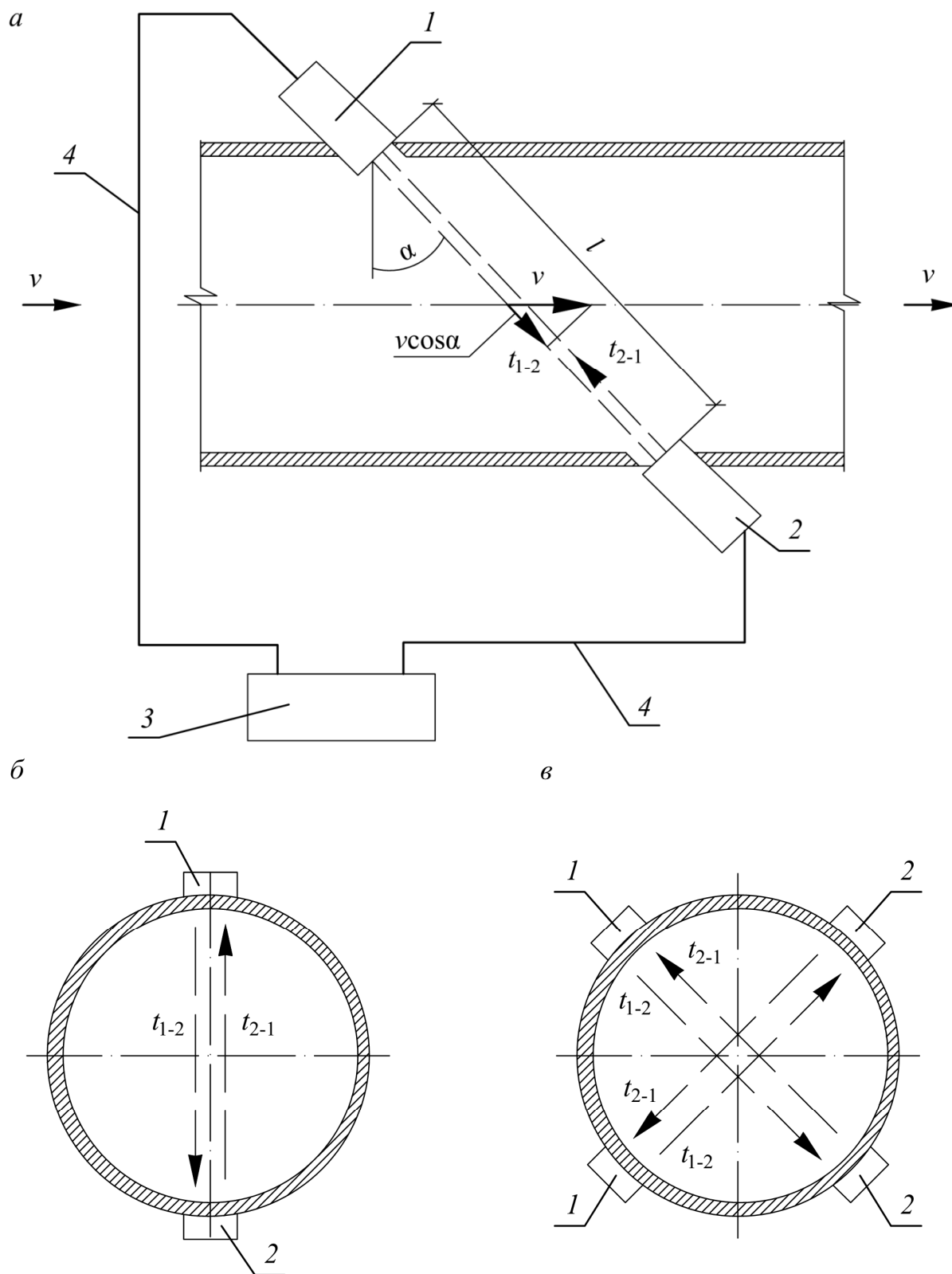


Рис. 5.10. Ультразвуковой расходомер (*a* – принципиальная схема; *б* – поперечное сечение расходомера с двумя преобразователями; *в* – то же с четырьмя преобразователями): 1, 2 – электроакустические преобразователи; 3 – вторичный преобразователь; 4 – кабели

5.10. Расходомеры Кориолиса

Расходомеры Кориолиса – это приборы для измерения расхода вещества. Их принцип работы основан на использовании сил инерции. Данные расходомеры получили свое название в честь французского математика Гюстава Кориолиса, доказавшего, что следует учитывать силу инерции при описании движения тел во вращающейся системе координат.

Принципиальная схема работы расходомера Кориолиса приведена на рис. 5.11. Сенсорные трубки 1 расходомера, имеющие изогнутую форму, приварены к корпусу 4, соединенному с трубопроводом фланцами 5. Вещество, расход которого измеряется, поступает в измерительные трубки в равных долях. Трубки колеблются в противоположном направлении с определенной частотой под воздействием задающей катушки 6. На входе и выходе установлены детекторы скорости 2, определяющие положение трубок относительно друг друга. Детекторы скорости представляют собой сборки магнитов 2 и катушек-соленоидов 3, смонтированных на разных трубках. Каждая катушка движется в однородном магнитном поле магнита. В результате генерируется напряжение в форме синусоидальной волны (рис. 5.11, а). Движение жидкости в колеблющейся трубке при первой половине цикла колебания приводит к сопротивлению её изгибанию вниз, а при обратном течении после поворота во второй половине цикла колебания, напротив, способствует её изгибу вверх. Движение жидкости через вибрирующую трубку приводит к её закручиванию (рис. 5.11, б). В этом и проявляется эффект Кориолиса. Угол закручивания трубки α прямо пропорционален расходу жидкости, проходящей через трубку.

При движении жидкости через трубки синусоидальный сигнал от катушек-соленоидов на входе будет запаздывать по сравнению с сигналом на выходе на величину времени ΔT , с, пропорциональную массовому расходу. Чем больше величина ΔT , тем больше массовый расход.

Расходомеры Кориолиса предназначены для измерения расходов жидкостей и газов в трубопроводах диаметром от 3 до 150 мм. Класс точности данных приборов от 0,5 до 1,5.

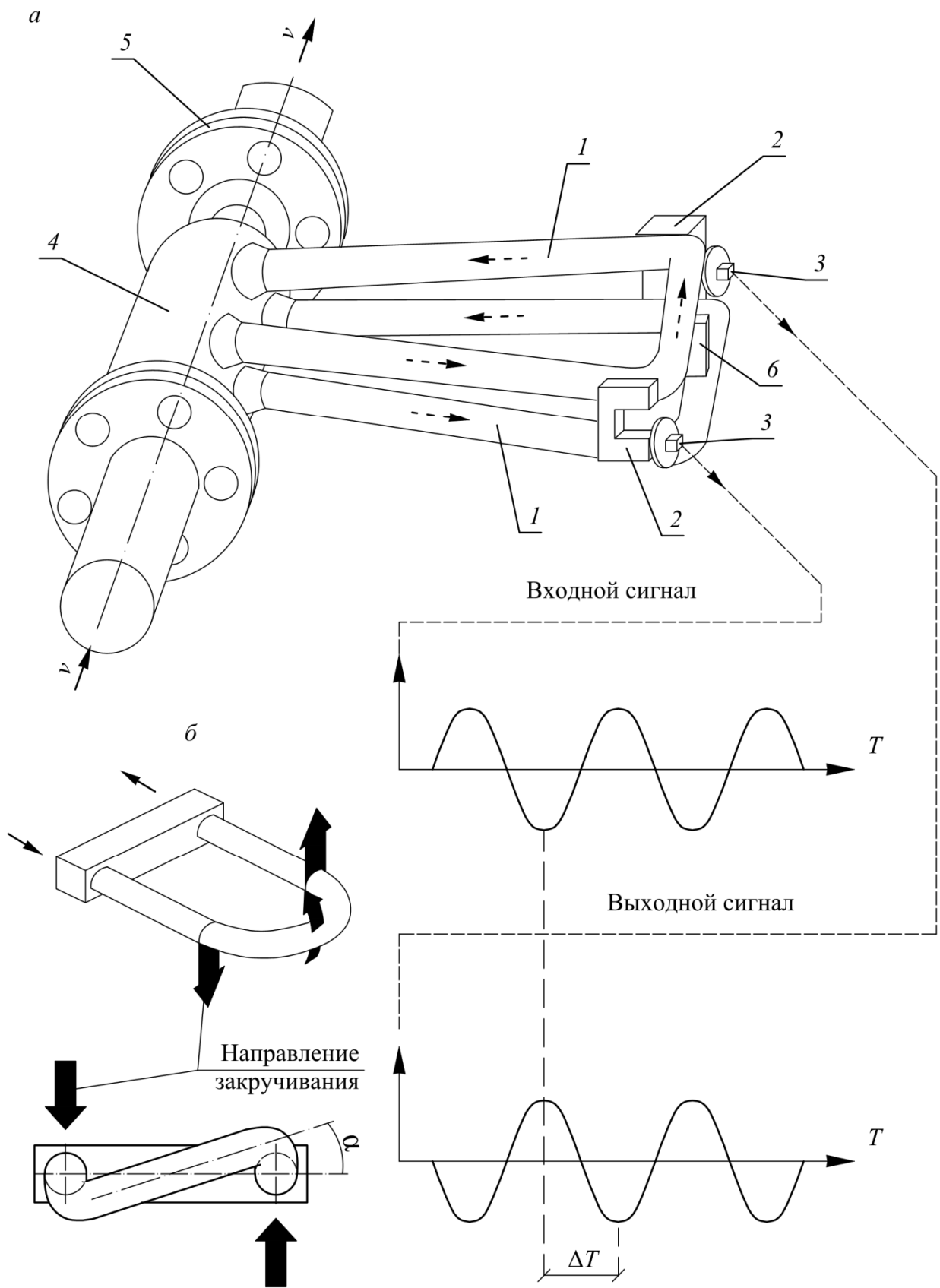


Рис. 5.11. Принципиальная схема работы расходомера Кориолиса (*a* – конструкция; *б* – направления изгиба): 1 – сенсорные трубки; 2 – магниты; 3 – катушки-соленоиды; 4 – корпус; 5 – фланцевое соединение; *б* – задающая катушка

5.11. Вихревые расходомеры

Вихревые расходомеры – это устройства, предназначенные для определения расхода веществ, принцип работы которых основан на эффекте Кармана (эффекте вихревой дорожки). Эффект Кармана заключается в том, что при обтекании твердого тела потоком жидкости за ним образуется вихревая дорожка из вихрей, которые поочередно срываются с противоположных сторон тела. Частота образования вихрей пропорциональна скорости движения потока.

Принципиальная схема вихревого расходомера приведена на рис. 5.12 [43]. По направлению движения жидкости устанавливается тело обтекания 1, за которым располагаются датчики пульсации давления 2. Перед телом обтекания установлен тензорезисторный преобразователь избыточного давления 3. Внутри тела обтекания размещен датчик температуры (термопреобразователь сопротивления) 4. Для доступа жидкости к датчику температуры в теле обтекания предусмотрено отверстие 5. Полученные от датчиков сигналы передаются к вторичному преобразователю 6, а оттуда к вычислителю, в котором по полученным данным проводится расчет расхода жидкости.

Частным случаем вихревых расходомеров является вихреакустический расходомер, схема которого приведена на рис. 5.13. В качестве тела обтекания принята трапецеидальная призма 1. Детектирование вихрей осуществляется ультразвуковыми преобразователями, расположенными за телом обтекания. Ультразвуковые колебания поступают из пьезоизлучателя 3 к пьезоприемнику 4, в результате взаимодействия с вихрями выходные и полученные сигналы колебаний становятся модулированными по фазе. В фазовом детекторе 5 разность фаз колебаний преобразуется в напряжение, по частоте и амплитуде пропорциональное частоте и интенсивности следования вихрей. Выходной сигнал поступает в микропроцессор, в котором вычисляется расход жидкости.

Областью применения вихревых расходомеров является измерение расходов чистых жидкостей (не способствующих изменению формы тела обтекания) с низкой вязкостью, двигающихся со средней и высокой скоростью.

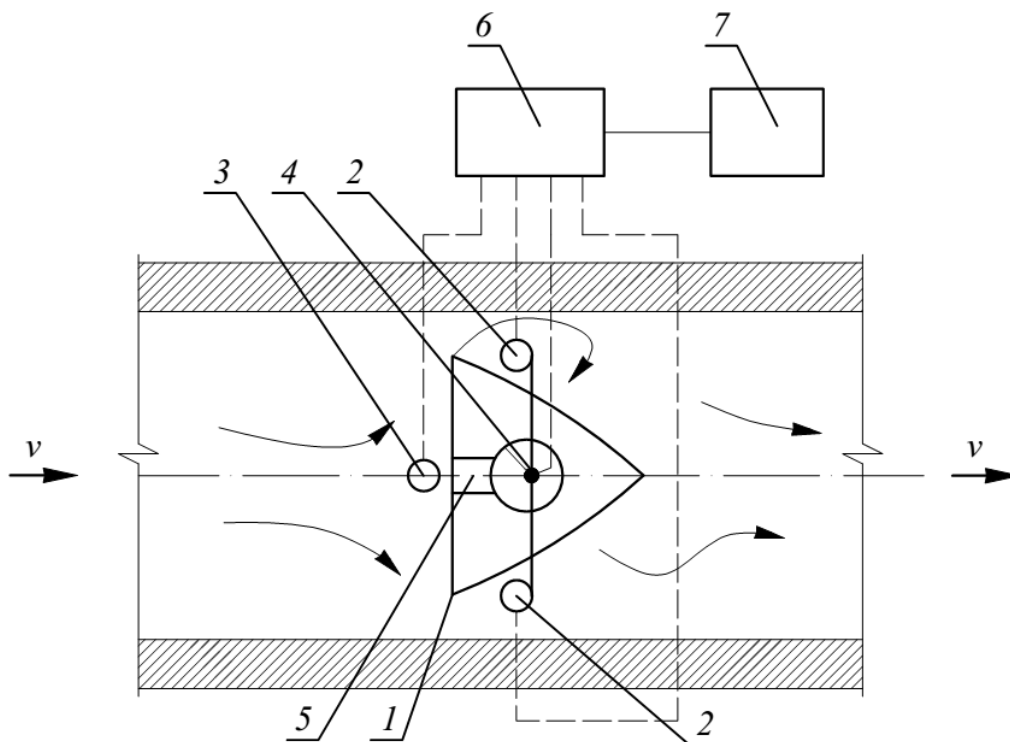


Рис. 5.12. Схема вихревого расходомера: 1 – тело обтекания; 2 – датчик пульсации давления; 3 – датчик избыточного давления; 4 – датчик температуры; 5 – входное отверстие; 6 – вторичный преобразователь; 7 – вычислитель

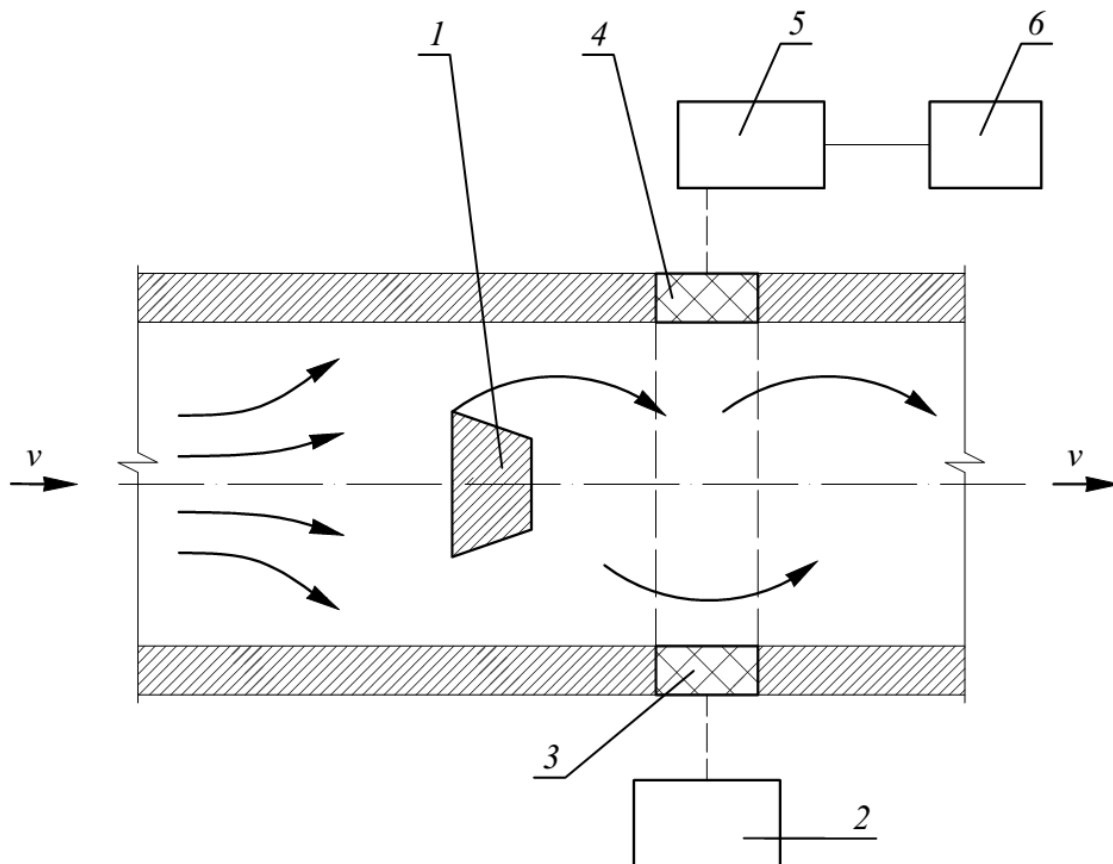


Рис. 5.13. Схема вихреакустического расходомера: 1 – тело обтекания; 2 – генератор; 3 – пьезоизлучатель; 4 – пьезоприемник; 5 – детектор; 6 – микропроцессор

5.12. Калориметрические и термоконвективные расходомеры

Работа калориметрических расходомеров основана на нагреве жидкости или газа внешним источником энергии и создании в результате этого разности температур, зависящей от скорости исследуемого потока.

Количество теплоты Q , Вт, переданное нагревателем потоку составляет

$$Q = kGc_p(t_2 - t_1), \quad (5.23)$$

где k – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения температур по сечению трубопровода и перевода единиц измерения физических величин; G – массовый расход жидкости, кг/ч; c_p – изобарная теплоемкость вещества, кДж/(кг·°С); t_1, t_2 – температура до и после нагревателя, °С.

Количество теплоты, отданное электронагревателем Q , Вт, составляет

$$Q = 0,24I^2R, \quad (5.24)$$

где I – сила тока, А; R – активное сопротивление нагревателя, Ом.

Уравнение для определения массового расхода через расходомер без учета потерь теплоты в окружающую среду имеет вид

$$G = \frac{0,24I^2R}{kc(t_2 - t_1)}. \quad (5.25)$$

Рассмотрим принципиальную схему работы калориметрического расходомера (рис. 5.14, а). Датчик расходомера представляет собой нагреватель \mathcal{Z} с двумя установленными до и после него датчиками температуры. Исследуемое вещество нагревается нагревателем \mathcal{Z} , величина мощности нагрева электронагревателя является постоянной и известной величиной. Приведенная схема позволяет сразу градуировать расходомер по разности температур теплоносителя.

Относительная погрешность измерений калориметрическими расходомерами составляет примерно $\pm 0,5 \dots 1$ %.

Аналогичный принцип работы имеют термоконвективные расходомеры (рис. 5.14, б), отличающиеся тем, что датчики температуры и нагреватель находятся снаружи трубопровода. Отсутствие контакта со средой повышает надежность данных расходомеров при измерении расходов агрессивных веществ.

