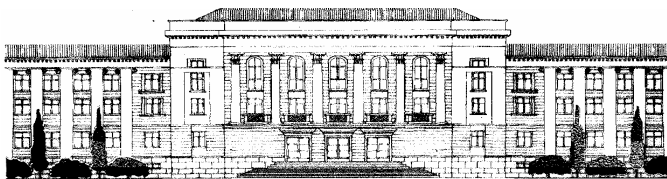


ГРУЗИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



И.Г. Зедгинидзе, Н.О. Берая

**ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И
ЗАВИСЯЩИХ ОТ ВРЕМЕНИ
ВЕЛИЧИН**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

*Утверждено
учебно-методическим
советом ГТУ*



Технический университет
«*Центр информатизации*»
Тбилиси 2002

УДК 53.096.389
З 473

Зедгинидзе И.Г., Берая Н.О. **Измерение времени и зависящих от времени величин.** Тбилиси: Технический университет – «Центр информатизации», 2002 г.

З 473 В серии «Методы и средства измерений» рассматриваются методы и средства измерений различных физических величин, встречающихся при определении качества продукции.

Данная книга посвящена методам и средствам измерений времени и таких зависящих от времени величин, как частота, скорость, ускорение. Рассмотрены также вопросы измерения расхода и количества жидкости, пара и газа. Уделено внимание метрологическому обеспечению измерений времени и вышеуказанных величин, зависящих от времени.

Рецензенты:

В.А. Долидзе, доктор технических наук, профессор

И.М. Чхеидзе, доктор технических наук, профессор

ISBN 99928 – 944 – 0 – 7

© Издательство «Технический университет», 2002

ISBN 99928 – 18 – 25 – 5

© Технический университет – «Центр информатизации», 2002

ВВЕДЕНИЕ

Физическая величина – это свойство, общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта. Основной задачей измерений является получение информации о значении физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

По условной зависимости от других величин физические величины делятся на основные, условно независимые физические величины и производные, условно зависимые физические величины. Соответственно делятся единицы физических величин. В Международной системе (СИ) семь основных единиц физических величин: времени – секунда (с), массы – килограмм (кг), длины – метр (м), силы тока – ампер (А), термодинамической температуры – кельвин (К), силы света – кандела (кн), количества вещества – моль, две дополнительные единицы – радиан и стерадиан и свыше ста производных единиц.

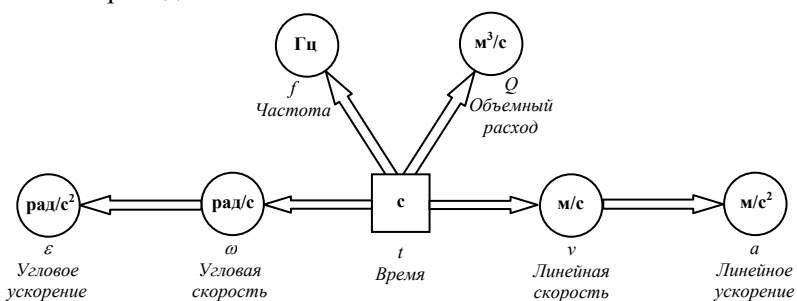
С фактором времени люди вынуждены были считаться с первых шагов развития человечества. Движение Солнца по небосводу являлось для них не только любопытным явлением, но и обстоятельством, которое диктовало распорядок жизни. В сопоставлении движения Солнца, иногда Луны, планет и звезд с другими явлениями природы и с событиями в общественной жизни у людей вырабатывалось сознательное представление о времени. Именно поэтому с древних времен при построении систем счисления времени за основу принимались обусловленные движением небесных тел закономерно (с относительно неизменным периодом) повторяющиеся явления (движение Земли вокруг Солнца, движение Луны, осевое вращение Земли). Для измерения больших интервалов времени стали применять один период полного обращения Земли вокруг Солнца – *год* (равный 365.2422 средних солнечных суток, т.е. «обычных» суток), с которым связан цикл сезонных изменений. Относительно меньшей единицей был период смены лунных фаз, связанный с обращением Луны вокруг Земли, – синодический *месяц*, равный 29.5306 ср. солнечных суток, видоизменением которого является современный месяц (в нашем календаре год делится на 12 месяцев продолжительностью от 28 (февраль) до 31 дня, не согласованных с фазами Луны). Однако фундаментальной единицей измерения времени всегда был период осевого вращения Земли – *сутки*. Сутки далее были поделены

на 24 одинаковых *часа*, для нужд науки и техники ввели *минуту* (1/60 часть часа) и *секунду* (1/60 часть минуты). Таким образом секунду определили как 1/86400 долю средних солнечных суток.

Обнаруженные далее нерегулярные колебания вращения Земли показали, что средние солнечные сутки определены с большой погрешностью 10^{-7} . За секунду в 1960 г. была принята 1/31556925.9747 часть тропического года на 0 января 1900 г. в 12 часов эфемеридного времени. Привязка определения секунды не к вращению Земли вокруг своей оси, а к движению Земли вокруг Солнца позволило почти на три порядка (в 1000 раз) повысить точность определения единицы времени.

Но и этого оказалось недостаточно. Создание квантомеханических источников электромагнитных колебаний позволило в 1967 г. ввести понятие физической, или атомной, секунды. Она была определена, как интервал времени, в течение которого совершается 9192631770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущений внешними полями.

Измерение времени тесно связано с измерением таких величин, как частота, линейная и угловая скорость, линейное и угловое ускорение, объемный расход и др. Если единица времени – секунда – является одной из основных во всех системах единиц физических величин, в том числе и в СИ, единицы остальных указанных выше физических величин выводятся из основных как производные. Связь между единицей времени и единицами этих величин приведена ниже



В данной книге рассматриваются методы и средства измерения времени и связанных с временем величин – частоты, линейной и угловой скорости и ускорения, объемного расхода.

Методы и средства измерения времени

1.1. Общие сведения об измерении времени

Основной единицей времени в принятой в настоящее время Международной системе единиц СИ является секунда, сокращенно обозначаемая одной русской буквой *с* или одной латинской буквой *s*.

В основе всех известных способов непрерывного измерения времени лежат периодические процессы – вращение Земли вокруг оси, обращение Земли вокруг Солнца, качание маятника, колебание кварцевого резонатора, изменение электрического состояния молекул и атомов и т.д. Возможность использования тех или иных из них для измерения времени в первую очередь определяется степенью постоянства периода.

Исторически сложилось так, что в основу измерения времени было положено вращение Земли вокруг оси. Метрологическими организациями была утверждена ранее повсеместно принятая единица измерения времени – средние солнечные сутки. Длительность солнечных суток определялась как интервал времени между двумя положениями Солнца в зените. Однако из-за эксцентриситета орбиты Земли и эклиптики имеются отклонения длительности солнечных дней. Поэтому средние солнечные сутки определяются как среднее значение продолжительности всех солнечных дней одного года. День разделяется на 24 часа по 60 минут или 86400 секунд. Следовательно секунду определяли как 1/86400 долю средних солнечных суток.

Ввиду вращения Земли нельзя установить единое для всех точек земной поверхности время. Это привело бы к рассогласованию такого единого времени с истинным солнечным временем, которым диктуется распорядок жизни общества в течение суток. Но использование только местного времени не обеспечивает взаимосвязи во времени хозяйственной деятельности отдельных районов земного шара или даже государства. Поэтому с целью объединения счета времени на всем пространстве Земли была принята система поясного времени. Сущность предложенной в 1878 г. канадским инженером С. Флемингом такой системы заключается в следующем. Поверхность Земли разбита меридианами на 24 пояса (от 0 до 23). Средние меридианы этих поясов, отстоящие друг

от друга на 15^0 (рис.1), приняты за основные меридианы. Так как за начальный основной меридиан принят средний меридиан нулевой полосы, проходящий через гринвичскую обсерваторию в Англии – гринвичский меридиан – и ему дан №0, то номера всех последующих часовых поясов, считаемых к востоку от гринвичского меридиана, включая №23, соответствуют восточным долготам основных меридианов этих часовых поясов, выраженным в часовой мере.

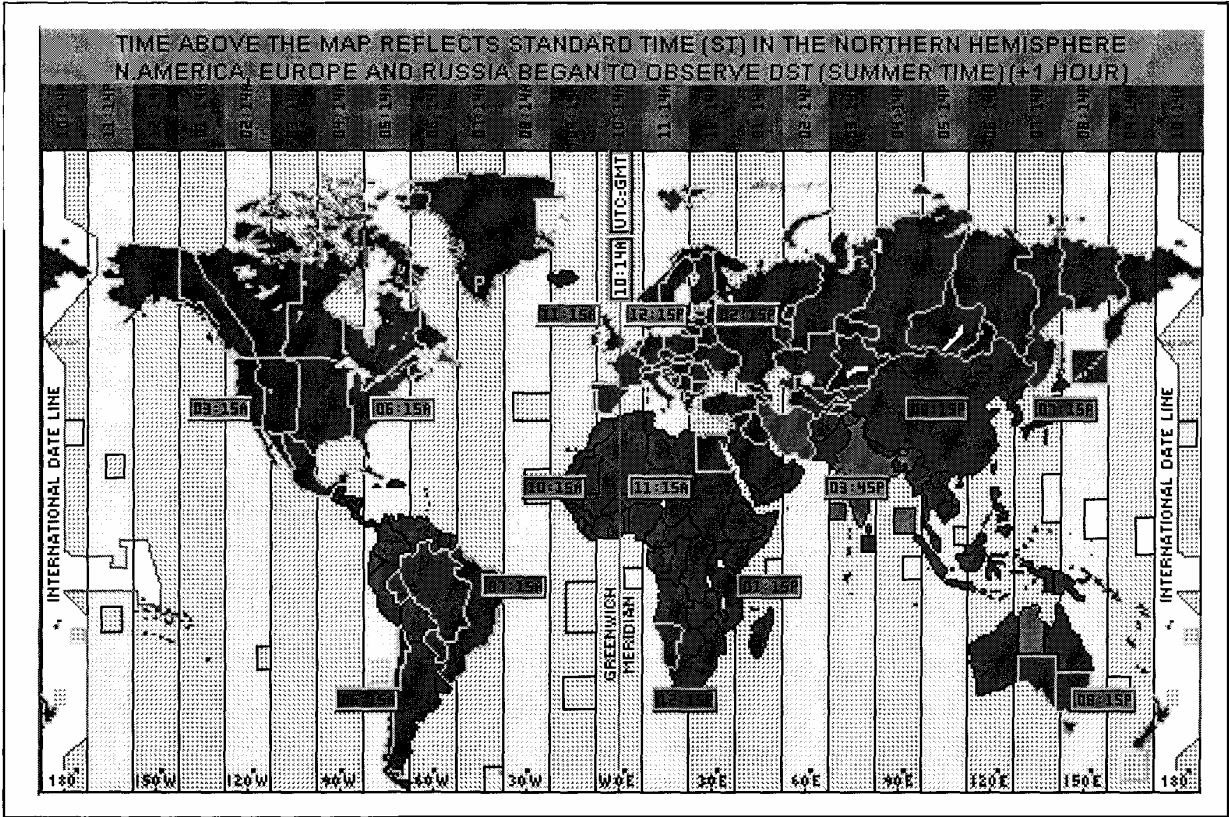
Время на нулевом (гринвичском) меридиане определяется как всемирное время (UT – Universal Time) и используется прежде всего в авиации и морском флоте. Для всемирного времени начало дня 0^h устанавливается по зениту «среднего Солнца» на 180 -м градусе долготы; а конец дня 24^h – по зениту следующего дня. В направлении с востока на запад начало дня смещается в соответствии с разностью значений поясного времени по отношению к всемирному времени.

На территории каждого часового пояса принято местное среднее время основного меридиана. Таким образом, минуты и секунды в каждый момент совпадают по всей Земле, а часы различаются в зависимости от номера пояса. В действительности границы поясов несколько нарушаются – они могут следовать государственно-административным или естественным границам (рис.2). Закавказье, например, находится в 3-ем часовом поясе, Москва – во втором и т.д.

Среди граничных линий часовых поясов есть такая, при переходе через которую наряду с изменением показаний часов на 1 ч изменяют дату. Линия изменения даты по международному соглашению проходит по Тихому океану, несколько восточнее Новой Зеландии, совпадая с меридианом 180^0 в открытом океане, огибает с запада Алеутские острова и через Берингов пролив уходит в Северный Ледовитый океан, нигде не касаясь суши (рис.1).

В процессе развития измерительной техники и повышения требований к точности измерений определение секунды претерпело существенные изменения. Уже маятниковые часы позволили обнаружить систематическое замедление суточного вращения Земли (замедление вращения Земли из-за приливного трения за столетие приводит к изменению длительности суток на 0.0016 с).

С целью повышения точности воспроизведения единицы времени в 1960 г. было принято ее новое определение с привязкой к



Puc.1

движению Земли вокруг Солнца, основанное на астрономическом определении эфемеридного равномерного времени. Секунду стали исчислять как $1/31556925.9747$ долю тропического года (интервала времени между двумя весенними равноденствиями) на 0 января 1900 г. в 12 часов эфемеридного времени¹. Это позволило повысить точность воспроизведения времени почти на два порядка. Но и этого оказалось недостаточно. С помощью кварцевых часов было выявлено, что сам период обращения Земли вокруг Солнца подвержен нерегулярным колебаниям.

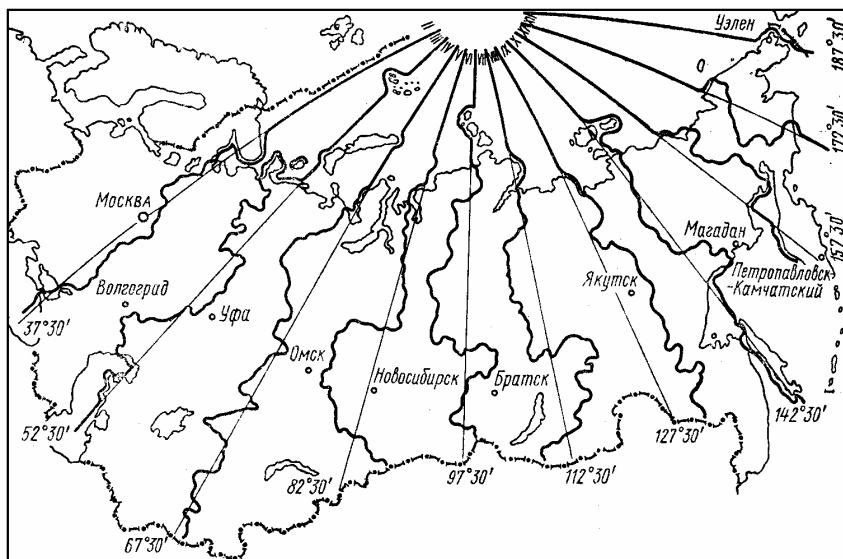


Рис.2. Часовые пояса СНГ

Рациональное решение задачи установления единицы измерения времени, постоянство и воспроизводимость которой отвечает современным требованиям точности, было найдено в процессах микромира. Оказалось, что молекулы и атомы некоторых веществ в переменном электрическом поле возбуждаются и изменяют свое энергетическое состояние на резонансной частоте, свойственной только молекулам и атомам данного вещества. Резонансные частоты, являющиеся константами этих веществ, чрезвычайно слабо зависят от условий возбуждения. В 1967 г. было

¹ Дата «0 января 1900 г. в 12 часов» выражена в принятом астрономами порядковом счете времени и соответствует полудню 31 декабря 1899 г.

введено понятие физической, или атомной, секунды. Она была определена как интервал времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения внешними полями.

Но и с принятием атомной секунды астрономическая система измерения времени не утратила своей роли. Обе шкалы взаимно дополняли друг друга. Если шкала эфемеридного времени воспроизводит течение времени по положению Земли относительно Солнца и других космических тел, фиксирует это положение и изменяется вместе с изменением скорости движения Земли (шкала эфемеридного времени воспроизводит и интервал, и момент времени), то шкала времени, в основе которой лежит атомная секунда, воспроизводит абстрактно равномерное время (шкала атомного времени хранит момент, переданный ей эфемеридной секундой).

В естественных науках, и прежде всего в физике, химии и астрономии, необходимы очень точные измерения промежутков времени в довольно большом диапазоне от 10^{-10} с до 10^{14} с. Часть шкалы измеряемых промежутков времени приведена на рис.3.

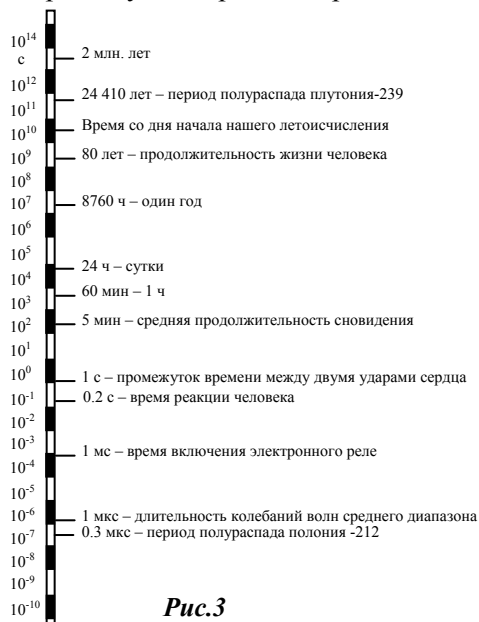


Рис.3

1.2. Меры времени

Назначение меры времени – в воспроизведении шкалы времени, т.е. последовательности интервалов времени с установленным временным положением начала интервала – моментом времени.

Кроме мер времени, основанных на периодических повторяющихся явлениях, связанных с собственным вращением Земли (дни) и вращением Земли вокруг Солнца (годы)¹ на практике широко применяются меры времени как с колебательной системой, так и без колебательной системы. Классификация этих мер времени приведена на рис.4.

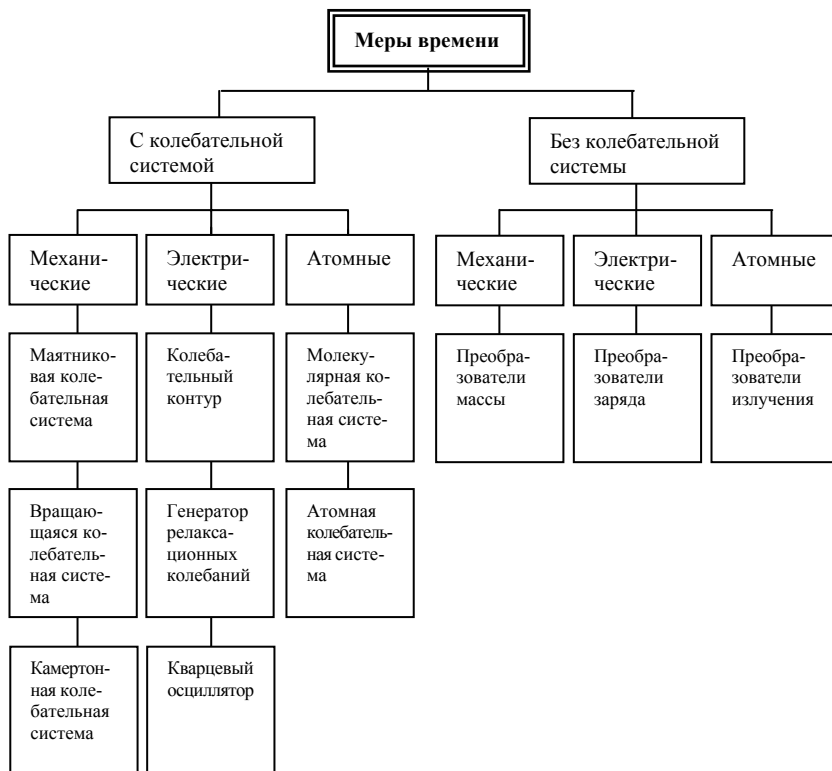


Рис.4. Меры времени

¹ Существующий в настоящее время календарь, введенный еще папой Григорием XIII в 1582 г. (григорианский календарь) состоит из 365 дней, разделенных на 12 месяцев и 52 недели. Возникающие при этом различия во времени вращения Земли вокруг Солнца выравниваются путем введения добавочного дня високосного года (29 февраля).

Механические колебания реализуются с помощью систем с накопителями энергии (маятник, пружина) (табл.1), имеющими положение равновесия, при отклонении от которого возникают силы, возвращающие их в это положение.

Таблица 1

Механические меры времени с колебательной системой

Тип	Маятниковая колебательная система	Вращающаяся колебательная система	Камертонная колебательная система
Схема			

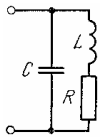
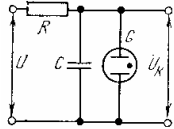
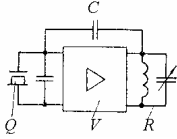
У маятниковых колебательных систем (табл.1) при малых углах отклонения φ период колебаний $T = 2\pi\sqrt{I_A/mgl}$, где I_A – момент инерции относительно оси A маятника; m – масса маятника; g – ускорение свободного падения; l – расстояние между осью A и центром тяжести S маятника. К достоинствам маятниковых колебательных систем следует отнести простоту конструкции; к недостаткам то, что она применима только для стационарных приборов.

Вращающаяся колебательная система, изображенная в табл.1, состоит из вибрирующего кольца 1, спиральной пружины 2, винта 3 для уравнивания, оси подшипника 4. Такая колебательная система, состоящая из спиральной пружины и элемента массы, имеет период колебаний $T = 2\pi\sqrt{I/c}$, где I – момент инерции массы; c – момент спиральной пружины (постоянная пружины). К достоинствам вращающейся колебательной системы следует отнести то, что ее работа не зависит от положения; к недостаткам – сложную конструкцию.

Камертонная колебательная система, изображенная в табл.1 состоит из яра 1, постоянного магнита 2, штифта для собачки храповика 3, камертона 4, крепления 5. Период колебания камертона зависит от плотности материала, модуля упругости и формы вилки камертона (длины и площади поперечного сечения зубцов). Такая колебательная система отличается высокой частотой колебания, но характеризуется сложностью приема колебаний.

Электрические колебательные системы схематически изображены в табл.2.

Таблица 2
Электрические меры времени с колебательной системой

Тип	Колебательный контур	Генератор релаксационных колебаний	Кварцевый осциллятор (генератор)
Схема			

Колебательный контур LC состоит из катушки и конденсатора, в которых возбуждаются электрические колебания. Энергия электрического поля конденсатора периодически преобразуется в энергию магнитного поля катушки и обратно. Период колебаний T определяется как $T = 2\pi / \sqrt{(1/LC) - (R/2L)^2}$, где L – индуктивность катушки, C – емкость конденсатора, R – омическое сопротивление катушки и проводов. Колебательный контур характеризуется широким диапазоном частот, но сильным затуханием. Электрические колебания могут поддерживаться путем внешнего подвода энергии через электронные схемы.

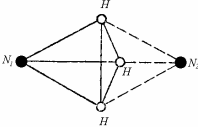
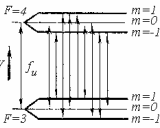
В *генераторе релаксационных колебаний* период колебаний T определяется контуром RC , характеристикой зажигания газоразрядной лампы и вычисляется следующим образом: $T = RC \ln[(U - U_L)/(U - U_Z)]$, где U_L – напряжение затухания газоразрядной лампы, U_Z – напряжение зажигания лампы, U – напряжение питания. Такие меры времени отличаются простотой конструкции. К недостаткам необходимо отнести то, что напряжение сети питания составляет 100 В.

Кварцевые генераторы принадлежат фактически к категории электромеханических генераторов, т.е генераторов, частота которых определяется собственной частотой колебаний механического элемента – пьезоэлектрического осциллятора (соответствующим образом вырезанного из кристалла кусочка кварца), играющего роль колебательного контура. Кроме стабилизирующего элемента (кварца) схема кварцевого генератора содержит элемент отрицательного сопротивления, в качестве которого служит генераторная схема с активными элементами, являющимися источниками мощности. Кварцевые генераторы на базе которых создаются часы отличаются зна-

чительным постоянством частоты (вариация суточного хода кварцевых часов в 100-1000 раз меньше, чем у лучших маятниковых), относительной свободой от посторонних влияний (возможность применения на транспорте, в авиации, подводных лодках, в зонах повышенной сейсмичности, на любой широте и любой высоте). Но это дорогостоящая система, отличающаяся сложностью конструкции.

Атомные колебательные системы схематически изображены в табл.3.

Таблица 3
Атомные меры времени с колебательной системой

Тип	Молекулярная колебательная система	Атомная колебательная система
Схема	 <p>Колебательная система на молекулах аммония: H – атом водорода; N_1 – 1-е положение атома азота; N_2 – 2-е положение атома азота</p>	 <p>Колебательная система для изотопа цезия-133: W – энергия; f_u – частота перехода из состояния $F=4, m=0$ в состояние $F=3, m=0$</p>

Молекулярная колебательная система содержит молекулы аммиака NH_3 , имеющие пирамидальную структуру (табл.3), в вершине которой находится атом азота, а плоскость основания проходит через три атома водорода, образующих равносторонний треугольник. Атом азота периодически колеблется вдоль оси, перпендикулярной к основанию пирамиды, между двумя состояниями равновесия (N_1 - N_2). Переход молекулы NH_3 от одной изомерной структуры (изображено сплошными линиями в табл.3) в другую (изображена пунктирными линиями) будет вызывать изменение ее энергетического состояния. При периодическом колебании атома азота между двумя состояниями равновесия в специальном молекулярном генераторе обеспечивается получение частоты 23870 МГц с высокой степенью стабильности.

