

627

П-76

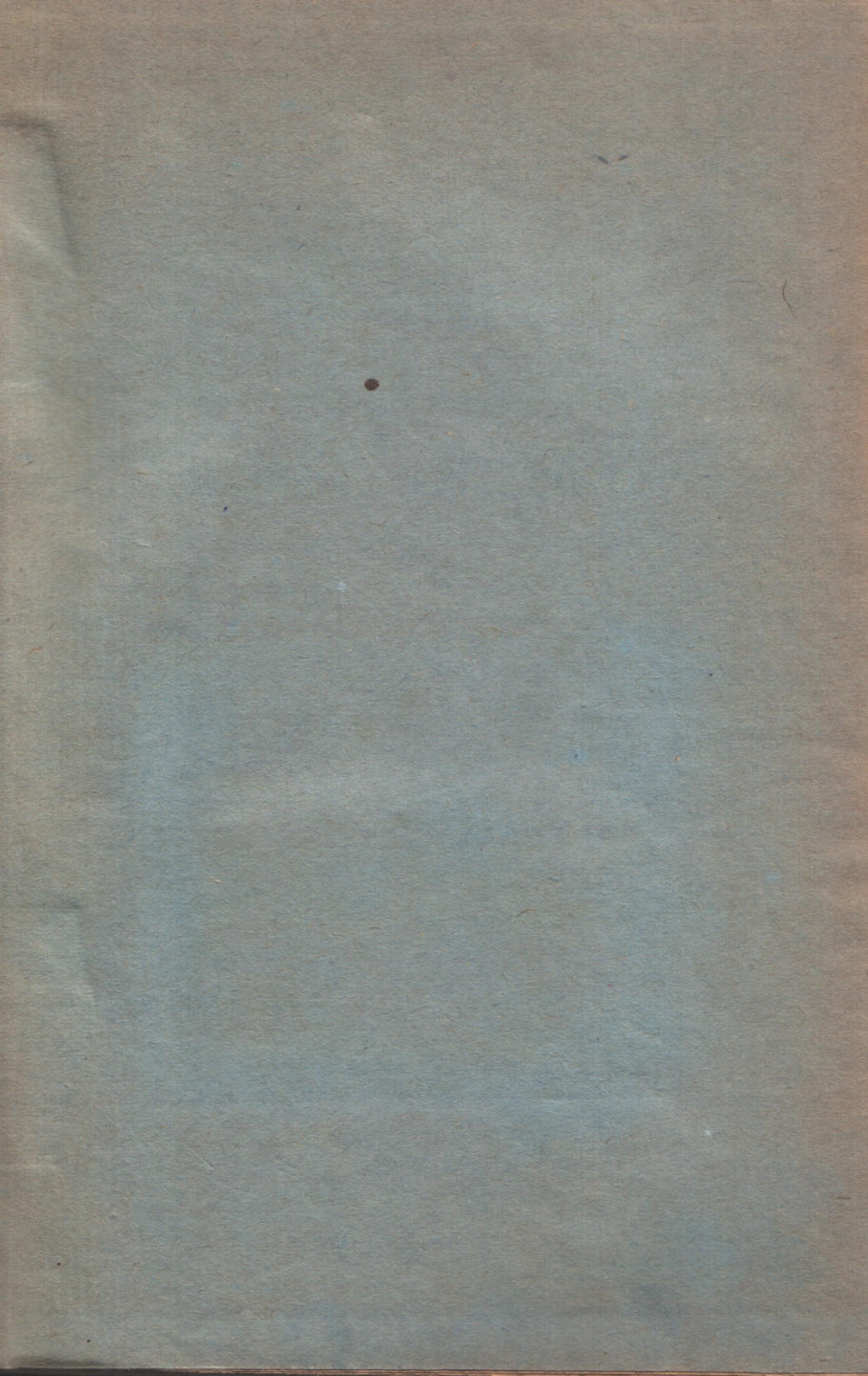
проф., д-р инж. А. ГРАМБЕРГ

ТЕХНИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ
ПРИ ИСПЫТАНИИ МАШИН
И КОНТРОЛЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ

О Н Т И — Д Н Т В У — Н К Т П

	11586	

✓



Проф.-доктор-инж. А. ГРАМБЕРГ

А 596. 621 Г-76

ПЕРЕУЧЕТ
1940 г.



ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

при

ИСПЫТАНИИ МАШИН и КОНТРОЛЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Авторизованный, значительно дополненный
перевод с 6-го последнего немецкого издания,
инж. Б. Е. КИНКУЛЬКИНА и Н. П. КОНЯЕВА

1966 г.

Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве
учебного пособия для втузов



Ответственный редактор *А. Н. Гапон*
Литературный редактор *И. Б. Цейтин*
Техническое оформление *Ф. И. Бергер*
Корректора: *Н. П. Трохименко, А. И. Драгомонова*

Типография Государственного научно-технического издательства Украины
Киев, Крещатик, 42

Уполномоч. Главлита № 2442. № 778. Тираж 2 000 27¹/₄ лист.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
3	3 сн.	квадратичного	квадратного
5	8 сн.	Формула Сан-Венана	Формула Сен-Венана
7	25 св.	конденсаторные	конденсационные
8	7 сн.	ОРС'а	Орса
15	20 сн.	2 см — 1 ат	2 см = 1 ат
15	14 сн.	на стр.	на стр. 30, 250, 289
30	21 сн.	укладывающим	указывающим
47	Рис. 326, подпись	Передачик Соколовского постоян- ного тока	Передачик КИП переменного тока

СОДЕРЖАНИЕ

		Стр.
	Предисловие автора	11
	Предисловие переводчиков	12
I. Единицы и размерности		
§ 1.	Измерение и единицы меры	14
	Основные и производные единицы.	
§ 2.	Размерность	14
	Основные единицы; размерность, однородность уравнений, расчет масштабов диаграмм.	
§ 3.	Практические единицы	15
	Единицы мощности и работы; продолжительность использования, коэффициент загрузки, тепловые величины, коэффициент теплопроводности, вязкость, обозначение градуса температуры.	
§ 4.	Технические и физические основные единицы	17
	Техническая система мер, система <i>cgs</i> и <i>MTS</i> ; теплотехническая система мер. Английская система мер.	
II. Свойства приборов		
§ 5.	Общие сведения	20
§ 6.	Показывающие приборы	20
	Равномерная, расширяющаяся и сужающаяся шкала; безузовые шкалы. Параллактическая погрешность, точность измерения. Статические свойства измерительных приборов, поверочная кривая, постоянство показаний, градуировка, поправка, регулирование, неточность и нечувствительность, упругое последствие. Влияние температуры. Таблица 1. Результаты испытаний манометра	
§ 7.	Статическая теория показывающих приборов	25
	Переставляющая сила: внутренняя и внешняя направляющие силы при равномерной и неравномерной шкале, испытание готового прибора.	
§ 8.	Динамические свойства показывающих приборов	30
	Собственное число колебаний и время, сопротивления, аperiodическое демпфирование. Обыкновенное и двойное демпфирование.	
§ 9.	Конструктивные приемы	35
§ 10.	Измерение периодически колеблющихся величин	36
	Измерение средних значений, исследование колебаний.	
§ 11.	Компенсационные приборы и нулевой метод	36
	Нулевой метод. Компенсационные приборы со вспомогательной шкалой.	
§ 12.	Интегрирующие приборы (суммирующие приборы, счетчики)	38
	Градуировка.	
§ 13.	Самопишущие приборы	39
	Интегрирование, получение средней величины, переставляющая сила, трение пишущего штифта. Виды записи, формы ленты для записи и пишущий орган.	
§ 14.	Измерительная энергия; сервомоторы, особенно электрические	42
	Затрата энергии при установке; постоянный расход энергии. Погрешность, обусловленная отъемом энергии. Вспомогательная энергия сервомотора; применение при весах и при мосте Уитстона.	
§ 15.	Электрическая передача измеряемых величин	44
	Переход на ток (или напряжение), передатчик на расстоянии, схемы включения, мостовая схема, схемы с прибором со скрещенными рамками, постоянный или переменный ток, аккумуляторная батарея, питаемый агрегат, приемные приборы, самопишущий прибор с падающей дужкой, самопишущий прибор на несколько точек, осциллограф, безнерционный механический датчик, токи высокой частоты и метод половины резонансной кривой, передача на расстояние показаний газоанализатора Моно.	
§ 16.	Математические приборы	54
	Воспринимающий и указывающий органы. Вычисление функции, суммирование показаний, образование разности, произведение, частного, интегрирование, электрические счетчики тона, счетный и переключающий механизмы, учет положения и остановка хода.	
III. Наблюдение и вычисление		
§ 17.	Отсчет	60
	Параллактическая погрешность, постукивание; нонус; простые приемы для повышения точности; измерение числа оборотов, обмеры поверочной диаграммы индикатора.	
§ 18.	Обычные ошибки при вычислении	61
	Вычисление процентных значений; вывод средних значений, квадратичного, квадратичного среднего значения, кубического, логарифмического и т. п. средних значений, об- обратных значениях.	