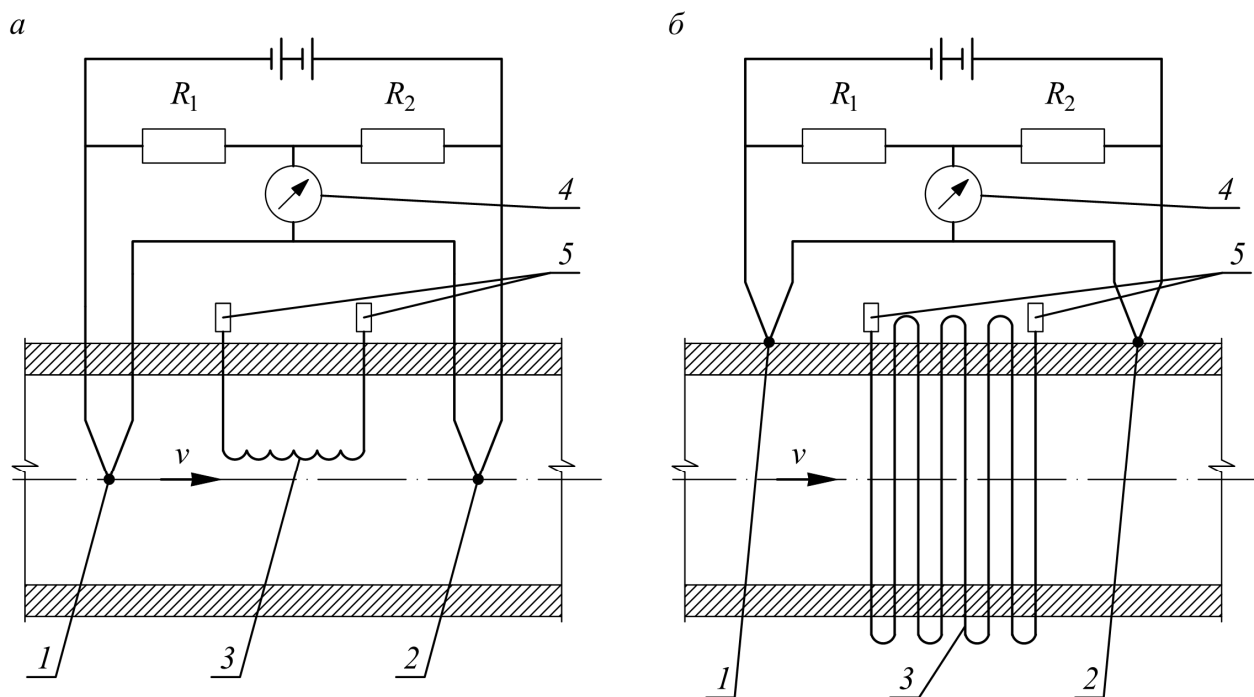


Рис. 5.14. Принципиальные схемы расходомеров (*a* – калориметрических; *б* – термоконвективных): 1, 2 – термометры сопротивления; 3 – электрический нагреватель; 4 – измерительный прибор; 5 – источник электрической энергии

5.13. Контрольные вопросы и задания для практических занятий и самостоятельной работы

Контрольные вопросы.

1. Чем счетчики отличаются от расходомеров? Перечислите основные характеристики счетчиков.
2. Перечислите, на какие основные типы подразделяются счетчики и расходомеры по принципу их работы.
3. Запишите зависимость между массовым и объемным расходами.
4. В чем заключается принцип работы скоростных счетчиков расхода жидкости с винтовой вертушкой?
5. Опишите принцип работы барабанного расходомера. Для измерений расходов каких веществ предназначены данные расходомеры?
6. В какой зависимости друг от друга находятся коэффициенты расхода, скорости входа и истечения сужающего устройства расходомеров переменного перепада давления?

7. Приведите основные конструктивные элементы камерной диафрагмы.
8. Дайте описание электрической дифференциально-трансформаторной системы ротаметров, в чем заключается принцип её работы.
9. В чем преимущества и недостатки электромагнитных расходомеров с постоянным и переменным магнитным полем?
10. Напишите уравнение объемного расхода жидкости от ЭДС для электромагнитных расходомеров с переменным магнитным полем.
11. Конструкция и принцип работы ультразвуковых расходомеров.
12. Каким образом связаны друг с другом угол закручивания сенсорной трубки, запаздывание синусоидального сигнала катушек и измеряемого расхода в расходомерах Кориолиса?
13. Перечислите основные конструктивные элементы вихревых и вихре-акустических расходомеров, в чем их сходства и отличия?
14. Чем отличаются друг от друга калориметрические и термоконвективные расходомеры? Какие из них имеют лучшую защиту от агрессивных сред?
15. Запишите уравнение для определения массового расхода калориметрическими и термоконвективными расходомерами.

Задания для самостоятельной работы.

Подготовить доклад в формате презентации с использованием средств Microsoft Office PowerPoint на следующие темы.

1. Абонентские счетчики холодной и горячей воды.
2. Ультразвуковые расходомеры для вязких жидкостей.
3. Методы расчета конструкции измерительной диафрагмы расходомеров переменного перепада давления.
4. Физо-френелевые лазерные расходомеры.
5. Гидродинамические расходомеры.
6. Турбопоршневые расходомеры.
7. Тепловычислители индивидуальных тепловых пунктов.
8. Расходомеры для систем канализации.

Глава 6. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЕЙ

6.1. Классификация приборов для измерения уровней

Выбор способа измерения уровня заполнения емкостей и сосудов зависит от физико-химических свойств контролируемой среды, условий работы и требований к эксплуатации.

По физическим законам, заложенным в принцип работы приборов, уровнемеры подразделяются на визуальные, поплавковые, буйковые, гидростатические, электрические, ультразвуковые, радарные и волновые.

Результатом измерения показаний уровнемера являются либо отметка уровня контролируемого вещества, либо отметка линии раздела нескольких веществ, находящихся в одной емкости.

Кроме приборов, предназначенных для непрерывного слежения за уровнем, также существуют сигнализаторы, применяемые для контроля за конкретными, промежуточными, положениями уровня.

6.2. Визуальные уровнемеры

Визуальные уровнемеры представляют собой указательные стекла, работа которых основана на принципе сообщающихся сосудов. Внешний вид указательного стекла приведен на рис. 6.1 [39].

Указательное стекло соединяется с емкостью обоими концами таким образом, чтобы уровни жидкости в цилиндрической трубке и емкости совпадали.

Возможно отсоединение уровнемера от емкости с помощью шаровых кранов при необходимости продувки системы.

В зависимости от исполнения стекла бывают проходящего и отраженного света. Данные уровнемеры не рекомендуется изготавливать длиной более 0,5 м, поэтому при большей высоте емкости, в которой контролируется уровень жидкости, применяют составные блоки из указательных стекол.

Плоские указательные стекла могут применяться для контроля уровня при рабочем давлении до 2,94 МПа и температуре до 300 °С.

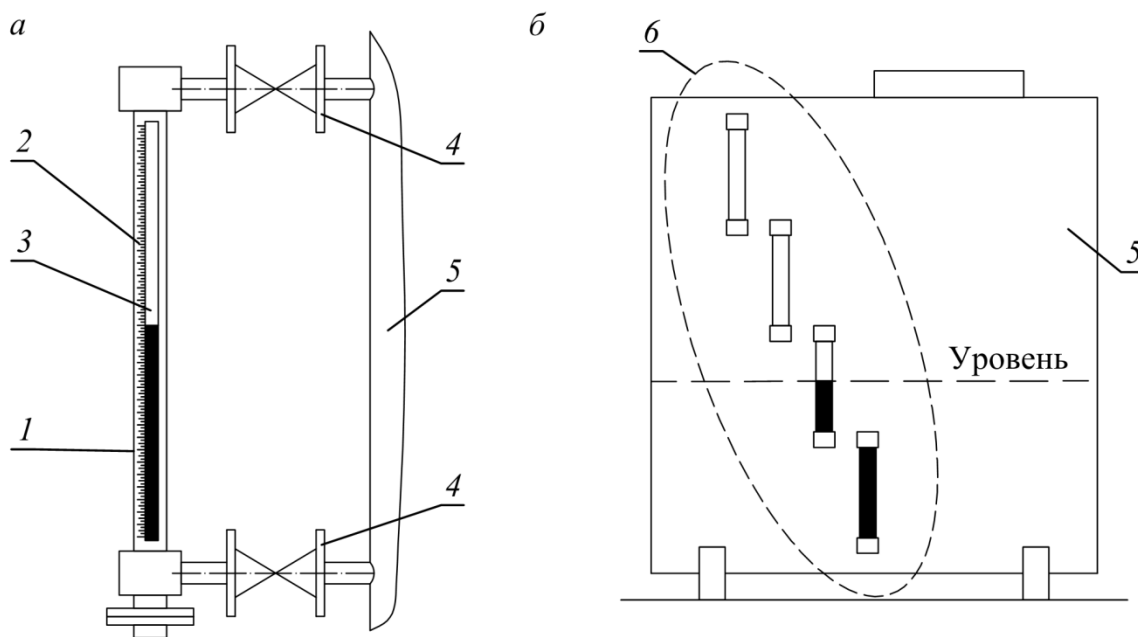


Рис. 6.1. Указательные стекла (*а* – одно; *б* – составного типа): 1 – цилиндрическая трубка; 2 – шкала; 3 – уровень жидкости; 4 – шаровые краны; 5 – корпус; 6 – блок стекло

6.3. Поплавковые уровнемеры

Поплавковые уровнемеры подразделяются на уровнемеры узкого и широкого диапазона измерений. Уровнемеры узкого диапазона (рис. 6.2) представляют собой шарообразный поплавок диаметром до 100 мм из нержавеющей стали или полимерных материалов, который плавает на поверхности контролируемой жидкости. При изменении уровня жидкости поплавок 1 меняет свою глубину погружения, перемещая штангу 2, которая передает показания либо на шкалу 3, либо вторичному преобразователю, где результат измерения преобразуется в электрический и цифровой сигналы [37].

Схема поплавкового уровнемера широкого диапазона измерений приведена на рис. 6.3 [39]. Поплавок 1 соединен тросом 2 с противовесом 4. На противовесе прикреплена стрелка, указывающая уровень жидкости в резервуаре.

Поплавок подбирается таким образом, чтобы находиться в состоянии равновесия с противовесом только при определенной глубине погружения в емкость. Состояние равновесия поплавка и противовеса описывается уравнением:

$$G_{\text{пр}} = G_{\text{п}} + f_{\text{п}} h_1 \rho_{\text{ж}} g, \quad (6.1)$$

где $G_{\text{пр}}$, $G_{\text{п}}$ – вес противовеса и поплавка, Н; $f_{\text{п}}$ – площадь поплавка, м²; h_1 – глубина погружения поплавка, м; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³.

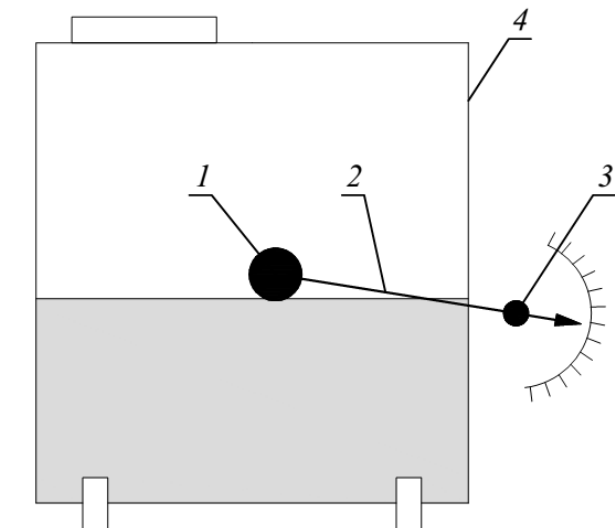


Рис. 6.2. Поплавковый уровнемер узкого диапазона: 1 – поплавок; 2 – штанга; 3 – указывающая стрелка; 4 – емкость

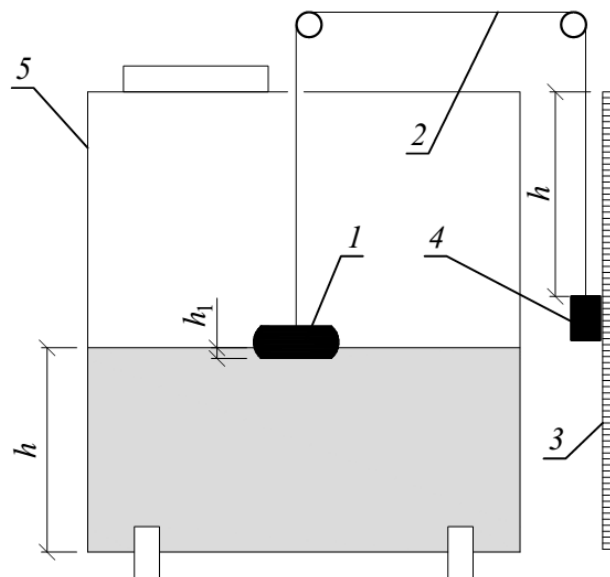


Рис. 6.3. Поплавковый уровнемер широкого диапазона: 1 – поплавок; 2 – гибкий трос; 3 – шкала; 4 – противовес; 5 – емкость

6.4. Буйковые уровнемеры

Принцип работы буйковых уровнемеров основан на законе Архимеда, согласно которому на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, пропорциональная весу вытесненной жидкости.

Схема работы буйкового уровнемера приведена на рисунке 6.4 [20]. Чувствительным элементом уровнемера является цилиндрический боек 1, выполненный в виде трубы из нержавеющей стали, в камере б. Боек находится в вертикальном положении и частично погружен в измеряемую жидкость. Длина бойка примерно равна максимальной высоте жидкости в емкости.

При изменении уровня жидкости в емкости вес бойка в жидкости изменится пропорционально её уровню. Выталкивающая сила составит

$$F = \rho g f_6 h, \quad (6.2)$$

где ρ – плотность измеряемой жидкости, кг/м^3 ; f_6 – площадь живого сечения бойка, м^2 ; h – высота бойка, погруженного в воду, м.

Если уровень жидкости меньше или равен начальному h_0 , измерительная штанга 2 находится в равновесии, так как момент бойка, создаваемый его весом G_1 , равен моменту противовеса $M_1 = M_2$.

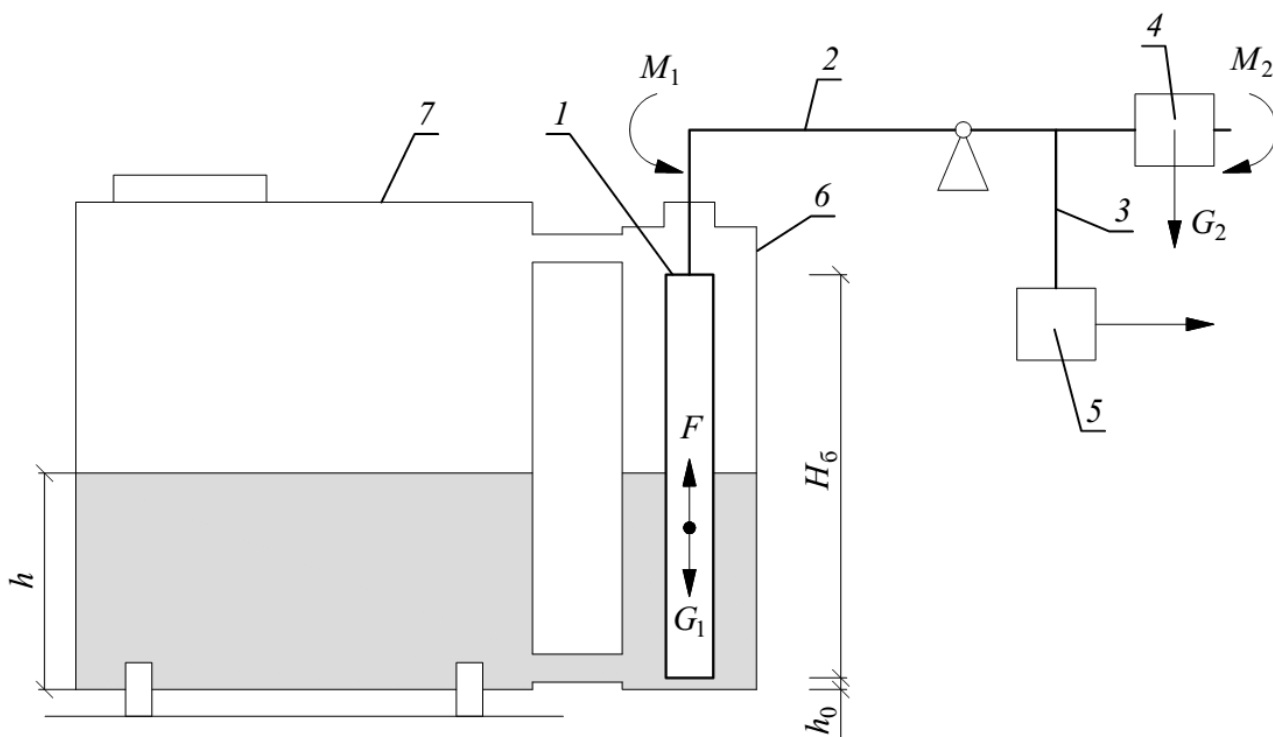


Рис. 6.4. Схема буйкового уровнемера: 1 – буйек; 2 – штанга; 3 – рычаг; 4 – противовес; 5 – вторичный преобразователь; 6 – выносная камера; 7 – емкость

При повышении уровня жидкости выше h_0 часть буйка длиной $(h - h_0)$ будет погружаться в жидкость, вес буйка при этом уменьшится на величину

$$F = \rho g f_6 (h - h_0). \quad (6.3)$$

С уменьшением веса буйка уменьшается и создаваемый им момент M_1 . Чтобы привести штангу 2 в состояние равновесия, противовес 4 опускается ниже на некоторую величину, двигая при этом рычаг 3, передающий перемещение поплавка вторичному преобразователю 5.

Современные буйковые уровнемеры изготавливаются для измерений уровней жидкостей в диапазоне от 0,025 до 16 м.

6.5. Гидростатические уровнемеры

Гидростатические уровнемеры работают по принципу определения гидростатического давления жидкости на дно резервуара.

Высота уровня жидкости h , м, определяется по формуле

$$h = \frac{P_{ст}}{\rho g}. \quad (6.4)$$

Из формулы (6.4) видно, что при известном гидростатическом давлении $p_{ст}$, Па, для определения уровня достаточно знать плотность контролируемой жидкости $\rho_{ж}$, кг/м³, и ускорение свободного падения g .

Измерение гидростатического давления может осуществляться датчиком избыточного давления, дифференциальным манометром, датчиком гидростатического давления и с помощью пьезометрического метода измерения [39].

Внешний вид и схема подключения датчиков избыточного давления и дифференциального давления для контроля за уровнем жидкости в открытом резервуаре приведены на рис. 6.5 [20]. Первая схема (рис. 6.5, а) непригодна для измерений уровней жидкости находящихся под избыточным давлением. Использование второй схемы (рис. 6.5, в) целесообразно только при расположении дифференциального манометра на одном уровне с жидкостью, когда измеряемый перепад давления на нем будет равен гидростатическому давлению.

В том случае если дифференциальный манометр располагается ниже нижней отметки измерения на высоту h_1 , м, применяют схемы с уравнительным сосудом, приведенные на рис. 6.6, а при проведении измерений в закрытом резервуаре, находящемся под избыточным давлением, – схему, показанную на рис. 6.7. Для последней схемы измеряемый манометром перепад давления определяется по формуле

$$\Delta p = \rho_{ж} g (H - h). \quad (6.5)$$

Для измерения уровня жидкостей широко используются датчики гидростатического давления (рис. 6.8, а), представляющие собой устройства с двумя измерительными камерами, одна из которых является открытой мембраной, а вторая – штуцером. Данные датчики присоединяются непосредственно к дну емкости. Типовые схемы присоединения приведены на рис. 6.8.

Существует и пьезометрический способ измерения уровня жидкости в емкостях, заключающийся в измерении давления газа, прокачиваемого по трубке, погруженной на фиксированную глубину в жидкость, которая заполняет резервуар. Пьезометрические уровнемеры применяются для контроля уровня агрессивных, кристаллизующихся жидкостей.