В атомных колебательных системах излучение с характеристической частотой дают атомы при переходе от возбужденного состояния в исходное. Для изотопа цезия-133 эта частота при переходе из состояния $F=4, m=0$ в состояние $F=3, m=0$ равна 9 192 613 770 Гц.

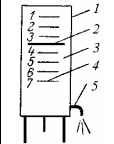


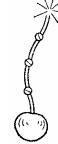
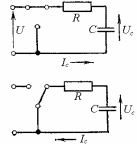
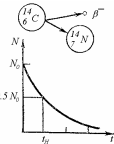
Частоты молекулярных и атомных генераторов слабо зависят от внешних возмущающих факторов, являются физичес-

кими константами. Эти частоты являются своеобразной реперной точкой для контроля частоты кварцевых генераторов. К молекулярным и атомным системам не предъявляется требование непрерывной длительной работы. Их назначение – излучение или поглощение высокочастотной мощности в течение времени, необходимого для измерения частоты непрерывно работающего высокостабильного кварцевого генератора. Такие системы по существу высокочастотные спектрометры.

Атомные меры времени являются дорогостоящими системами.

Рассмотрим меры времени без колебательной системы (табл.4).

Таблица 4
Меры времени без колебательной системы

Наименование	Механические меры времени		Тепловые меры времени		Электрические меры времени	Атомные меры времени
Тип	Водяные часы	Песочные часы	Свеча	Запальный шнур	Контур RC	Углерод C^{14}
Схема						

К механическим мерам времени без колебательной системы относят водяные или песочные часы. В них в качестве меры времени используется масса (объем) вытекающей (втекающей) воды или песка. Вытекающая масса зависит от диаметра входного отверстия и давления у выхода из отверстия. К достоинствам этих мер следует отнести простоту конструкции. Среди недостатков нужно отметить необходимость последующего наполнения водяных часов, быстрое разрушение песочных часов. Водяные часы в настоящее время представляют исторический интерес, песочные часы находят применение в медицине.

К тепловым мерам времени можно отнести свечу и запальный шнур. Они отличаются простотой конструкции, но применяются только однократно. Свечи представляют исторический интерес, а запальные шнуры применяются в строительстве и военной технике. В механотермических часах в качестве меры времени могут также использоваться процессы горения масляных ламп, фитилей. Длительность процесса горения зависит от химического состава сгораемого вещества, подвода кислорода и структуры горелки.

В качестве электрической меры времени можно рассматривать контур RC , служащий для измерения очень коротких про-

межутков времени. Здесь используется процесс заряда (разряда) конденсатора C через резистор R . Такой контур RC применим как механический задатчик времени и находит применение в научных исследованиях, технике, спорте.

В *атомных мерах* для определения длительных промежутков времени используются радиоактивные процессы распада. На основании закона радиоактивного распада вещества $N=N_0e^{-\lambda t}$, где N – число активных ядер, λ – постоянная распада, t – период полураспада. В органических веществах с помощью изотопа углерода C^{14} с периодом полураспада 5 760 лет можно определить «возраст» до 40 000 лет. Применяется в геологии, археологии. К недостаткам следует отнести необходимость сложной измерительной аппаратуры.

1.3. Приборы для измерения времени

С помощью приборов для измерения времени определяются текущее время или интервал времени. Все приборы для измерения времени соотносят измеряемое время с физическим процессом, зависящим от времени. Одна из возможных классификаций приборов для измерения времени по принципу действия приведена на рис.5.



Рис.5. Приборы для измерения времени

1.3.1. Механические приборы для измерения времени

Механические приборы для измерения времени (в дальнейшем рассматриваются механические часы) используются для измерения длительности механических процессов. В качестве собственной меры времени в механических часах используется

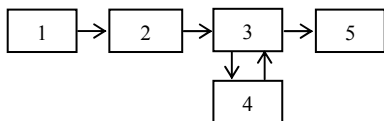


Рис.6

маятник или вращающаяся колебательная система. Соответственно различают маятниковые механические часы и часы с подзаводом.

Основными функциональными узлами механических часов (рис.6) являются механизм подзавода 1, привод 2, регулятор хода 3, ходовой механизм 4 и блок индикации 5.

Подзавод может осуществляться механически, электрически или вручную. Механический автоподзавод применяется, например, в наручных часах – при движении руки инерционная масса совершает маятниковые движения и возникающий при этом момент передается на привод.

Привод часов является источником и накопителем энергии. Прерывисто поступающая энергия при подзаводе накапливается приводом и непрерывно подается на спусковой механизм и регулятор хода. Механические приводы (системы завода) представляют собой гири или спиральные плоские пружины.

Привод с гирями (гиревый двигатель) применяется только для стационарных весов. Поднятая при подзаводе гиря накапливает потенциальную энергию. В дальнейшем при опускании груза цепью через зубчатое колесо или тросиком через барабан энергия передается на ведущее колесо и регулятор хода. Эта система привода характеризуется постоянством крутящего момента и простой конструкции.

Привод со спиральной пружиной (пружинный двигатель) работает независимо от положения часов. Крутящий момент создает спиральная пружина в напряженном состоянии.

Регулятор хода часов состоит из механического осциллятора, анкерного колеса и анкера качающейся вилки. Для поддержания постоянной частоты колебаний движение этого механизма попеременно тормозится анкером и снова освобождается. Время-задающим звеном является осциллятор – маятниковая колеба-

тельная система (колеблется с частотой от 2.5 до 5 Гц). При полном перемещении осциллятора анкерное колесо поворачивается на один зуб. Анкерное колесо жестко связано с приводом и механизмом хода и возмещает потерю энергии осциллятора от трения и регулирования механизма хода.

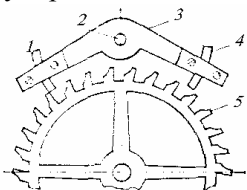


Рис.7. Маятниковый часовой спуск: 1 и 4 – вставные палеты; 2 – ось анкера 3; 5 – спусковое колесо

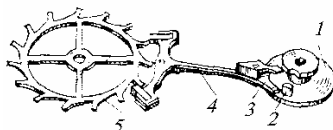


Рис.8. Балансный часовой спуск: 1 – ролик, надеваемый на ось баланса; 2 – эллипс; 3 – прорезь анкерной вилки 4; 5 – спусковое колесо

Механизм хода является связующим звеном между системой привода, регулятором хода и блоком индикации. Этот механизм состоит из нескольких зубчатых передач, передающих крутящий момент от привода и определенную регулятором хода частоту вращения в блок индикации, где эта частота преобразуется в перемещение отдельных указателей. Индикация времени в механических часах осуществляется с помощью указателей на неподвижном циферблате. Указание дат (числа и месяца) производится с помощью дисков. Механизм наручных часов и стрелочный механизм приведен на рис.9.

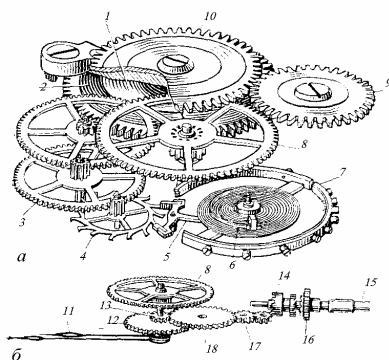


Рис.9. Механизм наручных часов (а) и стрелочный механизм (б): 1 – заводной барабан; 2 – пружина; 3 – секундное колесо; 4 – спусковое колесо; 5 – анкерная вилка; 6 – концевая кривая; 7 – баланс; 8 – центральное колесо; 9 – заводное колесо; 10 – барабанное колесо; 11 – часовая стрелка; 12 – часовое

колесо; 13 – минутник; 14 – кулачковая муфта; 15 – заводной ключ; 16 – заводной триб; 17 – переводные колеса; 18 – вексельное колесо

1.3.2. Электрические приборы для измерения времени

Электрические часы представляют собой приборы для измерения времени, в которых по крайней мере одна из функций – привод, регулирование хода, передача энергии к блоку индикации или же указание времени – реализуется с помощью электрических элементов и устройств.

Электрические часы с собственной механической мерой времени. В этих часах в качестве меры времени используется вращательная колебательная система или камертонная колебательная система. Основными функциональными узлами электрических часов с прямым заводом (рис.10) являются электромеханический задатчик времени 1, механическая система спуска 2, механическая система индикации 3, переключатель 4, блок питания 5.

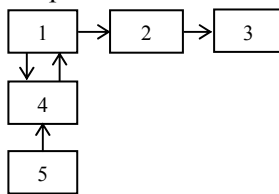
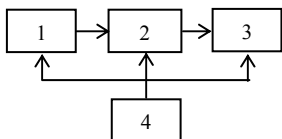


Рис.10

В электрических часах привод осуществляется с помощью электрических накопителей энергии (батарей, сети низкого напряжения питания). Это дает возможность делать их переносными, работа этих часов не зависит от положения. К недостаткам таких часов следует отнести то, что точность хода зависит от напряжения. Применяются как карманные часы, наручные часы, настольные часы, настенные часы.

Электрические часы с собственной электронной мерой времени. Электрические приборы для измерения времени, содержащие в качестве эталона электрический кварцевый резонатор (рис.11), называются кварцевыми часами. Здесь частота, получаемая с помощью генератора, стабилизируется с помощью кварцевого резонатора. В кварцевых часах имеются следующие основные части: задающий кварцевый генератор 1, делители частоты 2, индикаторы времени 3, источники питания 4.

После делителя частоты на выходе получают сигналы частотой 1 Гц (секундный импульс часов) и его долей. В зависи-



мости от типа индикатора времени эти сигналы осуществляют перемещение стрелки по циферблату или осуществляется их счет с помощью спе-

циальных счетчиков и индикация с применением индикаторов различного типа. Кварцевые часы характеризуются высокой точностью хода. В настоящее время создаются кварцевые часы в различных исполнениях и разной точности – от наручных часов до больших установок для централизованных служб времени. В последних для стабилизации резонансной частоты кварцевого генератора кварц устанавливается в термостат.

Электрические часы с собственной атомной мерой времени. Атомные часы основаны на использовании колебаний молекул NH_3 , частоты энергетических переходов атома цезия или принципа квантовых генераторов на водороде или таллии. Эта система измерения времени реализует (в качестве первичного эталона) единицу времени и используется в различных научно-исследовательских институтах.

Электрические часы с автономной электрической мерой времени. Эти часы работают с мерами времени, находящимися вне приборов.

Электрические системы измерения времени для специальных целей. Для измерения очень коротких интервалов времени, что необходимо в спорте, в военном деле, в научных исследованиях, находят применение специальные электрические часы с таймером (отметчиком времени). Процесс измерения времени ограничивается с помощью управляющего сигнала, например, прерывания светового потока фотоэлектрического устройства. Показывающие приборы имеют устройство нулевой установки.

Простейшая схема цифрового измерителя интервалов времени показана на рис.12. Ключ $Kл$ открывается триггером $Tг$ на время t_x , за которое цифровой счетчик $ЦС$ подсчитывает импульсы опорной частоты f_0 от кварцевого генератора импульсов $ГИ$.

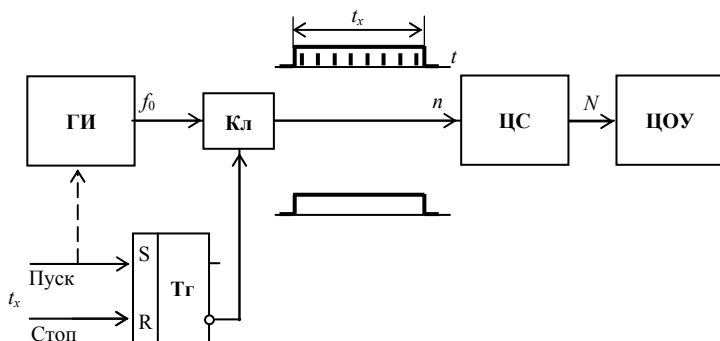


Рис.12

Число подсчитанных импульсов n пропорционально измеряемому интервалу времени t_x

$$N = t_x / T_0 = f_0 t_x.$$

Обычно для удобства отсчета выбирают $f_0 = 10^k$, тогда $n = 10^k t_x$.

1.2. Измерение частоты

Единица частоты герц (Гц) – не самостоятельно существующая единица измерения, она полностью определяется принятым размером единицы времени s . Частоту используют в качестве особого способа выражения времени между равномерно повторяющимися событиями, т.е. периода, и следовательно, при этом не создается новой величины. *Герц* – частота периодического процесса, при которой за время 1 с происходит один цикл периодического процесса.

1.2.1. Меры частоты

Если для мер времени первоочередное значение имеют метрологические характеристики выдаваемых интервалов и моментов времени, для мер частоты первоочередное значение имеют метрологические характеристики частоты генерируемых колебаний.

Метрологические характеристики меры частоты:

- номинальное значение частоты f_n (то значение частоты, которое должна воспроизводить мера частоты; оно записано в техническом выпускном паспорте);
- действительное значение частоты f_d (определяется сравнением данной меры с мерой более высокой точности);
- погрешность частоты – погрешность меры γ ;
- погрешность действительного значения частоты S'_f

$$S'_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2 / n(n-1)}$$

- (это средняя квадратическая погрешность результата);
- систематическое закономерное изменение частоты во времени ν (обнаруживается только за большие интервалы времени);
- вариация, случайные изменения частоты, a .

В настоящее время в качестве мер частоты высокой точности используются названные квантовыми стандартами частоты

цезиевый стандарт частоты, водородный стандарт частоты и рутидиевый стандарт частоты.

Схемы квантовых стандартов частоты строят по принципу стабилизации частоты колебаний кварцевого генератора по частоте электромагнитного излучения при переходе атома вещества из одного энергетического состояния в другое¹. Каждому атому присущ свой набор спектральных линий определенных частот различной естественной ширины и формы. Вершине спектральной линии соответствует некоторая резонансная частота, представляющая собой частотный репер. Измерение частоты вершины спектральной линии составляет основную задачу устройства, предназначенного для работы в качестве квантового стандарта частоты.

Цезиевый репер частоты

Источником пучка атомов цезия-133 в атомном стандарте (рис.13) является печь, нагреваемая до температуры порядка 200 °С.

Эмитированные атомы летят в направлении детектора 6. Вследствие наличия у атомов эффективного магнитного момента в неоднородном поле (более сильном у северного полюса и более слабом у южного), создаваемом постоянными магнитами 2 и 5, атомы будут отклоняться от первоначальной траектории. Если градиенты магнитного поля направлены одинаково и в резонаторах 3 не происходит энергетических переходов между уровнями сверхтонкой структуры, то атомы не фокусируются на детекторе, а проходят мимо него (пунктирная линия). Если же к резонаторам подведено электромагнитное поле высокой частоты (от кварцевого генератора с помощью синтезатора и умножителя частоты поступают колебания с частотой 9 192 631 770 Гц) в резонаторе под действием этого поля атомы цезия совершают энергетические переходы, происходит переориентация магнитного элемента атома, и атомы фокусируются на детектор пучка.

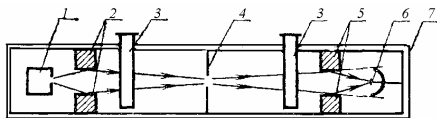


Рис.13

Установленный на оси атомно-лучевой трубки приемник-детектор 6 регистрирует ток, пропор-

¹ Связь между частотой излучения или поглощения ν_{nk} и изменением внутренней энергии в результате перехода микросистемы из одного энергетического состояния (энергетический уровень E_n) в другое (энергетический уровень E_k) устанавливается формулой $h\nu_{nk} = E_n - E_k$, где h – постоянная Планка.

циональный числу атомов, совершивших в объемном резонаторе квантовый переход. Следствием является излучение, резонансная частота которого является физической константой и слабо зависит от внешних возмущающих факторов. Она может являться своеобразной реперной точкой для контроля частоты кварцевых генераторов. В корпусе 7 создается вакуум порядка $(1-3)10^{-7}$ мм рт. ст.

Вариантом цезиевого стандарта частоты является атомикрон – прибор с автоматической фазовой подстройкой частоты исходного кварцевого генератора по частоте спектральной линии цезия, соответствующей переходу $F=4, m=0 \leftrightarrow F=3, m=0$. Атомикрон может быть использован не только как репер частоты, но и как постоянно работающие часы.

Водородный стандарт частоты

Этот активный квантовый стандарт частоты содержит водородный квантовый генератор, систему фазовой автоподстройки частоты и подстраиваемый кварцевый генератор. Устройство водородного генератора показано на рис.14.

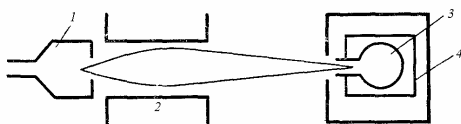


Рис.14

Как и в атомно-лучевых трубках на атомах цезия-133, в водородном генераторе используются энергетические

переходы между уровнями сверхтонкой структуры но не атомов цезия, а атома водорода. Переход между этими уровнями $F=0, m=0 \leftrightarrow F=1, m=0$ соответствует частоте 1420405751.6 Гц.

Водород в природе существует в виде молекул, поэтому в источнике атомного пучка 1 молекулы водорода подвергаясь действию высокочастотного электрического разряда, диссоциируют и вылетающие направленным пучком атомы водорода попадают в неоднородное поле магнитов 2. В связи с наличием магнитного момента атомы водорода, находящиеся на верхнем энергетическом уровне ($F=1, m=0$), попадая в такое магнитное поле, приближаются к оси, а находящиеся на нижнем энергетическом уровне ($F=0, m=0$) – отклоняются от нее. Возбужденные атомы фокусируются на вход в объемный резонатор 4, настроенный на частоту примерно 1420.405 МГц. В резонаторе возбужденные атомы совершают вынужденный переход на нижний энергетический уровень, вследствие чего электромагнитное поле в резонаторе усиливается, вновь поступающие в него атомы взаимодействуют с уси-

ленным полем, что может привести к генерации электромагнитных колебаний в резонаторе. Но энергия, излучаемая даже самым интенсивным пучком атомов водорода, очень мала. Поэтому для увеличения числа излучательных переходов в резонатор помещают накопительную кварцевую колбу Z с очень малым входным отверстием. Атом водорода, попав в колбу, может совершать несколько десятков тысяч столкновений со стенками колбы, прежде чем происходит квантовый переход, т.е. атом может взаимодействовать с полем резонатора в течение нескольких секунд. Вероятность вынужденного перехода при этом значительно возрастает.

Подстройка частоты кварцевого генератора осуществляется системой фазовой автоподстройки частоты, которая обеспечивает подстройку частоты кварцевого генератора к частоте водородного генератора.

Средняя квадратическая часовая и суточная вариация частоты составляет $(2-5)10^{-13}$.

Рубидиевый стандарт частоты

В атомах щелочного металла рубидия используются три уровня энергии и два перехода, частота одного из них f_{23} лежит в оптическом диапазоне, частота другого f_{12} – в радиодиапазоне.

На пары рубидия, заполняющие стеклянную колбу поглощающей ячейки, воздействует интенсивный пучок резонансного света, частота которого f_{23} соответствует энергетическому переходу $E_2 \rightarrow E_3$ (в качестве резонансной лампы используется спектральная лампа, наполненная парами ^{87}Rb , в которой с помощью генератора высокой частоты создается разряд и излучаемый лампой спектр содержит и частоту, равную частоте перехода). При этом населенность уровня E_3 возрастает, и система доводится до выравнивания населенностей на уровнях E_2 и E_3 (при этом пары рубидия становятся прозрачными). Для пропускания света накачки поглощающая ячейка помещена в цилиндрический резонатор с решетчатыми торцами. Этот резонатор настроен на частоту СВЧ-диапазона, равного частоте перехода $E_1 \rightarrow E_2$ (атомный переход $F=2, m=0 \leftrightarrow F=1, m=0$ в сверхтонкой структуре основного состояния атома рубидия-87 осуществляется на частоте 6884.682614 МГц). При воздействии на пары рубидия электромагнитного поля СВЧ-диапазона указанной частоты атомы рубидия поглощая энергию поля переходят с уровня E_1 на E_2 , увеличивая населенность E_2 за счет E_1 . Изменение энергетического состояния атомов сопровож-

дается высокочастотным излучением указанной выше частоты. Вновь возникает разность населенности уровней E_2 и E_3 , прозрачность вещества уменьшается пропорционально числу атомов, совершивших переход с уровня E_1 на E_2 (уменьшение прозрачности контролируется фотодиодом, на который попадает луч резонансного света, прошедший через поглощающую ячейку). Это число максимально при совпадении частоты СВЧ-поля с частотой перехода f_{12} . При рассогласовании частоты СВЧ-поля и квантового перехода возникает пропорциональное разности частот напряжение, которое и регулирует частоту кварцевого генератора по частоте квантового перехода.

Кривая, отражающая зависимость оптической прозрачности от частоты СВЧ-поля, имеет вид спектральной линии атомов рубидия с вершиной при частоте f_{12} .

В результате хаотического движения атомов рубидия в поглощающей ячейке, как и в накопительной колбе водородного генератора, происходит значительное уширение спектральной линии вследствие эффекта Доплера. Но так как электронная оболочка атома рубидия намного сложнее, чем у водорода, то одним выбором размеров колбы не удастся подавить эффект Доплера. Поэтому наряду с атомами рубидия в ячейку помещают небольшое количество инертных газов, к столкновениям с которыми атомы рубидия менее чувствительны, чем к столкновениям со стенками колбы. Однако легкие немагнитные буферные газы изменяют частоту в сторону возрастания, более тяжелые – в сторону низких частот (минимальное смещение получают при буферной смеси из 25%Ne и 75%Ar).

Зависимость генерируемой частоты от характера буферной смеси не позволяет использовать рубидиевые стандарты в качестве первичного эталона частоты. Однако вследствие хорошей воспроизводимости и малого систематического ухода частоты (порядка $1 \cdot 10^{-11}$ за месяц) систему с оптической накачкой можно использовать в качестве весьма стабильного и надежного рабочего прибора.

1.2.2. Приборы и методы, применяемые при измерении частоты

Измерение частоты в электро- и радиотехнике производится в диапазоне от 0 до 10^{14} Гц. На низких частотах (от 10 до 2500 Гц, но особенно в окрестности 50 и 400 Гц) используются

электромеханические приборы: резонансные электромагнитные частотомеры и частотомеры на основе электромагнитных и электродинамических (ферродинамических) логометров.

Резонансные (вибрационные) частотомеры (рис.15,*а*) состоят из электромагнита *1* с сердечником *2*, на обмотку которого подается напряжение с измеряемой частотой. В поле электромагнита находится металлический якорь *3* из магнитомягкого материала, укрепленный на общем основании *4* с гребенкой из стальных пластинок-язычков *6*. Один конец этих пластинок закреплен неподвижно, а второй может перемещаться. Этот конец обычно загнут и окрашен светлой краской для наблюдения за его колебаниями со стороны шкалы *7*. Пластинки подобраны так, что каждая из них обладает резонансной частотой собственных колебаний.

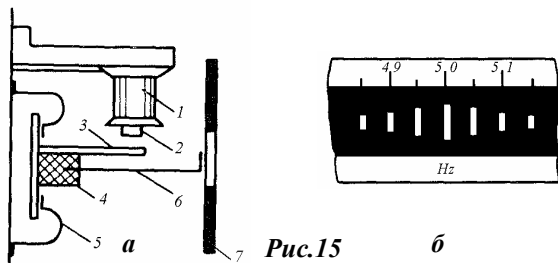


Рис.15 **б**

Пружинные опоры *5* позволяют якорю и пластинкам *6* совершать вынужденные колебания с удвоенной частотой напряжения (за каждый период измеряемого напряжения сердечник притягивается дважды). Наибольшую амплитуду колебания будет иметь та пластинка, у которой частота собственных колебаний совпадает с частотой второй гармоники вынужденных колебаний. На рис.16,*б* язычок, соответствующий показанию 50 Гц, совершает 100 колебаний в секунду. Рассматриваемая конструкция частотомера резонансного по Фраму вследствие большой колебательной массы имеет малый диапазон измерения (порядка 10-500 Гц). У выпускаемых промышленностью таких частотомеров узкие пределы измерения (например, 45-55 Гц, 450-550 Гц).

По сравнению с частотомером резонансным по Фраму конструкция частотомера резонансного по Хартману-Кемпфу имеет большой диапазон измерения (порядка от 10 Гц до 2 кГц). Конструкция

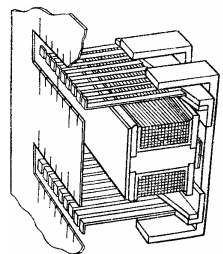


Рис.16

(рис.16) образована одним или двумя рядами стальных язычков и расположенным вдоль них электромагнитом, вызывающим колебания язычков.

Погрешность измерений резонансными частотомерами в большинстве случаев составляет $\pm(1.5-2.5 \%)$. Недостаток приборов такого типа заключается в том, что они неприменимы на подвижных установках в связи с возможностью возникновения механического резонанса пластинок с внешними вибрациями.

Измерение частоты переменного тока можно производить и при помощи электромагнитных и электродинамических логометров. Принцип работы логометрических частотомеров основан на зависимости разности вращающих моментов, действующих на скрепленные между собой подвижные катушки 1 и 2 с токами I_1 и I_2 , как от частоты, так и от положения катушек.