19.	Обобщения: установившееся состояние машин	63
20.	Точность числовых данных Длина моста и диаметр стержня, способ написания степенями десяти в физике. Число значущих цифр при отчете и при вычислениях; точность общего результата, точность поправок; методы дифференциального исчисления.	63
21.	Обработка результатов; величина погрешностей Среднее значение, средняя погрешность, сильно отклоняющиеся значения. Случайные и систематические, индивидуальные ошибки наблюдения; графическое изображение диаграммы; изменение изображаемых величин, случай произвольного измерения двух величин, семейства кривых, треугольные координаты. Таблица 2. Тормозные испытания электромотора.	65
22.	Измерение размеров машин Длина, метр. Обмер при данной температуре. Малые изменения длины и положения.	69
23.	Измерение площадей Правило Симпсона, способ Вагенера. Планиметр; линейный планиметр, роликовый планиметр; полярный планиметр, дисковый планиметр. Точность планиметров. Компенсационный планиметр. Средняя высота диаграммы. Корневой планиметр, радиальный планиметр.	70
24.	Другие математические вспомогательные средства	73
IV. Измерение давлений		
25.	Единицы Давление. Техническая атмосфера (<i>ат</i>), физическая атмосфера (<i>атм</i>), столб жидкости или газовый столб. Нормальная высота барометра. Английская система мер.	75
26.	Абсолютное давление, избыточное давление, вакуум Избыточное давление, отрицательное давление. Обозначение вакуума. Деление вакууметров в процентах. Температурное деление при холодильных установках.	76
27.	Динамическое и общее давление Статическое давление, динамическое давление, общее давление. Завихрение.	78
28.	Пружинные манометры Манометр с трубчатой пружиной, манометр с мембраной. Направляющие силы. Присоединение с петлей и краном. Таблица 3. Направляющие силы и баланс работы при пружинных манометрах.	79
29.	Жидкостные манометры Ртутный манометр, поправка на температуру. Конденсационная вода над ртутью. Укороченный барометр. Водяной манометр. Применение двух жидкостей.	81
30.	Измерение низких давлений и незначительных разностей давления. Тягомеры, применение двух жидкостей. Жидкости для манометров. Наклонная шкала, микроманометр, измеритель малых давлений. Непосредственная градуировка микроманометров. Кольцевые весы — их теория, принцип последовательного наполнения. Измеритель давлений с колоколом. Измерительная энергия, воломометрическая восприимчивость. Тягомер, измерение в ветренные дни. Таблица 4. Жидкость для наполнения манометров.	84
31.	Дифференциальные манометры Соединение кранов. Правила установки.	91
32.	Измерители количества Указатели для дроссельных приборов: кольцевые весы, поплавковые приборы специальной конструкции. Профильные шайбы, изменение внутренней или внешней направляющей силы.	93
33.	Проверка и градуировка манометров; эталоны Поршневой манометр, самопишущие манометры. Контрольный манометр, поршневой пресс. Поплавковый поршень.	95
34.	Установка манометров Напорное давление водяного насоса, высота подачи, замер давления в текущей жидкости; отсчет давления пара, уравнительные резервуары и проводка.	98
35.	Давление пара и температура; барометрическое давление Определение барометрического давления, использование газетных метеорологических бюллетеней.	100
V. Измерение времени и скорости		
36.	Секундомер Часы, часовое время, промежутки времени; секундомер, двойной секундомер. Хронограф со сбегавшей лентой, кинематография.	101
37.	Единицы скорости Поступательная скорость, угловая скорость, обороты, число оборотов в секунду.	102
38.	Обзор методов измерений; соотношение между поступательной и угловой скоростью	103
39.	Счетчики Счетчики оборотов, счетчики, анкерное зацепление, большие числа оборотов. Ручные счетчики.	104
40.	Тахометры Тахометры с центробежным маятником, индукционный тахометр, жидкостный тахометр, гироскоп. Привод к тахометру, область измерения, ручные тахометры.	105
41.	Сравнение Счетчики и тахометры.	107
42.	Дистанционные тахометры Резонансная гребенка.	108
43.	Неравномерные скорости Причины неравномерности, тахометр Горна, отметки пути и времени, поступательная скорость. Различные методы изучения неравномерности.	109
44.	Гидрометрическая вертушка Уравнение вертушки и характеристическая линия вертушки. Градуировка.	111
45.	Анемометр Крыльчатый анемометр, анемометр с чашечным крестом, анемотахометр; градуировка; центробежный аппарат, поддувание, градуировка в свободном потоке, градуировка в принудительном потоке, статический анемометр.	113
46.	Напорные приборы (трубки Пито) Напорное или динамическое давление. Простая статическая трубка; трубка Праудля. Напорная трубка для измерения компонент. Сравнение с вращающимися приборами.	116
47.	Различные прочие методы	120