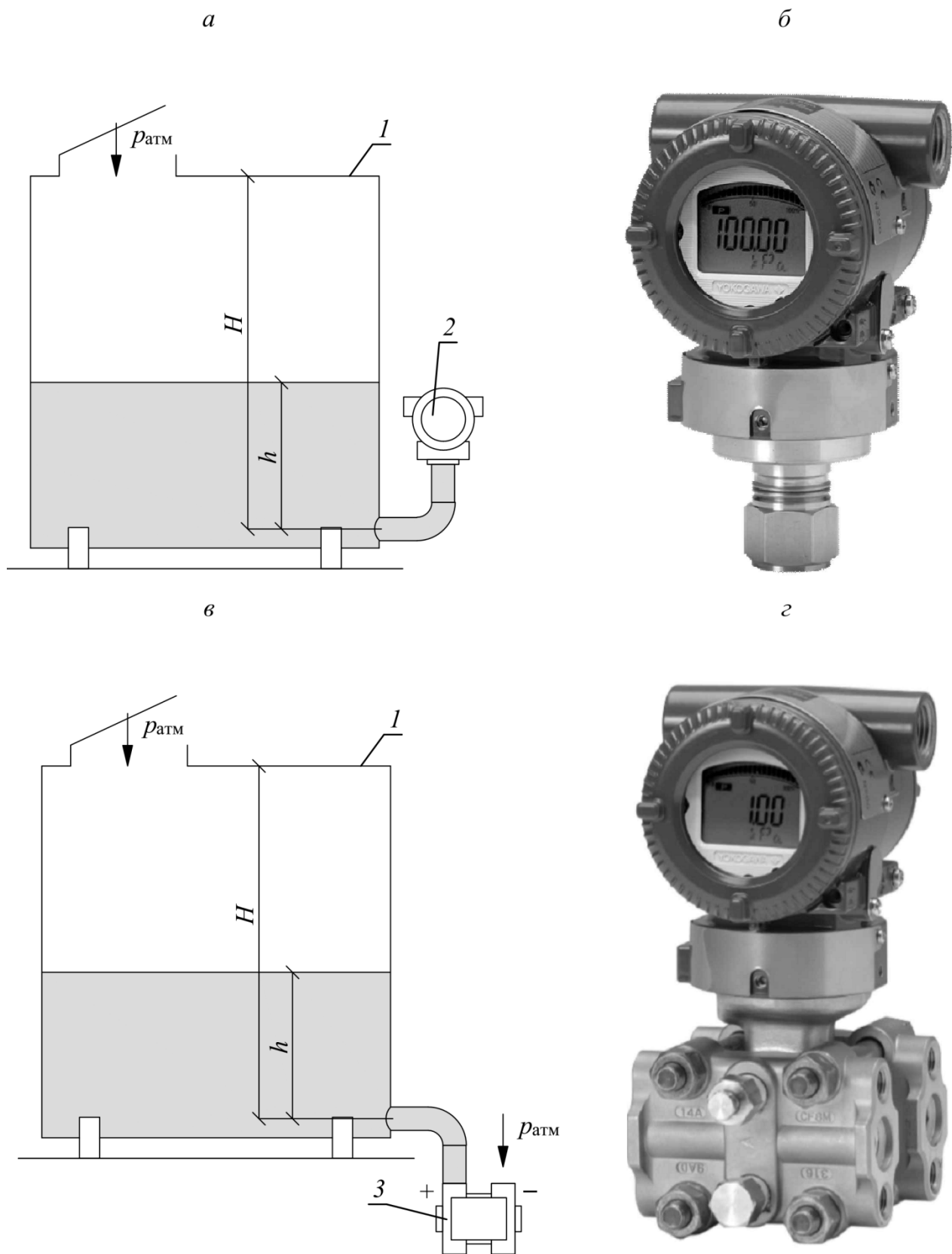


Рис. 6.5. Внешний вид и схемы подключения датчиков гидростатических уровнемеров (*а, в* – подключение датчика избыточного давления и дифференциального манометра соответственно к емкости, сообщающейся с атмосферой, для измерения гидростатического давления жидкости; *б, г* – внешний вид датчиков избыточного давления и дифференциального манометра (ЕЛХ, производитель ООО «Июкогава Электрик СНГ») соответственно): *1* – емкость; *2* – датчик избыточного давления; *3* – дифференциальный манометр

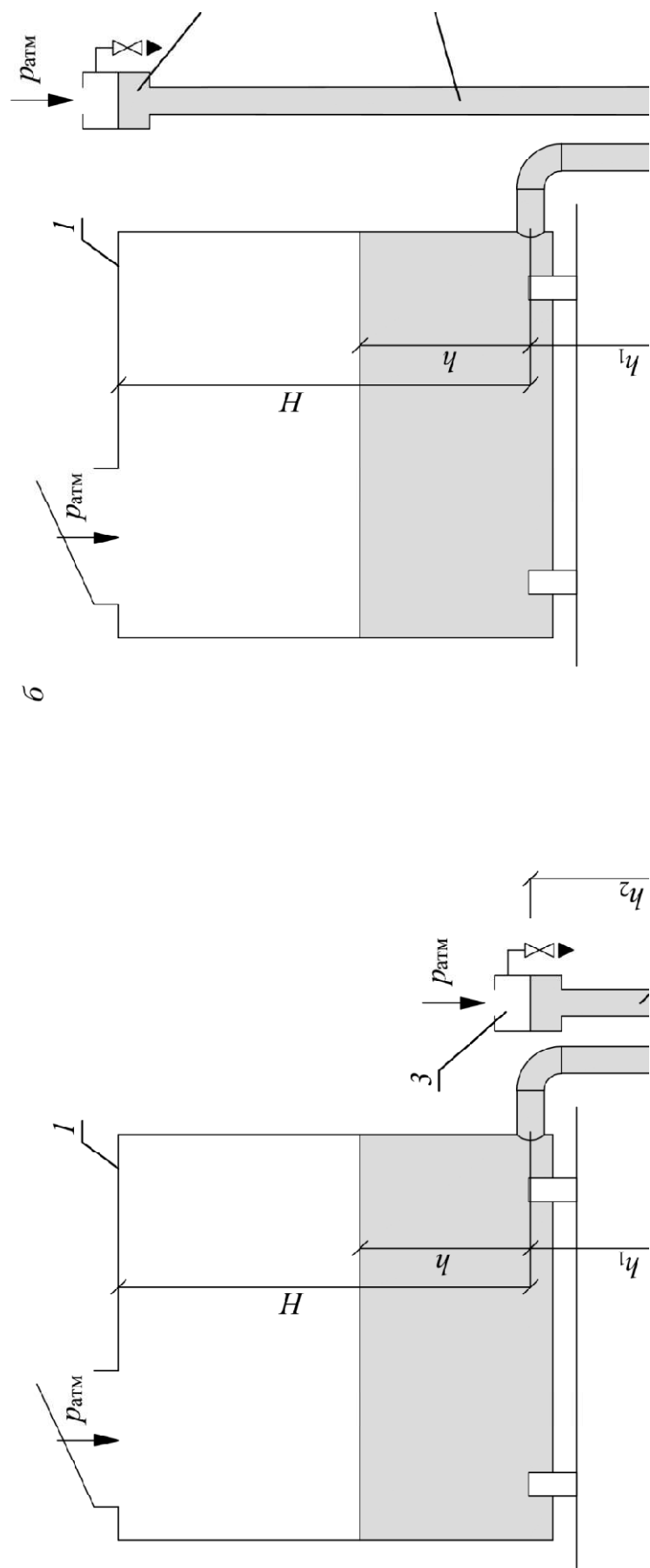


Рис. 6.6. Схемы измерения уровня открытого резервуара с помощью дифференциальных манометров с применением уравнения сосуда (а) – с нижним присоединением уравнительного сосуда; б – с верхним присоединением уравнительного со-

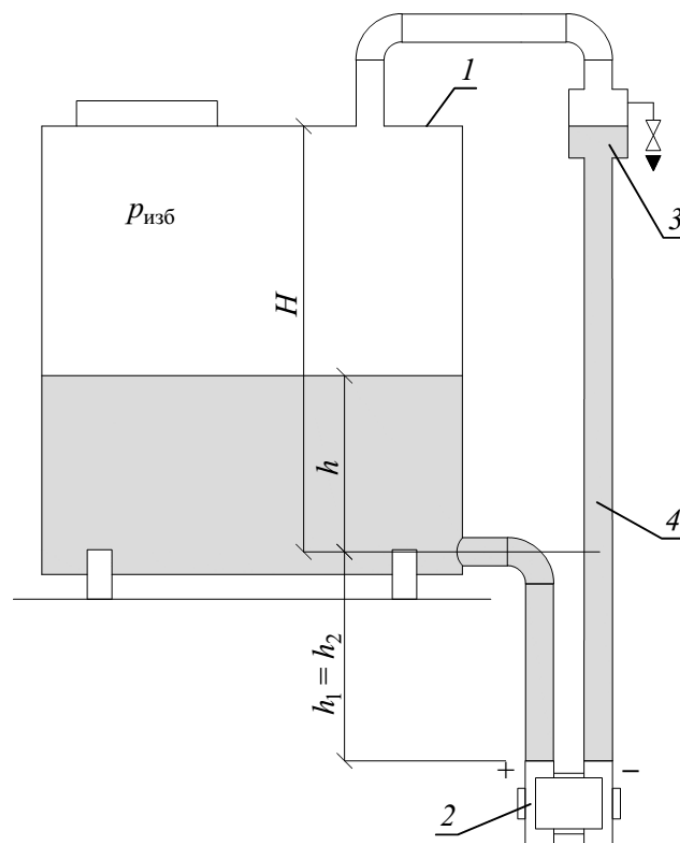


Рис. 6.7. Схема измерения уровня резервуара с помощью дифференциального манометра с использованием уравнильного сосуда в емкости под избыточным давлением: 1 – емкость; 2 – дифференциальный манометр; 3 – уравнильный сосуд; 4 – уравнивающая импульсная трубка

6.6. Электрические уровнемеры

Принцип работы электрических уровнемеров заключается в преобразовании уровня жидкости в электрический сигнал. Электрические уровнемеры подразделяются на омические и емкостные.

Определение уровня жидкости **емкостным уровнемером** основано на отличии диэлектрической проницаемости воздуха и измеряемой жидкости. Схема емкостного уровнемера показана на рис. 6.9 [42]. В емкость 4 опущен преобразователь, представляющий собой два цилиндрических конденсатора (трубы), один из которых расположен внутри другого. Между трубами находится слой жидкости высотой h .

Емкость преобразователя в данном случае равна сумме емкостей двух участков: погруженного в жидкость с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{ж}$; находящегося в среде с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{ср}$ (воздух).

Зависимость емкости преобразователя C , Ф, от высоты h имеет вид [43]

$$C = 0,24 \frac{\epsilon_{ж} h + \epsilon_{сп} (H - h)}{\lg(D/d)}, \quad (6.6)$$

где h – измеряемый уровень, м; H – максимально возможная измеряемая высота емкости, м; D, d – наружный и внутренний диаметр преобразователя, м.

При измерении уровней агрессивных сред обкладки цилиндрического преобразователя изготавливают из химически стойкого сплава либо покрывают антикоррозионной пленкой.

Омические уровнемеры используются для сигнализации о поддержании необходимого уровня жидкости. Схема работы омического уровнемера приведена на рис. 6.10 и заключается в замыкании электрической цепи источника питания через контролируемую среду. При необходимости контроля одного уровня достаточно одной пары электрод 1 – электромагнитное реле 2.

Сигналом о снижении уровня жидкости ниже контролируемой высоты служит размыкание цепи, как показано на рис. 6.10, б.

К недостаткам электродных приборов следует отнести невозможность их применения в вязких, кристаллизующихся средах, а также для контроля за уровнем веществ, образующих твердые осадки и налипающих на электроды.

6.7. Ультразвуковые уровнемеры

Ультразвуковые уровнемеры являются приборами бесконтактного действия, в которых используется принцип отражения звуковых волн от поверхности контролируемой среды. На рис. 6.11 приведена принципиальная схема работы ультразвукового уровнемера. Электронный блок 3 управляет частотой повторения ультразвуковых импульсов, которые передаются от уровнемера 2 к поверхности среды, отражаются от неё и возвращаются назад.

Время t , с, между моментом посылы и возвращения импульса находится в следующей зависимости от уровня среды h , м:

$$t = 2(H - h) / c. \quad (6.7)$$

где c – скорость распространения ультразвука в измеряемой среде, м/с.

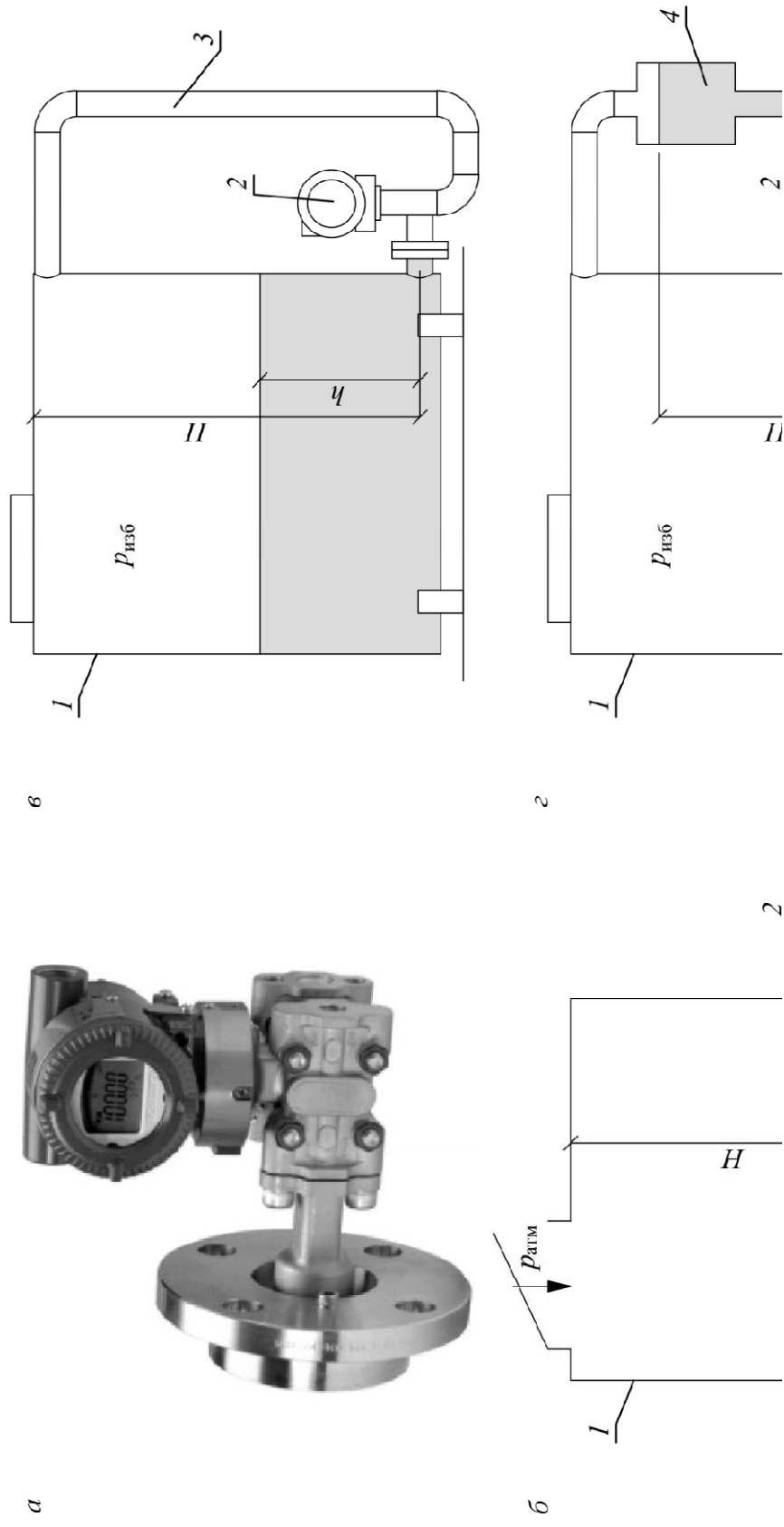


Рис. 6.8. Схемы измерения уровня с использованием датчиков гидростатического давления (*а* – внешний вид датчика гидростатического давления (ЕЛХ, производитель ООО «Июкогава Электрик СНГ»); *б* – для емкости под атмосферным давлением; *в* – для емкости под избыточным давлением без уравнительного сосуда; *г* – то же с уравнительным сосудом): *1* – емкость; *2* – датчик гидростатического давления; *3* – уравновешивающая импульсная трубка; *4* – уравнительный сосуд

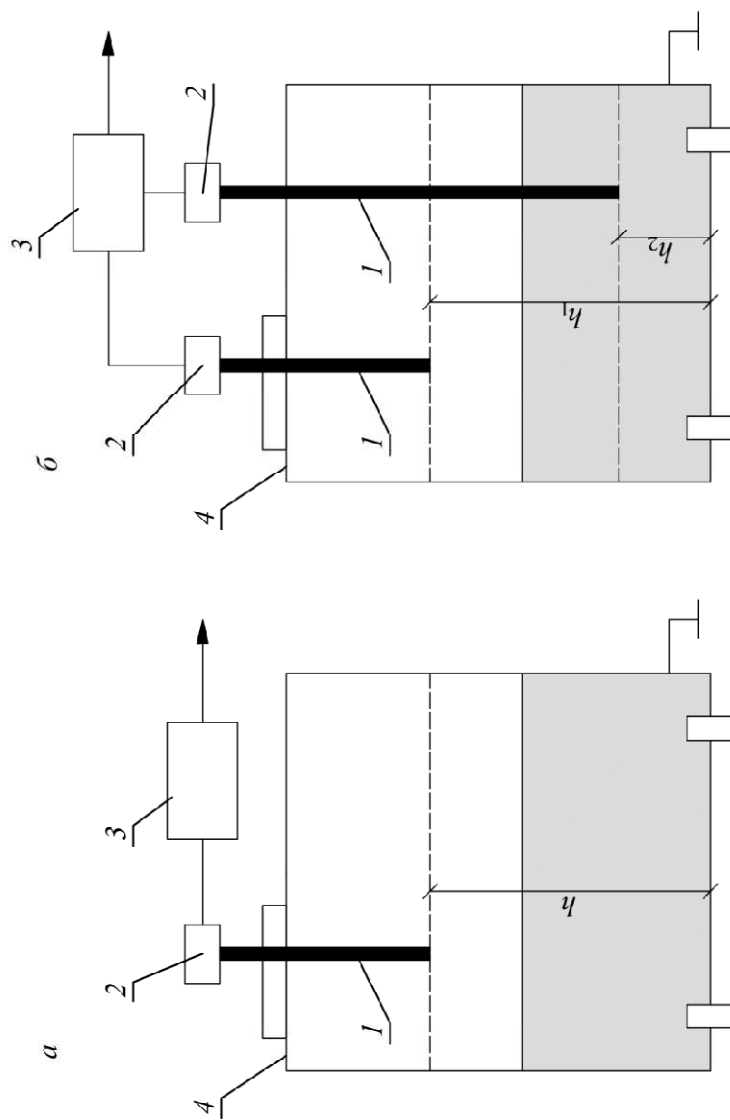


Рис. 6.10. Схемы работы омического уровнемера (*а* – одного уровня; *б* – двух уровней); *1* – измерительные электроды; *2* – электромагнитные реле; *3* – источник питания / вторичный преобразователь; *4* – емкость

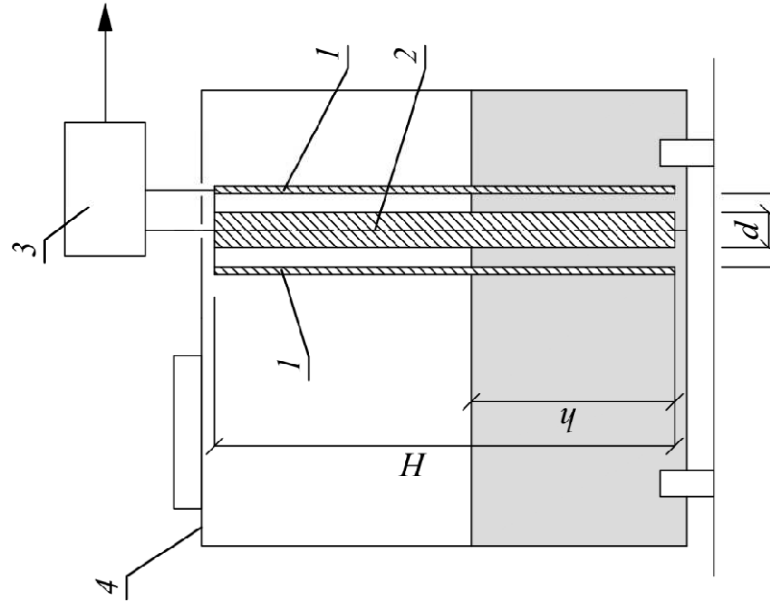


Рис. 6.9. Схема работы емкостного уровня-мера: 1, 2 – цилиндрические конденсаторы; 3 – источник питания/вторичный преобразователь; 4 – емкость

Ультразвуковые уровнемеры могут быть использованы для измерения уровня практически любых веществ. Достоинствами приборов являются: возможность измерения уровня загрязненных жидкостей; бесконтактность; длительный срок службы; независимость от плотности контролируемой среды.

К недостаткам ультразвуковых уровнемеров следует отнести: применимость только в емкостях с нормальным атмосферным давлением; влияние пыли, пара, газовых смесей и пены на точность измерений.

6.8. Волноводные уровнемеры

Волноводные уровнемеры – это приборы для измерения уровня контактного типа, их принцип работы основан на технологии рефлектометрии интервала времени. Схема работы и внешний вид волноводного уровнемера приведены на рис. 6.12. Волноводный уровнемер 2 передает электромагнитные импульсы малой мощности по жёсткому или гибкому зонду 4 каждую наносекунду. Импульсы перемещаются со скоростью света. Достигнув поверхности измеряемой среды, импульсы отражаются в обратном направлении, при этом интенсивность отражения зависит от диэлектрической проницаемости среды. Временной интервал между моментом подачи и возвращения импульсов пропорционален расстоянию до уровня контролируемой среды.