В изображенной на рис.17,а схеме электромагнитного логометрического частотомера при изменении частоты тока I_1 и I_2 будут изменяться неодинаково, так как характер сопротивлений цепей этих токов различен. Так например, с увеличением частоты ток I_1 будет уменьшаться, а ток I_2 увеличиваться. Таким образом, отношение этих токов, а следовательно, и показания прибора будут зависеть от частоты.

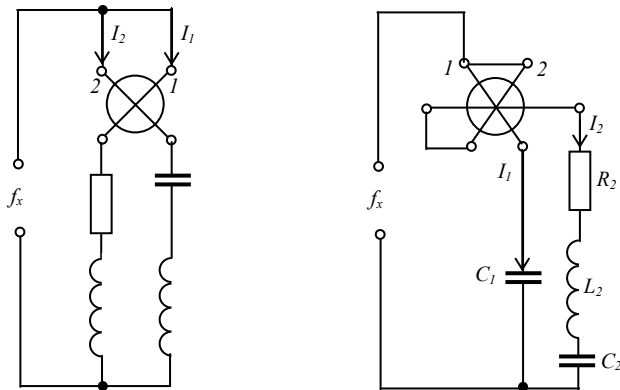


Рис.17

В случае изображенной на рис.17, б схемы электродинамического логометрического частотомера отклонение стрелки логометра

$$\alpha = F(X_1/X_2) = F\{[1/(\omega_x C_1)]/[\omega_x L_2 - 1/(\omega_x C_2)]\},$$

где $\omega_x = 2\pi f_x$. Следовательно, $\alpha = \Phi(f_x)$ и шкала может быть отградуирована в единицах частоты.

Основная погрешность логометрических частотомеров составляет 1-2.5%. Они имеют узкие диапазоны измерения (45-55; 180-200; 450-550 Гц) и используются в качестве щитовых приборов.

Электронные частотомеры представляют собой сочетание магнито-электрического измерительного механизма с преобразователями, осуществляющими преобразование частоты в постоянный ток. В качестве преобразователей широко используются управляемые электронные ключи.

На изображенной на рис.18 схеме, поясняющей принцип работы электронного конденсаторного частотомера, конденсатор C при помощи электронного ключа S переключается то на заряд от батареи GB , то на заряд через магнитоэлектрический измерительный механизм PA .

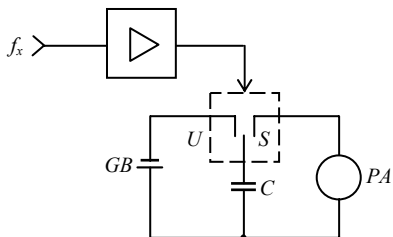


Рис.18

За время одного такого цикла через индикатор PA будет протекать заряд $Q=CU$. Если частота переключений равна измеряемой частоте f_x , то средний ток, протекающий через индикатор, равен $I_{cp} = Qf_x = Cuf_x$, т.е. показание индикатора пропорционально частоте.

Очевидно, что градуировка частотомера может быть произведена только при условии постоянства U и C . Постоянная времени цепей заряда и разряда конденсатора должна быть подобрана так, чтобы при самой высокой из измеряемых частот конденсатор успевал бы практически полностью зарядиться и разрядиться.

Управление электронным ключом осуществляется напряжением измеряемой частоты, которое для нормальной работы схемы предварительно усиливается и приобретает форму, близкую к прямоугольной.

Электронные конденсаторные частотомеры применяются для измерения частот от 10 до 1 МГц. Основная приведенная погрешность таких частотомеров лежит в пределах 2-3 %.

Семейство перечисленных аналоговых частотомеров дополняют гетеродинные частотомеры, принцип действия которых основан на сравнении измеряемой частоты с частотой перестраиваемого стабильного генератора. Сравнение осуществляется посредством гетеродинирования напряжений сравниваемых частот, в результате которого в окрестности равенства частот (измеряемой

частоты и частоты перестраиваемого генератора) появляются низкочастотные (нулевые) биения, которые удобно наблюдать на осциллографическом индикаторе. Достоинством гетеродинных частотомеров является возможность измерения очень высоких частот – до 100 ГГц с погрешностью не хуже $10^{-2} - 10^{-3} \%$.

Электронно-счетные частотомеры являются цифровыми приборами. Принцип их действия основан на счете числа периодов измеряемой частоты за некоторый, строго определенный интервал времени t_u . За это время импульсы частотой f_x , сформированные усилителем-формирователем $УФ$ (рис.19) из поданного на вход прибора синусоидального сигнала, пройдут через ключ $Кл$ на вход цифрового счетчика $ЦС$ в количестве

$$n = t_u / T_x = t_u \cdot f_x.$$

Следовательно, показания прибора пропорциональны f_x . Формирование требуемого интервала времени t_u осуществляется с помощью генератора импульсов $ГИ$ опорной частоты f_0 , делителя частоты $ДЧ$ и триггера $Тг$.

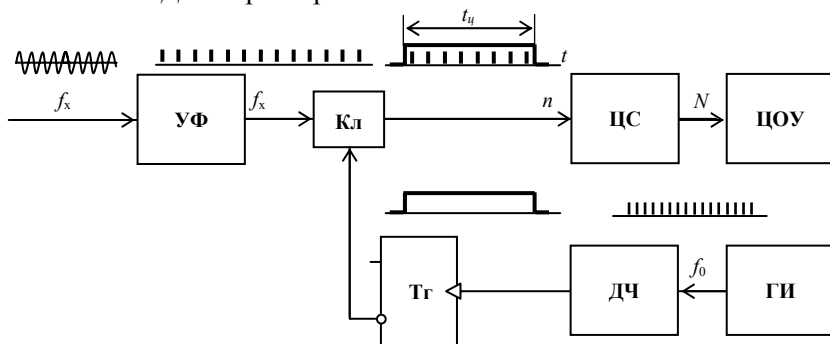


Рис.19

Погрешность этих частотомеров в основном определяется нестабильностью формирования калиброванного интервала времени и погрешностью квантования, зависящей от T_x/t_u . Последняя уменьшается с увеличением измеряемой частоты.

Электронно-счетные частотомеры являются наиболее точными (относительная погрешность может не превышать $10^{-7} \%$) и обладают всеми преимуществами цифровых приборов. Диапазон измеряемых частот от 0.1 Гц до сотен мегагерц. Эти приборы нашли широкое применение на практике для измерения частоты.

1.3. Метрологическое обеспечение измерений времени и частоты

Проблема обеспечения единства измерений времени и частоты является одной из актуальных в метрологии и стандартизации. Сложность ее комплексного решения обусловлена чрезвычайной распространенностью, широким диапазоном точностей и разнообразием областей применения средств измерений времени. Например, точность эталона времени и частоты отличается от точности хода бытовых часов в миллиарды раз. Погрешность, с которой осуществляется привязка местных шкал времени к шкале государственного эталона, в зависимости от областей применения средств измерения времени колеблется от долей секунды до долей микросекунды. Относительная погрешность измерения времени примерно в десять тысяч раз меньше погрешности измерений других физических величин.

Принципиальной особенностью измерения времени, накладывающей отпечаток на всю структуру метрологического обеспечения средств его измерения, является накопление погрешностей с течением времени. Любые часы объективно не могут служить измерительным средством вне системы метрологического обеспечения. О точности измерения времени можно говорить только применительно к единой шкале времени страны, а в ряде случаев – и мира. Эта особенность, главным образом, и определила создание и деятельность Государственной службы времени и частоты (ГСВЧ) на территории стран СНГ, центр которой находится в НИИ физико-технических и радиотехнических измерений г. Москвы. Эта служба представляет собой систему организаций, объединенных общей деятельностью по обеспечению единства измерений времени и частоты. Специальный орган службы времени и частоты – Главный метрологический центр Государственной службы времени и частоты:

- хранит государственный первичный эталон времени и частоты и воспроизводит размер секунды в соответствии с принятым определением;
- формирует и хранит национальные шкалы атомного и всемирного времени;
- исчисляет и выдает поправки для вторичных эталонов по отношению к первичному;
- проводит сбор и обработку информации о работе средств передачи на основе данных метрологического контроля;

- осуществляет методическое руководство системой метрологического контроля передач сигналов времени и частоты;
- оперативно воздействует с ведомственными подразделениями службы времени, а также с потребителями сигналов времени;
- координирует международную деятельность ГСВЧ.

В Главном метрологическом центре НИИ физико-технических и радиотехнических измерений создан и хранится государственный эталон времени и частоты, который наряду со вторичными эталонами Госстандарта и рядом ведомственных вторичных эталонов составляет эталонную базу ГСВЧ.

1.3.1. Эталонная база ГСВЧ

Государственный первичный эталон для средств измерений времени и частоты предназначен для воспроизведения и хранения единиц времени и частоты и шкалы времени и передачи размеров единиц времени и частоты и шкалы времени при помощи вторичных эталонов и образцовых средств измерений рабочим средствам измерения.

Государственный *первичный эталон* времени и частоты представляет собой сложный аппаратный комплекс, состоящий из следующих средств измерений:

- метрологические цезиевые реперы частоты, предназначенные для воспроизведения размеров единиц времени и частоты;
- водородные реперы частоты, предназначенные для хранения размеров единиц времени и частоты и одновременно выполняющие функцию хранителей шкал времени;
- группа квантовых часов, предназначенных для хранения шкал времени;
- аппаратура для передачи размера единицы частоты в оптический диапазон, состоящая из группы синхронизированных лазеров и СВЧ генераторов;
- аппаратура внутренних и внешних сличений, включающая перевозимые квантовые часы, перевозимые лазеры; а также аппаратура средств обеспечения (системы автоматики, контроля параметров среды, электропитания и т.д.).

Диапазон значений интервалов времени, воспроизводимых эталоном, составляет $1 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^8$ с, диапазон значений частоты 1 – $1 \cdot 10^{14}$ Гц. Воспроизведение единиц осуществляется со сред-

ним квадратическим отклонением результата измерений S_0 , не превышающим $5 \cdot 10^{-14}$, а неисключенная погрешность Q_0 не превышает $2 \cdot 10^{-13}$. За интервалы времени измерений от 1000 с до 1 сут нестабильность частоты эталона не должна превышать $2 \cdot 10^{-14}$.

Государственный первичный эталон применяют для передачи размеров единиц времени и частоты и шкалы времени вторичным эталонам, образцовым и рабочим средствам измерений повышенной точности сличением при помощи компараторов (перевозимых квантовых часов), а также сличением при помощи использования эталонных сигналов времени и частоты, передаваемых по телевидению, радио и другим каналам связи.

К *вторичным эталонам* относятся эталоны-копии и рабочие эталоны.

Эталон-копию применяют для передачи размеров единиц времени и частоты и шкалы времени рабочим эталонам, образцовым и рабочим средствам измерений непосредственным сличением, сличением при помощи телевидения, радио и других каналов связи. В качестве эталона-копии применяют комплекс средств измерений, состоящий из водородных реперов частоты, квантовых часов, аппаратуры внутренних и внешних сличений, включающей перевозимые квантовые часы, аппаратуры обеспечения. Эталон-копия должен обеспечивать средние квадратические отклонения результатов сличения $S_{\Sigma 0}$ с государственным не превышающие $1 \cdot 10^{-13}$. Нестабильность частоты эталона-копии за интервалы измерений от 1000 с до 1 сут не должна превышать $3 \cdot 10^{-14}$.

Рабочие эталоны применяют для передачи размеров единиц времени и (или) частоты и шкалы времени образцовым и рабочим средствам измерений непосредственным сличением, сличением при помощи компаратора, а также сличением при помощи телевидения, радио и других каналов связи.

Образцовые средства измерений времени и (или) частоты применяют для проверки и градуировки подчиненных образцовых и рабочих средств измерений непосредственным сличением, сличением при помощи частотного компаратора, а также сличением при помощи телевидения, радио и других каналов связи.

В качестве образцовых средств измерений частоты применяют квантовые и кварцевые меры частоты и средства измерений на их основе (электронно-счетные частотомеры, синтезаторы, кварцевые синхронметры и др.), генераторы электромаг-

нитных колебаний, синхронизированные по квантовым или кварцевым мерам в диапазоне $1-1 \cdot 10^{14}$ Гц. Пределы допускаемых относительных погрешностей Δ_0 образцовых средств измерений частоты составляет от $1 \cdot 10^{-12}$ до $1 \cdot 10^{-6}$.

В качестве рабочих средств измерений времени и частоты применяют приборы технического или специализированного назначения, основанные на использовании различных периодических процессов. Допускаемые относительные погрешности Δ_0 рабочих средств измерений частоты составляет от $1 \cdot 10^{-12}$ до $1 \cdot 10^{-3}$. Допускаемые суточные значения ходов у рабочих средств измерений времени составляют от $1 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10$ с/сут.

Достигнутая точность Государственного первичного эталона времени и частоты имеет смысл только тогда, когда она может быть передана без существенных потерь широкому кругу потребителей. В целях достижения наивысшей точности измерений метрологические организации устанавливают для каждой единицы измерения схему перехода от первичного эталона к образцовым мерам, регламентируют способ сравнения первичного эталона с рабочими эталонами и последних с образцовыми мерами. Порядок передачи устанавливается поверочной схемой для средств измерений времени и частоты (рис.20).

В ряде случаев регламентируют также эталонный метод воспроизведения единицы измерения, если последняя не может быть непосредственно представлена вещественной мерой с необходимой точностью. Важной особенностью осуществления эталона единицы измерения времени является необходимость воспроизведения помимо этой единицы непрерывных шкал времени: атомного и универсального.

1.3.2. Воспроизведение системы измерения времени

Под воспроизведением системы измерения времени понимается процесс, который складывается из трех основных операций: собственно определения времени относительно естественных эталонов, хранения времени и передачи сигналов времени по радио.

В общих чертах метрологическая схема воспроизведения единиц и шкал времени и частоты показана на рис.21.

Процесс хранения времени заключается в технической эксплуатации часов – хранителей времени и в совместной обработке результатов сравнений их между собой и поправок этих часов относительно естественных эталонов. Создаваемые системы

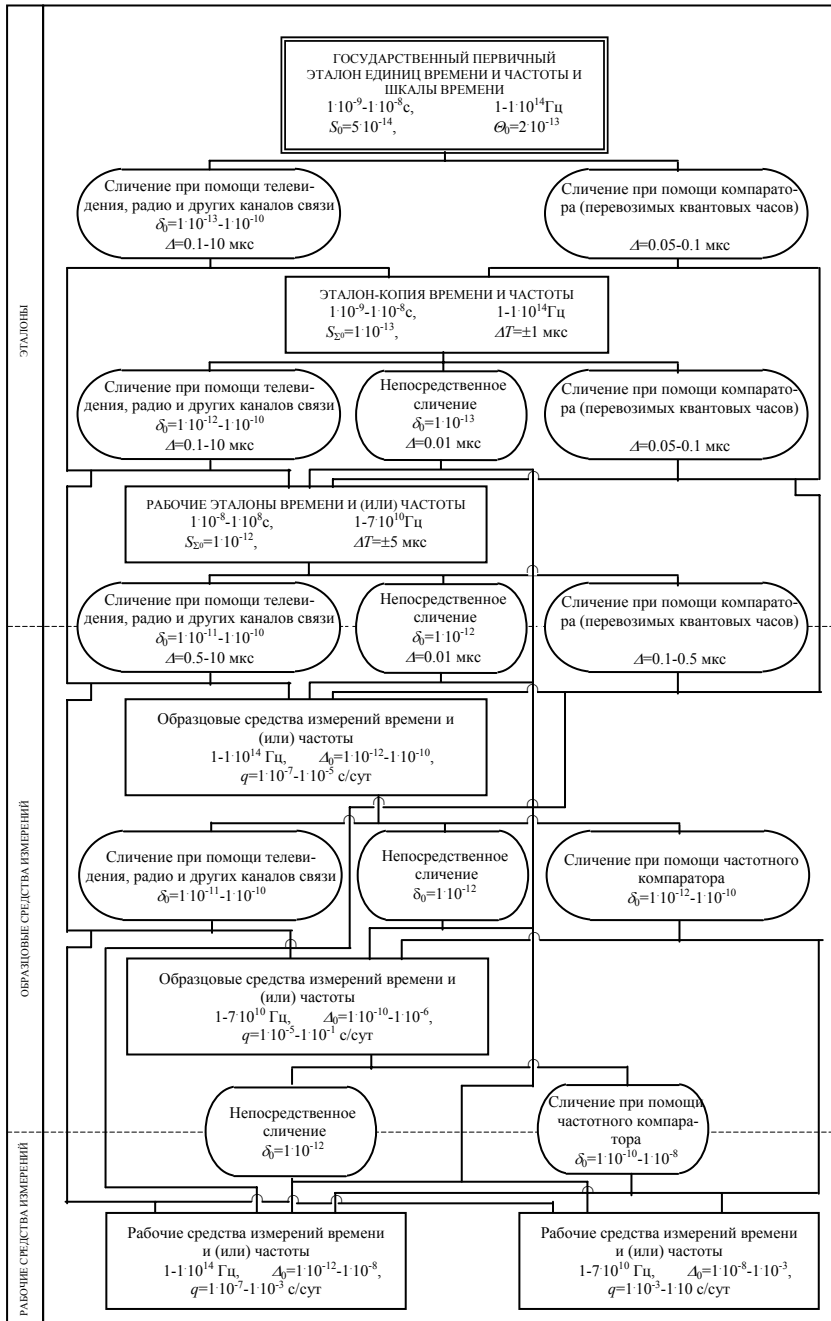


Рис.20

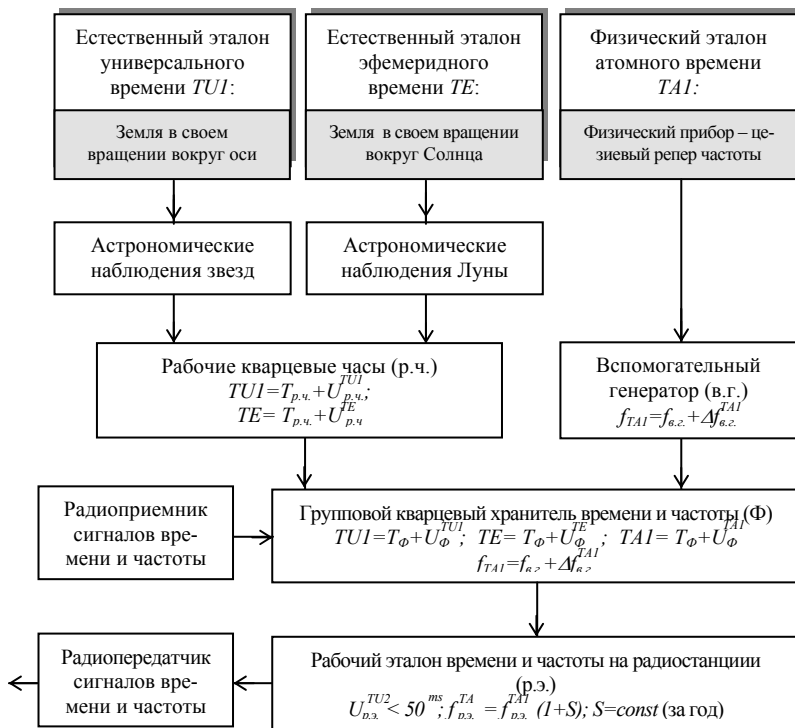


Рис.21

универсального и атомного времени выражаются в виде показаний часов и поправок к ним на эти системы для любой текущей даты.

В групповом хранителе времени и частоты кварцевые часы и кварцевые генераторы связаны в одну общую систему посредством взаимного сравнения по времени и частоте. В групповой хранитель входит не менее трех кварцевых часов с примерно равными параметрами точности, чтобы выход из строя одних кварцевых часов не исключал возможности внутреннего контроля показаний часов. Сравнения кварцевых часов, образующих групповой хранитель, выполняют тремя способами: измерением интервалов между секундными сигналами, непрерывным счетом биений частот и периодическими сличениями частот генераторов кварцевых часов. Математической обработкой результатов сравнения получают так называемые фиктивные или средние часы, чем достигается ряд преимуществ: уменьшается вариация хода

часов (нестабильность частоты); круговые сравнения обеспечивают надежный контроль за поведением каждых часов (генераторов).

Под показаниями фиктивных часов T_i^Φ в момент t понимается среднее из показаний T_i всех n кварцевых часов, входящих в групповой хранитель времени, в тот же момент t :

$$T_i^\Phi = (1/n)(T_i^1 + T_i^2 + T_i^3 + \dots + T_i^n).$$

Если в качестве ведущих часов выбирают первые часы и известны разности показаний ΔT этих часов со всеми остальными для одного и того же физического момента t (т.е. выполнены сравнения часов), то показания фиктивных часов для этого момента

$$T_i^\Phi = T_i^1 + (1/n)(\Delta T_i^{2,1} + \Delta T_i^{3,1} + \dots + \Delta T_i^{n,1}), \quad (1)$$

где

$$\Delta T_i^{2,1} = T_i^2 - T_i^1; \Delta T_i^{3,1} = T_i^3 - T_i^1; \dots; \Delta T_i^{n,1} = T_i^n - T_i^1.$$

В формуле (1) показания часов могут быть заменены поправками часов

$$U_i^\Phi = U_i^1 + (1/n)(\Delta U_i^{2,1} + \Delta U_i^{3,1} + \dots + \Delta U_i^{n,1}), \quad (2)$$

где

$$\Delta U_i^{2,1} = U_i^2 - U_i^1; \Delta U_i^{3,1} = U_i^3 - U_i^1; \dots; \Delta U_i^{n,1} = U_i^n - U_i^1.$$

Фиктивные часы выступают в виде реальных – ведущих часов группового хранителя и редуций, выравнивающих ход этих часов. В практике службы времени фиктивные часы позволяют с высокой степенью точности интерполировать и экстраполировать значение поправок реальных часов, т.е. позволяют знать время в интервалах между его определениями относительно естественных эталонов и вне пределов этих определений.

Доведение эталонного времени и частоты до потребителя осуществляется посредством передачи сигналов времени и частоты по радиоканалам. Радиосигналы времени и частоты передаются в диапазоне коротких волн – от 2.5 до 25 МГц (рекомендованы частоты 2.5; 5; 10; 15 и 25 МГц) и в диапазоне длинных волн – от 10 до 100 кГц. Для исключения взаимных помех при приеме радиостанции иногда сдвигают несущие частоты на $1000n$ Гц, где n – целое число (обычно 4).

Сигналы времени формируются посредством манипуляций и реже модуляции несущей частоты. Время подачи, длительность и периодичность сигналов времени и частоты определяют общим термином – программа передачи радиосигналов времени и частоты. Программа может включать следующие основные виды радиосигналов:

позывные радиостанции;
несущую частоту;
сигналы с периодом 1 с – секундные сигналы;
сигналы с периодом $60/61 \text{ с} = 0.9836 \text{ с}$ – ритмические сигналы;
сигналы с периодом 0.1 с.

Сигналы, приходящиеся на начало минуты, маркируют удлинением сигнала.

Одну из программ передачи сигналов представляют сигналы проверки времени или шесть точек (шестая соответствует началу часа).

Обеспечение приема этих сигналов в любое время и в любой точке заданного района является одной из основных задач службы времени. Решение этой задачи включает создание необходимого количества передающих сигналы времени и частоты радиостанций и их оптимальное размещение на территории страны, установление требуемой мощности в антеннах передатчика и выбор направлений максимумов излучения, составление программы и волнового расписания передач сигналов и т.п. Частоты радиостанций служб времени и программа передач радиосигналов времени и частоты публикуются в специальных изданиях.

Сигналы времени и частоты радиостанций, участвующих в международной координации должны согласовываться по несущей частоте в пределах $1 \cdot 10^{-10}$ и по моментам выхода радиосигналов времени с антенн передатчиков – в пределах 1 мс. Практически вследствие погрешностей цезиевых эталонов, несовершенства средств сличения и ряда других обстоятельств излучение несущей эталонной частоты с ошибкой менее $1 \cdot 10^{-10}$ выполняется не всеми радиостанциями, участвующими в международной координации. Но даже и в случае выполнения данного условия уже через 100 суток рассогласование моментов передач радиосигналов времени двух радиостанций может достигнуть 2 мс, что составляет от случая к случаю изменять эпоху сигналов времени отдельных радиостанций на единицы миллисекунд. Практически это сводится к подстройке передач передающих радиостанций к сигналам одной радиостанции, контролируемой Национальным бюро эталонов США.

Согласование сигналов времени и частоты, передаваемых радиостанциями Службы времени стран СНГ в диапазоне коротких волн, гарантируется по сигналам частоты в пределах $1 \cdot 10^{-10}$ и

по сигналам времени в пределах 100 мкс. Относительная погрешность излучаемых эталонных частот $\pm 1 \cdot 10^{-10}$.

Сигналы поверки времени в общем случае воспроизводятся радиовещательными станциями посредством ретрансляции, поэтому задержка может достигать десятков миллисекунд.

Показание местных часов в момент выхода сигнала времени с антенны передающей радиостанции

$$T_{np} = T_p - \tau - t_3, \quad (3)$$

где T_p – показание местных часов в момент поступления сигнала времени на индикатор регистрирующей аппаратуры; τ – длительность прохождения (распространения) сигнала времени от антенны передающей радиостанции до входа радиоприемника; t_3 – время задержки сигнала в радиоприемном тракте. Погрешность приема радиосигналов складывается из погрешности регистрации и погрешностей, с которыми известны τ и t_3 .