При известной высоте емкости 1 это позволяет определить высоту уровня жидкости или отметку границы раздела двух жидких сред, имеющих разные значения диэлектрической проницаемости.

Свойства среды влияют на выбор конструкции зонда уровнемера, которая может быть: коаксиальной; жесткой одностержневой и двухстержневой; гибкой однопроводной и двухпроводной. Длина коаксиального зонда обычно не превышает 6 м, жестких зондов – 3 м, а гибких – 23,5 м.

Выбор применяемого типа зонда зависит от физико-химических свойств контролируемой среды (диэлектрической проницаемости, вязкости, способности к налипанию и кристаллизации и пр.), а также наличия пара, потоков жидкости, взвесей и пены вблизи контролируемого уровня среды.

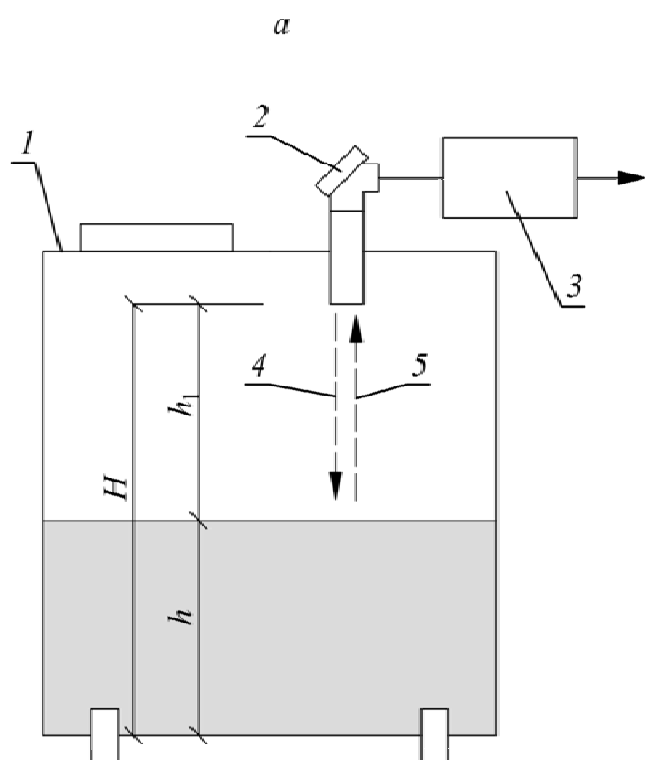


Рис. 6.11. Ультразвуковой уровнемер Echo TREK фирмы Nivelco (*a* – схема работы; *б* – внешний вид): 1 – емкость; 2 – ультразвуковой уровнемер; 3 – электронный блок; 4 – посланный импульс; 5 – отраженный импульс

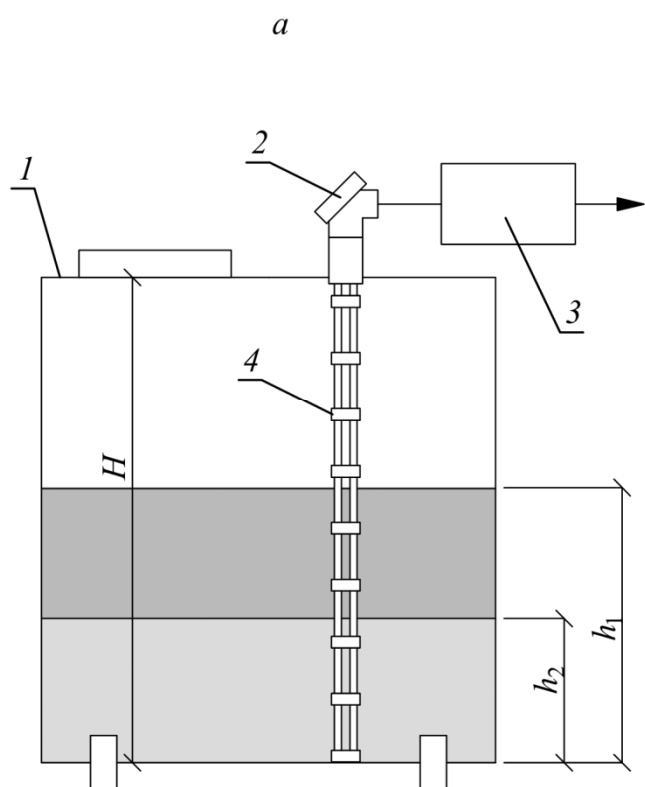


Рис. 6.12. Волноводный уровнемер Rosemount 3300 фирмы Emerson (*a* – схема работы; *б* – внешний вид): 1 – емкость; 2 – волноводный уровнемер; 3 – электронный блок; 4 – измерительный зонд уровнемера

6.9. Радарные уровнемеры

Радарный метод измерения уровня заключается в следующем (рис. 6.13). Излученный радарным уровнемером СВЧ-сигнал отражается от поверхности контролируемой среды и принимается обратно. Для создания СВЧ-сигнала применяются технологии с непрерывным частотно-модулируемым излучением (FMCW – frequency-modulated continuous-wave) или импульсным излучением сигнала. При реализации технологии FMCW расстояние от уровнемера до уровня контролируемой среды определяется косвенным путем. Измеряется разница Δf , ГГц, между частотами излученного f_1 и отраженного f_0 микроволнового сигнала, как показано на графике, отображающем зависимость частоты излучения прямого I и обратного II сигналов от времени (рис. 6.13, б).

Значение разности частот Δf прямо пропорционально расстоянию до контролируемой среды h_1 , м. В результате можно определить высоту уровня контролируемой жидкости h , м, по формуле

$$h = H - h_1, \quad (6.8)$$

где H – расстояние от дна емкости до приемника радарного уровнемера, м.

В связи с наличием конструктивных элементов емкости вблизи распространения сигналов уровнемера происходит образование паразитарных эхосигналов III и IV (рис. 6.13, в), которые создают смесь сигналов с большим разбросом амплитуды. Для учета паразитарных эхосигналов при обработке измерений используют установленное на уровнемере программное обеспечение, основанное на методе быстрого преобразования Фурье.

При применении технологии импульсного излучения сигнала расстояние h_1 определяется по времени прохождения СВЧ-сигнала от излучателя уровнемера до контролируемой среды и обратно Δt . Данный способ позволяет исключить преобразования Фурье, однако требует использования специальных средств обработки сигнала.

Применение технологии импульсного излучения имеет ряд преимуществ перед технологией FMCW, а именно: простота разделения сигналов; меньшее энергопотребление; высокая надежность.

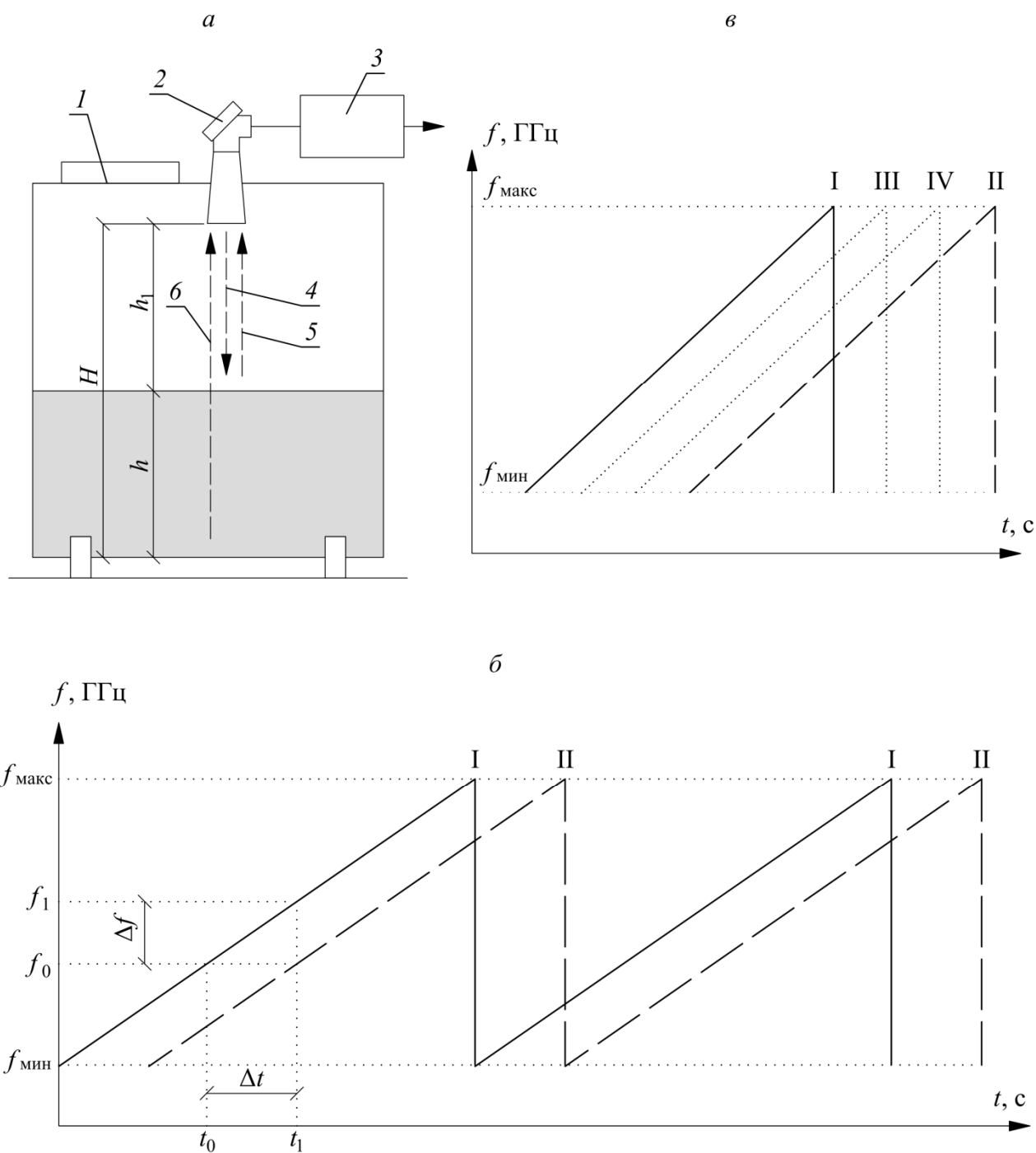


Рис. 6.13. Радарный метод измерения (*a* – принципиальная схема работы радарного уровнемера; *б* – график для определения расстояния при использовании технологии FMCW; *в* – паразитарные отражения при использовании технологии FMCW): 1 – емкость; 2 – радарный уровнемер; 3 – электронный блок; 4 – излученный сигнал (I); 5 – отраженный сигнал (II); *б* – паразитарные эхо-сигналы (III, IV)

6.10. Контрольные вопросы и задания для практических занятий и самостоятельной работы

Контрольные вопросы.

1. Приведите основную классификацию уровнемеров по физико-химическим свойствам, заложенным в принципы их работы.
2. Принцип работы и конструкция визуальных уровнемеров.
3. Типы поплавковых уровнемеров. Запишите уравнение состояния равновесия поплавка поплавковых уровнемеров.
4. Опишите конструкцию буйкового уровнемера.
5. Какие устройства применяются в гидростатических уровнемерах? Опишите схему измерения уровня закрытой емкости под избыточным давлением с применением дифференциального датчика давления.
6. В чем заключается принцип работы емкостного и емкостного электрических измерителей уровня?
7. Какова максимальная длина зондов волноводных уровнемеров? От чего зависит выбор конструкции зонда волноводного уровнемера?
8. Какие технологии СВЧ-сигнала применяются в радарных уровнемерах?

Задания для самостоятельной работы.

Подготовить доклад в формате презентации с использованием средств Microsoft Office PowerPoint на следующие темы.

1. Поплавковые сигнализаторы уровня.
2. Виды зондов волноводных уровнемеров.
3. Вибрационные сигнализаторы уровня.
4. Конструкция и принцип работы радиоизотопных уровнемеров.
5. Емкостные и магнитные сигнализаторы уровня.
6. Схемы работы пьезометрических уровнемеров.
7. Кондуктометрические сигнализаторы уровня.
8. Лазерные уровнемеры для сыпучих материалов.

Глава 7. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА

Приборы, предназначенные для измерения скорости ветра и определения скорости движения газов в трубопроводах, называются **анемометрами**.

Существует большое разнообразие конструкций современных анемометров, разделяющихся по принципу действия на динамические (чашечные и крыльчатые), статические, термоанемометры, ультразвуковые и лазерные.

Динамические анемометры – это анемометры, принцип работы которых заключается в определении скорости движения воздуха по числу оборотов вращающегося под её действием механизма.

Статические анемометры – это приборы, определяющие величину ветрового напора по величине отклонения противостоящей пластины либо шара.

Термоанемометры – устройства для измерения скорости, работа которых основана на зависимости теплоотдачи нагретого тела от скорости обтекающего тело потока газа или жидкости.

Ультразвуковые анемометры – это анемометры, измеряющие время прохождения ультразвукового сигнала от одного преобразователя до другого и, как следствие, определяющие скорость движения потока.

Лазерные анемометры – анемометры, работающие с использованием эффекта Доплера для измерения скорости.

7.1. Чашечные анемометры

Чашечные анемометры являются наиболее распространенным типом анемометров, что связано с их широким применением на метеостанциях. Конструкция четырехчашечного анемометра была разработана британско-ирландским изобретателем, доктором Джоном Томасом Ромни Робинсоном (рис. 7.1) и реализована в 1846 г. в Арманской обсерватории, директором которой он и являлся. Внешний вид данного анемометра, впоследствии получившего его имя, приведен на рис. 7.2. Четырехчашечный анемометр (рис. 7.3) имеет крыльчатку, которая представляет собой радиально расположенные в горизонтальной плоскости стержни (крест), укрепленные на вертикально стоящей оси.

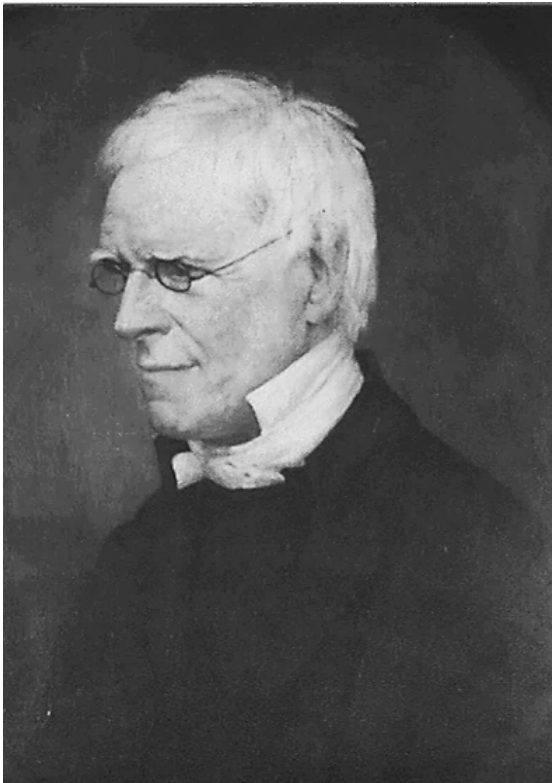


Рис. 7.1. Изобретатель динамического чашечного анемометра, доктор, британско-ирландский астроном Джон Томас Ромни Робинсон

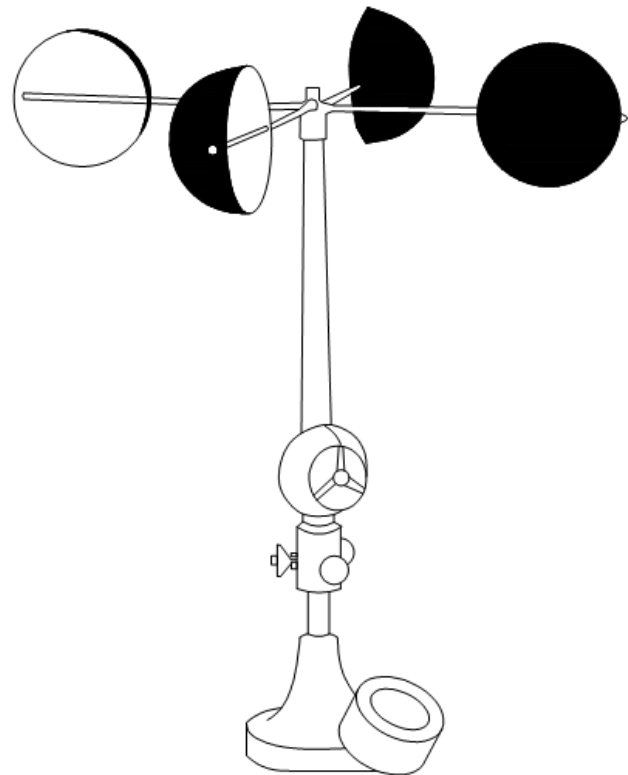


Рис. 7.2. Внешний вид чашечного анемометра Робинсона

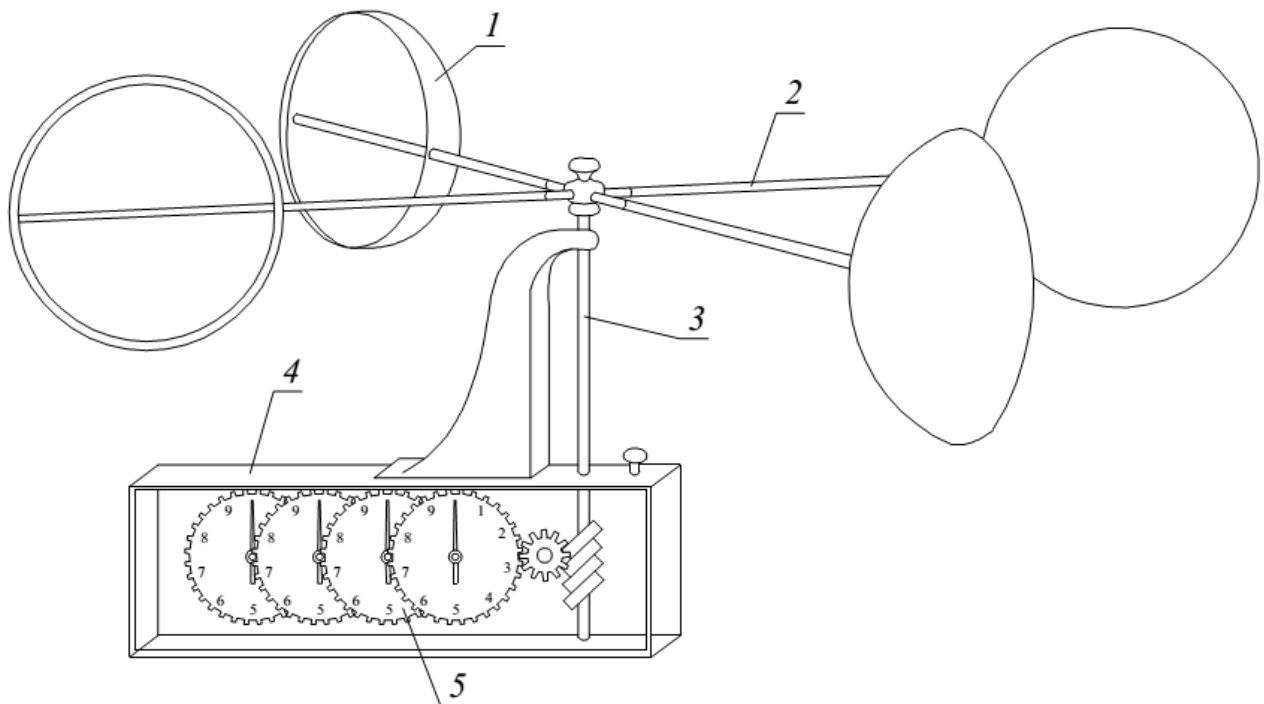


Рис. 7.3. Принципиальная схема чашечного анемометра Робинсона: 1 – четыре чашки; 2 – горизонтальный крест; 3 – вертикальная ось вращения; 4 – червячная передача; 5 – счетчик числа оборотов

К концу стержня присоединены полусферические чашки, которые под действием воздушного потока приводят в движение ось, сообщающуюся со счетчиком числа оборотов посредством механической передачи.

Аналогичную конструкцию имеет трехчашечный анемометр, разработанный канадским метеорологом Джоном Петерсоном в 1926 г. (рис. 7.4, а). Преимуществом данного анемометра является то, что при угле 45° между направлением ветра и чашками анемометра создается наибольший момент вращения вертикальной оси и совершается максимальное число оборотов.