Основными метрологическими задачами прецизионной хронометрии являются измерение некоторого интервала времени или определение показаний часов в момент какого-либо события. Эти задачи решаются с помощью местных хранителей времени, согласованных с эталонными часами. Процесс согласования состоит из выравнивания временных интервалов рабочей меры, согласования их с интервалами эталонной шкалы и последующего совмещения реперных точек временной шкалы местных часов и шкалы эталонных часов. Совокупность данных операций называется синхронизацией шкал времени.

Местные хранители времени и эталонной частоты находятся в разных пунктах, разделенных порою тысячами километров, поэтому для синхронизации приходится либо пользоваться радиосредствами, либо транспортировать вспомогательные часы.

Измерение угловой и линейной скорости и ускорения

Скорость и ускорение являются важнейшими характеристиками движения, подлежащими измерению.

2.1. Измерение угловой скорости

Под угловой скоростью ω равномерно вращающегося тела понимается отношение угла φ , описанного при вращении (в радианах) ко времени t (в секундах): $\omega = \varphi/t$. Производной единицей угловой скорости согласно Международной системе единиц (СИ) является радиан в секунду (рад/с). Радиан в секунду – угловая скорость равномерно вращающегося тела, при которой за время 1 с совершается поворот тела относительно оси на угол 1 рад. Диапазон измеряемых угловых скоростей чрезвычайно высок. Поэтому в целях удобства можно условно разбить его на поддиапазоны: весьма большие – до 10^2 рад/с; малые технические – до 1 рад/с; весьма малые – до 10^{-5} рад/с.

Для угловой скорости распространено также применение внесистемной единицы – оборот в минуту (об/мин). Число оборотов в минуту n , определяющее скорость вращения частей машин, устройств и агрегатов, однозначно связано с частотой вращения f : $f = n/60$; $n = 60f$. Применяется также единица оборот в секунду (об/с).

Соотношение между единицами угловой скорости приведено в табл.5.

Таблица 5

Единица	рад/с	об/мин	об/с
радиан в секунду	1	9.55	0.159
оборот в минуту	0.105	1	$1.677 \cdot 10^{-2}$
оборот в секунду	6.28	60	1

Приборы, предназначенные для измерения угловых скоростей (частоты вращения) называются *тахометрами*.

Рассмотрим наиболее распространенные методы измерения частоты вращения: центробежные, магнитоиндукционные, электрические, стробоскопические и др.

Центробежный метод основан на реагировании чувствительного элемента на центробежную силу, развиваемую неуравновешенными массами вращающегося вала. Центробежный метод реализуется в коническом (рис.22,а) и кольцевом (рис.22,б) тахометрах.

В коническом тахометре на шарнирах, вращающихся вместе с осью, установлены грузы m , которые под действием центробежных сил расходятся, перемещая вдоль оси муфту 1 и сжимающая пружину 2. Если обозначить y – перемещение муфты и y_0 – начальную длину пружины (при $\omega=0$), то зависимость между угловой скоростью ω и перемещением y будет иметь вид

$$\omega = \sqrt{y/S}, \quad (4)$$

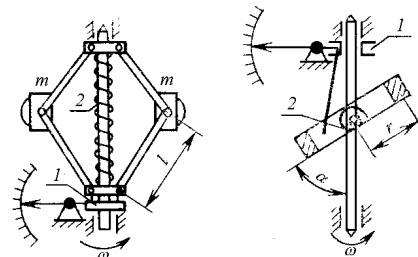


Рис.22

где $S = nmy_0(1 + 2r_0/\sqrt{4l^2 - y_0^2})/4c_1$ – чувствительность прибора; n , m , r_0 , c_1 – соответственно число грузов, масса грузов, радиус муфты и коэффициент упругости пружины. Перемещение муфты y преобразуется в показание прибора, а так как $y=S\omega^2$, центробежный конический тахометр имеет квадратичную характеристику.

Если в начальном положении грузов угол между осью вала и кулачком прямой и по мере отклонения грузов он растет, то шкала имеет в начале широкие деления, а к концу узкие. Если в начале этот угол острый, а к концу становится равным прямому, то деления шкалы растут. Наконец, при равенстве угла прямому в среднем положении грузов самые широкие деления расположены в середине шкалы, а в начале и в конце шкалы деления узкие. Это обстоятельство используется при регулировке тахометров.

Устройство центробежного конического тахометра с двумя грузами дано на рис.23.

Из корпуса тахометра выступает приводной вал 2, который посредством какой-либо передачи соединяется с измеряемой скоростью валом. При помощи зубчатой передачи 1 вращение приводного вала передается валу тахометра 3. С помощью четырех шарнирно закрепленных тяг 4 подвижной муфты 5 и неподвижной муфты 6 к валу диаметрально противоположно прикреплены два груза 7. Между муфтами вокруг вала навита винтовая пружина 8. Нижняя подвижная муфта 5 имеет направляющую, в которую входит кулачок 9 синусоидального механизма. На ось кулачка насажен зубчатый сектор 10, входящий в зацепление

с зубчатым колесом 11 на оси стрелки тахометра. Для гашения вибраций стрелки с ее осью скреплена спиральная пружина.

В кольцевом тахометре при невращающейся оси ($\omega=0$) плоскость кольца наклонена по отношению к оси на угол α_0 (рис.22,б). При вращении кольцо стремится занять положение, перпендикулярное оси вращения, чему препятствует пружина 2. Перемещение муфты 1 пропорционально приращению угла отклонения кольца

$$\alpha = S\omega^2, \quad (5)$$

где $S = mr^2 \sin 2\alpha_0 / 2c_1$ – чувствительность кольцевого тахометра; m , r , c_1 – соответственно масса и радиус кольца и коэффициент упругости пружин.

Центробежные тахометры характеризуются значительными погрешностями, технологическими трудностями изготовления и регулировки.

Для центробежных тахометров допускаются погрешности от 1 до 8 %; изготавливаются как рабочие тахометры (3-го и 4-го классов), так и образцовые (2-го класса).

Магнитоиндукционный метод основан на зависимости наводимых в металлическом теле вихревых токов от частоты вращения. Наведение вихревых токов может осуществляться как в металлическом теле, вращающемся в магнитном поле, так и в неподвижном теле, находящемся во вращающемся магнитном поле. Тахометры, построенные на магнитоиндукционном методе, выполняются в двух вариантах: с цилиндрическим чувствительным элементом (рис.24,а) и с дисковым чувствительным элементом (рис.24, б).

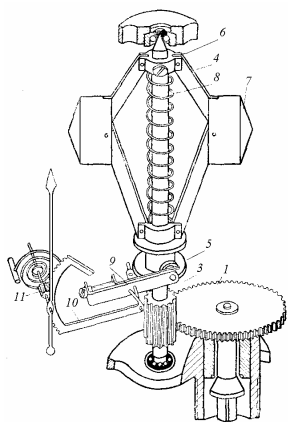


Рис.23

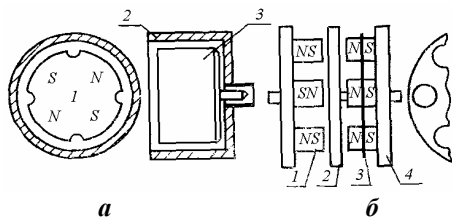


Рис.24. Магнитоиндукционные тахометры:
а – с полым ротором; б – с диском;

1 – магнит; 2 – чувствительный элемент; 3 – термомангнитный шунт; 4 – магнитопровод

Основной частью магнитоиндукционного тахометра является измерительный узел, который состоит из постоянного магнита 1 и чувствительного элемента 2, выполненного из металла с большим удельным сопротивлением в виде полого цилиндра или диска. При вращении постоянного магнита с угловой скоростью ω в чувствительном элементе индуцируется пропорциональная ω ЭДС, под действием которой в чувствительном элементе (роторе) возникают вихревые токи. В результате взаимодействия вихревого тока с магнитом возникает движущий момент, пропорциональный скорости вращения ω постоянного магнита, и пытающийся вызвать вращательное движение ротора. Но этот движущий момент уравнивается противодействующим моментом спиральной пружины (рис.25), демпфирующим моментом и моментом инерционных сил. В результате вместо вращения ротор лишь поворачивается на угол, пропорциональный скорости вращения ω . Этот угол регистрируется по шкале отклонением стрелки, жестко связанной с осью ротора.

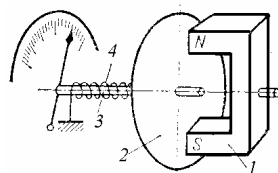


Рис.25. Схема тахометра:
1 – постоянный магнит; 2 – ротор;
3 – ось со стрелкой; 4 – пружина

Электрический метод основан на зависимости генерируемого напряжения от частоты вращения. Различают электрические тахометры постоянного, переменного или импульсного тока.

Электрические *тахометры постоянного тока* (рис.26) включают тахогенератор постоянного тока и гальванометр. Тахогенераторы бывают двух типов: с ограниченным и неограниченным углом поворота ротора.

Тахогенераторы с ограниченным углом ротора (рис.26,а) выполняются с неподвижной статорной обмоткой, внутри которой помещается постоянный магнит, связанный с валом, скорость вращения которого контролируется. Наводимая в статорной обмотке ЭДС пропорциональна угловой скорости вращения

$$e = kB\omega, \quad (6)$$

где k – коэффициент, зависящий от геометрических и обмоточных данных; B – магнитная индукция в зазоре. Отсутствие коллектора и щеток является существенным достоинством таких тахометров.

Основными элементами тахогенератора с неограниченным углом поворота (рис.26,б) являются постоянный магнит 1 с

соответствующими магнитопроводами, обмотка якоря 2 и коллектор со щетками 3.

Снимаемое с коллектора напряжение постоянного тока вызывает в рамке гальванометра протекание тока, сила которого пропорциональна скорости вращения ротора

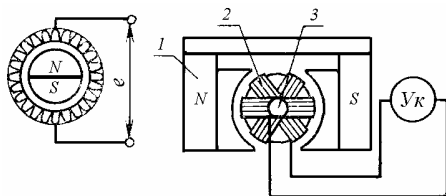


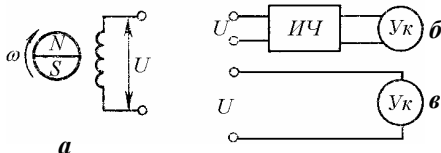
Рис.26. Электрические тахометры постоянного тока

$$I = kB\omega / (R_p + R_d + R_y),$$

где R_p – сопротивление рамки гальванометра; R_d – добавочное сопротивление; R_y – внутреннее сопротивление якоря. Шкала тако-

го прибора равномерная.

В тахометрах переменного тока (рис.27) тахогенератор состоит из вращающегося постоянного магнита и статорной обмотки, ЭДС на зажимах которой равна



$$e = kB\omega \sin \omega t. \quad (7)$$

Из этого выражения следует, что измерение угловой скорости ω можно свести к измерению частоты переменного тока ω , равной

Рис.27. Электрические тахометры переменного тока: а-тахогенератор переменного тока; б-измеритель частоты; в-измеритель напряжения

частоте вращения (рис.27,б) или к измерению амплитуды напряжения $U_m = kB\omega$ (рис.27,в). Первый способ является предпочтительным.

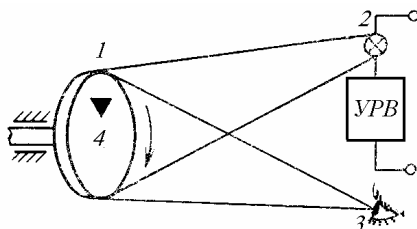


Рис.28

Стробоскопический метод измерения основан на свойстве глаза сохранять видимое изображение на десятые доли секунды после его исчезновения. Принцип реализации эффекта поясним по схеме

рис.28. Если отметку 4 на вращающемся валу 1 освещать вспышками света от источника 2, то при совпадении числа вспышек N с частотой вращения f отметка будет казаться неподвижной. Если разность $f - N$ отлична от нуля, то отметка начнет вращаться со скоростью $f - N$ в ту или иную сторону в зависимости от знака раз-

ности. Так как глаз замечает очень медленное движение отметки, то подбирая частоту вспышки посредством устройства регулируемой вспышки *УРВ*, можно остановить метку, что будет соответствовать $f=N$.

Грубые ошибки могут возникнуть при наблюдении кратных стробоскопических картин, появляющихся при кратном отношении f/N . Наиболее простой способ избежать такие грубые ошибки – примерно знать диапазон измеряемых скоростей.

Особая ценность тахометров, построенных на принципе стробоскопического эффекта, заключается в том, что можно измерить угловую скорость вращения вала, не создавая противодействующего момента, который неизбежно возникает при пользовании тахометрами всех рассмотренных выше систем, присоединяемыми к валу, скорость которого измеряется. Тахометр, основанный на стробоскопическом эффекте, к валу машины не присоединяется; на этот вал необходимо лишь поместить какую-либо метку или легкий диск с рядом меток. Применение стробоскопического эффекта обеспечило возможность создания образцовых установок первого класса.

2.2. Измерение линейной скорости

Во многих случаях большой интерес представляет измерение не угловой, а линейной скорости.

Под линейной скоростью v при равномерном движении понимается отношение длины (пройденного пути) S к времени t : $v=S/t$. В общем случае $v=dS/dt$. Производной единицей линейной скорости согласно Международной системе единиц (СИ) является метр в секунду (м/с). Применяется также единица км/ч ($1 \text{ км/ч} = 0.278 \text{ м/с}$). Диапазон измеряемых скоростей чрезвычайно велик. Поэтому в целях удобства можно условно разбить его на поддиапазоны: космические скорости – до $1.2 \cdot 10^4 \text{ м/с}$; скорость авиационных объектов – до 10^3 м/с ; транспортные скорости – до 50 м/с ; промышленные скорости – до 10 м/с ; малые технические скорости – до 10^{-1} м/с ; весьма малые скорости – до 10^{-5} м/с .

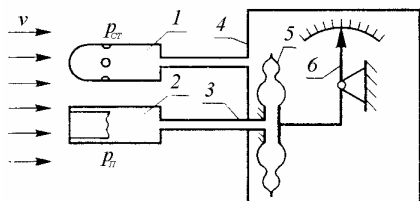
Приборы, предназначенные для измерения линейных скоростей, называются *измерителями скорости*.

Рассмотрим наиболее распространенные методы измерения линейных скоростей движущихся твердых тел: аэрометрический, компенсационный, термодинамический, турбинный, доплеровский, электромагнитный и др.

Аэрометрический метод основан на измерении скоростного (динамического) напора $\Delta p = p_n - p_{ст}$, функционально связанного со скоростью v тела, движущегося в воздушной среде

$$v = a \sqrt{(2v/k) [(\Delta p / p_{ст} + 1)^{1/v} - 1]},$$

где k – показатель адиабаты; $a = \sqrt{gkRT}$ – скорость звука; g – ускорение силы тяжести; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура воздуха;



$v = k/(k-1)$; $p_{ст}$ – статическое давление; p_n – полное давление.

Аэрометрический измеритель скорости схематически изображен на рис.29.

Рис.29. Аэрометрический измеритель скорости:

1 – приемник статического давления; 2 – приемник полного давления; 3 – трубопроводы; 4 – корпус; 5 – манометрическая коробка; 6 – стрелка

не превышающей 2-3%.

Приборы, построенные на аэрометрическом методе позволяют измерять скорость с погрешностью,

Компенсационный метод основан на автоматическом уравновешивании полного давления p_n давлением p_k , развиваемым воздушным компрессором 1 (рис.30).

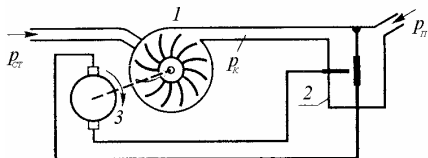


Рис.30

Уравновешивание происходит в манометрическом реле 2 с двумя полостями, в одну из которых поступает полное давление p_n , а во вторую – давление p_k .

Замыкание в цепи электродвигателя 3, приводящего во вращение компрессор, происходит тогда, когда давление p_n больше p_k . При этом мембрана реле прогибается влево. Если $p_n < p_k$, контакты реле размыкаются и частота вращения ω компрессора поддерживается такой, при которой $p_n = p_k$. Тогда

$$v = \omega / \sqrt{\rho / 2k}.$$

Термодинамический метод основан на измерении температуры заторможенного потока двумя преобразователями температуры (например, термоэлектрическими 1 и 2 на рис. 31) с разными коэффициентами торможения r_1 и r_2 , зависящими от геометрической формы препятствия.

Если взять разность сигналов U_1 и U_2 преобразователей, имеющих чувствительность S , то можно получить

$$v = \sqrt{5gkR(U_1 - U_2)/S(r_1 - r_2)},$$

где g – ускорение силы тяжести; R – газовая постоянная; k – показатель адиабаты.

Для реализации этого метода необходимы малоинерционные измерители температуры. Погрешности прибора по этому методу обусловлены непостоянством параметров r_1 и r_2 .

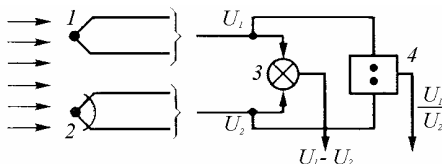


Рис. 31. Термодинамический измеритель скорости:

1 – открытая термопара; 2 – экранированная термопара; 3 – сумматор

Турбинный метод основан на использовании кинетической энергии воздушного или водного потока для вращения тангенциальной или аксиальной турбинки (рис.32).

Частота вращения турбинки пропорциональна скорости движения

$$\omega = cv,$$

где c зависит от радиуса турбинки и других параметров.

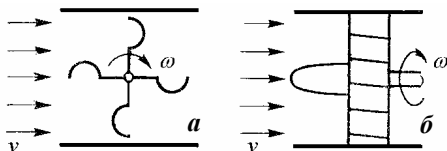


Рис.32. Турбинный измеритель скорости:

а – тангенциальная турбинка;
б – аксиальная турбинка

Доплеровский метод измерения скорости основан на эффекте, обнаруженном австрийским физиком и астрономом К. Доплером в 1842 г. и заключающемся в зависимости частоты колебаний (электромагнитных в воздухе и ультразвуковых в воде), воспринимаемых наблюдателем, от скорости и направления взаимного перемещения наблюдателя и источника излучения. Было замечено, что при приближении источника волн и наблюдателя частота воспринимаемых колебаний возрастает, а при удалении – уменьшается. Например, тон гудка приближающегося паровоза кажется высоким, когда он приближается и низким, если он удаляется.

На практике доплеровский метод измерения скорости реализуется в различных вариантах. Один из них рассмотрим более детально.

Предположим, что на объекте, движущемся со скоростью v в воздушной или водной среде, установлена приемопередающая система (точка A на схеме рис.33,а). Сигнал частотой f , излу-

чаемый передатчиком, попадая в точку B на подстилающей поверхности, частично не отражается и принимается на борту. Частота отраженного сигнала равна $f_1=f+2f_0$, где $f_0=v/\lambda\cos\gamma$, λ – длина волны; γ – угол наклона луча.

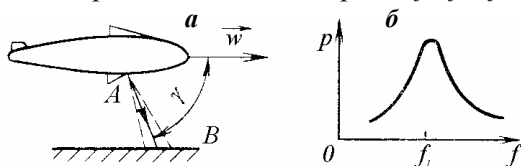


Рис.33. Доплеровский измеритель скорости:

a – схема однолучевого измерителя;

b – сплошной спектр отраженного сигнала

Поэтому из воспринимаемого приемником сплошного спектра необходимо выделить сигнал с частотой f_1 , что осуществляется с помощью специальных схем. Неточная фильтрация сигнала и крены объекта (самолета, корабля) приводят к погрешности метода. Так, например, при $\gamma=70^\circ$ и крене 1° погрешность скорости составляет 4.7 %.

Приборы, служащие для измерения линейной скорости наземного транспорта называют *спидометрами*. Устройство спидометров почти не отличается от устройства тахометров магнитного типа. Отличие заключается лишь в том, что его шкала градуирована не в единицах угловой скорости, а в единицах линейной скорости (км/ч).

Приводной вал спидометра соединен с валом колеса транспортного средства, диаметр которого, а следовательно, и длина окружности известны. Если принять, что при движении транспортного средства колесо вращается без проскальзывания, то по этой длине и числу оборотов можно легко вычислить путевую скорость. Например, при длине окружности колеса 1 м и числе его оборотов 500 в минуту путевая скорость будет

$$v = \frac{500 \cdot 1 \cdot 60}{1000} = 30 \text{ км/ч.}$$

Пределы шкалы спидометра устанавливаются в соответствии с предельными скоростями транспортного средства, для которого он предназначен.

2.3. Измерение линейного и углового ускорения

Ускорения, развиваемые отдельными частями машин, локомотивов, самолетов, кораблей и т.п., представляют собой весьма важную характеристику динамики машины.

Под линейным ускорением a прямолинейно и равномерно движущейся точки понимается отношение изменения скорости точки v_0-v_1 (в метрах в секунду) ко времени t (в секундах) этого изменения: $a=(v_0-v)/t$. Производной единицей линейного ускорения согласно Международной системе единиц (СИ) является метр на секунду в квадрате ($\text{м}/\text{с}^2$). Метр на секунду в квадрате – ускорение прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с. Диапазон изменения ускорений можно разбить на следующие поддиапазоны: весьма большие ускорения – до $1 \cdot 10^5 \text{ м}/\text{с}^2$; большие – до $10^3 \text{ м}/\text{с}^2$; средние – до $10^2 \text{ м}/\text{с}^2$; малые – до $1 \text{ м}/\text{с}^2$; весьма малые – до $10^{-5} \text{ м}/\text{с}^2$.

В последнее время в авиации и астронавтике применяется единица ускорения, равная нормальному ускорению свободного падения $9.80665 \text{ м}/\text{с}^2$. Обозначается эта единица латинской буквой g . Ускорение, измеренное единицами g , часто называют перегрузкой, поскольку оно показывает, во сколько раз вес тела, покоящегося или движущегося с данным ускорением, больше веса того же тела, покоящегося или движущегося равномерно вблизи поверхности Земли.

Приборы, предназначенные для измерения ускорений, называются *акселерометрами*. По принципу действия различают механические акселерометры, электромеханические акселерометры и др. Механические акселерометры применяют для измерения больших ускорений при колебаниях движущихся объектов и частей машин с небольшими частотами (до 10 Гц), электромеханические – при колебаниях относительно более высокой частоты.

Для измерения линейных ускорений находят применение инерциальный метод, метод дифференцирования скорости и метод двухкратного дифференцирования расстояния до неподвижной базы.

2.4. Метрологическое обеспечение измерений скорости и ускорения

Существующие первичные и специальные эталоны в области измерений параметров движения разделяются на две основные группы: эталоны единиц, характеризующих линейное движение центра масс твердого тела (скорость, ускорение), и эталоны единиц, характеризующих угловое движение вокруг центра масс твердого тела (угловая скорость и угловое ускорение).

Государственный первичный эталон единицы постоянно-го линейного ускорения твердого тела в диапазоне $0.001-200 \text{ м}/\text{с}^2$ включает в себя две установки:

- установку для воспроизведения постоянного линейного ускорения в диапазоне $0.001-10 \text{ м/с}^2$, основанную на методе поворотов акселерометра в гравитационном поле Земли;
- установку для воспроизведения единицы постоянного линейного ускорения в диапазоне $5-200 \text{ м/с}^2$ (центрифуга с электромеханической системой, системой управления электроприводом, измерительной системой и системой регистрации параметров, хранения и ввода информации).

Принцип действия первой установки иллюстрируется рис.34. Проверяемый акселерометр устанавливается на платформу, обладающую свободой поворота вокруг оси, проходящей через точку O перпендикулярно плоскости чертежа. В исходном положении A верхняя плоскость платформы и измерительная ось акселерометра горизонтальны. При повороте платформы на заданный угол α по измерительной оси акселерометра будет направлена составляющая ускорения свободного падения a_g , равная по модулю, согласно принципу эквивалентности, инерционному ускорению:

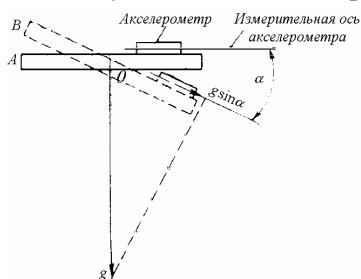


Рис.34

точка O перпендикулярно плоскости чертежа. В исходном положении A верхняя плоскость платформы и измерительная ось акселерометра горизонтальны. При повороте платформы на заданный угол α по измерительной оси акселерометра будет направлена составляющая ускорения свободного падения a_g , равная по модулю, согласно принципу эквивалентности, инерционному ускорению:

равная по модулю, согласно принципу эквивалентности, инерционному ускорению:

$$a = -a_g = -g \sin \alpha. \quad (8)$$

Зная значение g и измеряя угол α , по формуле (8) находят значение воспроизводимого ускорения.

Описанная эталонная установка воспроизводит единицу линейного ускорения в зависимости от его значения со средним квадратическим отклонением результата измерений S_0 при неисключенной систематической погрешности Θ_0 , не превышающими значений, указанных в таблице 6.

Таблица 6

Постоянное линейное ускорение, м/с^2	S_0	Θ_0
От 0.001 до 0.01 вкл.	$1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2} - 1,5 \cdot 10^{-2}$
Св. 0.01 до 0.1 вкл.	$5 \cdot 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-2} - 2,5 \cdot 10^{-3}$
Св. 0.1 до 1 вкл.	$6 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-4}$
Св. 1 до 10 вкл.	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-5}$

Вторая эталонная установка, обеспечивающая воспроизведение единицы постоянного ускорения в диапазоне $5-200 \text{ м/с}^2$, изображена на рис.35. Здесь платформа A вращается вокруг вертикальной оси 00_1 с постоянной угловой скоростью Ω . Верхняя плоскость платформы и измерительная ось установленного на платформе акселерометра горизонтальны, при этом измерительная ось акселерометра пересекает ось 00_1 . Если расстояние от оси 00_1 до центра масс чувствительного элемента акселерометра равно R , то приложенное к центру масс центробежное ускорение $a = -\Omega^2 R$.

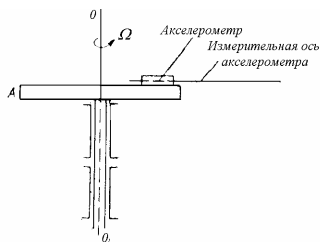


Рис.35

Требуемые значения воспроизводимого ускорения достигаются путем задания различных постоянных значений Ω . Описываемая эталонная установка обеспечивает воспроизведение единицы линейного ускорения со средним квадратическим отклонением результата измерений, не превышающим $2 \cdot 10^{-5}$, при неисключенной систематической погрешности, не превышающей $8 \cdot 10^{-5}$.

Описанный Государственный первичный эталон применяют для передачи размера единицы постоянного линейного ускорения образцовым 1-го разряда и рабочим средствам измерений повышенной точности методом прямых измерений.

Как видно из поверочной схемы (рис.37) в качестве образцовых средств измерений 1-го разряда применяют образцовые акселерометры с диапазонами измерений $5-200 \text{ м/с}^2$ и $0.001-10 \text{ м/с}^2$. Образцовые акселерометры 1-го разряда применяют для поверки образцовых средств измерений 2-го разряда методом прямых измерений.

В качестве образцовых средств измерений 2-го разряда применяются образцовые поверочные установки и образцовые центрифуги. Образцовые средства измерений 2-го разряда применяют для поверки рабочих акселерометров методом прямых измерений.

Параметры углового движения воспроизводятся двумя эталонами.

В Государственном специальном эталоне единицы угловой скорости в диапазоне $5 \cdot 10^{-8} - 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ рад/с}$ используется метод сравнения воспроизводимой скорости с составляющей угловой скорости вращения Земли.

Государственный специальный эталон состоит из измерительной системы, включающей в себя автоколлимационный преобразователь и блок обработки информации, а также стенд для воспроизведения малых углов скоростей в диапазоне $5 \cdot 10^{-8}$ - $2.5 \cdot 10^{-4}$ рад/с. Он обеспечивает воспроизведение единицы со средним квадратическим отклонением результата измерений S , не превышающим $2 \cdot 10^{-9}$ рад/с, при неисключенной систематической погрешности Θ , не превышающей $2 \cdot 10^{-9}$ рад/с.

Государственный специальный эталон применяют для передачи размера единицы угловой скорости образцовым средствам измерений 1-го разряда непосредственным сличением (рис.36).

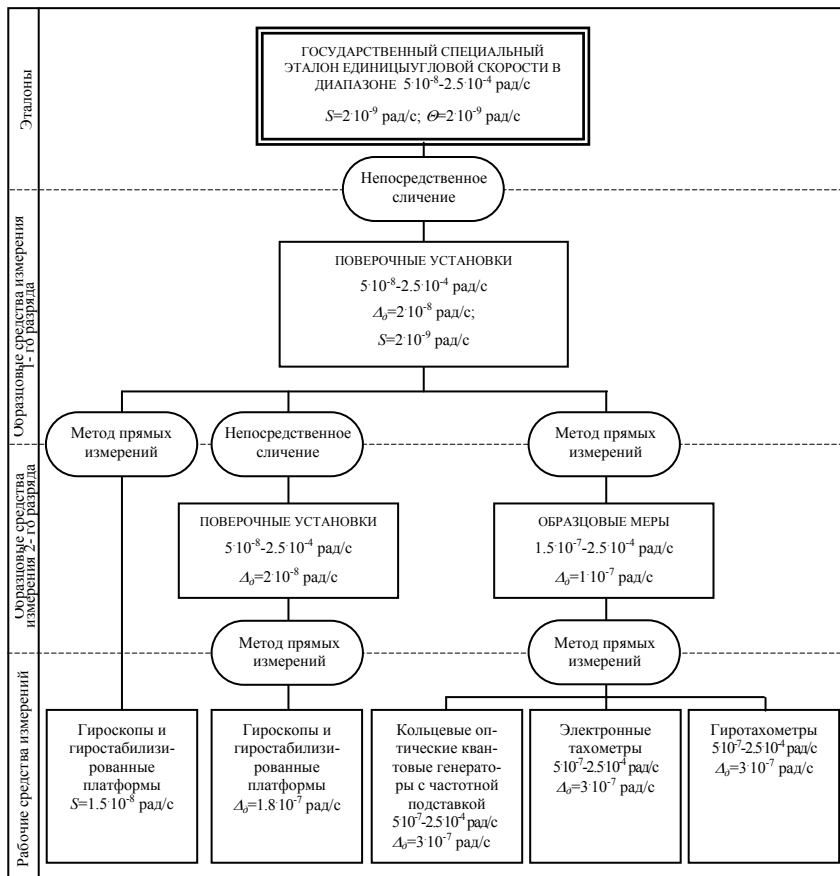


Рис.36

В качестве образцовых средств измерений первого разряда применяют поверочные установки (автоколлимационные установки с диапазоном измерений $5 \cdot 10^{-8}$ - $2.5 \cdot 10^{-4}$ рад/с). Пределы их допускаемых абсолютных погрешностей (Δ_b) не должны превышать $2 \cdot 10^{-8}$ рад/с (средние квадратические отклонения результата поверки – $5 \cdot 10^{-9}$ рад/с). Образцовые средства измерений 1-го разряда применяют для поверки образцовых средств измерений 2-го разряда непосредственным сличением или методом прямых измерений и рабочих средств измерений повышенной точности методом прямых измерений.

В качестве образцовых средств измерений 2-го разряда применяют поверочные установки (поворотные платформы, работающие в режиме одноосного гиросtabilизатора) и образцовые меры угловой скорости (электромеханические поворотные столы). Пределы допускаемых абсолютных погрешностей образцовых средств измерений 2-го разряда составляют от $6 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-7}$ рад/с. Соотношение пределов допускаемых абсолютных погрешностей образцовых средств измерений 1 и 2-го разрядов должно быть не более 1:3. Образцовые средства измерений 2-го разряда применяют для поверки рабочих средств измерений методом прямых измерений. В качестве рабочих средств измерений применяют гироскопы и гиросtabilизированные платформы, кольцевые оптические квантовые генераторы с частотной подставкой с диапазоном измерений $5 \cdot 10^{-7}$ - $2.5 \cdot 10^{-4}$ рад/с, электронные тахометры с диапазоном измерений $5 \cdot 10^{-7}$ - $2.5 \cdot 10^{-4}$ рад/с и гири тахометры с диапазоном измерений $3 \cdot 10^{-7}$ - $2.5 \cdot 10^{-4}$ рад/с. Средние квадратические отклонения результата поверки рабочих средств измерений не должны превышать $1.5 \cdot 10^{-8}$ рад/с, а пределы абсолютных погрешностей рабочих средств измерений составляют от $1.8 \cdot 10^{-7}$ до $3 \cdot 10^{-7}$ рад/с.

В Государственном первичном эталоне единицы постоянного углового ускорения в диапазоне 1-100 рад/с с помощью винтовой пары ускорение свободно падающей платформы преобразуется в ее угловое ускорение, дискретные значения которого задаются с помощью устанавливаемых на платформе инерционных дисков.

Кроме описанного стенда для воспроизведения постоянного углового ускорения в состав эталона входит измерительная система, состоящая из блока преобразователей угла поворота платформы стенда в электрический сигнал, блоков усилителей,

источников питания и регистрирующей аппаратуры, а также магнитный барабан.

Государственный первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы со средним квадратическим отклонением результата измерений S_0 , не превышающим $3 \cdot 10^{-4}$, при неисключенной систематической погрешности θ_0 , не превышающей $5 \cdot 10^{-5}$. Государственный первичный эталон применяют для передачи размера единицы постоянного углового ускорения образцовым средствам измерений 1-го разряда (рис.37) сличением при помощи компаратора (магнитного барабана).

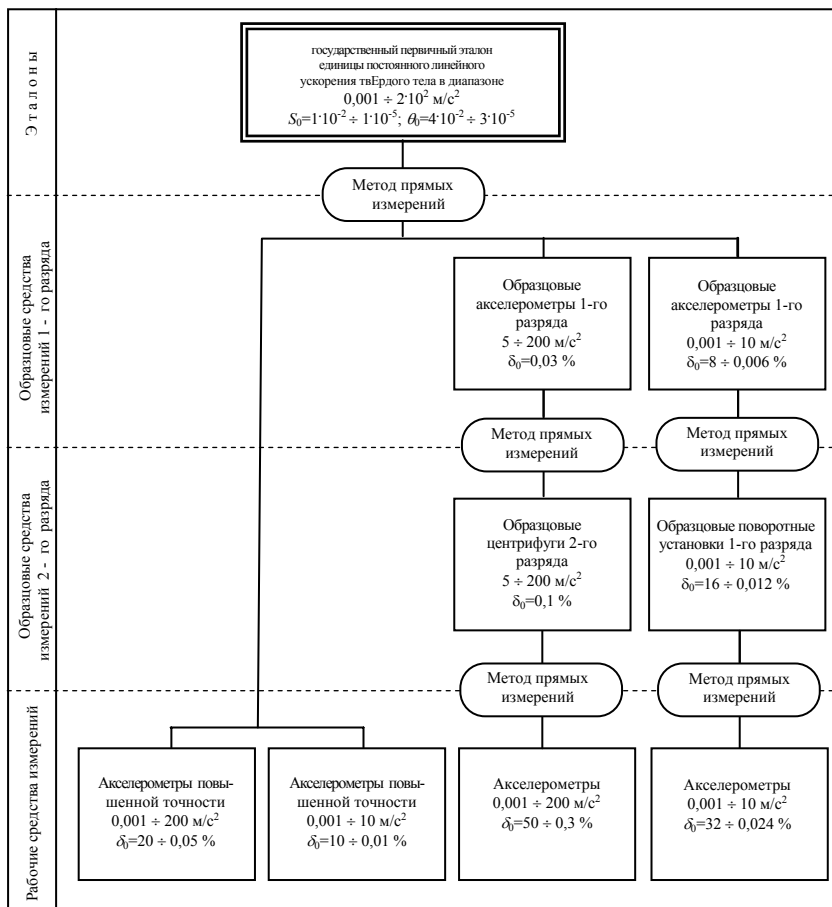


Рис.37

В качестве образцовых средств измерений 1-го разряда применяют образцовые меры, работающие на принципе падающего в аэростатическом подвесе винта. Пределы их допускаемых относительных погрешностей δ_0 не должны превышать 0.3%. Образцовые средства измерений 1-го разряда применяют для поверки образцовых средств измерений 2-го разряда сличением при помощи компаратора и рабочих средств измерений повышенной точности методом прямых измерений.

В качестве образцовых средств измерений 2-го разряда применяют образцовые меры, работающие на принципе падающего винта, на принципе блока с падающим грузом, на принципе управляемых электродвигателей. Пределы допускаемых относительных погрешностей образцовых средств измерений 2-го разряда составляют от 1 до 3%. Их применяют для поверки рабочих угловых акселерометров методом прямых измерений.

В качестве рабочих средств измерений применяют угловые акселерометры с диапазонами измерений 1-100 рад/с² и 5-100 рад/с² и пределами допускаемых относительных погрешностей от 1 до 15%.

Измерение расхода и количества жидкости и газа

3.1. Измерение расхода

Расходом называют количество вещества, протекающее через данное сечение в единицу времени. Расход можно измерять в единицах массы, деленных на единицу времени (кг/ч, г/с и т.д.), либо в единицах объема, деленных на единицу времени ($\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, $\text{см}^3/\text{с}$ и т. д.). В первом случае расход называют массовым расходом, а во втором – объемным.

Приборы для определения расхода газа, жидкости или сыпучих материалов называют *расходомерами*.

Расходомеры нашли широкое применение в различных отраслях промышленности – энергетической, химической, нефтяной, пищевой, металлургической и др. Их используют также для проведения научных исследований, при управлении самолетами и космическими кораблями и во многих других случаях. С помощью расходомеров обеспечивается оптимальный режим важнейших технологических процессов, повышается эффективность производства, качество изготавливаемой продукции, осуществляется экономия исходных материалов.

Расходомеры отличаются разнообразием принципов действия, конструкций, что значительно усложняет их классификацию. Поэтому при рассмотрении расходомеров условно разобьем их на три группы: расходомеры постоянного перепада давления; расходомеры переменного перепада давления и расходомеры, основанные на других принципах действия.

В приборах первой группы измеряемое вещество, протекая через прибор, воздействует на подвижной элемент (поплавок, поршень, крыло и т. д.), перемещает его, изменяя при этом в зависимости от расхода площадь, через которую проходит вещество между элементом и стенками прибора (перепад давления остается постоянным перед подвижным элементом и за ним). Величина перемещения подвижного элемента является мерой расхода. К этой группе относятся ротаметры, расходомеры с подвижным поршнем, пневматические расходомеры и др.

Расходомерами переменного перепада давления называют расходомеры, основанные на зависимости от расхода вещества перепада давления, создаваемого неподвижным устройством, ко-

торое устанавливается в трубопроводе, либо самим элементом трубопровода. К приборам такого типа относятся расходомеры с нормированными сужающими устройствами (сопла, диафрагмы, сопла Вентури) и ненормированными сужающими устройствами (трубы Вентури, сдвоенные диафрагмы и т.п.).

Кроме расходомеров постоянного и переменного перепадов давления, применяют расходомеры, основанные на других принципах измерения. Эти приборы состоят из преобразователя, установленного в трубопроводе и устройств, воспринимающих его импульсы, сигналы, напряжения и т.п., и преобразующих их в значения расхода. Различают электромагнитные расходомеры, силовые, тахометрические, тепловые, ультразвуковые, корреляционные, ионизационные, ядерно-магнитные, оптические и др.

3.1.1. Расходомеры постоянного перепада давления

Среди расходомеров постоянного перепада давления широко применяются на практике расходомеры со свободно перемещающимся поплавком, называемые ротаметрами; расходомеры с погруженным поплавком и расходомеры с цилиндрическим поршнем.

3.1.1.1. Ротаметры

Ротаметры, являющиеся расходомерами обтекания, отличаются простотой конструкции, наглядностью показаний, в связи с чем получили наибольшее распространение.

Показанный на рис.38 стеклянный ротаметр состоит из поплавка 1, конически расширяющейся стеклянной трубки 2, на которую нанесены деления шкалы, уплотнения 3 и ограничителя подъема поплавка 4.

Под действием потока измеряемого вещества поплавок перемещается вверх до тех пор, пока не наступит равновесие между силой, перемещающей поплавок и его собственной силой тяжести. Высота подъема и является мерой расхода.

Изготовление ротаметров из коррозионно-стойких материалов исключает один из основных недостатков стеклянных ротаметров – их хрупкость, а также дает возможность использования ротаметров для измерения расходов практически любых сред.

Ротаметры можно устанавливать непосредственно в трубопроводе, либо самим элементом трубопровода.

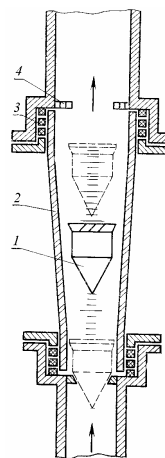


Рис.38

редственно до и после изгибов трубопроводов и вентилях, так как установка этих приборов в трубопровод не требует наличия перед ними прямого участка.

Шкала ротаметров достаточно равномерна; погрешность не превышает 2 %, а при очень точной калибровке может быть уменьшена до 1 %.

Недостатком ротаметров является их непригодность для измерения больших расходов.

3.1.1.2. Расходомеры с погруженным поплавком

Поплавковым называется расходомер, у которого поплавок перемещается внутри отверстия. Для обеспечения увеличения площади проходного сечения по мере подъема поплавок изготавливают различные формы поплавков и проходных отверстий. На

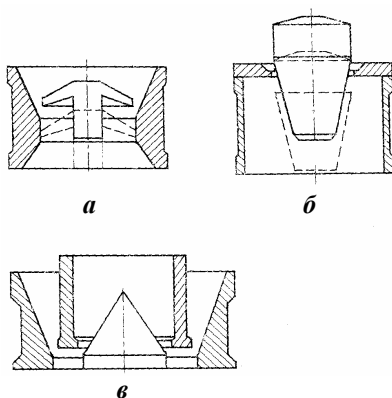


рис.39 показаны некоторые из применяемых поплавок-вых пар: тарельчатый, дисковый или цилиндрической формы поплавок, перемещающийся в коническом отверстии (рис.39,а); конический поплавок, перемещающийся в круглом цилиндрическом отверстии (рис.39,б) и кольцевой цилиндрический поплавок, перемещающийся в коническом отверстии, в центре которого

имеется неподвижный конус, обращенный вершиной вверх (рис.39,в).

Рис.39

Общий вид расходомеров с поплавком показан на рис.40.

Через правый патрубок измеряемое вещество поступает в нижнюю часть корпуса, протекает снизу вверх через расширяющееся кверху сопло 2 и выходит через левый патрубок. В сопле на штоке 3 установлен диск-поплавок 1, ход которого в нижнем положении ограничен кольцевым седлом сопла, а в верхнем – упором. При отсутствии расхода поплавок находится на седле, полностью закрывая проход в измерительное сопло; при наличии расхода поплавок перемещается вверх, причем высота его подъема зависит от величины расхода. Перемещения поплавок при помощи штока через втулку 5 с уплотнительной набивкой переда-

ются в верхнюю часть прибора, в которой размещены устройства: показывающее, регистрирующее 6 и интегрирующее 7 расход.

Снизу к корпусу прикреплено демпфирующее устройство, состоящее из наполненного жидкостью стакана и поршня 9, жестко связанного со штоком поплавка. На поршне укреплен груз 8, масса которого подобрана при градуировке прибора. Диск 4 предохраняет верхнюю часть прибора от нагрева.

Основными недостатками расходомеров с поплавком являются необходимость градуировки и зависимость показаний от трения в проходной трубке. Погрешность не превышает $\pm 3\%$.

Применяют такие приборы для измерения как средних, так и больших расходов.

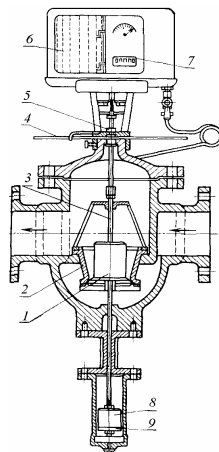


Рис.40

3.1.1.3. Расходомеры с погруженным поршнем

Поршневым называется расходомер постоянного перепада давления, имеющий поршень, вертикально перемещающийся в цилиндрической втулке с окнами особой формы. Устанавливают такой прибор непосредственно в горизонтальном трубопроводе между прямыми участками труб. Работает расходомер с погруженным поршнем в комплекте с одним или двумя вторичными приборами, действующими на индукционном принципе.

В корпусе 1 прибора (рис.41) размещен цилиндр 2, в котором имеются два отверстия, расположенные диаметрально противоположно друг другу. Нижнее отверстие круглой формы является входным, а верхнее – прямоугольное – выходным.

При работе прибора поступающая под поршень 1 с грузами 8 жидкость поднимает поршень на высоту, соответствующую расходу и открывает вы-

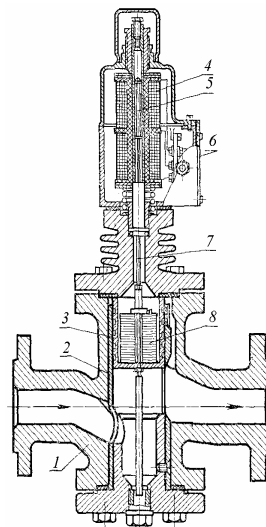


Рис.41

ходное отверстие.

В верхней части расходомера находится индукционный датчик 6, в катушке 4 которого перемещается сердечник 5, связанный с поршнем штоком 7.

Расходомеры с погруженным поршнем рассчитаны на работу при давлении до $1.57 \cdot 10^6$ Н/м² и температуру 100 °С.

Погрешность составляет ± 2.5 %.

Кроме рассмотренных приборов, входящих в группу расходомеров постоянного перепада давления, сюда же можно отнести и другие расходомеры, например, пружинно-дисковый расходомер, расходомер с поворотной лопастью и др.

Принцип действия *пружинно-дискового расходомера*, в котором уравнивающее усилие развивается измерительной пружиной, аналогичен принципу действия ротаметра. Однако такие расходомеры обладают рядом преимуществ: возможностью замены измерительной пружины и шкалы при изменении диапазона измерений; независимостью показаний прибора от влияния силы тяжести, что позволяет устанавливать его в любом положении и измерять расходы в потоках, направленных сверху вниз.

В *расходомерах с поворотной лопастью* при нулевом сечении проходное сечение полностью перекрывается лопастью. При увеличении расхода под действием развиваемого усилия лопасть поворачивается на угол, который и служит мерой расхода. Эти приборы обычно применяются для измерения больших расходов, а также расходов сильно загрязненных сред.

3.1.2. Расходомеры переменного перепада давления

Большая часть применяемых в промышленности расходомеров основана на методе измерения расхода по переменному перепаду давления.

В зависимости от устройства и принципа действия первичного преобразователя различают расходомеры с сужающими устройствами; центробежные расходомеры, основанные на зависимости от расхода перепада давления, образующегося на закруглении трубопровода; расходомеры с напорным устройством; струйные расходомеры и др.

Наибольшее распространение получили расходомеры с сужающими устройствами, которые отличаются универсальностью, возможностью использования для измерения расходов различной

величины в трубах практически любого диаметра и практически при любых давлениях и температурах.

К числу достоинств таких расходомеров можно отнести и удобство массового производства: индивидуально изготавливается только сужающее устройство, а все сложные части – дифманометр и вторичный прибор – могут изготавливаться крупными сериями, так как их устройство не зависит ни от рода измерений среды, ни от расхода.

3.1.2.1. Расходомеры с сужающими устройствами

Полная энергия (сумма кинетической и потенциальной энергий) протекающего по трубопроводу неразрывного потока вещества является постоянной величиной. При уменьшении поперечного сечения с помощью какого-либо сужающего устройства скорость потока на этом участке увеличивается – происходит частичный переход потенциальной энергии давления в кинетическую энергию скорости. Поэтому статическое давление в суженном сечении будет меньше давления перед местом сужения. Разность давлений перед суженным участком и в месте сужения (перепад давления) тем больше, чем больше скорость – расход протекающего вещества. Таким образом, мерой расхода служит перепад давления.

В общем случае схема такого расходомера (рис.42) состоит из первичного преобразователя 1 (например, диафрагмы или сопла); первичной линии связи 2 – соединительных трубок и вспомогательных устройств; дифманометра 3, измеряющего перепад давления; вторичного преобразователя – датчика 4, преобразующего перемещение подвижного элемента дифманометра в электрическую величину или пневматический сигнал; вторичной линии связи 5; вторичного измерительного прибора 6, который измеряет электрическую или пневматическую величину, созданную вторичным преобразователем. Когда нет необходимости передавать показания на значительное расстояние, последние три элемента схемы отсутствуют.

К недостаткам таких расходомеров относится малый диапазон измерений, нелинейность шкалы, ограниченная точность и

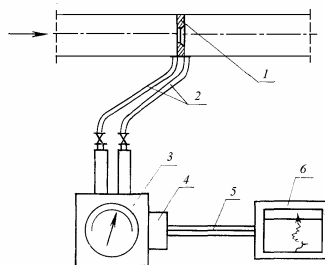


Рис.42

быстродействие. Кроме того, с увеличением длины трубок, соединяющих сужающее устройство с дифманометром, возрастает инерционность расходомеров. Погрешность составляет $\pm(1-3)\%$.

➤ Сужающие устройства. В качестве стандартных сужающих устройств в расходомерах переменного перепада давления применяют диафрагмы, сопла, а также расходомерные трубы (трубы Вентури).

Преимущественно применяют диафрагмы. В основном это обусловлено низкой стоимостью и простотой их изготовления. В зависимости от мест отбора давлений используют диафрагмы различных модификаций.

Стандартная диафрагма, показанная на рис.43, представляет собой плоский диск с концентрическим отверстием для истечения жидкости.

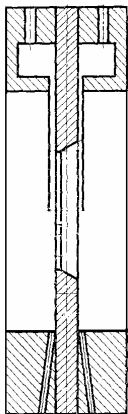


Рис.43

Диафрагма имеет цилиндрическую форму со стороны входа потока и коническую – со стороны выхода. Угол между образующими конической и цилиндрической частей отверстия составляет обычно 45° .