Усовершенствованная М.Т. Бревуртом и У.Т. Джойнером (NASA, США, 1934 г.) конструкция анемометра Петерсона позволила добиться линейности зависимости скорости от числа оборотов чашек при скоростях воздуха $v_{\text{воз}}$, м/с, до 27 м/с, с относительной погрешностью 3 %.

Наибольшее распространение в нашей стране получил чашечный анемометр МС-13 по ГОСТ 6376-74 (рис. 7.4, б), предназначенный для измерений скорости воздушного потока в промышленных условиях и на метеорологических станциях ($v_{\text{воз}} = 1 \dots 20$ м/с). Основная погрешность измерения $\Delta v_{\text{воз}}$, м/с, данного прибора определяется по следующей зависимости:

$$\Delta v_{\text{воз}} = \pm(0,3 + 0,05v_{\text{воз}}), \quad (7.1)$$

где $v_{\text{воз}}$ – измеряемая скорость воздушного потока, м/с.

Чувствительность анемометра МС-13 не должна превышать 0,8 м/с.

Ветроприемным устройством данного анемометра служит четырехчашечная вертушка, насаженная на ось, вращающуюся в опорах. На нижнем конце оси нарезан червяк, который через редуктор передает движение трем указывающим стрелкам. Циферблат имеет шкалы единиц, сотен и тысяч делений. Червяк передает движение центральному колесу (шкалы единиц), триб которого после полного оборота большой стрелки приводит в движение промежуточное колесо (шкалы сотен). В свою очередь триб промежуточного колеса двигает малое колесо (шкалы тысяч). Счетный механизм включается и выключается арретиром. Определение скорости воздуха происходит в такой последовательности. Записывают начальные показания анемометра. Затем устанавливают ане-

мометр в воздушном потоке таким образом, чтобы чашки располагались перпендикулярно направлению движения воздуха, и одновременно включают арретир анемометра и секундомер. Время измерения составляет от 1 до 2 минут, по истечении которого секундомер выключают и записывают конечные показания числа делений по шкалам анемометра.

По полученным данным определяют число делений $n_{\text{дел}}$, дел./с, чашечного анемометра на одну секунду времени измерения по формуле

$$n_{\text{дел}} = \frac{n_{\text{кон}} - n_{\text{нач}}}{t}, \quad (7.2)$$

где: $n_{\text{нач}}$, $n_{\text{кон}}$ – начальное и конечное число делений, в начале и по окончании проведенных измерений, дел.; t – время проведения замеров, с, $t = 60 \dots 120$ с.

Скорость воздушного потока определяется по градуировочному графику (рис. 7.5 [14]), на вертикальной оси которого находится число делений крыльчатки, приходящихся на одну секунду. Полученное по формуле (7.2) значение откладывается от неё по прямой до пересечения с линией графика и затем опускается вертикально вниз до пересечения с горизонтальной осью, от которой откладывается искомая скорость движения воздуха $v_{\text{воз}}$, м/с.

Пример 7.1. Требуется определить скорость воздушного потока, измеренную анемометром МС-13 и основную погрешность измерения. Время измерений составляло $t = 100$ с. Начальные показания анемометра: шкала единиц – 60 дел.; шкала сотен – 1 дел.; шкала тысяч – 1 дел.. Конечные показания анемометра: шкала единиц – 80 дел.; шкала сотен – 5 дел.; шкала тысяч – 1 дел..

Определим число делений анемометра на одну секунду измерений:

$$n_{\text{дел}} = \frac{1580 - 1160}{100} = 4,2 \text{ дел./с.}$$

По полученному числу делений анемометра за одну секунду по градуировочному графику определяем скорость движения воздуха. При $n_{\text{дел}} = 4,2$ дел./с, скорость движения воздуха равна $v_{\text{воз}} = 4,1$ м/с (рис. 7.5).

Основная погрешность данного измерения:

$$\Delta v_{\text{воз}} = \pm(0,3 + 0,05 \cdot 4,1) = \pm 0,505 \text{ м/с.}$$

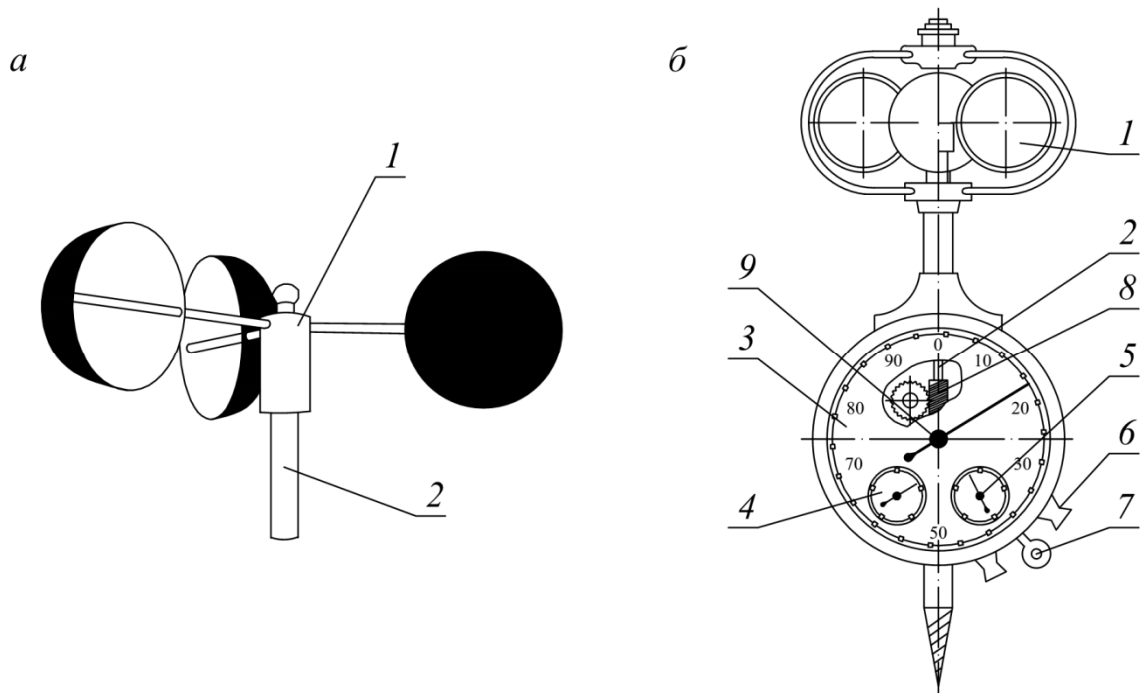


Рис. 7.4. Чашечные анемометры (*а* – Петерсона *б* – МС-13): 1 – крыльчатка с чашками; 2 – ось вращения крыльчатки; 3 – циферблат; 4 – шкала сотен; 5 – шкала тысяч; 6 – ушки для включения/выключения анемометра, поднятого на стойке; 7 – арретир; 8 – червячная передача; 9 – стрелка шкалы единиц

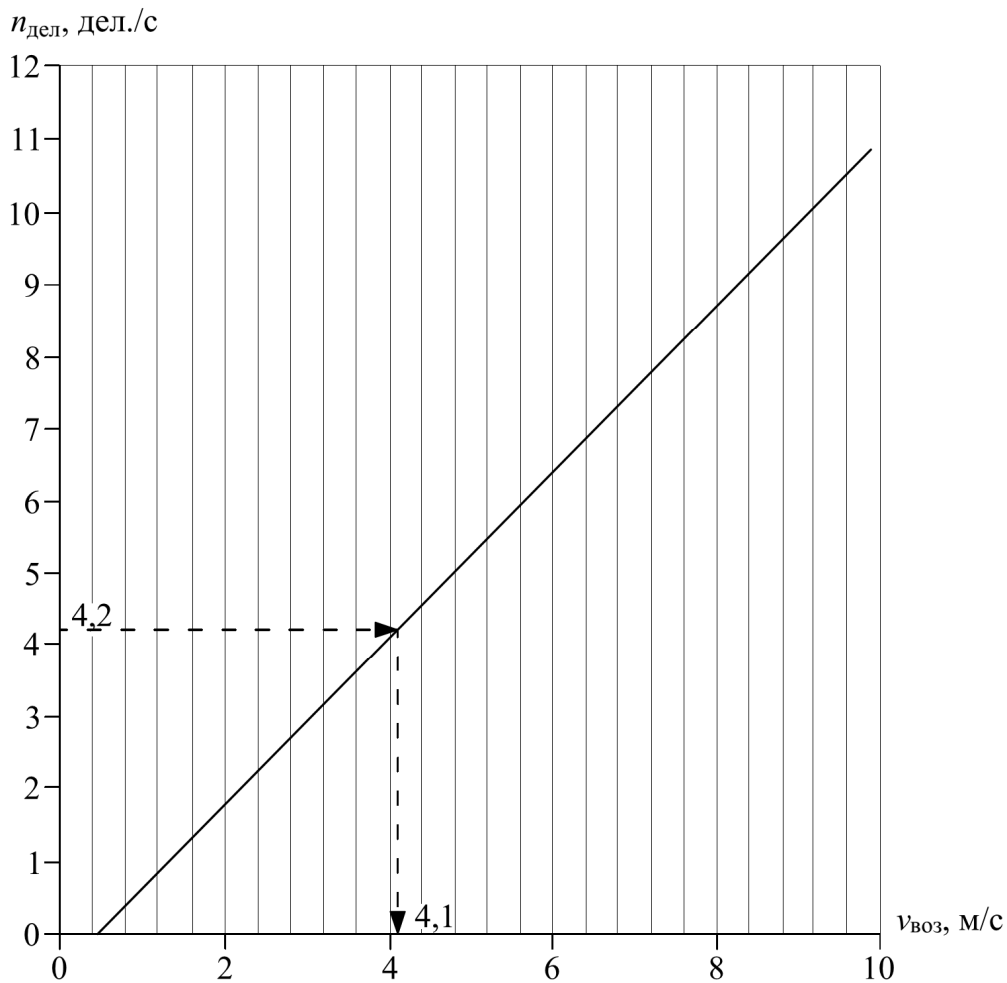


Рис. 7.5. Градуировочный график для определения скорости движения воздуха чашечным анемометром МС-13

Анемометр Шульц-Фюсса, приведенный на рис. 7.6, а, является чашечным, однако имеет принцип работы, отличный от рассмотренных, ранее анемометров. Крыльчатка анемометра приводится в движение заводным механизмом, вращающим его со скоростью 30 м/мин. При помещении прибора перпендикулярно направлению потока воздуха меняется скорость вращения его крыльчатки, которая составляет n_1 , м/мин. Таким образом, скорость воздушного потока $v_{\text{воз}}$, м/с, определяется по формуле:

$$v_{\text{воз}} = \frac{30 - n_1}{60}, \quad (7.3)$$

где 30 м/мин. – скорость вращения заводного механизма; 60 – переводной коэффициент из м/мин, м/с.

7.2. Крыльчатые анемометры

В настоящее время известно большое количество модификаций крыльчатых анемометров (рис. 7.6). Старейшим из группы динамических анемометров является **анемометр конструкции Комба** (рис. 7.6, б). На оси вращения анемометра закреплены четыре лопасти с алюминиевыми или слюдяными пластинками, под углом к оси вращения. Под давлением воздушного потока система лопастей приходит в движение. Ось представляет собой параллельный потоку воздуха бесконечный винт, который сообщает движение зубчатому колесу. По поворотам колеса отсчитывается число оборотов лопастей, которое показывается на циферблате устройства.

Скорость воздушного потока $v_{\text{воз}}$, м/с, определяют по формуле

$$v_{\text{воз}} = v_{\text{наим}} + bn_{\text{об}}, \quad (7.4)$$

где $v_{\text{наим}}$ – наименьшая скорость течения воздуха, которая может привести в движение крыльча, м/с; b – коэффициент сопротивления трению крыльчатки анемометра; $n_{\text{об}}$ – число оборотов крыльчатки в секунду, об/с.

Анемометр Рекнагеля (рис. 7.6, д) имеет воздушное колесо с лопастями из слюды, насаженные на стальную ось. Вращение лопастей передается зубчатому колесу аналогично анемометру Комба.

Перевод движения по зубчатому колесу рассчитан таким образом, что один оборот указательной стрелки на циферблате соответствует 1000 оборотов воздушного колеса. Скорость воздушного потока $v_{\text{воз}}$, м/с составляет

$$v_{\text{воз}} = a + b \frac{n_{\text{об}}}{z}, \quad (7.5)$$

где: a, b – постоянные, зависящие от размеров колеса и угла, под которым установлены его лопасти, а константа чувствительности зависит от трения оси; z – продолжительность работы анемометра, с.

Динамические анемометры Комба и Рекнагеля и другие сходные с ними по конструкции отмечают на счетчике не скорость движения воздуха, а число оборотов крыльчатки. Для анемометров данной конструкции справедлива общая зависимость определения скорости движения воздуха $v_{\text{воз}}$:

$$v_{\text{воз}} = a + bn_{\text{об}} + cn_{\text{об}}^2, \quad (7.6)$$

где c – коэффициент, не равный нулю при измерении больших скоростей.

Анемометр Ришара (рис. 7.6 з), как и описанные выше, является крыльчатим, однако в отличие от них он имеет два циферблата, верхний из которых показывает время измерения $\Delta t_{\text{изм}}$, с, а нижний – число метров пути, пройденных воздушной струей за период измерения $\Delta l_{\text{изм}}$, м.

Скорость движения воздуха определяют по формуле

$$v_{\text{воз}} = \frac{\Delta l_{\text{изм}}}{\Delta t_{\text{изм}}}. \quad (7.7)$$

Анемометр Казелли (рис. 7.6, в) работает по тому же принципу, что и анемометр Ришара, однако занимает меньше пространства, т. к. его циферблат располагается на одной оси с крыльчаткой. В данном анемометре нет секундомера, поэтому требуются дополнительные часы для измерения времени.

Скорость движения воздуха рассчитывается по формуле (7.7). Предел чувствительности анемометра Казелли составляет 0,1 м/с.

В нашей стране широкое распространение для измерения средних скоростей воздушного потока ($v_{\text{воз}} = 0,3 \dots 5$ м/с) в промышленных установках получили крыльчатые анемометры марки АСО-3 по ГОСТ 6376-74 (рис. 7.7).

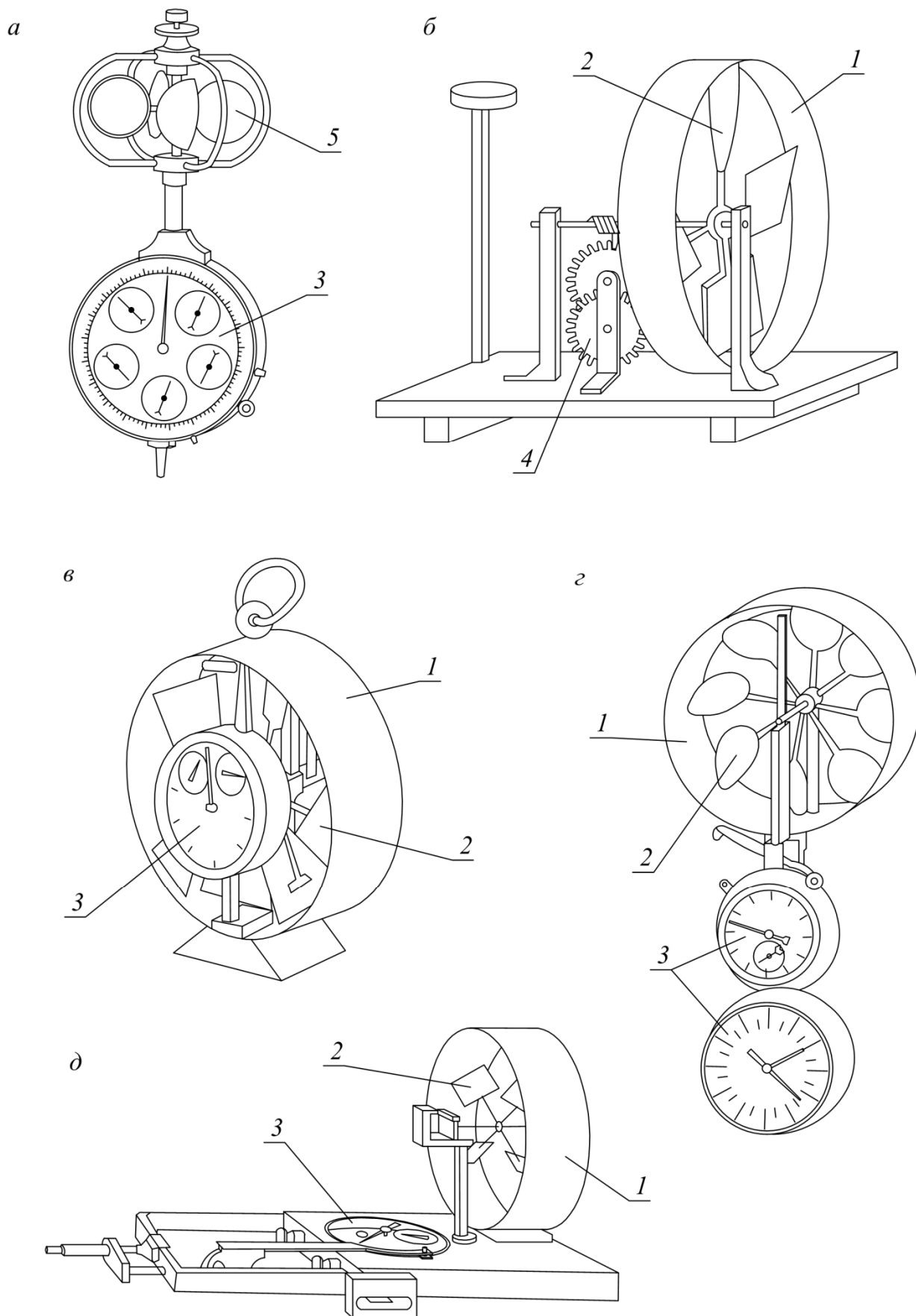


Рис. 7.6. Внешний вид динамических анемометров (а – Шульц-Фюсса; б – Комба; в – Казелли; г – Рижара; д – Рекнагеля): 1 – воздушное колесо; 2 – крыльчатка; 3 – циферблат; 4 – счетный механизм; 5 – крыльчатка с чашками

Чувствительность анемометра АСО-3 составляет не более 0,2 м/с. Основная погрешность измерения $\Delta v_{\text{воз}}$, м/с, данного прибора определяется по зависимости, приведенной заводом изготовителем:

$$\Delta v_{\text{воз}} = \pm(0,1 + 0,05v_{\text{воз}}), \quad (7.8)$$

где $v_{\text{воз}}$ – измеряемая скорость воздушного потока, м/с.

Ветроприемным устройством анемометра АСО-3 служит крыльчатка 1, установленная на трубчатой оси 3 с подшипниковыми втулками 9. Втулки вращаются на стальной оси 5, один конец которой впаян в обойму и закреплен в неподвижной опоре, а второй загнут гайкой 7 во втулке 6, закрепленной в отверстии распорного стержня 2. Стальная ось находится в натяжении посредством пружины 4. Пружиной 8 регулируется осевой люфт оси 3. Вращение ветроприемного устройства передается счетному механизму червяком 12 через редуктор. Принцип работы счетного механизма анемометра АСО-3 аналогичен механизму работы счетного механизма чашечного анемометра МС-13. Счетный механизм имеет три шкалы – единиц, сотен и тысяч. Счетный механизм включается и выключается арретиром 16. Прибор оборудован ручкой 11, представляющей собой трубку, используемую для установки прибора на деревянный штوك. Ветроприемное устройство анемометра оборудовано цилиндром (диффузором) для защиты от механических повреждений и ограничения сечения измеряемого воздушного потока.

Определение скорости воздуха проводится следующим образом. Записываются начальные показания анемометра по трем шкалам $n_{\text{нач}}$. Ветроприемное устройство устанавливается перпендикулярно направлению воздушного потока. По истечении 10...15 секунд одновременно включают механизм анемометра и секундомер. Необходимое время измерения t составляет 60...120 с. Затем анемометр выключают и записывают конечные показания $n_{\text{кон}}$. По полученным данным по формуле (7.2) определяют число делений $n_{\text{дел}}$, дел./с, крыльчатого анемометра на одну секунду времени измерения. Скорость воздушного потока определяется по графикам (рис. 7.7, б, в [14]), на вертикальной оси которых находится число делений крыльчатки, приходящихся на одну секунду.