Форма потока в диафрагме определяется входной кромкой, которая должна быть острой. На кромке происходит отрыв струи от стенки и дальнейшее ее свободное формирование. Струя сужается за кромкой, причем коэффициент сужения оказывает существенное влияние на коэффициент расхода. Одним из основных недостатков диафрагм является то, что в результате коррозии и оседания загрязнений входная кромка диафрагмы скругляется. Изнашивается острая кромка и при больших скоростях протекания измеряемого вещества. Поэтому при равных перепадах давления при больших скоростях потока, а следовательно, и при больших расходах, неоспоримое преимущество по сравнению с диафрагмами имеют сопла.

Стандартное расходомерное сопло (рис.44) представляет собой сужающее устройство с круглым отверстием, имеющим плавно сужающуюся часть на входе и цилиндрическую часть на выходе.

В отличие от струи, свободно выходящей из диафрагмы, струя, выходящая из сопла, принимает его форму.

Цилиндрическая часть сопла выполняется очень гладкой и строго цилиндрической, так как даже незначительное конусообразное расширение цилиндрической части к выходу или ее волнистость влияют на коэффициент расхода. На конце сопла делается расточка, которая предохраняет выходную кромку цилиндрической части от механических повреждений.

Наряду со стандартными соплами широко применяются сопла Вентури (рис.45).

Нормальное сопло Вентури состоит из входной части, полностью по профилю соответствующей стандартному соплу и являющейся собственно измерителем расхода, и соединенного с ней диффузора, в котором восстанавливается исходное давление. Обе части соединены между собой цилиндрической вставкой, исключающей обратное воздействие диффузора на входную часть.

Стандартные сопла Вентури применяются в трубопроводах диаметром более 50 мм. Вес сопла Вентури, в особенности большого диаметра, достигает нескольких тонн, что усложняет их монтаж.

Недостатком стандартных диафрагм и сопел является значительная потеря давления, возникающая в неактивных зонах, находящихся после диафрагмы или сопла. Этого недостатка лишены расходомерные трубы.

Наиболее распространенными расходомерными трубами являются трубы Вентури, предложенные Гершелем в США еще в конце XIX века.

Классическая труба Вентури (рис.46) состоит из соединенных между собой конусных и цилиндрических отрезков труб, что исключает трудно изготавливаемую скругленную по форме сопла входную часть.

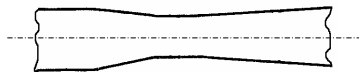


Рис.46

Существенным достоинством труб Вентури является меньшее по сравнению со всеми сужающими устройствами требование к длине прямых участков трубопровода.

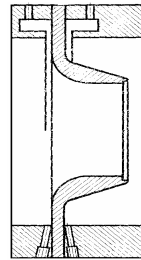


Рис.44

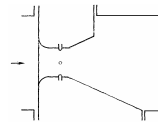


Рис.45

Измерения расхода при небольших числах Рейнольдса¹ в ряде случаев (например, при измерении расхода вязких жидкостей, таких как нефтепродукты, газы с большим содержанием водорода и др.) имеют большое практическое значение. Для подобных измерений разработаны специальные сужающие устройства с профилями отверстий, обеспечивающими постоянство коэффициента расхода именно в области малых чисел Рейнольдса. На рис.47 приведены некоторые из таких сужающих устройств.

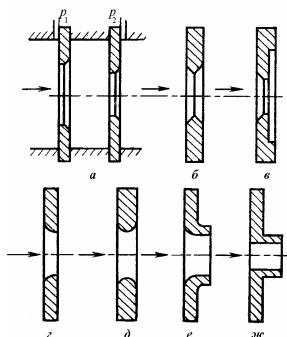


Рис.47

Все эти устройства по характеру воздействия на протекающий через них поток являются промежуточными между стандартными диафрагмой и соплом. Они имеют менее плавный вход, чем стандартное сопло, поэтому у них имеется некоторое сужение струи, но это сужение значительно меньше, чем у стандартной диафрагмы, благодаря чему изменение коэффициента потерь и коэффициента сужения взаимокompенсирруется, обеспечивая постоянные значения коэффициента расхода при небольших числах Рейнольдса.

Постоянство коэффициента расхода при малых числах Рейнольдса может быть достигнуто последовательной установкой двух диафрагм (рис.48).

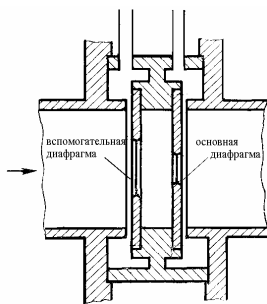


Рис.48

Недостаточно острая кромка вспомогательной диафрагмы (первой по движению потока) приводит к уменьшению коэффициента расхода, а недостаточно острая кромка основной диафрагмы (второй по движению пото-

¹ Число Рейнольдса – безразмерная величина, являющаяся одной из основных характеристик течения вязкой жидкости и равная отношению сил инерции к силам вязкости: $Re = \rho v l / \mu$, где ρ – плотность жидкости, v – скорость потока, l – диаметр трубы, μ – коэффициент вязкости жидкости.

ка) – к его увеличению. Таким образом, влияние недостаточно острых кромок диафрагм в какой-то степени взаимокompенсруется.

Для получения надежных результатов сдвоенные диафрагмы необходимо подвергать индивидуальной градуировке в тех пределах чисел Рейнольдса, при которых они будут применяться.

В ряде зарубежных стран для определения расходов при малых числах Рейнольдса успешно применяют гидравлический мост VISKOFLUX, который представляет собой четыре гидравлических сопротивления, включенных в схему гидравлического моста (рис.49).

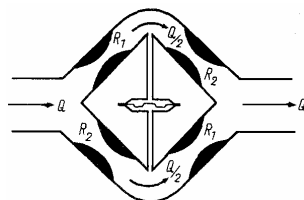


Рис.49

Разность давлений в диагонали при данной плотности жидкости, протекающей через ветви моста, не зависит от числа Рейнольдса и зависит от скорости среды. Влияние вязкости среды на сопротивление элементов моста компенсируется соответствующим подбором характеристик. Прибор предназначен для измерений расходов при малых скоростях потоков, обладающих высокой вязкостью.

➤ Дифференциальные манометры. Дифманометры устанавливаются в комплекте с сужающим устройством. Они служат для измерения перепада давления, образующегося в преобразователе расхода – сужающем устройстве, напорной трубке и т.п.

По принципу действия манометры разделяются на две большие системы – жидкостную и деформационную. К первой относятся дифманометры с видимым уровнем, кольцевые, колокольные, поплавковые, а ко второй – мембранные и сильфонные. Подробно эти манометры уже были описаны в учебнике «Измерения механических величин» (глава 3) серии «Методы и средства измерений».

➤ Соединительные линии и вспомогательные устройства. Передача перепада давления от сужающего устройства к дифманометру осуществляется при помощи *соединительных трубок*, которые также называют импульсными трубками. Во многих случаях на этих трубках устанавливают различные вспомогательные устройства, такие как уравнильные или разделительные сосуды, обеспечивающие правильную работу расходомера.

Существенное влияние на точность измерительных установок оказывает прокладка соединительных линий, а также взаимное расположение сужающих устройств и расходомеров.

Наличие неплотности в трубках, накопление в них конденсата приводят к искажению результата измерения.

Соединительные линии от сужающего устройства к дифманометру прокладываются по кратчайшему расстоянию вертикально или с уклоном к горизонтали не менее 1:10 для того, чтобы пузырьки газа в трубках, заполненных жидкостью могли подняться к газосборникам, а конденсат в трубках, заполненных газом, и твердые частицы могли удалиться в ловушки или отстойники.

Длина соединительных трубок определяется расстоянием между сужающим устройством и дифманометром. От этого расстояния зависят быстродействие и надежность работы расходомера, поэтому желательно, чтобы оно не превышало 15-16 м. При необходимости применяют дифманометры с электрической или пневматической передачей к вторичному прибору.

Внутренний диаметр трубок выбирают в зависимости от рода измеряемого вещества и длины трубок, но не менее 8 мм.

В качестве материалов для изготовления труб применяют коррозионностойкие материалы – медь, латунь, нержавеющую сталь. Используются также трубки из пластмасс – винилпластовые, полиэтиленовые, полихлорвиниловые.

Изгибы соединительных трубок выполняют плавно, без прямых углов и вмятин. Во избежание неодинакового нагревания или охлаждения труб, их располагают близко друг от друга. При необходимости трубы совместно изолируют.

При измерении жидкостей дифманометр устанавливают под сужающим устройством. Если же необходимо разместить дифманометр выше, то в наивысшей точке соединительных линий следует установить газосборник с кранами для выпуска воздуха и газа.

Если жидкость содержит примеси, то в низших точках системы устанавливают отстойные камеры.

В случае, когда температура жидкости превышает 120 °С, в соединительные линии включают уравнительные сосуды, которые охлаждают, выравнивают плотность жидкости в импульсных трубках. Если есть опасность замерзания воды в трубках, то можно при-

менить электрический или паровой обогрев, обеспечив при этом равномерность нагрева и предотвращение испарения воды в трубках.

При измерении расхода вязких агрессивных жидкостей и газов возникает необходимость в применении сосудов с разделительными жидкостями.

По возможности разделительные сосуды устанавливают близко к сужающему устройству. Жидкость в них при нулевом перепаде давления должна находиться на одном уровне. Разделительную жидкость подбирают таким образом, чтобы она химически не взаимодействовала ни с измеряемой средой, ни с рабочей жидкостью прибора, а также не воздействовала бы на материал соединительных линий, разделительных сосудов и внутренние полости дифманометра. Обычно это глицерин, этиловый спирт, дибутилфталат, легкие минеральные масла.

При измерении расхода чистого газа или воздуха дифманометр лучше располагать выше сужающего устройства, в противном случае в наивысших точках труб следует поместить сборник конденсата.

В случае расхода горячих газов необходимо обеспечить равенство температур в обеих соединительных линиях, чтобы исключить неправильное измерение перепада давления.

Если пар имеет очень высокую температуру и давление, рекомендуется для предохранения сужающего устройства от попадания холодной жидкости из соединительных трубок иметь ловушку в виде емкости между каждым сосудом и сужающим устройством.

3.1.2.2. Расходомеры с напорными устройствами.

С увеличением размеров трубопровода возрастает и стоимость расходомеров, а также затраты на их установку. Это вызвало необходимость разработки ряда методов измерения расходов, основанные на измерении местных скоростей потока в одной или нескольких точках поперечного сечения трубопровода и определении средней скорости потока в заданном сечении, по которой определяется расход. К числу таких расходомеров в первую очередь относятся напорные трубки, отличающиеся универсальностью и простотой конструкции.

Напорная трубка обычно выполняется Г-образной формы с отверстием, направленным навстречу потоку (ее также называют трубкой Пито).

В трубопроводах часто используется дифференциальная трубка Пито, показанная на рис.50, представляющая собой сочетание трубки Пито, воспринимающей полное давление p_n с трубкой, воспринимающей статическое давление p_{cm} , которое через ряд небольших отверстий поступает в кольцевое пространство, образованное центральной трубкой Пито и наружной трубкой.

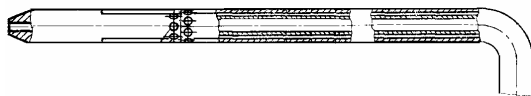


Рис.50

С уменьшением скорости динамическое давление, представляющее собой разность полного и статического давлений, резко падает, поэтому напорные трубки плохо пригодны для измерения малых скоростей.

Большим перепадом давления, чем дифференциальные трубки Пито отличаются напорные трубки зондового типа, выполняемые цилиндрической формы и располагаемые перпендикулярно к оси трубопровода. Отверстие одной трубки направлено навстречу потоку, а другой – в противоположную сторону. Преимуществом таких трубок является удобство монтажа.

В некоторых странах для увеличения перепада давления применяют комбинацию из трубки Пито, воспринимаемой плюсовое давление, и маленькой трубки Вентури, из горла которой отбирается минусовое давление. Такое устройство является напорным усилителем.

Расходомером, основанном на измерении местных скоростей потока в нескольких точках поперечного сечения трубопровода, является *расходомер Аннубара* (рис.51), в котором динамические напоры измеряются в четырех точках трубопровода, лежащих на одном диаметре.

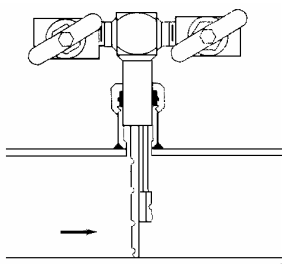


Рис.51

Результаты замеров усредняются и определяется суммарный динамический напор, являющийся мерой расхода. Необходимый поправочный коэффициент находится эмпирически в зависимости от диаметра трубопровода и числа Рейнольдса. Нали-

чие прямых участков трубопровода до и после прибора обеспечивает удовлетворительные результаты.

3.1.3. Расходомеры, основанные на других принципах измерения

Кроме расходомеров постоянного и переменного перепада давления в промышленности нашли применение расходомеры, основанные на иных принципах измерения. К ним относятся турбинные расходомеры, ультразвуковые, индукционные и др.

С достаточно большой точностью расход жидкости в трубах измеряется *турбинными расходомерами* (погрешность составляет 0.3-1.5 %; имеются приборы с погрешностью 0.1 %).

Работают турбинные расходомеры на скоростном принципе, при котором вращающий момент на оси турбинки создается за счет кинетической энергии измеряемого потока.

Датчик турбинного расходомера (рис.52) состоит из турбинки 1 с закрепленной в подшипниках 2 осью, на которой запрессован стальной стержень 3.

Труба 4, в которой установлена турбинка, выполняется из немагнитного материала. Импульсный индукционный преобразователь 5 смонтирован снаружи трубы.

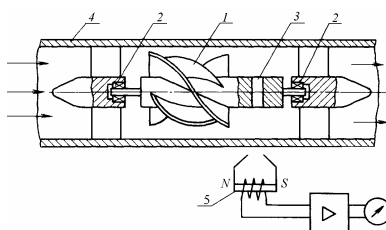


Рис.52

При движении жидкости по трубе турбинка начинает вращаться, причем частота вращения турбинки пропорциональна скорости движения жидкости. Вращение стального стержня в поле постоянного магнита индукционного преобразователя генерирует в катушке импульсы напряжения, частота которых пропорциональна частоте вращения турбинки, а следовательно, и расходу жидкости. Наличие в жидкости твердых примесей значительно ухудшают качество подшипников, увеличивают трение и погрешность расходомеров. Поэтому турбинные расходомеры применяют, в основном, для измерения расхода чистых жидкостей.

Для измерения расхода воды и других электропроводных жидкостей используются *индукционные расходомеры* (рис.53). В таких расходомерах используется эффект возникновения элект-

рического тока в электрическом проводнике, перемещающемся в магнитном поле.

Проводником является жидкость, протекающая по трубе, выполненной из изоляционного материала и находящейся между полюсами магнитной системы 2.

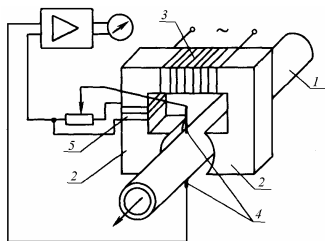


Рис. 53

Магнитный поток возбуждается переменным током промышленной частоты в обмотке 3. При протекании жидкости между диаметрально расположенными электродами 4 возникает ЭДС, пропорциональная средней скорости потока среды, и следовательно, расходу жидкости.

ЭДС преобразователя усиливается усилителем переменного тока и подается на указатель. Значение ЭДС может также измеряться и регистрироваться автоматическим потенциометром переменного тока.

Такие расходомеры применимы в различных областях химической промышленности тогда, когда другие методы расхода непригодны, например, для измерения расхода вязких, агрессивных и сильно загрязненных жидкостей. Поскольку наличие твердых частиц не влияет на результаты измерений, метод применим для контроля процесса обогащения – измерения расхода пульпы (смесей уголь-вода, песок-вода и др.).

Подобные расходомеры безинерционны и могут служить для измерения расхода быстропеременных и пульсирующих потоков.

Индуктивным способом измеряют также расходы жидких металлов, таких как натрий, ртуть, висмут в системах охлаждения ядерных реакторов.

Расход определяется также *тепловыми методами*, основанными на измерении зависящего от расхода теплового параметра (температуры, разности температур или производных от этих величин) контролируемого потока или контактирующего с ним тела.

Тепловые расходомеры состоят из нагревательного элемента и устройства для измерения температур потока или контактирующего с потоком тела. Они различаются способом нагрева, расположением нагревателей и термопреобразователей, принципом действия.

Наиболее распространены тепловые расходомеры с электрическим нагревом – калориметрические, термоанемометрические и с наружным нагревом.

Калориметрические расходомеры применяют преимущественно для измерения расхода газа. На рис.54 показана схема калориметрического расходомера, состоящая из расположенных внутри трубопровода нагревателя 3 и двух термопреобразователей 1 и 2 для измерения температуры потока T_1 и T_2 после нагревателя. Разность температур $\Delta T = T_2 - T_1$ и является функцией расхода.

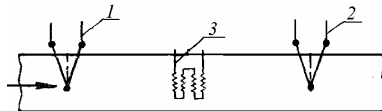


Рис.54

В основном калориметрические расходомеры применяют для исследовательских и экспериментальных работ, в связи с недостаточной надежностью длительной работы нагревательных элементов в тяжелых эксплуатационных условиях. Их можно использовать в качестве образцовых приборов для поверки и градуировки других расходомеров, особенно массовых, измеряющих большие расходы газа, для которых практически нет образцовых поверочных установок.

Приборы, основанные на зависимости между количеством тепла, теряемым непрерывно нагреваемым телом, и скоростью потока газа или жидкости, в котором это тело находится, называются термоанемометрами.

Обычно в качестве первичного преобразователя служит тонкая проволока из платины, никеля или вольфрама с диаметром от 0.005 до 0.3 мм и длиной от 0.5 до 10 мм. Концы проволочки привариваются к укрепленным на каком-либо основании (например, эбонитовом) стерженькам из манганина или платины. Проволочка включается в качестве плеча в электрический мост и нагревается на несколько сот градусов выше температуры измеряемой среды. На рис.55 показан термоанемометр, питаемый постоянным током.

Ток, нагревающий проволоку, поддерживается постоянным и измеряется изменением сопротивления, вызванным ее охлаждением: $R = f(v)$. Подбором параметров и питания схемы добиваются того, что при нулевой скорости газа она находится в равновесии. Отк-

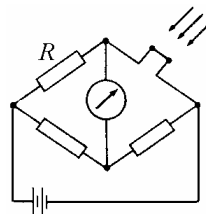


Рис.55

лонение стрелки гальванометра служит мерой скорости потока.

Термоэлементы из платины и торированного вольфрама нагреваются примерно до 500°C . Чем выше температура нагрева проволоки, тем меньше влияет на точность измерений температура измеряемой среды. Однако при высоких температурах материал проволоки стареет и вызывает нарушение градуировки. Скорость старения можно снизить применением отожженной проволоки. Иногда вместо проволоки используют пленочные и полупроводниковые преобразователи.

Термоанемометрический метод обладает рядом преимуществ: высокая чувствительность обеспечивает возможность измерения малых и средних скоростей потоков; возможность измерения быстро меняющихся скоростей потоков; миниатюрные размеры преобразователя и малая инерционность делают их удобными для исследования распределения скоростей в каналах газовых и гидравлических машин, аппаратов и других объектов.

Эксплуатационная надежность значительно выше у тепловых расходомеров с наружным нагревом, у которых как нагреватель, так и термопреобразователи расположены на наружной стенке трубопровода. Тепло к потоку передается через стенку трубы и далее через пограничный слой.

На рис.56 показан тепловой расходомер с наружным обогревом, который применяют преимущественно при небольших

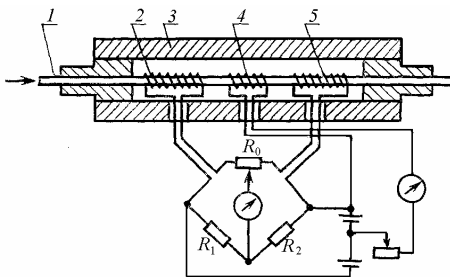


Рис.56

диаметрах труб и который можно назвать квазикалориметрическим, так как по своим характеристикам он близок к калориметрическому расходомеру.

На трубе 1 укреплены нагреватель 4 и два симметрично расположенных от него термопреоб-

разователя 2 и 5. Весь измерительный участок трубы 1 необходимо хорошо изолировать и поместить внутри пластмассового или металлического кожуха 3 для того, чтобы устранить влияние внешней среды и стабилизировать температуру. Изоляцию выполняют обычно из нескольких слоев алюминиевой фольги и стеклоленты. При значительных диаметрах используют трубы из

пенопласта. Проволочные термопреобразователи 2 и 5 вместе с постоянными сопротивлениями R_1 и R_2 образуют плечи электрического моста. Для регулировки нуля используют манганиновое сопротивление R_0 .

Тепловые расходомеры с внешним нагревом применяют в различных случаях независимо от давления измеряемого вещества.

Основным недостатком является значительная инерционность, которая может быть снижена применением корректирующих измерительных схем. Погрешность лежит в пределах $\pm(2-3)\%$ предела шкалы.

Принцип действия *ультразвукового расходомера* основан на смещении звукового колебания движущейся жидкостью. Для измерений расхода используются частоты от 50 кГц до многих мегагерц. В качестве измерительного преобразователя ультразвуковых расходомеров используют пьезоэлектрический вибратор, изготовленный в виде помещенной в корпус мембраны с наклеенными на нее пьезокристаллами. При приложении к пьезокристаллу электрического напряжения указанных частот кристалл начинает вибрировать, генерируя ультразвуковые волны. Наиболее распространенными материалами для изготовления пьезоэлементов являются кварц, титанат бария, цирконат свинца. Эти пьезоэлектрические материалы имеют большой пьезомодуль и высокую диэлектрическую проницаемость.

Скорость распространения ультразвуковых колебаний в движущихся жидкостях изменяется в зависимости от скорости перемещения самой жидкости. Время прохождения сигнала против направления потока превышает время его прохождения по направлению потока. Разность этих времен, определяемая тем или иным способом, оказывается пропорциональной скорости потока. Объем жидкости, протекающей в единицу времени через данное сечение известной геометрической формы, может быть определен путем измерения средней скорости потока.

Наибольшее распространение на практике нашли ультразвуковые расходомеры, у которых преобразователи расхода состоят из двух пар пьезоэлементов (двухканальные ультразвуковые элементы). Применение двух каналов позволяет одновременно посылать ультразвуковые волны в двух противоположных направлениях. При этом изменение параметров среды одинаково

влияет на оба сигнала и не оказывает влияния на измеряемую разность времен их прохождения.

Для определения разности времен $\Delta\tau$ применяют несколько методов, в связи с чем ультразвуковые расходомеры разделяются на:

- фазовые, измеряющие разность фазовых сдвигов ультразвуковых колебаний, направляемых по потоку и против него;
- частотные, основанные на измерении разности частот повторения коротких импульсов или пакетов ультразвуковых колебаний, направляемых одновременно по потоку и против него;
- время-импульсные, основанные на периодическом измерении разности времени прохождения очень коротких импульсов (длительностью 0.1-0.2 мкс) по направлению скорости потока и против него.

Время-импульсные расходомеры применяются редко, так как даже при максимальном расходе значение разности времен очень мало (10^{-6} - 10^{-7} с). Измерять эту разность с погрешностью не более 10^{-8} - 10^{-9} с довольно сложно.

Фазовый метод позволяет обойти трудности, возникающие при измерениях малых интервалов времени, что является его достоинством. Однако показания фазового расходомера зависят от скорости распространения ультразвука в жидкости.

Преимущество частотных расходомеров заключается в том, что показания расходомера не зависят от физических параметров жидкости, хотя их максимальная точность в силу ряда причин, в том числе и из-за небольшого значения разностной частоты, ограничивается значением $\pm 1-2\%$, так же, как и в фазовых расходомерах.

Кроме перечисленных расходомеров, у которых направление распространения ультразвуковых колебаний направлено либо параллельно потоку, либо составляет угол с осью трубопровода, имеется особая разновидность расходомеров, у которых ультразвуковые колебания направляются перпендикулярно к движению потока. По мере увеличения средней скорости потока эти колебания все больше будут отклоняться по направлению скорости. Соответственно будет меняться количество энергии, поступающее на приемный пьезоэлемент, расположенный на противоположной стороне трубы.

Ультразвуковые расходомеры применяют для измерения расхода любых жидкостей, в том числе агрессивных и вязких, в любых трубах диаметром от 10-20 мм и выше.

Недостатками ультразвуковых расходомеров являются сложность измерительных схем, а также зависимость показаний от физических свойств и температуры среды.

Довольно широко для измерения расходов применяется *меточный метод*, предусматривающий введение в контролируемый поток небольшого потока легко контролируемого вещества и определение времени прохождения им определенного участка пути.

В зависимости от вида метки расходомеры подразделяют на расходомеры с химической меткой, с радиоактивной меткой, с оптической меткой и т.п.

В общем случае принципиальная схема меточных расходомеров имеет вид, показанный на рис.57.

Метка создается элементом 1. Элементы 2 и 3 являются устройствами для обнаружения метки (детекторы метки). Расстояние L между двумя детекторами служит измерительной базой. Измерив время Δt перемещения метки на участке длиной L , определяют скорость метки, а затем и расход.