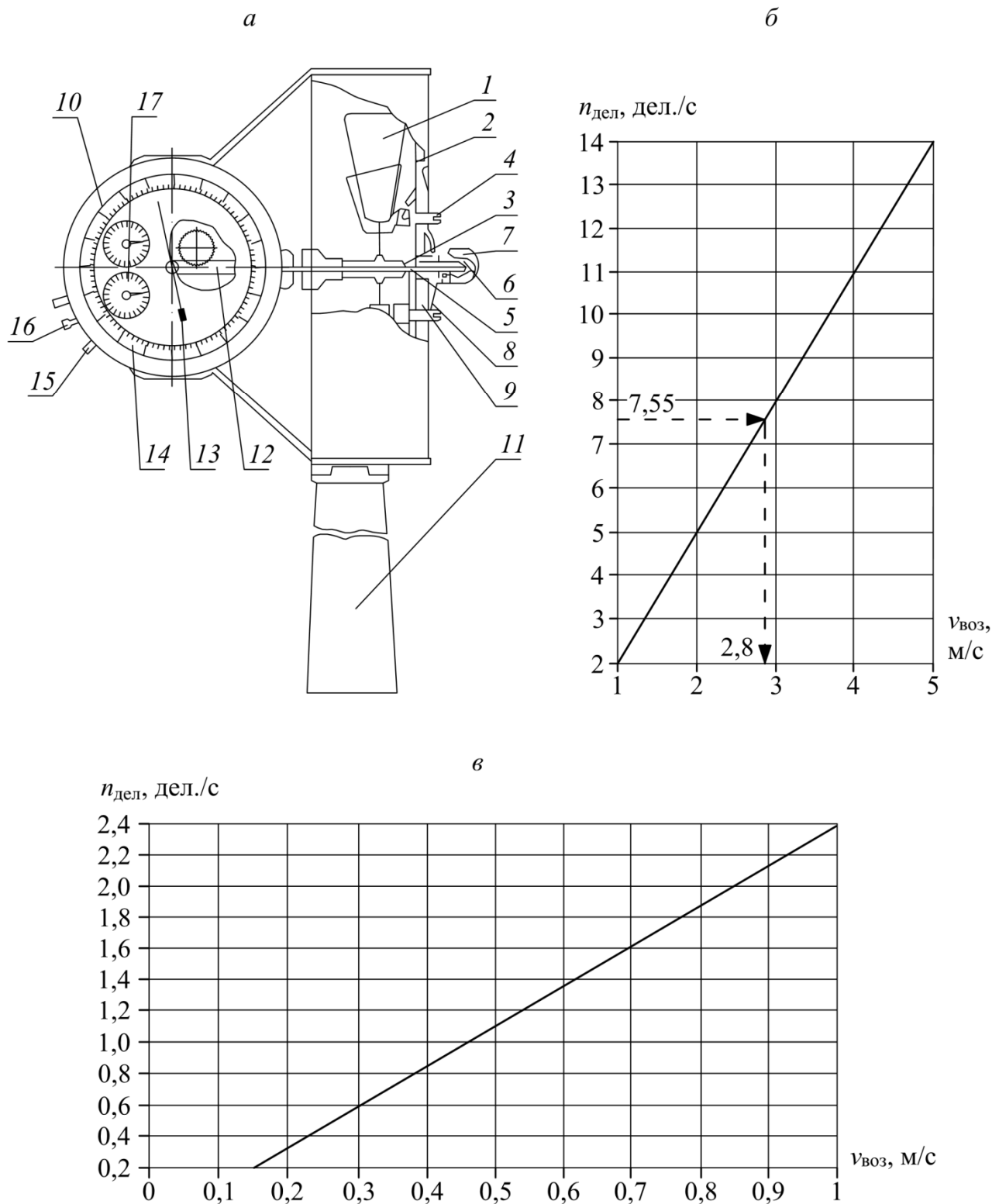


Рис. 7.7. Крыльчатый анемометр АСО-3 (*а* – внешний вид; *б* – градуировочный график для определения скорости движения воздуха в интервале скоростей от 1 до 5 м/с; *в* – то же в интервале скоростей от 0,15 до 1 м/с): 1 – крыльчатка; 2 – стержень; 3 – трубчатая ось; 4 – пружина; 5 – ось стальная; 6 – втулка; 7 – гайка; 8 – пружина; 9 – втулка подшипниковая; 10 – стрелка шкалы сотен; 11 – ручка; 12 – червяк; 13 – стрелка шкалы единиц; 14 – циферблат; 15 – ушко; 16 – арретир; 17 – стрелка шкалы тысяч

Полученное по формуле (7.2) значение откладывается от оси по прямой до пересечения с линией графиков и затем опускается вертикально вниз до пересечения с горизонтальной осью, от которой откладывается искомая скорость движения воздуха $v_{\text{воз}}$, м/с. К анемометрам данной конструкции прилагается два графика, первый предназначен для интервала скоростей от 0,15 до 1 м/с, а второй – для интервала от 1 до 5 м/с.

Пример 7.2. Требуется определить скорость воздушного потока, измеренную анемометром АСО-3, и основную погрешность измерения. Время измерений t составляло 90 с. Начальные показания анемометра: шкала единиц – 40 дел.; шкала сотен – 1 дел.; шкала тысяч – 3 дел.. Конечные показания анемометра: шкала единиц – 20 дел.; шкала сотен – 8 дел.; шкала тысяч – 3 дел..

Определяем число делений анемометра на одну секунду измерений:

$$n_{\text{дел}} = \frac{3820 - 3140}{90} = 7,55 \text{ дел./с.}$$

По полученному числу делений анемометра за одну секунду по градуировочному графику определяем скорость движения воздуха. При $n_{\text{дел}} = 7,55 \text{ дел./с}$, скорость движения воздуха $v_{\text{воз}} = 2,8 \text{ м/с}$ (рис. 7.7, б).

Основная погрешность данного измерения равна:

$$\Delta v_{\text{воз}} = \pm(0,1 + 0,05 \cdot 2,8) = \pm 0,24 \text{ м/с.}$$

Современные крыльчатые анемометры изготавливаются со стационарной и с выносной крыльчаткой, как показано на рис. 7.8 а, б (анемометры Testo 417, ООО «Тэсто Рус» [34]). Длина выносного кабеля, соединяющего крыльчатку анемометра и корпус, составляет 1,5 м. Обработка результатов замеров проводится прибором автоматически, результаты выводятся на дисплей.

Крыльчатые анемометры могут дополнительно оборудоваться датчиком температуры и сенсором влажности воздуха, что делает данные приборы многофункциональными и не требует ручного пересчета их показаний при отличии фактической плотности воздуха от нормальных условий. Прибор Testo 417 вычисляет не только среднюю скорость, но и расход воздуха, проходящего сквозь воздушное колесо. Диапазон измерений прибора составляет $v_{\text{воз}} = 0,3 \dots 20 \text{ м/с}$.

Производителем также предлагаются анемометры с компактным телескопическим зондом-крыльчаткой Testo 416 (рис. 7.8, в), предназначенным для измерения средней скорости воздуха в воздуховодах. Предусмотрена возможность расчета расхода воздуха, проходящего через сечение воздуховода, при введении данных о его поперечной площади. Диапазон измерений данного анемометра несколько выше и составляет $v_{\text{воз}} = 0,6 \dots 40$ м/с.

Основная погрешность измерения скорости $\Delta v_{\text{воз}}$, м/с, крыльчатым анемометром Testo 417 определяется по формуле

$$\Delta v_{\text{воз}} = \pm(0,1 + 0,015v_{\text{воз}}), \quad (7.9)$$

где $v_{\text{воз}}$ – измеренная скорость воздушного потока, м/с.

Разрешение рассмотренных приборов составляет 0,1 м/с.

Пример 7.3. Требуется определить основную погрешность измерения скорости крыльчатым анемометром Testo 417. Измеренная скорость воздушного потока составила $v_{\text{воз}} = 7,5$ м/с.

Основная погрешность измерения скорости $\Delta v_{\text{воз}}$, м/с, крыльчатым анемометром Testo 417 составляет:

$$\Delta v_{\text{воз}} = \pm(0,1 + 0,015 \cdot 7,5) = \pm 0,22 \text{ м/с.}$$

Данные анемометры могут входить в состав комплекта для измерения расхода воздуха, проходящего через вихревые воздухораспределители (рис. 7.8, г, д). Использование круглой воронки, изолирующей воздухораспределитель от окружающего воздуха, и выпрямителя потока исключает влияние неоднородных потоков, турбулентностей и воздушных струй от соседних воздухораспределителей, местных отсосов и душирующих патрубков на точность измерения расхода воздуха через них.

Существуют модификации крыльчатых анемометров, позволяющие проводить измерения дистанционно с помощью смартфона (смарт-зонд).

Отечественный рынок в настоящий момент наполнен крыльчатыми анемометрами различной конструкции, частные характеристики которых приводятся в их паспортах и руководствах по эксплуатации.

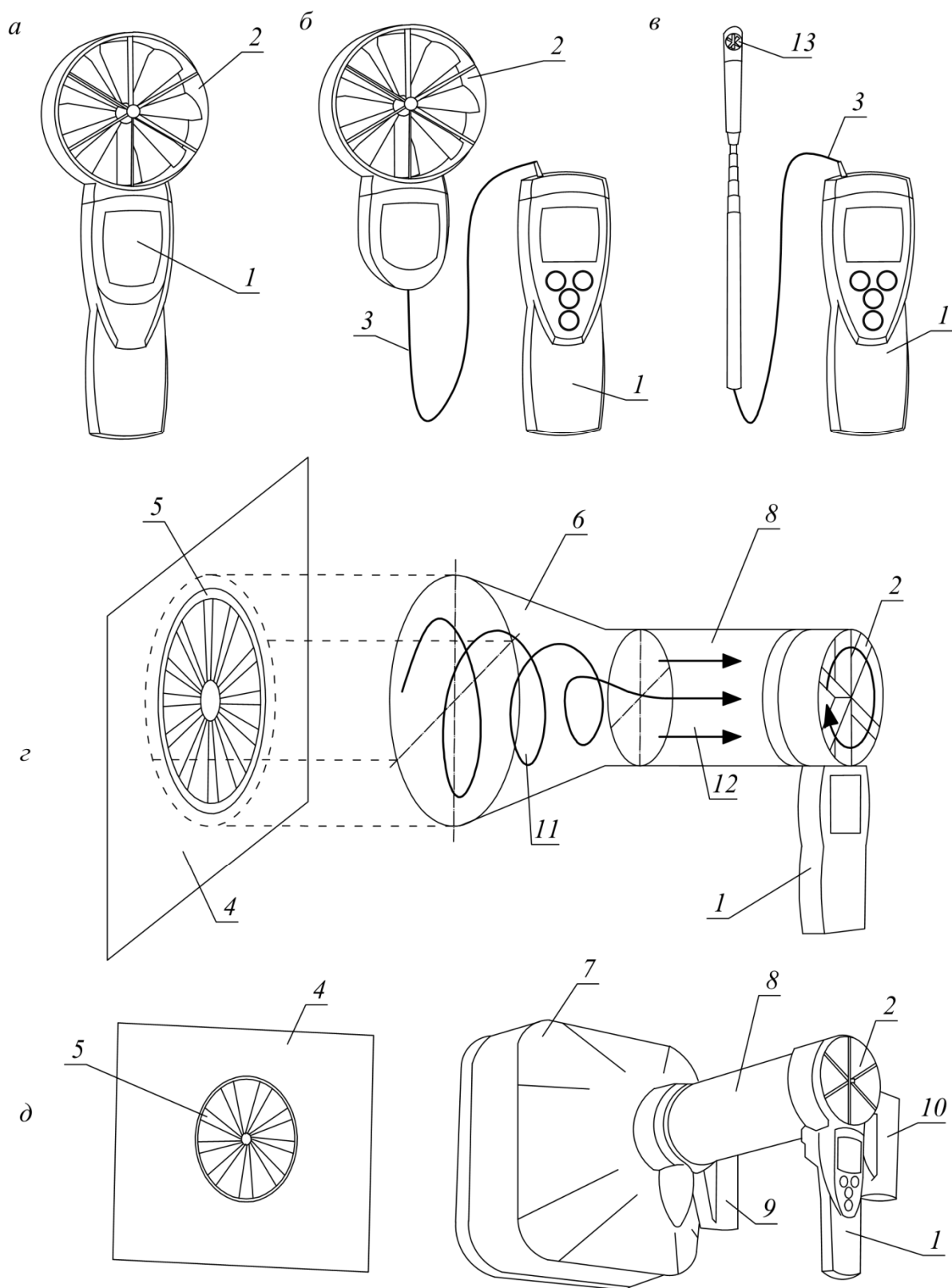


Рис. 7.8. Электронные крыльчатые анемометры фирмы ООО «Тэсто Рус» (*а* – со стационарной крыльчаткой; *б* – с выносной крыльчаткой; *в* – с компактной крыльчаткой; *г* – принципиальная схема анемометра в комплекте с воронкой и выпрямителем потока; *д* – то же внешний вид): 1 – дисплей и панель управления; 2 – крыльчатка; 3 – кабель; 4 – поверхность стены/потолка; 5 – воздухораспределитель; 6 – круглая воронка; 7 – прямоугольная воронка; 8 – выпрямитель потока; 9, 10 – держатели; 11 – вращение воздушного потока в воронке; 12 – движение воздушного потока в цилиндрическом выпрямителе; 13 – компактный зонд-крыльчатка

7.3. Статические анемометры

Статические анемометры имеют принцип действия, основанный на вычислении скорости воздушного потока по данным об отклонении пластины или шара от их первоначального положения. На точность измерений, получаемых данными анемометрами, значительно влияет плотность воздуха, что позволяет их использовать только для сравнительно грубых измерений.

Одним из примеров статического анемометра является **анемометр А. Вильда** (рис. 7.9, а [27]), который состоит из рамы с установленной качающейся пластиной. В верхней её части установлен указатель, который при отклонении пластины под действием ветрового потока указывает на величину скорости потока, отсчитываемую на циферблате.

Статический **анемометр Вольперта** (рис. 7.9, б) снабжен крыльчаткой, ось которой сдерживается пружиной. При воздействии воздушного потока крыльчатка отклоняется на определенный угол поворота ψ , град, указываемый стрелкой на циферблате, нанесенной на кольцо, окружающем крыльчатку. Скорость воздушного потока определяется по формуле

$$v_{\text{воз}} = a\sqrt{\psi}, \quad (7.10)$$

где a – переводной коэффициент, для приведенного прибора $a = 0,06$.

Анемометр Далоза (рис. 7.9, в) более чувствителен, чем анемометр Вильда, и представляет собой флюгер, на верхнем конце которого подвешен легкий алюминиевый маятник, качающийся вдоль нижней изогнутой стороны флюгера с нанесенными на ней делениями. Прибор сам ориентируется по направлению ветра. Шар прибора подвешен на уравновешенном стержне.

Перемещение шара по дуге шкалы прибора показывает значение измеряемой скорости, которая подчиняется следующей зависимости:

$$v_{\text{воз}} = v_{\text{пр}} \operatorname{tg} \alpha, \quad (7.11)$$

где $v_{\text{пр}}$ – предельная скорость падения шара, м/с; α – угол отклонения подвеса шара от вертикального положения, град.

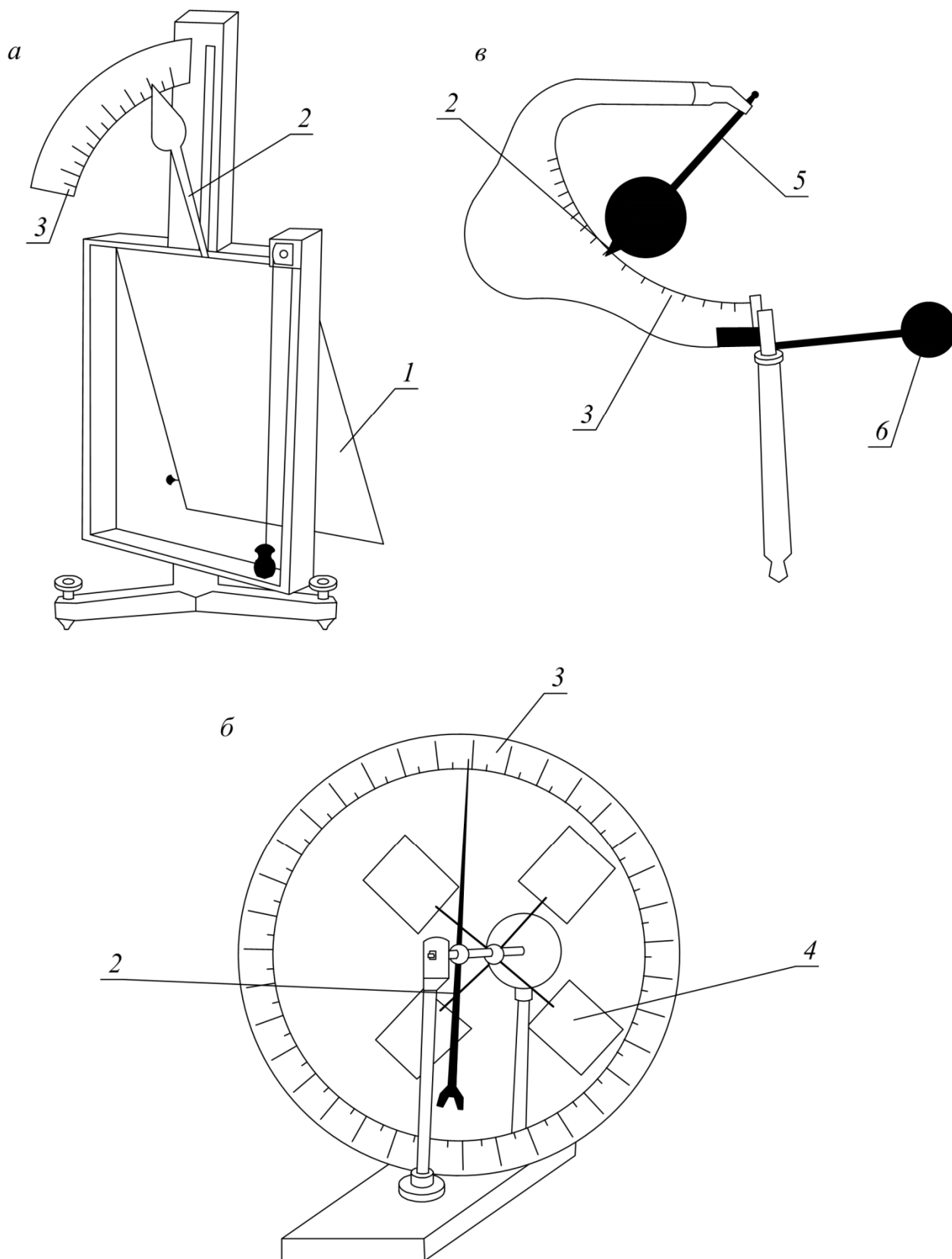


Рис. 7.9. Внешний вид статических анемометров (*a* – Вильда, *б* – Вольперта; *в* – Дазоля): *1* – качающаяся пластина; *2* – измерительная стрелка; *3* – циферблат/шкала; *4* – измерительная крыльчатка; *5* – алюминиевый маятник; *б* – флюгер

7.4. Термоанемометры

Термоанемометры подразделяются на тепловые анемометры сопротивления и термоэлектрические анемометры.

Принцип работы теплового анемометра сопротивления заключается в помещении в поток газа или жидкости нити из вольфрама либо платиново-иридиевого сплава. Нить, через которую проходит электрический ток и нагревает её, является термометром сопротивления.

Термоэлектрический анемометр представляет собой термопару, которая определяет температуру тонкой нагретой нити, изменяющуюся в зависимости от скорости воздушного потока.

Первый тип рассмотренных термоанемометров имеет большую точность, второй – более простую конструкцию. Основные преимущества термоанемометров: механическая прочность; компактность; высокая точность измерений; безынерционность; высокая чувствительность.

Конструкция датчика термоанемометра должна исключать все виды потерь теплоты через него, кроме потерь тепла конвекцией. При соблюдении данного требования справедлива зависимость

$$R_{\text{н}} = f(v_{\text{воз}}), \quad (7.12)$$

где R – активное сопротивление нагретой нити, Ом.

Тепловой баланс нагретой нити имеет следующий вид:

$$I^2 R_{\text{н}} = \alpha F(t_{\text{п}} - t_{\text{с}}), \quad (7.13)$$

где: α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); F – поверхность измерительной нити, м²; I – сила электрического тока, А; $t_{\text{п}}$ – температура потока, °С; $t_{\text{с}}$ – температура проволоки, °С.

Тепловые анемометры сопротивления (рис. 7.10, а) разделяются на работающие при постоянной температуре накала нити и постоянной силе тока.

В первом случае постоянная температура накала нити регулируется силой тока, которая зависит от активного сопротивления реостата R .

Скорость движения воздуха определяется из равенства:

$$U = I^2 R = A + Bv_{\text{воз}}^n, \quad (7.14)$$

где U – напряжение, В; A , B , n – опытные коэффициенты, величина которых указывается в паспортных данных приборов.

В том случае, если тепловой анемометр сопротивления работает при постоянной силе тока, для определения температуры проводится подбор активного сопротивления R таким образом, чтобы сумма $R + R_{\text{п}} = \text{const}$.