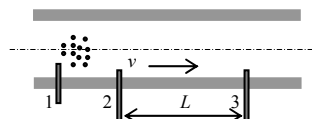


Рис.57

В приборах с химической меткой для измерения расхода воды применяют солевую метку, изменяющую электропроводность воды. Пиковые изменения электрической проводимости, обусловленные перемещением метки по контролируемому участку фиксируются с помощью осциллографа двумя парами электродов. Первую пару электродов устанавливают в непосредственной близости от места ввода меточного раствора, а вторую — на некотором расстоянии от нее. Время перемещения метки между контрольными сечениями определяют по осциллограмме. Основным недостатком таких расходомеров является трудоемкость приготовления солевых растворов.

Для определения расходов газа в качестве химической метки вводят галоидосодержащий газ (фреон, четыреххлористый углерод и т.п.).

В качестве метки радиоактивных расходомеров используют порцию ^{24}Na , являющегося источником γ -излучения с периодом полураспада 15 ч. ^{24}Na мгновенно вводят в центр проходяще-

го по трубопроводу потока контролируемой среды. Количество вводимого изотопа незначительно даже при больших скоростях потока. Продолжительность пробега определяется двумя счетчиками, измеряющими интенсивность γ -излучения в соответствующих сечениях трубопровода. Метод является бесконтактным и успешно применяется как для измерения расхода газа, так и жидкости.

Расходомеры с оптической меткой имеют дозирующее устройство, при помощи которого в поток периодически вводится порция вещества, изменяющего какое-либо оптическое свойство среды (обычно прозрачность). В качестве детектора чаще всего применяется фотоэлектрическое устройство.

Погрешность меточных расходомеров колеблется в широких пределах: имеются приборы как с погрешностью $\pm 0.2\%$, так и с погрешностью порядка 2-3 %.

Меточные расходомеры применяют для градуировочных работ, для поверки расходомеров на месте их установки, для периодического измерения расхода в различных промышленных и лабораторно-исследовательских установках.

В последнее время все чаще на практике используют *корреляционные расходомеры*. Корреляционный метод основан на использовании случайных возмущений (например, местных и нерегулярных колебаний давления, температуры, электропроводности, перемещений электрических зарядов, скорости, оптической проницаемости потока), вызванных турбулентностью потока или особыми течениями многофазных смесей.

В корреляционных расходомерах осуществляется регистрация статически изменяющихся сигналов двух последовательно установленных в потоке датчиков. По этим сигналам коррелятором определяется время пробега потоком расстояния между датчиками, а затем по найденному времени и геометрии измерительного участка вычисляют искомый расход.

Корреляционные методы расхода известны давно, но так как связаны со значительными затратами, то применялись только для решения узко специальных задач. Выпуск в настоящее время быстродействующих недорогих элементов микроэлектронной техники обеспечил широкое применение корреляционных расходомеров.

3.2. Измерение количества жидкостей и газа

Рассматривая расходомеры, нельзя не упомянуть о счетчиках количества. Счетчиком называется прибор, измеряющий количество вещества, протекающего через трубопровод в течение произвольно взятого промежутка времени. Количество вещества определяется разностью двух последовательных показаний счетных указателей прибора в начале и конце этого промежутка. Показания счетчиков выражаются либо в единицах объема, либо в единицах массы.

Некоторые приборы обеспечивают одновременное измерение расхода и количества. Расходомер может быть снабжен особым механизмом – интегратором, по показаниям которого количество измеряемого вещества определяется за какой-то промежуток времени, а счетчик – указателем, показывающим и записывающим расход измеряемого вещества в единицу времени.

По принципу измерения счетчики жидкостей и газов делятся на две группы: объемные и скоростные.

В *объемных счетчиках* жидкость измеряется отдельными, равными по объему дозами. Число доз суммируется счетным механизмом, а счетным указателем показывается равное сумме объемов протекших доз количество жидкости.

Объемные счетчики разделяются на счетчики с принудительным вытеснением жидкости (с дисковым поршнем, с кольцевым поршнем, с овальными шестернями, с цилиндрическим поршнем, ротационные и др.), счетчики со свободным сливом жидкости (со стационарными мерными баками, с опрокидывающимися камерами, барабанные и др.) и счетчики с вытеснением газа (барабанные, ротационные и др.).

В *скоростных счетчиках* жидкость, протекающая через патрубков или камеру прибора, приводит во вращение вертушку (турбинку) или крыльчатку с угловой скоростью, пропорциональной скорости потока. Число оборотов вращающегося элемента суммируется счетным механизмом, а счетным указателем указывается количество вещества.

Скоростные счетчики выполняют с аксиальным подводом жидкости (с винтовой турбинкой), с тангенциальным подводом жидкости (одноструйные и многоструйные с вертикальной крыльчаткой), с аксиальным подводом газа (с крыльчатым колесом).

3.2.1. Объемные счетчики

Работа объемных счетчиков основана на принципе измерения объема. Также счетчики нашли применение в измерении жидких нефтепродуктов, агрессивных жидкостей, жидких пищевых продуктов. Благодаря высокой точности (погрешность показаний в диапазоне измерений 1:20 составляет $\pm 0.5\%$) объемные счетчики применяют для измерения наиболее дорогостоящих жидкостей.

В зависимости от принципа действия объемные счетчики подразделяют на две большие группы: счетчики со свободным сливом, работающие под атмосферным давлением и счетчики с принудительным вытеснением, работающие под давлением, имеющимся в трубопроводе.

3.2.1.1. Счетчики со свободным сливом (опорожняющиеся счетчики)

Счетчик со свободным сливом состоит из одной или нескольких мерных камер (баков), которые автоматически заполняются или опорожняются. Под действием поплавковых или иных устройств, а также вследствие смещения центра тяжести жидкость из камер сливается, а сама камера опрокидывается или вращается.

Конструкции счетчиков со свободным сливом позволяют измерять объемы сильно загрязненных сред. Погрешности лучших моделей счетчиков $\leq 0.1\%$.

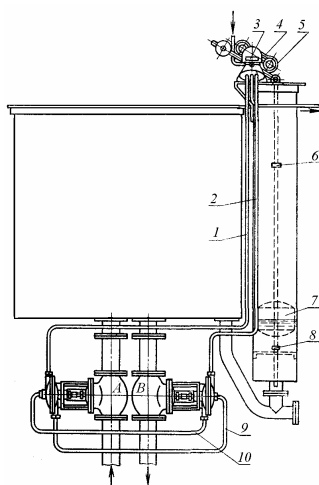


Рис.58

Значительным преимуществом таких счетчиков является возможность измерения малых расходов, так как счетчики чувствительны к малым количествам среды, поступающей в измерительные камеры.

На рис.58 показан один из опорожняющихся счетчиков – сливной счетчик со стационарным мерным баком и действующим от поплавка автоматическим управлением.

При наполнении бака (клапан *A* открыт, а *B* – закрыт) уровень жидкости в вертикальной трубе поднимается и увлекает за собой поплавок 7, который в конце наполнения доходит до упора 6 и перемещает штангу вверх. Штанга поворачивает соединенную с ней шарнирно кулису 5, а находящийся

При наполнении бака (клапан *A* открыт, а *B* – закрыт) уровень жидкости в вертикальной трубе поднимается и увлекает за собой поплавок 7, который в конце наполнения доходит до упора 6 и перемещает штангу вверх. Штанга поворачивает соединенную с ней шарнирно кулису 5, а находящийся

на кулисе передвижной груз 4, переместившись влево до упора, завершает поворот кулисы. С кулисой соединен кран, открывающий доступ воде, которая, проходя через линию 1, воздействует на мембрану привода, закрывает клапан А, а проходя через линию 10, открывает клапан В. Перед этим мембраны клапанов должны быть разгружены от воды через линии 2 и 9. Разгрузка этих линий также регулируется кулисой 5.

При разгрузке мембраны привода клапана А сливающаяся напорная вода не попадает непосредственно в линию 2, а проходит через мембрану привода клапана В. Поэтому можно добиться такого положения, при котором этот клапан будет открываться только в том случае, если клапан А уже закрыт. Первый этап управления заканчивается и мерный бак вместе вертикальной трубой опорожняются через клапан В. Поплавок, опускаясь, достигает упора 8 и под действием его веса штанга перемещается вниз, поворачивает кулису, а подвижной груз, перекатившись вправо, завершает ее поворот.

Напорная вода поступает теперь в мембранные приводы клапанов через линии 2 и 9, в то время как линии 1 и 10 опорожняются. Цикл управления работой мерного бака на этом заканчивается. Число наполнений бака фиксируется связанным с кулисой счетным механизмом 3.

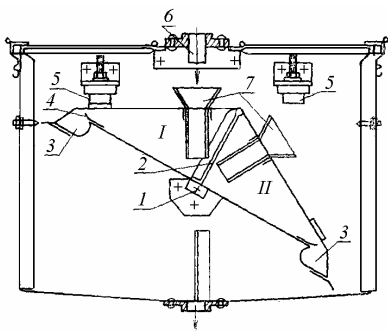
Счетчики выполняются также с двумя мерными баками.

Такие измерительные устройства достаточно надежны в работе и практически не требуют ухода. Они применяются для измерения количества жидкостей не только очищенных, но и со взвешенными частицами. Выпадение осадков в баках предотвращается установленными в них мешалками.

Для измерения количества самых разнообразных жидкостей, имеющих малую вязкость, применяют *счетчики с опрокидывающимися камерами*.

Мерные камеры I и II (рис.59) выполняют призматической формы. Они имеют общую разделительную стенку 2, под которой находится шарнир, позволяющий поворачивать камеры на определенный угол.

Воронка 7, которой снабжена каждая камера, предотвращает разбрызгивание жидкости и направляет ее в нижнюю часть камеры. В виде желобов к каждой из камер прикреплены дополнительные объемы 3. Когда камеры опорожнены, центр тяжести



системы находится на оси ее вращения 1. Сечение камер треугольной формы, поэтому центр тяжести жидкости находится на одной вертикали с центром вращения системы до тех пор, пока уровень жидкости, поступающей в камеру I, не поднимется до кромки порога 4. При дальнейшем наполнении камеры жидкость переливается через порог в желоб, центр тяжести смещается и под действием опрокидывающего момента система выходит из равновесия. При повороте системы жидкость поступает в камеру II, после наполнения которой система поворачивается в первоначальное положение, и процесс измерения продолжается. Жидкость из камер сливается в нижнюю часть корпуса, а из нее отводится к месту назначения.

Ось 1, поворачивающаяся при каждом перемещении камер, приводит в действие счетный механизм. Угол качания камер ограничен упорами 5, снабженными демпфирующим устройством.

Типичным примером опрокидывающегося счетчика служит барабанный счетчик (рис. 60).

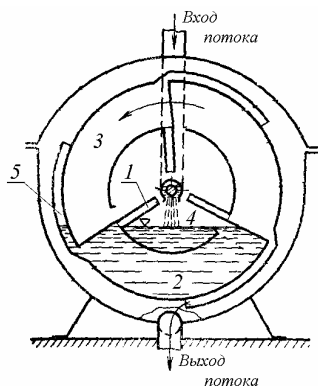


Рис. 60

ды. Затем при дальнейшем вращении среда из камеры 2 выливается через выпускное отверстие 5. Одновременно камера 3 снова

На рисунке измерительная камера 2 почти заполнена контролируемой средой. После окончательного ее заполнения контролируемая среда через щель поступает в камеру 3. В результате этого центр тяжести системы смещается влево и барабан поворачивается по направлению стрелки. При этом измерительная кромка 4 выходит из контролируемой среды. Затем при дальнейшем вращении среда из камеры 2 выливается через выпускное отверстие 5. Одновременно камера 3 снова

начинает наполняться. Для удаления воздуха из измерительной камеры при ее заполнении предусмотрена трубка 1.

Подобные счетчики имеют большой диапазон измерений, высокую и стабильную во времени точность, надежны в эксплуатации. Соприкасающиеся с жидкостью детали могут быть изготовлены из коррозионностойких материалов, в том числе и из керамики.

Барабанные счетчики могут использоваться для измерения расхода спирта, нефтепродуктов, растворителей, кислот, щелочей, сахарных растворов, сиропа, конденсата и др.

3.2.1.2. Счетчики с принудительным вытеснением (вытесняющие счетчики)

Вытесняющие счетчики применяют во всех случаях, когда точность расходомеров с сужающими устройствами недостаточна. Значительным преимуществом счетчиков этого типа является повышенная точность при измерении пульсирующих потоков.

Основными элементами счетчиков с принудительным вытеснением являются измерительная камера и подвижный рабочий орган (поршень, диск, лопасть, овалы, шестерни и т.д.), который приводится в движение контролируемой средой. Погрешности измерения вызываются, главным образом, щелевыми потерями, т.е. утечками между стенкой измерительной камеры и рабочим органом, причем существенную роль играет вязкость измеряемой среды. Возрастающее при перегрузке счетчиков истирание материала способствует увеличению щелевых утечек. Поэтому погрешность быстро возрастает при измерении малых расходов. Вытесняющие счетчики чувствительны к загрязнениям, так как зазор между корпусом измерительной камеры и рабочим органом мал. Это вызывает необходимость фильтрации контролируемой среды. Регулирующие устройства, встраиваемые в счетчик, обеспечивают его работу с учетом влияния утечки жидкости, а также допусков на изготовление измерительной камеры и рабочего органа.

Рассмотрим некоторые из моделей вытесняющих счетчиков, наиболее часто применяемые на практике.

Действие *счетчика с дисковым поршнем*, показанном на рис.61, основано на принудительном вытеснении из измерительной камеры определенных объемов жидкости.

Поршень, состоящий из диска 3, двух шаровых сегментов 1, расположенных в его центре и оси 16, совершает колебательное

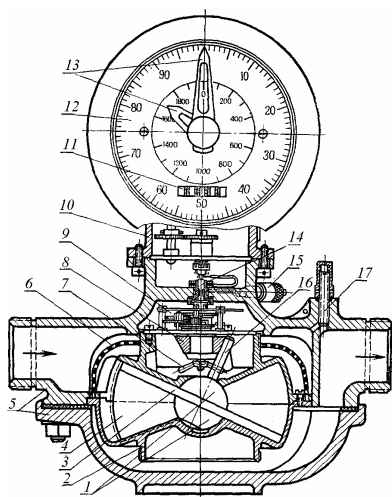


Рис.61

движение под влиянием разности давлений на входе в измерительную камеру 2 и на выходе из нее. Перед входом в измерительную камеру установлена предохранительная сетка 6, защищающая прибор от засорений, попавших в поток на участке между счетчиком и фильтром. Верхняя и нижняя поверхности диска плоские, а боковая выполнена в виде шарового сегмента. Направляющей для поршня служит перегородка 4, которая входит в имеющуюся на диске радиальную прорезь.

Оба края прорези скошены. Этим предотвращается заедание диска при его колебательном движении. Ось диска, выведенная из камеры, постоянно соприкасается с поверхностью направляющего корпуса 8, который посажен на втулку. Внутри втулки имеется ось, несущая в нижней части поводок 7 приводного валика, а в верхней части – трибку.

При протекании жидкости через измерительную камеру, диск совершает колебательное движение, причем поверхности диска катятся по конусам камеры, а его радиальная прорезь перемещается вверх и вниз вдоль радиальной перегородки. Колебательное движение диска преобразуется во вращательное осью диска, которая, перемещаясь по поверхности направляющего конуса, вращает поводок приводного валика. Через редуктор 9 движение передается счетному механизму, учитывающему число колебаний диска в камере. Счетный механизм со стрелочным 13 и роликовым 11 указателями и циферблатом 12 размещен в головке 10. Редуктор соединен со счетным механизмом осью 14, которая в месте прохождения через герметическую разделительную перегородку уплотнена специальной набивкой. Набивка подается к передаточной оси через масленку 15. Обычно набивка

имеет густую консистенцию и одного поворота крышки масленки достаточно для уплотнения оси на несколько недель.

Погрешность показаний счетчика регулируется путем изменения передаточного числа редуктора, либо путем изменения величины потока жидкости, пропускаемого, минуя измерительную камеру, с помощью винта 17. Верхняя и нижняя части корпуса 5 прибора соединены болтами.

Счетчики с дисковым поршнем характеризуются высокой чувствительностью, а следовательно, малым нижним пределом измерений.

В качестве бытовых счетчиков расхода воды, для измерения количества горючих жидкостей и масел используют *счетчики с кольцевым поршнем*. Разработаны конструкции, которые можно использовать для пищевых продуктов: вина, молока, соков и др.

Кольцевой счетчик (рис.62) состоит из двух полых концентрично установленных цилиндров, которые соединены между собой перегородкой (на рисунке цилиндры показаны жирными линиями).

Кольцевой поршень с радиальной прорезью (на рисунке показан в виде тонко обведенного кольца) помещен в измерительную камеру, образованную двумя цилиндрами. При работе счетчика жидкость, поступающая в измерительную камеру, оказывает давление на стенки кольцевого поршня и, вследствие разности давлений на входе в измерительную камеру и выходе из нее, создает усилие, перемещающее поршень.

При своем движении поршень перемещается радиально вдоль разделяющей перегородки измерительной камеры. Одновременно ось поршня z скользит по внутренней стенке внутреннего цилиндра. Таким образом, поршень перемещается по внутренней и наружной стенкам измерительной камеры. За каждый цикл своего перемещения поршень вытесняет из нее определенный объем жидкости. Для входа и выхода контролируемой среды предусмотрены входное E и выходное A отверстия. Конструкция исклю-

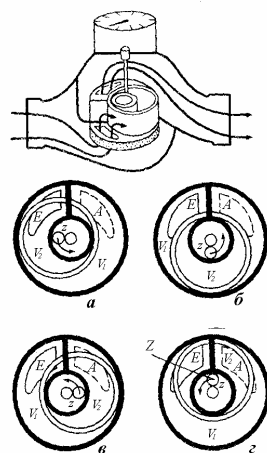


Рис.62

чает возможность их соединения при заполнении и опорожнении объемов v_1 и v_2 .

Погрешность таких счетчиков зависит от точности изготовления поршня и измерительной камеры.

В качестве измерителей расходов жидкостей и газов при расчетах с потребителями, а также в качестве датчиков и сигнализаторов в системах управления и регулирования широкое распространение получили *счетчики с овальными шестернями*.

Прибор состоит из измерительной камеры, в которой находятся две сцепленные между собой овальные шестерни, обкатывающие друг друга во встречных направлениях (рис.63).

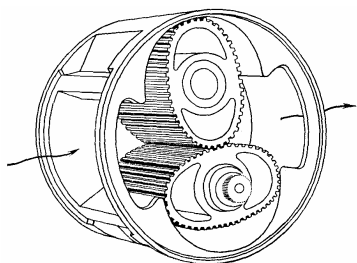


Рис.63

Под действием разности давлений перед измерительной камерой и за ней, а также под действием вращающих моментов, возникающих вследствие овальной формы шестерен, шестерни вращаются. При каждом полном обороте шестерен выдаются одинаковые объемы жидкости. Суммарный объемный расход определяется счетчиком по числу оборотов. Принцип действия счетчика с овальными шестернями показан на рис.64.

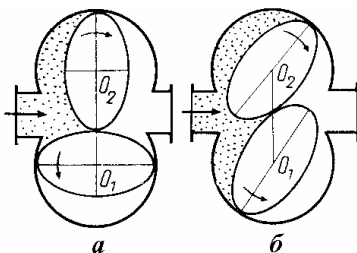


Рис.64

рис.64,*а* тонкими стрелками. Под действием создаваемых потоком крутящих моментов, шестерни продолжают вращаться. При этом жидкость, находящаяся между верхней шестерней и стенкой перемещается (рис.64,*б*). Дальнейшее вращение вызывает последовательное вытеснение соответствующих порций жидкости.

Такие счетчики являются быстродействующими. При небольших конструктивных размерах они позволяют измерять зна-

чительные объемные расходы. Для них характерны высокая точность в широком диапазоне расходов, независимость показаний от вязкости среды, малые потери давления, а также значительный вращающий момент даже при пуске.

К числу основных недостатков следует отнести высокий уровень акустического шума, а также чувствительность к загрязнению контролируемой среды.

Гораздо меньшей чувствительностью к загрязнению среды обладают *счетчики с цилиндрическими поршнями*, отличающиеся числом, расположением и уплотнением поршней. Счетчики с цилиндрическими поршнями используются для объемного измерения бензина, керосина, масел, нефти, мазута. Более подробно остановимся на принципе действия однопоршневого счетчика (рис.65).

В положении *а* через четырехходовой кран *1* жидкость поступает в полость над поршнем *5* измерительной камеры *б*. Разность давлений жидкости над поршнем и под ним вызывает его перемещение сверху вниз. При этом жидкость, находящаяся под поршнем вытесняется через кран в отводящий трубопровод. Поршень перемещается до тех пор, пока не произойдет переключение крана.

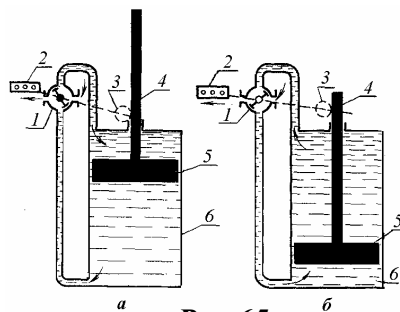


Рис.65

В положение *б* кран повернут на 90^0 по сравнению с положением *а*. При этом поршень вытесняет находящуюся под ним жидкость в отводящий трубопровод. Перемещаясь, поршень через шток *4* и шестерню *3* воздействует на счетный механизм *2*.

Однопоршневые счетчики применяются для измерения количества холодной и горячей воды, неагрессивных жидкостей, а также очень вязких жидкостей, имеющих консистенцию пасты.

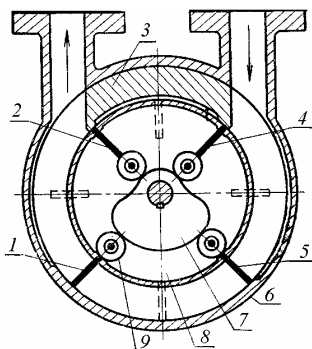
К числу недостатков относятся большой вес и большие габаритные размеры при сравнительно малой пропускной способности. Потеря давления в этих счетчиках почти вдвое больше, чем в счетчиках с дисковым или кольцевым поршнем того же размера.

К достоинствам кроме малой чувствительности к загрязнениям следует отнести малое влияние вязкости и температуры измеряемой жидкости на его показания.

Для измерения количества жидкостей при больших расходах используют *ротационные счетчики с прямыми лопастями* (существуют конструкции счетчиков и с изогнутыми лопастями). Для таких счетчиков характерна небольшая потеря давления. Кроме того, по сравнению со счетчиками с цилиндрическим поршнем, они имеют меньший вес и габаритные размеры.

Ротационный счетчик с прямыми лопастями показан на рис.66.

Через входное отверстие жидкость поступает в полость, ограниченную цилиндрическими поверхностями корпуса 6 и



ротора 8 и оказывает давление на лопасть 5. Ротор, вместе с заключенными в нем лопастями 2 и 4, приводится в движение. Ролики 9 катятся по неподвижному кулачку 7, форма которого подобрана таким образом, что если одна лопасть находится вне ротора, преграждая путь жидкости, то парная с ней лопасть расположена внутри ротора. Жидкость, замкнутая между лопастями 1 и 5 перемещается вместе с

Рис.66

ними по направлению к выходному отверстию. После того, как ротор повернется на 45° , лопасть 1 начнет продвигаться внутрь ротора, а лопасть 4 – из ротора. Затем, при дальнейшем вращении ротора, лопасть 4 замкнет весь объем между лопастями 4 и 5. Вставка 3 препятствует протеканию жидкости от входного отверстия к выходному.

За полный оборот ротора через счетчик проходит количество жидкости, равное разности объемов цилиндров корпуса и ротора за вычетом объема выступающих из ротора лопастей.

В основном ротационные счетчики применяют в магистральных трубопроводах большой пропускной способности.

3.2.1.3. Счетчики с вытеснением газа

Рассмотрим несколько конструкций объемных газовых счетчиков, получивших наибольшее распространение.

Для установки на газопроводах дальнего газоснабжения и при измерении расхода дорогостоящих газов применяют *ротационные счетчики*.

Основными элементами ротационных счетчиков (рис.67) являются гладкие роторы в форме восьмерки связанные между собой шестернями и заключенные в корпус, выполненный в виде неподвижных цилиндров неполного кругового сечения. При протекании газа роторы вращаются, отсекая в камере определенные дозы газа и вытесняя их из счетчика. Объем вытесненных доз суммируется счетным механизмом.

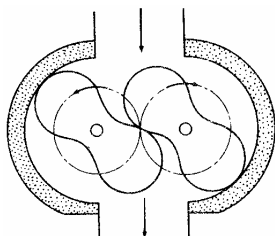


Рис.6

Зазор между поверхностями роторов, составляющий 0.05-1 мм, позволяет роторам не соприкасаться при вращении.

В ротационных счетчиках предусмотрено встроенное промывочное устройство, при помощи которого чувствительный к загрязнению контролируемой среды счетчик очищается.

При учете давления, температуры и влажности контролируемого газа и непрерывной корректировке показаний может быть обеспечена высокая точность показаний (погрешность менее 1 %). Поэтому, несмотря на высокую стоимость, применение ротационных счетчиков неизбежно при требованиях повышенной точности, а также при низком давлении газа.

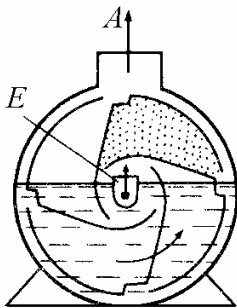
Для лабораторных работ, требующих большой точности измерений, а также в качестве контрольных счетчиков в промышленных условиях, применяют *барабанные счетчики (мокрые газовые счетчики)*.