Скорость при измерении термоэлектрическим анемометром (электрическая схема приведена на рис. 7.10, б) определяется из равенства:

$$t_{\text{п}} - t_{\text{с}} = \frac{I^2 R_{\text{н}} v_{\text{воз}}^{0,4}}{0,81 \lambda_{\text{воз}} \pi d^{0,4} l} v_{\text{воз}}^{-0,4}, \quad (7.15)$$

где $v_{\text{воз}}$ – кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$; $\lambda_{\text{воз}}$ – теплопроводность воздуха, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$; d , l – диаметр и длина припаянной термопары, м.

Датчики, изготавливаемые из проволоки (рис. 7.10, в, г), применяются для измерения скорости и её пульсации в потоках газов (воздуха). Для измерений в пограничных слоях и в газовых потоках со звуковыми и сверхзвуковыми скоростями (более 340 м/с) применяются пленочные датчики (рис. 7.10, д [17]), имеющие большую механическую прочность. Рабочей частью датчика является узкий клин из термостойкого стекла, на острие которого нанесена платиновая пленка толщиной 1 мкм. Пленочные датчики также могут применяться для измерения средних скоростей потоков жидкостей до 10 м/с.

Внешний вид современного термоанемометра Testo 405i с телескопической рукояткой приведен на рисунке 7.10, е. Диапазон измерения данного прибора $v_{\text{воз}}$ составляет 0...30 м/с, разрешение 0,01 м/с. Основная погрешность измерения $\Delta v_{\text{воз}}$, м/с, имеет линейную зависимость от скорости не на всем интервале измеряемых скоростей и определяется по формулам

$$\Delta v_{\text{воз}} = 0,1 + 0,05 v_{\text{воз}}, \text{ для } v_{\text{воз}} = 0 \dots 2 \text{ м/с}; \quad (7.16)$$

$$\Delta v_{\text{воз}} = 0,3 + 0,05 v_{\text{воз}} \text{ для } v_{\text{воз}} = 2 \dots 30 \text{ м/с}, \quad (7.17)$$

где $v_{\text{воз}}$ – измеренная скорость движения воздуха, м/с.

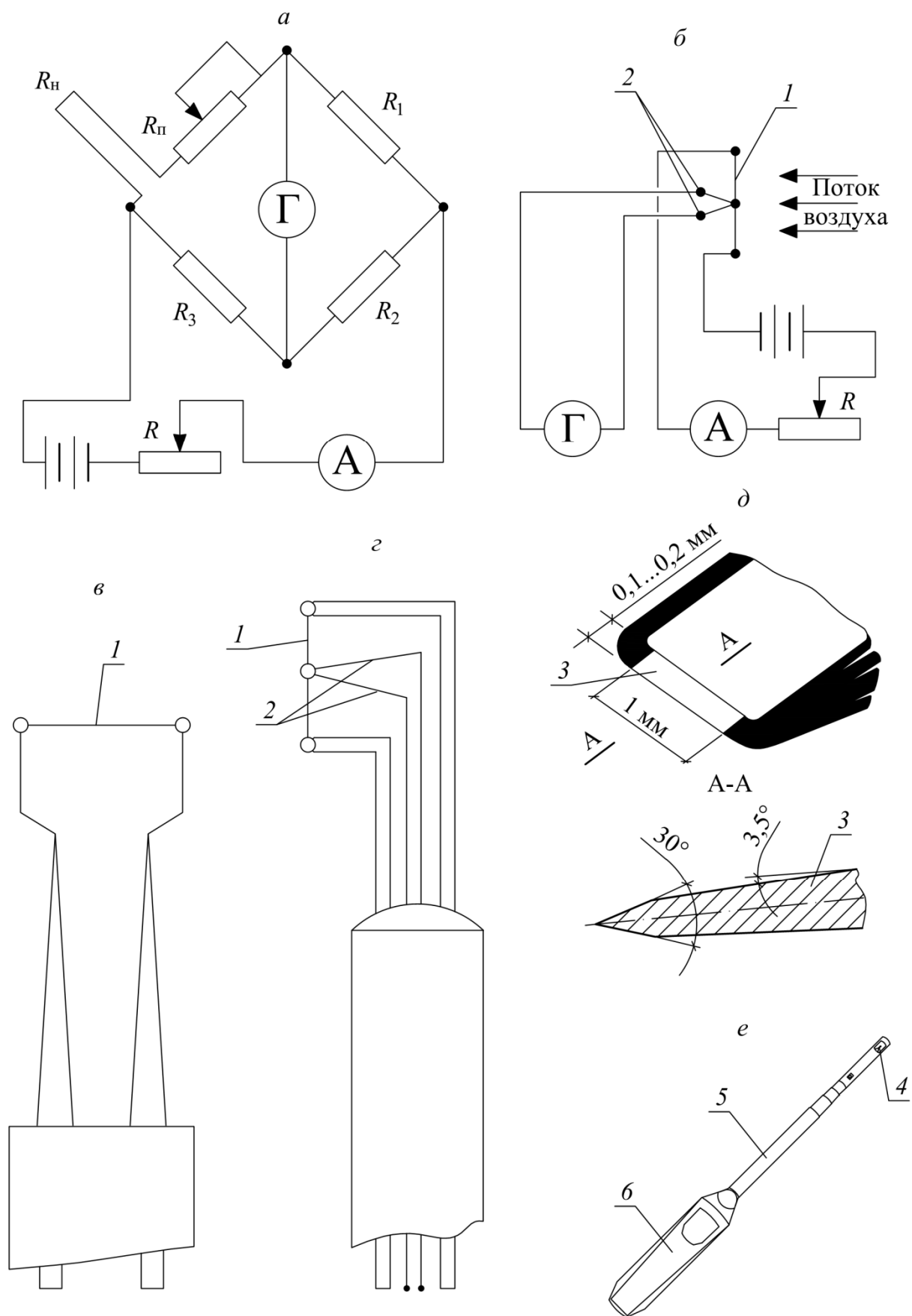


Рис. 7.10. Термоанемометры (*a* – электрическая схема теплового анемометра сопротивления; *б* – то же термоэлектрического анемометра; *в* – проволочный датчик теплового анемометра сопротивления; *г* – то же термоэлектрического анемометра; *д* – пленочный датчик; *е* – термоанемометр Testo 405i): 1 – нагретая нить; 2 – термопара; 3 – платиновая пленка; 4 – зонд с нагретой нитью (струной); 5 – телескопический зонд; 6 – рукоятка

7.5. Ультразвуковые анемометры

Одними из наиболее точных из существующих средств измерения скорости движения воздушного потока $v_{\text{воз}}$, м/с, являются ультразвуковые анемометры. Ультразвуковые анемометры имеют от одной до трех пар преобразователей (излучателей/приемников) и измерительную цепь для определения времени распространения ультразвуковой волны на малом пути $L = 100 \dots 250$ мм.

Первые модели ультразвуковых преобразователи определяли скорость потока воздуха по времени распространения ультразвука из фазового сдвига между непрерывными передаваемыми и принимаемыми сигналами. Данный метод в настоящее время не используется, так как преобразователи чувствительны не только к сигналам излучателей, но и к сигналам близко расположенных объектов (отражателей), а также к резким порывам ветра.

Значительно снизить влияние приведенных недостатков удалось путем применения ультразвуковых анемометров импульсного принципа действия, когда преобразователи попеременно излучают и принимают короткие импульсы с несущей частотой $20 \dots 200$ кГц. Данная схема (рис. 7.11 *а, б*) позволяет определить продольную скорость воздуха $v_{\text{воз}L}$, м/с [38]:

$$v_{\text{воз}L} = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_f} - \frac{1}{t_r} \right), \quad (7.18)$$

где L – расстояние между преобразователями, м; t_f , t_r – время распространения ультразвуковой волны в прямом и обратном направлении между излучателями, с.

В том случае, если не известно направление воздушного потока, применяют три пары преобразователей, а значение скорости рассчитывают по формуле

$$v_{\text{воз}} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}, \quad (7.19)$$

где v_x , v_y , v_z – проекции вектора скорости воздушного потока через точку измерения в трехмерной системе координат, м/с, равные горизонтальной составляющей скорости, определяемой каждой парой преобразователей.

Из формул (7.18), (7.19) видно, что при совпадении направления оси ультразвукового анемометра с направлением движения воздуха $v_{\text{воз}} = v_{\text{воз}L}$.

Ультразвуковые преобразователи и поддерживающая их арматура являются препятствиями для воздушного потока и вызывают его искажение и экранирование. Наибольшим значениям погрешности измерения соответствует параллельное направление измерительного пути и воздушного потока, в данном случае относительная погрешность измерения может достигать 20 %.

Ультразвуковые анемометры подразделяются на бистатические и моностатические. Первые в свою очередь делятся на системы с одним и с двумя излучателями (рис. 7.11 в). В бистатических анемометрах один из преобразователей всегда является излучателем, а второй приемником ультразвуковых импульсов, что приводит к снижению точности измерений времени прохождения сигналов вследствие различной степени загрязнения поверхностей преобразователей, вызывающих различные временные задержки $\Delta t_f \neq \Delta t_r$. Для измеренного времени прохождения сигнала справедливы зависимости

$$t_f = t_{f\text{действ}} + \Delta t_f, \quad (7.20)$$

$$t_n = t_{r\text{действ}} + \Delta t_r, \quad (7.21)$$

Где $t_{f\text{действ}}$, $t_{r\text{действ}}$ – действительные значения времени распространения ультразвуковой волны в прямом и обратном направлении между преобразователями, с; Δt_f , Δt_n – временные задержки, вызванные загрязнением преобразователей, с.

Большинство современных ультразвуковых анемометров являются моностатическими (рис. 7.11, г), в них каждый из преобразователей попеременно является и излучателем, и приемником, что приводит к равенству временных задержек $\Delta t_f = \Delta t_n$ и позволяет добиться меньшей чувствительности к загрязнениям вследствие взаимного обмена функций излучения и приема.

Ультразвуковые анемометры с двумя парами преобразователей применяются для измерения скорости горизонтального ветра (рис. 7.11, д), а с тремя – для измерения скорости и направления ветра в пространстве (рис. 7.11, е).

Основной областью применения данных анемометров являются метеонаблюдения. Анемометры, оборудованные цифровыми процессорами, рассчитывают температуру исследуемого воздушного потока. Отдельные модификации анемометров имеют колпак для защиты от атмосферных осадков (рис. 7.11, ж).

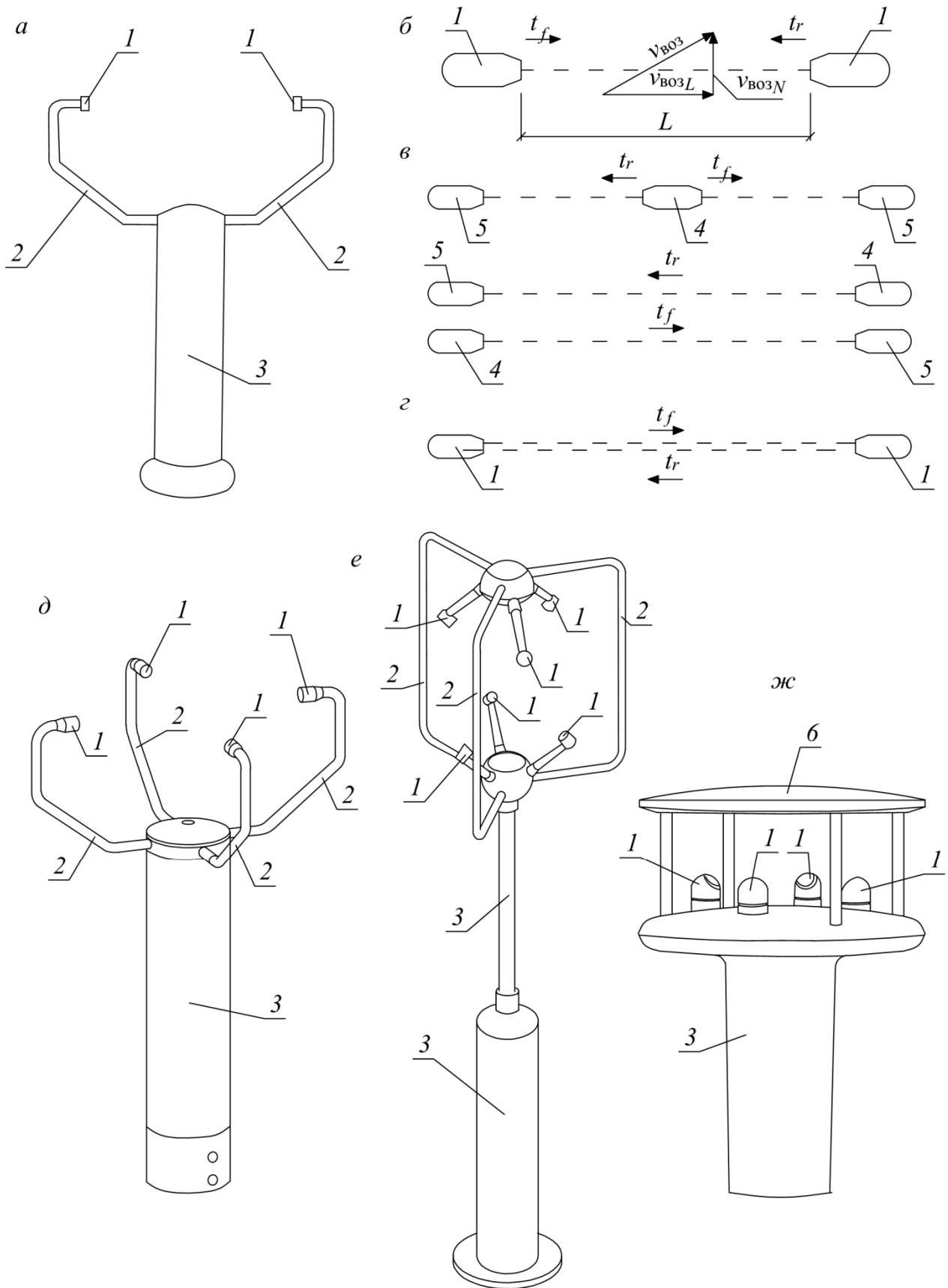


Рис. 7.11. Ультразвуковые анемометры (а – одномерный анемометр; б – принципиальная схема одномерного анемометра; в – схемы бистатических анемометров; г – схемы моностатических анемометров; д – двухмерный анемометр; е – трехмерный анемометр; ж – двухмерный анемометр с защитой от осадков): 1 – преобразователь; 2 – поддерживающая арматура; 3 – стакан с цифровым процессором; 4 – излучатель; 5 – приемник; 6 – колпак

7.6. Лазерные анемометры

Лазерные доплеровские анемометры используют рассеивание лазерного излучения частицами, помещаемыми в воздушный поток. Принципиальная схема рассеяния лазерного излучения движущейся частицей приведена на рис. 7.12 [40]. Источник света испускает волну с круговой частотой w_i и волновым вектором k_i . Свет падает на движущуюся со скоростью $v_{\text{ч}}$ частицу и рассеивается во все стороны. Рассеянная волна имеет волновой вектор k_s и частоту w_s , которая воспринимается приемником.

Скорость движения частиц определяется в зависимости от сдвига частоты рассеянной волны w_D , обусловленного эффектом Доплера, из равенства

$$w_D = w_s - w_i = \frac{2\pi n}{\lambda} (\cos\theta_s - \cos\theta_i) v_{\text{ч}}, \quad (7.22)$$

где n – показатель преломления среды, окружающей частицу; λ – длина волны в вакууме падающего излучения, м; θ_i , θ_s – углы между направлением распространения падающей волны и скоростью частицы и между направлением рассеивания и скоростью частицы соответственно, град.

Принципиальная схема простейшего лазерного доплеровского анемометра приведена на рис. 7.13 [15]. Излучение лазера попадает на полупрозрачное зеркало и делится на два пучка. Первый пучок, пройдя через зеркало, направляется в исследуемый поток, где, рассеявшись, собирается линзой и направляется на фотоприемник. В фотоприемник также попадает второй пучок, который прошел через ультразвуковой модулятор и систему линз. Результаты измерения доплеровского сдвига частоты w_D и вычисления скорости движения частицы $v_{\text{ч}}$ выводятся на монитор электронного блока.

Доплеровские лазерные анемометры широко применяют в технологических, гидрометеорологических и медицинских исследованиях.

Внешний вид, область применения и основные технические характеристики некоторых современных доплеровских анемометров отечественного производства (ОАО «Институт оптико-электронных информационных технологий») приведены в табл. 7.1 [18].

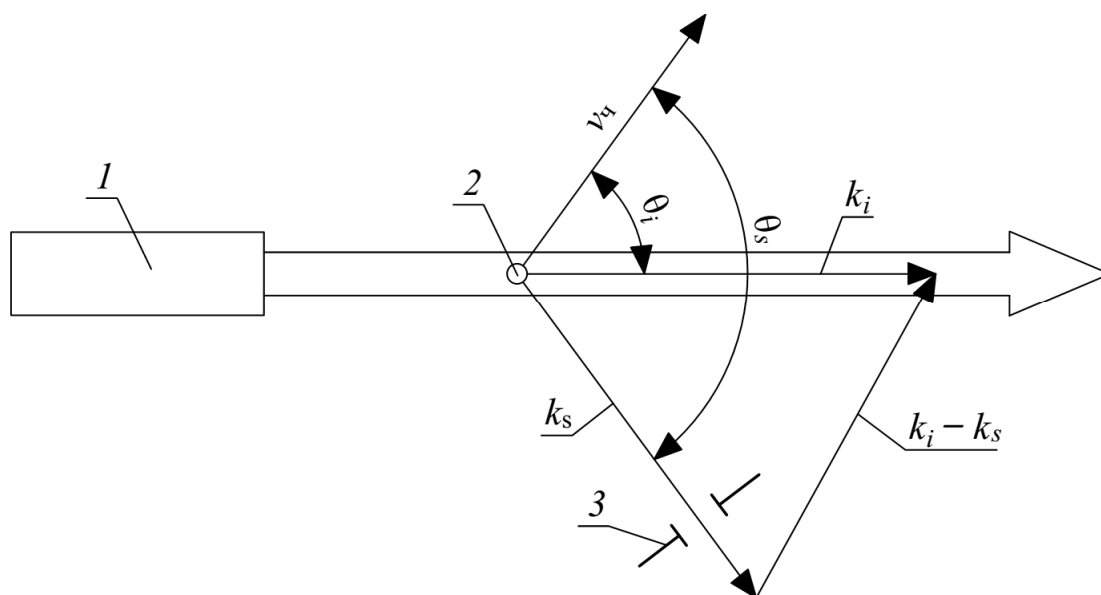


Рис. 7.12. Схема рассеяния лазерного излучения движущейся частицы: 1 – источник излучения; 2 – исследуемая частица; 3 – неподвижный приемник