Барабанный счетчик состоит из корпуса-кожуха, барабана с измерительными камерами и счетного механизма. Принцип действия такого счетчика показан на рис.68.

Барабан разделен перегородками на четыре камеры равного объема. Частично он погружен в жидкость, заполняющую нижнюю часть корпуса.

Через входное отверстие *E* поступает контролируемая среда. Под действием давления этой среды измерительная каме-

ра, включающая часть объема, отделенного запорной жидкостью, начинает поворачиваться вокруг оси. По мере вращения измерительная камера заполняется, а затем отсекается дальнейшее поступление среды и происходит ее вытеснение из измерительной камеры, заполненной жидкостью.



На погрешность показаний барабанного счетчика в значительной степени влияет уровень жидкости. Поэтому перед работой корпус счетчика устанавливается по уровню. При спокойной нагрузке погрешность показаний хорошо отрегулированного счетчика составляет $\pm(0.2-1 \%)$, благодаря чему они используются в качестве образцовых при проверке бытовых газосчетчиков и (при малых расходах) ротационных.

Рис.68

3.2.2. Скоростные счетчики

Принцип действия скоростных счетчиков основан на измерении количества по числу оборотов крыльчатки или вертушки, угловая скорость которых пропорциональна скорости жидкости, протекающей через прибор.

По конструкции измерительного устройства скоростные счетчики можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся скоростные счетчики с вертикальными турбинками, в которых поток жидкости, поступающий на турбинку, направлен тангенциально к окружности, описываемой средним радиусом лопаток. Ко второй группе принадлежат счетчики с винтовыми турбинками, в которых поток жидкости направлен аксиально, т.е. параллельно оси турбинки.

Скоростные счетчики применяют для различных жидкостей, за исключением очень вязких жидкостей, содержащих взвешенные частицы, вызывающие засорение и износ опор.

3.2.2.1. Счетчики с тангенциальным подводом жидкости

В зависимости от распределения потока воды, поступающего на турбинку, существуют две разновидности счетчиков с тангенциальным подводом – *одноструйные* и *многоструйные*.

Если счетный механизм прибора вместе с циферблатом находится в воде, то счетчик называется «мокроходом», а если счетный механизм находится над водой и отделен от нее герметичной перегородкой, то «сухоходом». «Мокроходы» могут обеспечить более точное измерение, кроме того, счетный механизм у них не окисляется. Однако наличие примесей в воде вызывает засорение счетного механизма и покрытие циферблата осадком, что значительно затрудняет отсчет показаний.

На рис.69 показан *одноструйный водосчетчик с вертикальной турбинкой*.

Основание турбинки выполнено в виде пятиконечной звезды, каждый конец которой несет вертикальную прямоугольную пластину – лопасть. Поток воды, поступающей в корпус счетчика общей струей, тангенциально воздействует на лопатки турбинки с одной стороны от ее оси, приводит турбинку во вращение и вытекает через выходное отверстие.

Скоростной *многоструйный водосчетчик с вертикальной турбинкой* состоит, в основном, из тех же узлов, что и одноструйный, но турбинка, в отличие от последнего, размещена в направляющем кольце с отверстиями (рис.70)

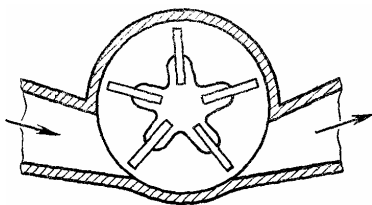


Рис.69

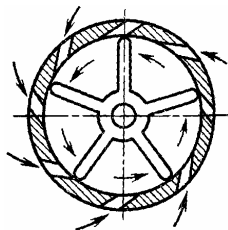


Рис.70

В направляющем кольце поток разделяется на несколько отдельных струй, которые воздействуют тангенциально со всех сторон на турбинку. Затем вода поднимается по спирали вдоль оси турбинки и через верхний ряд отверстий, направленных в противоположную сторону, поступает в верхнюю часть корпуса прибора, откуда уходит к месту потребления.

Одноструйные счетчики отличаются от многоструйных простотой конструкции, меньшей чувствительностью к загрязне-

ниям. Однако в одноструйных счетчиках имеет место односторонний износ подшипника.

К недостаткам одноструйного водосчетчика относится быстрый износ входных кромок отверстий направляющего кольца, а также возможность засорения отверстий, в связи с чем может быть нарушено равномерное распределение потока воды при его подходе к турбинке. Основным достоинством многоструйных счетчиков является исключение одностороннего давления на подшипник.

3.2.2.2. Счетчики с аксиальным подводом жидкости

Скоростные счетчики с аксиальной турбинкой, ось которой совпадает с осью трубопровода, а лопасти изогнуты по винтовой линии (рис.71), применяют для измерения количества воды при больших расходах.

Такие счетчики относятся к группе скоростных приборов, измеряющих количество жидкости по скорости ее протекания.

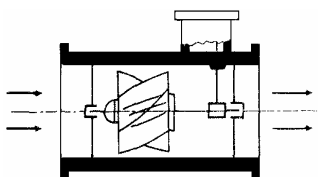


Рис.71

Вращение турбинки, вызванное воздействием потока на винтообразные лопасти, передается через ряд устройств к счетному механизму.

Для бесперебойной работы счетчика необходимо отсутствие завихрений в поступающем на турбинку потоке. Изменение профиля потока, вызываемое изгибом трубопровода обуславливает значительные погрешности. Во избежание этого необходимо предусматривать либо прямой участок трубопровода перед счетчиком, либо установку струевыпрямителя, который будет выравнивать поток воды, поступающей в прибор.

Использование таких счетчиков для измерения малых расходов нецелесообразно из-за погрешностей, вызываемых значительными энергетическими потерями в системе передачи от турбинки к счетчику числа оборотов.

В приборах типа «Поттер», выпускаемых фирмой De Havilland Ltd (рис.72), энергетические потери снижены за счет индуктивного преобразования скорости вращения турбинки в электрический сигнал измерителя скорости. Для этого в одну из лопастей или ступицу турбинки встраивают постоянный магнит. Сам корпус выполняют из аустенитной стали или пластмассы.

При вращении турбинки магнит индуцирует в расположенной на наружной части корпуса обмотке импульсы напряжения, частота которых пропорциональна числу оборотов турбинки. Струевыпрямителями, расположенными на входе и выходе измерительной камеры, устраняется неравномерное набегание контролируемого потока на лопасти турбинки.

Подобные счетчики Поттера являются довольно дорогостоящими приборами и используются для измерения расхода горючего в самолетах, а также для дистанционного измерения на трубопроводах.

Еще одним примером турбинного счетчика с бесконтактным электронным преобразователем может служить прибор Rotoquant фирмы Woppe a.Reuther, показанный на рис.73.

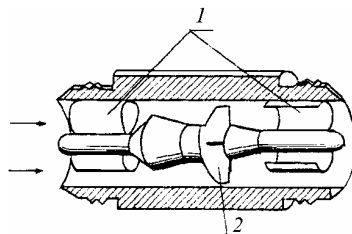


Рис.72

На наружной части корпуса прибора параллельно оси или вдоль окружности располагают один или несколько магнитов с индукционными катушками. При вращении турбинки, ступица и несколько пар лопастей которой выполнены из ферромагнитного материала, изменяется зазор магнитного контура. Изменение магнитного потока при этом возбуждает в обмотках переменное напряжение, частота которого пропорциональна числу оборотов турбинки.

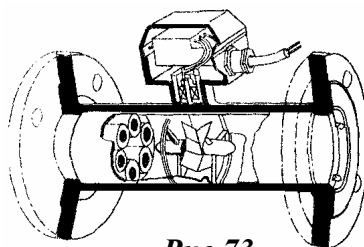


Рис.73

Счетчики Rotoquant мало чувствительны к наличию взвешенных частиц, так как имеют относительно большое проходное сечение. Кроме того, ввиду малой инерционности турбинки, их можно использовать и для измерения пульсирующих потоков.

3.2.2.3. Скоростные счетчики газа

Скоростные счетчики газа используются довольно редко, так как характеризуются небольшим движущим моментом. Кроме того, большая скорость газа, а значит и турбинки, вызывает ускоренный износ подшипников.

Работа скоростных счетчиков основана на таком же принципе, что и скоростных счетчиков жидкости. Протекающий по трубе газ приводит во вращение турбинку с угловой скоростью, пропорциональной скорости потока. Протекший объем газа, пропорциональный числу оборотов турбинки, суммируется счетным механизмом.

3.3. Метрологическое обеспечение измерения расхода и количества жидкости и газа

Образцовые расходомерные установки как 1-го, так и 2-го разрядов существенно отличаются друг от друга в зависимости от того, предназначены ли они для работы на жидкости или на газе и служат ли они для поверки объемных или массовых расходомеров и счетчиков.

Еще в 1975 г. были утверждены три поверочные схемы: одна (ГОСТ 8.145-75) для средств измерений объемного расхода жидкости в диапазоне $3 \cdot 10^{-6} - 10 \text{ м}^3/\text{с}$, другая (ГОСТ 8.142-75) для средств измерений массового расхода жидкости в диапазоне $1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^3 \text{ кг/с}$ и третья (ГОСТ 8.143-75) для средств измерений объемного расхода газа.

Здесь исходными для поверки средств измерений расхода наряду с образцовыми мерами массы, длины, времени, давления, температуры и вместимости приняты также образцовые расходомерные установки, возведенные в ранг первичных эталонов. Эталоны для жидкости созданы по типу классических образцовых расходомерных установок, а эталоном для газа является трубопоршневая расходомерная установка. Их метрологические характеристики следующие: среднее квадратическое отклонение результата измерения не более $2 \cdot 10^{-4}$ (объемный расход жидкости); $1.5 \cdot 10^{-4}$ (массовый расход жидкости) и $8 \cdot 10^{-4}$ (объемный расход газа); неисключенная систематическая погрешность θ_0 не более $7 \cdot 10^{-4}$, $1.6 \cdot 10^{-4}$ и $5 \cdot 10^{-4}$ соответственно.

Во главе поверочной схемы для измерения массового расхода жидкости находится *Государственный первичный эталон* единицы массового расхода жидкости в диапазоне $1 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^3 \text{ кг/с}$. Он состоит из комплекса следующих средств измерений: аппаратуры для измерений интервала усреднения; быстродействующего переключателя потока; напорной системы (системы передачи и стабилизации потока); устройства регулирования расхода; системы хранения рабочей среды; испытательного трубопровода с запорной арматурой; пульта управления. Диапазон усредненных значений массового расхода жидкости, воспроизводимых эталоном, составляет $15 \div 35 \text{ кг/с}$ со средним квадратическим отклонением резуль-

тата измерений (S_0), не превышающим $1.5 \cdot 10^{-4}$ при неисключенной систематической погрешности (\mathcal{O}_0), не превышающей $1.6 \cdot 10^{-4}$.

Государственный первичный эталон применяют для передачи размера единицы массового расхода жидкости рабочим эталонам непосредственным сличением.

В качестве *рабочих эталонов* применяют наборы расходомеров жидкости; средние квадратические отклонения результата поверки рабочих эталонов не должны превышать $2 \cdot 10^{-4}$. Рабочие эталоны применяют для поверки образцовых и рабочих средств измерений непосредственным сличением.

В качестве *образцовых средств измерений, заимствованных из других поверочных схем*, применяют образцовые гири 3-го разряда, образцовые электронно-счетные частотомеры 2-го разряда, образцовые термометры 1-го разряда, образцовые денсиметры 1-го разряда и образцовые средства измерений объемного расхода жидкости (наборы образцовых расходомеров). Образцовые средства измерений, заимствованные из других поверочных схем, применяют для аттестации образцовых средств измерений методом косвенных измерений.

В качестве *образцовых средств измерений* применяют наборы образцовых расходомеров и образцовые поверочные расходомерные установки с диапазоном измерений не менее 1:5. Пределы допускаемых относительных погрешностей (δ_0) образцовых средств измерений составляют от 0.1 до 1.5 %. Образцовые средства измерений применяют для поверки рабочих средств измерений непосредственным сличением.

В качестве *рабочих средств измерений* применяют расходомеры жидкости с пределами допускаемых относительных погрешностей от 0.25 до 5 %. Соотношение пределов допускаемых относительных погрешностей образцовых и рабочих средств измерений должно быть не более 1:3.

3.3.1. Поверка расходомеров жидкости

Одна из возможных схем образцовых расходомерных установок, работающих не только на воде, но и на других жидкостях, приведена на рис.74.

Она отличается от испытательной установки для счетчиков жидкости прежде всего устройством, обеспечивающим строгое постоянство расхода во время испытания, и перекидным уст-

ройством, направляющим установившийся поток в мерную емкость. Это устройство должно быть связано с секундомером, измеряющим время поступления потока в мерную емкость.

Центробежный насос 2 непрерывно подает воду из сливного резервуара 1 в напорный бак 4. Постоянный уровень в этом

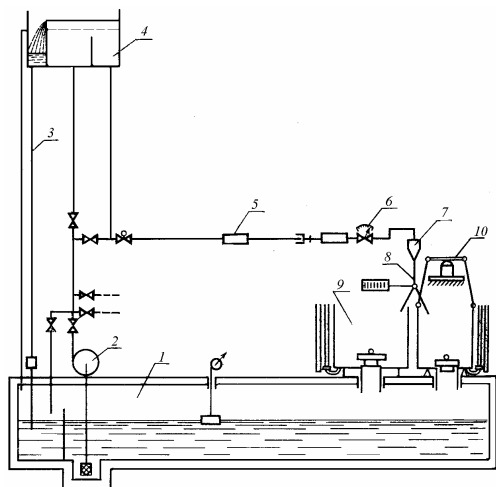


Рис. 74

баке поддерживается благодаря удалению избытка воды по сливному трубопроводу 3. Вследствие этого вода из напорного бака поступает к поверяемому прибору 5 под постоянным давлением, проходит через регулировочное устройство 6 и вытекает через направляющее сопло 7. В зависимости от положения перекидного устройства 8 струя направляется или в сливной 1 или же в мерный 9 бак. Если мерный бак установлен на весах 10, погрешность измерения поступившего в бак количества воды может быть снижена с ± 0.2 до ± 0.05 %.

При значительных расходах и, следовательно, больших диаметрах труб подобные установки становятся очень громоздкими и требуют больших помещений. Так, например, установка в английском городе Ист-Килбрайде расположена в двухэтажном здании с полуподвалом. Высота здания 18 м, рабочая площадь – более 3000 м²/ч. В связи с этим было предложено поверять расходомеры, имеющие большой предел измерения с помощью нескольких (четыре-пять) параллельно включенных, низкопределных контрольных расходомеров, предварительно поверенных и аттестованных весовым или объемным способом. Точность подобной расходомерной поверочной установки, естественно, зависит от погрешности низкопределных расходомеров, применяемых в качестве контрольных. При случайном характере погрешностей конт-

рольных расходомеров точность измерения ими суммарного общего расхода может быть выше точности каждого отдельного из них.

Перекидка потока происходит приблизительно за 1 с.

Длительность поступления воды в бак на весах измеряется с точностью до миллисекунды электронным секундомером, управляемым перекидным устройством.

Для переброски потока рабочей жидкости или в мерный бак (резервуар весового устройства) в начале опыта, или в пролетный бак в начале и конце опыта, применяют перекидные устройства различных типов.

На практике получил распространение качающийся двухканальный лоток.

3.3.2. Проверка счетчиков жидкости

Счетчики жидкости проверяются на испытательных установках объемным или весовым методом, но при этом счетчики воды проверяются только первым методом, а счетчики других жидкостей, в зависимости от их вязкости, первым или вторым методом.

Принципиальная схема испытательной установки *объемного типа* для проверки счетчиков воды изображена на рис.75. Ее основным элементом является проградуированный мерный бак 10, снабженный водомерной трубкой 8 и шкалой 6.

К установленному на стенде 3 поверяемому водосчетчику 2 вода поступает по трубе 1. Далее, проходя через регулировочный кран 4 и сопловую насадку 9, вода выливается в мерный бак. Необходимый расход воды у-

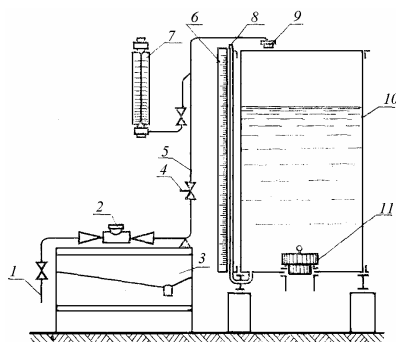


Рис. 75

становливают с помощью регулировочного крана 4, руководствуясь показаниями однотрубного ртутного дифманометра 7, измеряющего давление перед сопловой насадкой 9 и градуированного в единицах расхода. Герметичный клапан 11 служит для выпуска воды из бака. Вместо сопловой насадки применяют также и сопло, установленное на участке между регулировочным краном 5 и выходным отверстием трубы. Стенд 3 снабжен поддоном.

Погрешность показаний δV водосчетчика определяется по формуле

$$\delta V = \frac{V_{CЧ} - V_M}{V_M} \cdot 100\%,$$

где $V_{CЧ}$ – разность показаний водосчетчика после и до поверки, м^3 ; V_M – разность показаний мерного бака после и до поверки, м^3 . Если температура t_M в мерном баке или мернике отличается от температуры t_C поверяемого счетчика, то погрешность δV определяется по формуле

$$\delta V = \left[\frac{V_{CЧ} - V_M}{V_M} + \beta(t_M - t_C) \right] \cdot 100\%,$$

где β – коэффициент объемного расширения жидкости.

Испытательные установки объемного типа применимы для жидкостей, вязкость которых менее $36 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (36 сСт). Если жидкость имеет большую вязкость, применяют испытательные установки *весового типа*. Здесь бак, куда поступает жидкость, прошедшая через поверяемый прибор, установлен на весах или подвешен к ним.

3.3.3. Поверка счетчиков газа

Основным средством для поверки газосчетчиков, градуированных в единицах объема, является образцовый мерник (рис.76). Цилиндрический колокол 8, подвешенный на цепи 9, снабженной противовесом 11, погружен своей нижней частью в водяной затвор. Вода заливается в цилиндрический резервуар 12, имеющий кольцевое поперечное сечение. Подколокольное пространство через трубу 3 может соединяться или с вентилятором 1, служащим для наполнения мерника воздухом, или же с поверяемым газосчетчиком 14. Колокол снабжен роликами 7, которые при движении колокола катятся вдоль направляющих 6, связанных наверху перекладиной.

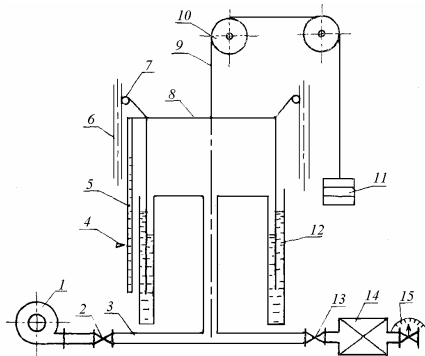


Рис. 76

На последней укреплены опоры для роликов *10*, через которые перекинута цепь *9*. К днищу колокола прикреплена шкала *5*, перемещающаяся вдоль неподвижного указателя *4*. Погрешность градуировки шкалы не более ± 0.1 % измеряемого объема. Измеряемая емкость заключена между колоколом и водяным затвором. Воздух, подаваемый вентилятором *1*, наполняет мерник при открытом кране *2* и закрытом кране *13*. Кран *15* является регулировочным. Он снабжен шкалой, проградуированной в единицах расхода. При определенной степени его открытия и одновременно при полном открытии крана *3* и определенном давлении воздуха в мернике обеспечивается необходимый расход через поверяемый газосчетчик *14*.

Для поверки расходомеров газа нет типовых установок, поэтому на практике применяют различные средства поверки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987.
2. Хофманн Д. Техника измерений и обеспечения качества. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Евтихийев Н.Н., Купершмидт Я.А., Папуловский В.Ф., Скугоров В.Н. Измерение электрических и неэлектрических величин. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Боднер В.А., Алферов А.В. Измерительные приборы, т.2. М.: Изд.-во стандартов, 1986.
5. Измерения в промышленности. Справ. изд. в 3-х кн. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура: Пер. с нем./Под ред. Профоса П.-2-е изд., перераб. и доп.- М.: Металлургия, 1990.
6. Кремлевский П.П. Измерение расхода и количества жидкости, газа и пара. М.: Изд.-во стандартов, 1980.
7. Павловский А.Н. Измерение расхода и количества жидкостей, газа и пара. М.: Изд.-во комитета стандартов, мер и измерительных приборов, 1967.
8. Чистяков В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям. М.: Энергоатомиздат, 1990.
9. Константинов А.И., Флеер А.Г. Время. М.: Изд.-во стандартов, 1971.
10. Палий Г.Н., Артемьева Е.В. Синхронизация высокоточных мер времени и частоты. М.: Изд.-во стандартов, 1976.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1	
<i>МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ</i>	5
1.1. <i>Общие сведения об измерении времени</i>	5
1.1.1. Меры времени	10
1.1.2. Приборы для измерения времени	15
1.1.2.1. Механические приборы для измерения времени . . .	16
1.1.2.2. Электрические приборы для измерения времени . . .	18
1.2. <i>Измерение частоты</i>	20
1.2.1. Меры частоты	20
1.2.2. Приборы и методы, применяемые при измерении частоты	24
1.3. <i>Метрологическое обеспечение измерений времени и частоты</i>	29
1.3.1. Эталонная база ГСВЧ	30
1.3.2. Воспроизведение системы измерения времени	32
Глава 2	
<i>ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТИ И ГАЗА</i>	38
2.1. <i>Измерение угловой скорости</i>	38
2.2. <i>Измерение линейной скорости</i>	43
2.3. <i>Измерение линейного и углового ускорения</i>	46
2.4. <i>Метрологическое обеспечение угловой скорости и ускорения</i> . .	47
Глава 3	
<i>ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТИ И ГАЗА</i>	54
3.1. <i>Измерение расхода</i>	54
3.1.1. Расходомеры постоянного перепада давления	55
3.1.1.1. Ротаметры	55
3.1.1.2. Расходомеры с погруженным поплавком	56
3.1.1.3. Расходомеры с погруженным поршнем	57
3.1.2. Расходомеры переменного перепада давления	58
3.2.2.1. Расходомеры с сужающими устройствами	58
3.2.2.2. Расходомеры с напорными устройствами	65
3.1.3. Расходомеры, основанные на других принципах измерения	67
3.2. <i>Измерение количества жидкости и газа</i>	75
3.3.1. Объемные счетчики	76
3.2.1.1. Счетчики со свободным сливом (опорожняющиеся счетчики)	76

3.2.1.2. Счетчики с принудительным вытеснением (вытесняющие счетчики)	79
3.2.1.3. Счетчики с вытеснением газа	84
3.2.2. Скоростные счетчики	86
3.2.2.1. Счетчики с тангенциальным подводом жидкости . .	86
3.2.2.2. Счетчики с аксиальным подводом жидкости	88
3.2.2.3. Скоростные счетчики газа	89
3.3. Метрологическое обеспечение измерения расхода и количества жидкости и газа	90
3.3.1. Поверка расходомеров жидкости	91
3.3.2. Поверка счетчиков жидкости	93
3.3.3. Поверка счетчиков газа	94
Л и т е р а т у р а	96

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ И ЗАВИСЯЩИХ ОТ ВРЕМЕНИ ВЕЛИЧИН

ი. ზედგინიძე, ნ. ბერაია. დროისა და დროზე დამოკიდებული სიდიდეების გაზომვები. ტექნიკური უნივერსიტეტი - „ინფორმატიზაციის ცენტრი“. თბილისი, 2002, გვ. 94.

სერიაში „გაზომვის მეთოდები და საშუალებები“ განხილულია სხვადასხვა ფიზიკური სიდიდის გაზომვის მეთოდები და საშუალებები.

დამხმარე სახელმძღვანელო ეძღვნება დროის, სიხშირის, სიჩქარის, აჩქარების გაზომვის მეთოდებსა და საშუალებებს. განიხილება აგრეთვე სითხეებისა და აირების ხარჯის გაზომვის მეთოდები და საშუალებები, მთვლელები.

განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა დროის, სიხშირის, სიჩქარის, აჩქარების, ხარჯსაზომი ტექნიკის მეტროლოგიურ უზრუნველყოფას.

**Зедгинидзе Ираклий Георгиевич
Берая Нино Олеговна**

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЗАВИСЯЩИХ ОТ ВРЕМЕНИ ВЕЛИЧИН

(Учебное пособие)

Печатается в представленном авторами виде

Технический редактор *Т.З. Модебадзе*
Компьютерный набор, верстка и графика *Н.О. Берая, И.Г. Зедгинидзе*

Сдано в производство 15.01.2002г. Подписано в печать 15.02.2002г. Формат бумаги 60x84 1/16. Гарнитура «Times New Roman». Печатных листов 6.25. Учетно-изд.листов 5.12. Тираж 200 экз. Заказ N2002/1.

Цена договорная

Издательство «Технический университет», Тбилиси, ул. М.Костава, 77

Оригинал-макет изготовлен в Центре информатизации ГГУ

Тираж отпечатан в индивидуальном предприятии «Гоча Далакишвили»