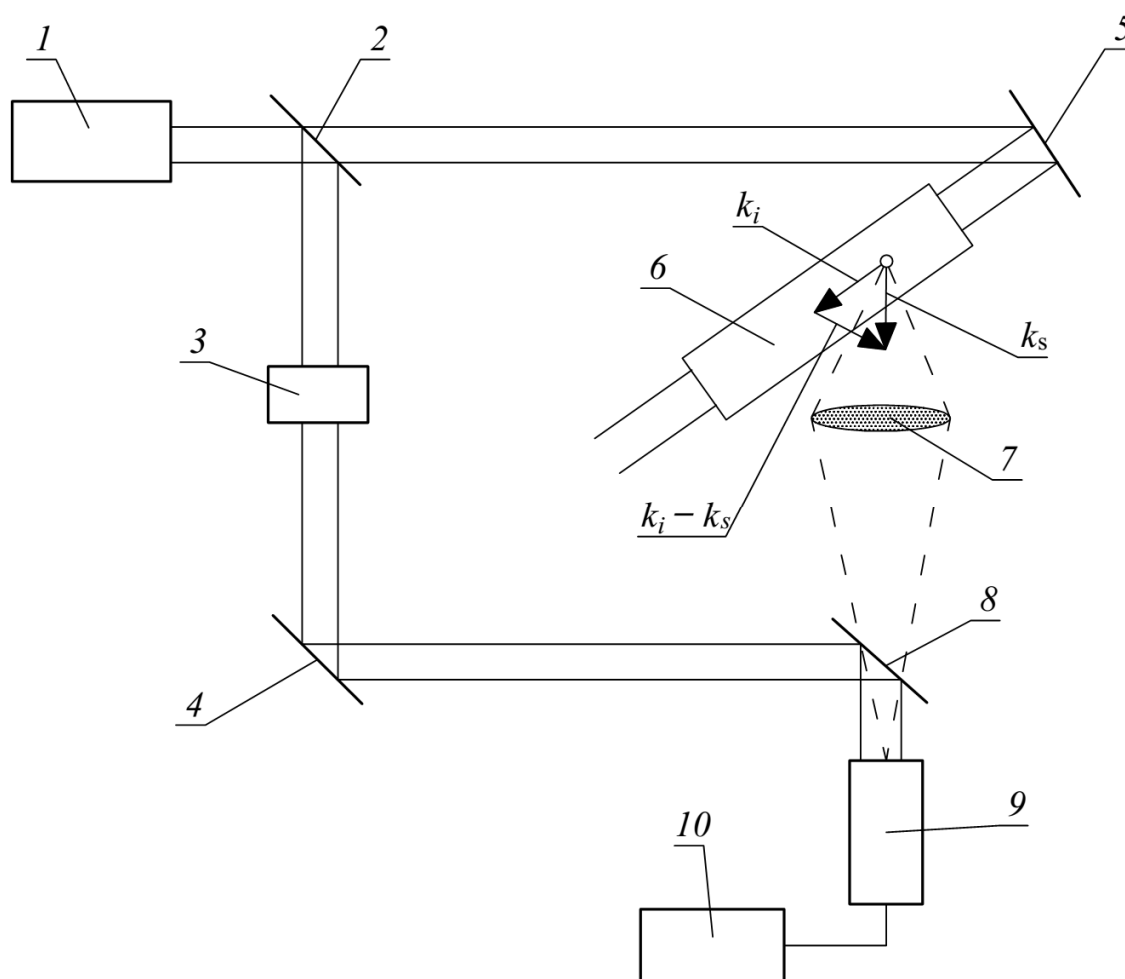
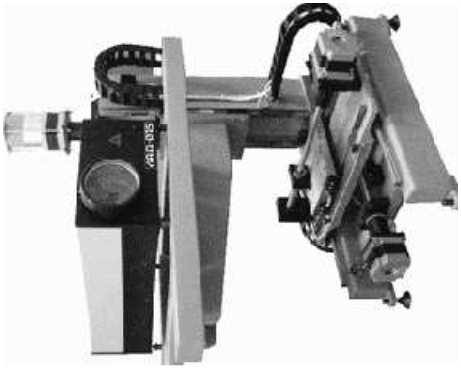
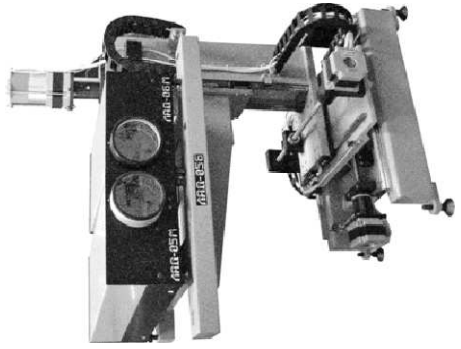


Рис. 7.13. Принципиальная схема лазерного доплеровского анемометра: 1 – источник излучения; 2, 4, 5, 8 – зеркала; 3 – брэгговский ультразвуковой модулятор; 6 – исследуемый поток; 7 – собирающая линза; 9 – фотоприемник; 10 – электронный блок

Таблица 7.1

Внешний вид и технические характеристики современных лазерных доплеровских анемометров (ОАО «Институт оптико-электронных информационных технологий»)

Внешний вид	Наименование, область применения и основные технические характеристики
<p>1</p> 	<p>Одно- и двухкомпонентные лазерные доплеровские измерительные системы «ЛАД-015», «ЛАД-05», «ЛАД-06».</p> <p>Предназначен для прецизионного бесконтактного измерения и визуализации вектора скорости газожидкостных многофазных мутных потоков в режиме обратного светорассеяния и для измерения концентрации светорассеивающих частиц. Область применения: научные исследования в области гидро- и аэродинамики, измерение скоростей жидкостных и газовых потоков в промышленных технологических процессах, для образовательных целей.</p> <p>Основные технические характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> – диапазон измеряемых скоростей – $\pm 0,01 \dots 30$ м/с; – погрешность измерения средней скорости – $\pm 0,5$ %; статическая погрешность отслеживания спектрального пика доплеровского сигнала не превышает $\pm 0,1$ %; – фокусное расстояние выходных сменных объективов $F - 0,25, 0,5, 1,0$ м; – размер зондирующего оптического поля при $F = 0,5$ м; $\lambda = 0,655$ мкм – $\varnothing 0,05 \times 1$ мм
	<p>Трехкомпонентная лазерная доплеровская измерительная система «ЛАД-056»</p> <p>Область применения: измерение кинематических и структурных параметров жидкостных и газовых потоков в промышленных технологических процессах; научные исследования в области гидро- и аэродинамики.</p> <p>Основные технические характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> – диапазон измеряемых скоростей, компоненты X, Y – $\pm 0,01 \dots 30$ м/с; – диапазон измеряемых скоростей, компоненты Z – $\pm 0,02 \dots 100$ м/с; – погрешность измерения средней скорости, компоненты X, Y – $\pm 0,5$ %; погрешность измерения средней скорости, компоненты Z – $\pm 1,5$ %; статическая погрешность отслеживания спектрального пика доплеровского сигнала не превышает $\pm 0,1$ %; – максимальная частота коммутации измерительных каналов – 300 кГц; – фокусное расстояние выходных сменных объективов $F - 0,25, 0,5, 1,0$ м; – размер зондирующего оптического поля при $F = 0,5$ м; $\lambda = 0,655$ мкм – $\varnothing 0,05 \times 1$ мм

7.7. Контрольные вопросы и задания для практических занятий и самостоятельной работы

Контрольные вопросы.

1. Что такое анемометр? Приведите классификацию анемометров по принципу их действия.
2. Какое число чашек чашечного анемометра является оптимальным для его конструкции и почему?
3. Опишите порядок работы с крыльчатим анемометром АСО-3, в том числе проведение измерений и обработку их результатов.
4. Каким образом проводятся измерения расхода воздуха через воздухо-распределители с применением современных крыльчатых анемометров?
5. Перечислите основные конструкции статических анемометров.
6. Чем отличаются конструкции тепловых анемометров сопротивления и термоэлектрических анемометров?
7. На чем основан принцип работы ультразвуковых анемометров?
8. Для каких измерений применяются одномерные, двухмерные и трехмерные ультразвуковые анемометры?
9. На каком эффекте основывается работа лазерных анемометров?
10. Опишите принцип работы лазерных анемометров.

Задания для практических занятий.

1. Определите скорость воздушного потока, измеренную анемометром МС-13, и основную погрешность измерения. Исходные данные для проведения расчетов приведены в табл. 7.2.
2. Определите скорость воздушного потока, измеренную анемометром АСО-3, и основную погрешность измерения. Исходные данные для проведения расчетов указаны в табл. 7.3.
3. Требуется определить основную погрешность измерения скорости крыльчатим анемометром Testo 417. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.2

Исходные данные для определения скорости воздушного потока, измеренной анемометром МС-13, и основной погрешности измерения

Номер варианта	Начальные показания			Конечные показания			Время замера t , с
	Единицы	Сотни	Тысячи	Единицы	Сотни	Тысячи	
1	51	8	3	59	5	4	90
2	8	9	5	54	4	6	90
3	63	5	6	42	9	6	120
4	87	5	7	77	8	7	60
5	81	9	1	59	1	2	90
6	58	1	3	52	6	3	120
7	77	7	2	93	3	3	90
8	74	1	4	31	7	4	90
9	19	7	0	18	0	1	120
10	63	0	3	36	4	3	60
11	71	3	6	45	6	6	90
12	12	3	0	44	0	1	120
13	96	9	5	37	6	6	90
14	95	1	3	92	3	3	90
15	13	5	5	5	7	5	120
16	75	2	5	68	0	6	90
17	10	7	2	1	0	3	90
18	86	7	0	39	5	1	120
19	64	8	1	64	4	2	90
20	63	8	6	90	2	7	90
21	65	3	4	80	4	4	120
22	42	4	3	46	9	3	60
23	40	4	1	60	7	1	90
24	13	7	1	28	1	2	120
25	67	7	1	43	5	2	90
26	44	1	1	9	4	1	90
27	69	6	1	87	3	2	120
28	39	4	5	69	9	5	60
29	17	0	2	34	6	2	90
30	20	0	5	22	2	5	120

Таблица 7.3

Исходные данные для определения скорости воздушного потока, измеренной анемометром АСО-3, и основной погрешности измерения

Номер варианта	Начальные показания			Конечные показания			Время замера t , с
	Единицы	Сотни	Тысячи	Единицы	Сотни	Тысячи	
1	59	2	6	21	7	6	60
2	52	7	4	77	0	5	90
3	78	2	3	25	3	3	60
4	26	4	2	0	7	2	60
5	51	8	6	48	3	7	90
6	66	5	4	30	6	4	60
7	17	4	7	17	6	7	90
8	65	0	3	71	4	3	90
9	35	1	7	38	5	7	60
10	88	0	3	76	1	3	60
11	28	0	7	71	4	7	90
12	49	0	7	78	3	7	60
13	58	7	5	11	8	5	90
14	6	5	6	40	8	6	60
15	77	4	5	70	6	5	60
16	13	3	6	11	5	6	90
17	66	4	3	47	6	3	90
18	17	4	4	88	8	4	60
19	0	2	7	41	5	7	90
20	6	6	5	83	6	5	90
21	19	4	7	78	5	7	60
22	42	4	7	31	7	7	60
23	39	3	1	92	6	1	90
24	55	2	4	53	6	4	60
25	97	0	1	43	5	1	60
26	79	3	4	11	5	4	90
27	96	1	1	55	3	1	60
28	99	7	5	61	8	5	60
29	70	2	4	19	5	4	90
30	54	3	7	41	4	7	60

Таблица 7.4

Исходные данные для определения основной погрешности измерения скорости анемометром Testo 417

Номер варианта	Измеренная скорость $v_{\text{воз}}$, м/с	Номер варианта	Измеренная скорость $v_{\text{воз}}$, м/с
1	5,1	16	7,6
2	7	17	6,8
3	13,1	18	2,9
4	7,2	19	13,2
5	13,4	20	12,8
6	16,9	21	3,8
7	12,2	22	15,2
8	3,3	23	5,3
9	14	24	2,6
10	19,9	25	9,5
11	2,3	26	16,6
12	10	27	11
13	3,5	28	5,3
14	12	29	9,1
15	19,3	30	12,9

Задания для самостоятельной работы.

Подготовить доклад в формате презентации с использованием средств Microsoft Office PowerPoint на следующие темы.

1. История развития средств измерения скорости воздуха.
2. Обзор модельного ряда основных разработчиков и производителей современных термоанемометров.
3. Современные конструкции ультразвуковых анемометров, в том числе работающих на основе акустического резонанса.
4. Физический смысл эффекта Доплера.
5. Передовые конструкции лазерных доплеровских анемометров.
6. Применение анемометров на современных метеостанциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдун, Г.Д. Основы метрологии / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 256 с.
2. Бриндли, К. Измерительные преобразователи / К. Бриндли. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
3. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов. – М.: Спектр, 2009. – 544 с.
4. Вавилов, В.П. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике / В.П. Вавилов, А.Н. Александров. – М.: Энергопрогресс, 2003. – 76 с.
5. Волков, А.И. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. – Минск: Современная школа, 2005. – 608 с.
6. Геращенко, О.А. Тепловые и температурные измерения / О.А. Геращенко, В.Г. Федоров. – Киев: Наукова думка, 1965. – 305 с.
7. Головин, Е.П. Практическое руководство по методике санитарного обследования вентиляции жилых помещений и общественных зданий / Е.П. Головин, М.А. Головина. – Москва – Ленинград: Гос. мед. изд-во, 1934. – 312 с.
8. Гордеев, Б.А. Метрология. Основные понятия и погрешности измерений / Б.А. Гордеев, Т.Н. Прахова. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2007. – 70 с.
9. ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Стандартинформ, 2006. – 26 с.
10. ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 12 с.
11. ГОСТ Р 8.585-2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – М.: Стандартинформ, 2010. – 78 с.
12. ГОСТ 6651-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. – М.: Стандартинформ, 2011. – 25 с.
13. Гурьев, М.Е. Тепловые измерения в строительной теплофизике / М.Е. Гурьев. – Киев: Вища школа, 1976. – 128 с.
14. Дорохова, Н.Д. Определение и оценка параметров микроклимата производственных помещений / Н.Д. Дорохова, Ю.С. Зыга. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2007. – 38 с.
15. Дубнищев, Ю.Н. Оптические методы исследования потоков / Ю.Н. Дубнищев, В.А. Арбузов, П.П. Белоусов, П.Я. Белоусов. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2003. – 418 с.
16. Иванов, Г.М. Теплотехнические измерения и приборы / Г.М. Иванов, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: МЭИ, 2007. – 460 с.

17. Измерения в промышленности. Справ. изд.: в 3 кн. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура: пер. с нем. Под общ. ред. П. Профоса – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgia, 1990. – 384 с.
18. Измерительные системы и комплексы / Институт оптико-электронных информационных технологий [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ioit.ru> (дата обращения: 08.07.2017).
19. Исакович, Р.Я. Технологические измерения и приборы / Р.Я. Исакович. – М.: Недра, 1979. – 344 с.
20. Камразер, А.Н. Контрольно-измерительные приборы и автоматика / А.Н. Камразер, М.Я. Фитерман. – Л.: Химия, 1988. – 224 с.
21. Ковальногов, Н.Н. Теория и техника теплофизического эксперимента / Н.Н. Ковальногов, Н.М. Лукин. – Ульяновск: УлГТУ, 1999. – 196 с.
22. Кравченко, Н.С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме / Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская. – Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2011. – 88 с.
23. Крамарухин, Ю.Е. Приборы для измерения температуры / Ю.Е. Крамарухин. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
24. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества вещества / П.П. Кремлевский. – СПб.: Политехника, 2002. – 409 с.
25. Кузнецов, Н.Д. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам / Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.
26. Кулаков, М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств / М.В. Кулаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
27. Мартенс, Л.К. Техническая энциклопедия. Т.1. Аэродинамика / Л.К. Мартенс. – М.: Советская энциклопедия, 1927. – 860 с.
28. Мурин, Г.А. Теплотехнические измерения / Г.А. Мурин. – М.: Энергия, 1979. – 424 с.
29. Мухин, В.С. Приборы контроля и средства автоматизации тепловых процессов / В.С. Мухин, И.А. Саков. – М.: Высшая школа, 1988. – 256 с.
30. Манометрические термометры. Руководство по эксплуатации. – Klingenberg: WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, 2009. – 44 с.
31. Орнатский, П.П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые) / П.П. Орнатский. – Киев: Вища школа, 1986. – 504 с.
32. Половинкин, А.А. Основы общего земледелия / А.А. Половинкин. – М.: Учпедгиз, 1958. – 496 с.
33. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.

34. Приборы для измерения скорости и объемного расхода воздуха. Каталог. – М.: Тесто Рус, 2017. – 32 с.
35. Промышленные приборы и средства автоматизации: справочник / В.Я. Баранов, Т.Х. Безновская, В.А. Бек [и др.]; под общ. ред. В.В. Черенкова. – Л.: Машиностроение, 1987. – 847 с.
36. Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – М.: Академия, 2004. – 336 с.
37. Соловцов, В.К. Контрольно-измерительные приборы / В.К. Соловцов. – М.: Высшая школа, 1969. – 272 с.
38. Тихомиров, А.А. Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения пульсаций скорости и температуры воздушных потоков. Обзор / А.А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – № 7. – С. 585–600.
39. Фарзани, Н.Г. Технологические измерения и приборы / Н.Г. Фарзани, Л.В. Илясов, А.Ю. Азимзаде. – М.: Высшая школа, 1989. – 456 с.
40. Федосов, И.Ф. Лазерный доплеровский анемометр / И.Ф. Федосов. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2008. – 18 с.
41. Фримантл, М. Химия в действии. В 2-х ч. Ч. 1; пер. с англ. – М.: Мир, 1998. – 528 с.
42. Хансуваров, К.И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара / К.И. Хансуваров. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 287 с.
43. Чистофарова, Н.В. Технические измерения и приборы. Ч.1. Измерение теплоэнергетических параметров / Н.В. Чистофарова, А.Г. Колмогоров. – Ангарск: АГТА, 2008. – 200 с.
44. Чистяков, В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям / В.С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ.....	5
1.1. Общие сведения об измерениях физических величин.....	5
1.2. Точность измерений. Погрешность измерений.....	12
1.3. Средства измерений. Метрологические характеристики средств измерений....	17
1.4. Оценка случайных погрешностей равноточных измерений.....	22
1.4.1. Свойства случайных величин.....	22
1.4.2. Определение случайной погрешности многократных измерений.....	24
1.4.3. Определение случайной погрешности однократных измерений. Учет случайной ошибки многократных и однократных измерений.....	27
1.4.4. Определение случайной погрешности косвенных измерений.....	29
1.5. Контрольные вопросы и задания для практических занятий и самостоятельной работы.....	30
Глава 2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	34
2.1. Общие сведения об измерениях температуры.....	34
2.2. Термометры расширения.....	35
2.3. Манометрические термометры.....	40
2.4. Термопреобразователи сопротивления.....	43
2.5. Термоэлектрические преобразователи.....	46
2.6. Дилатометрические термографы.....	49
2.7. Пирометры.....	51
2.8. Тепловизоры.....	55
2.9. Контрольные вопросы и задания для практических занятий и самостоятельной работы.....	58
Глава 3. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ.....	60
3.1. Общие сведения об измерении давления.....	60
3.2. Жидкостные манометры.....	62
3.3. Деформационные манометры.....	65
3.4. Электрические манометры.....	68
3.5. Грузопоршневые манометры.....	74
3.6. Контрольные вопросы и задания для практических занятий и самостоятельной работы.....	77
Глава 4. ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ.....	80
4.1. Измерение влажности воздуха и материалов.....	80
4.1.1. Общие сведения о влажности воздуха и материалов.....	80
4.1.2. Измерение влажности воздуха.....	81
4.1.3. Измерение влажности материалов.....	89
4.2. Определение состава газов.....	90
4.2.1. Объемные химические газоанализаторы.....	91
4.2.2. Термокондуктометрические газоанализаторы.....	92
4.2.3. Магнитные газоанализаторы.....	94
4.2.4. Оптические газоанализаторы.....	95

4.2.5. Электрические газоанализаторы.....	97
4.2.6. Хроматографические газоанализаторы.....	98
4.2.7. Масс-спектрометрические газоанализаторы.....	100
4.3. Контрольные вопросы и задания для практических занятий и самостоятельной работы.....	101
Глава 5. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ.....	104
5.1. Общие сведения об измерении количества и расхода веществ	104
5.2. Скоростные счетчики.....	105
5.3. Объемные счетчики.....	106
5.4. Барабанные счетчики.....	108
5.5. Ротационные счетчики.....	109
5.6. Расходомеры переменного перепада давления.....	110
5.7. Расходомеры постоянного перепада давления.....	114
5.8. Электромагнитные расходомеры.....	116
5.9. Ультразвуковые расходомеры.....	118
5.10. Расходомеры Кориолиса.....	120
5.11. Вихревые расходомеры.....	122
5.12. Калориметрические и термоконвективные расходомеры.....	124
5.13. Контрольные вопросы и задания для практических занятий и самостоятельной работы.....	125
Глава 6. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЕЙ.....	127
6.1. Классификация приборов для измерения уровней.....	127
6.2. Визуальные уровнемеры.....	127
6.3. Поплавковые уровнемеры.....	128
6.4. Буйковые уровнемеры.....	129
6.5. Гидростатические уровнемеры.....	130
6.6. Электрические уровнемеры.....	134
6.7. Ультразвуковые уровнемеры.....	135
6.8. Волноводные уровнемеры.....	138
6.9. Радарные уровнемеры.....	140
6.10. Контрольные вопросы и задания для практических занятий и самостоятельной работы.....	142
Глава 7. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА.....	143
7.1. Чашечные анемометры.....	143
7.2. Крыльчатые анемометры.....	148
7.3. Статические анемометры.....	156
7.4. Термоанемометры.....	158
7.5. Ультразвуковые анемометры.....	161
7.6. Лазерные анемометры.....	164
7.7. Контрольные вопросы и задания для практических занятий и самостоятельной работы.....	167
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	171

Бодров Михаил Валерьевич
Кузин Виктор Юрьевич

Теплотехнические измерения и приборы

Учебное пособие

Редактор
Т. Л. Батаева

Подписано в печать _____ Формат 60x90 1/16 Бумага офсетная. Печать офсетная.
Уч. изд. л.10,6. Усл. печ. л. 11,0. Тираж 300 экз. Заказ №

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.
Полиграфцентр ННГАСУ, 603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.
<http://www.nngasu.ru>, srec@nngasu.ru