VI. Измерение количеств

§ 48.	Единицы; масса, объем, плотность Масса объемные меры, плотность, относительный вес, влияние температуры. Таблица 5 Удельный вес воды.	122
§ 49.	Приведенные или неприведенные объемы Значение приведенного объема, примеры. Английские меры.	123
§ 50.	Влияние влажности	124
§ 51.	Когда следует давать вес, когда — объем Примеры: требуемая работа насоса, вентилятора, подача воздуха воздухоудвнкой.	125
§ 52.	Удельный вес жидкостей Ареометр, потеря веса в жидкостях, весовой ареометр.	126
§ 53.	Плотность газов Прибор Шиллинг-Буизена, газовые весы, газоотстойные весы; разница или отношение удельных весов. Пересчет на нормальные условия.	127
§ 54.	Методы измерения при определении количеств Измерение отдельных количеств, измерение длительно протекающих жидкостей, газов и паров. Распространимость метода измерения, приложимость метода измерения для измерений других веществ. Измерение горячего конденсата.	130
§ 55.	Определение количеств по правилу смешения Примеры: потребление воздуха газовой машиной, свободный воздухообмен помещения, большие количества воды в турбинных установках, измерения с помощью гипосульфита (способ разбавления растворов). Измерение посредством добавки красящих веществ. Способ определения скорости распространения солей. Опытные устройства для определения количеств.	132
§ 56.	Весы Подъемная сила воздуха. Изменяемость силы тяжести.	135
§ 57.	Весы основаны на законах равновесия рычагов Опорные призмы, несущие призмы, параллельное направление для мостовых весов, сотенные и десятичные весы, страсбургские мостовые весы; весы с подвижным грузом, вспомогательный подвижной груз; разгрузка.	135
§ 58.	Юстировка и проверка весов Определение точности и чувствительности.	138
§ 59.	Теория весов Чувствительность. Прогиб коромысла, нечувствительность при меняющейся нагрузке, константы нечувствительности. Измерительное коромысло с подвижным грузом. Деформация коромысла и правильность весов; юстировочная погрешность, погрешность от прогиба.	138
§ 60.	Выверка коромысловых весов Нормальные гири, юстировка. Выверка.	142
§ 61.	Маятниковые весы Равномерность шкалы. Ленточное подвешивание.	144
§ 62.	Измерение и взвешивание жидкостей Тара, брутто и нетто вес, измерение градуированными сосудами, влияние температуры, градуировка, например, путем добавки химикалий; очень большие сосуды.	145
§ 63.	Длительные измерения Отрывное острие. Пробник.	146
§ 64.	Измерение калиброванными сосудами как нормальный метод	148
§ 65.	Волнометрическое определение количества газа Газометр.	148
§ 66.	Метод наполнения Теория. Пример: подача воздуха и коэффициент подачи компрессора. Метод продувки (в выпуск).	149
§ 67.	Определение количеств пара по конденсату Измерение горячего конденсата; конденсат ниже 100°.	151
§ 68.	Определение количеств по индикаторным диаграммам Примеры: объемный коэффициент полезного действия компрессора, потребление пара паровой машиной.	152
§ 69.	Определение количеств по средним скоростям Количество воды в потоках, в каналах турбин. Отклонение оси прибора от направления течения. Количества воды в проводах насосов и турбин, суммирование количеств в круглых трубопроводах. Количества воздуха в вентиляционных и холодильных установках, обмен воздуха в жилых помещениях, отверстия с решетками.	153
§ 70.	Измерение воды помощью щитов	157
§ 71.	Измерение с запрудами Теория, коэффициент истечения K , явление сжатия струи; измерительная запруда с боковым и без бокового сжатия как и при весьма широких подводящих каналах. Запруда, измерение высоты уровня, ширина запруды. V-образная запруда. Нулевая точка высоты уровня. Таблицы 6 и 7. Вытекающие количества по Ребоку и Фразе. Таблицы 8 и 9. V-образная запруда.	158
§ 72.	Теория измерения помощью истечения Действующее давление. Измерение истекающих количеств, измерение протекающих количеств; предварительная скорость, отношение отверстий.	163
§ 73.	Измерение жидкостей истечением Сжатие струи, коэффициент сжатия, скоростной коэффициент, коэффициент истечения. Истекающий объем и истекающий вес. Опыты с водой и соляными растворами. Производство испытаний истечением, диафрагма или насадка. Метод Брауера, многие отверстия. Таблица 10. Коэффициенты истечения по Шнейдеру.	163
§ 74.	Истечение газа из резервуара	167
§ 75.	Большие перепады давления в газах и парах; поправка на расширение ϵ . Формула Сан-Внеана и Вантцеля, критическое отношение давлений. Приближенная формула. Поправка на расширение. Примеры. Таблица 11. Характеристические числа для насыщенного пара, перегретого пара и т. д.	167
§ 76.	Измерение протекающих количеств Дроссельные приборы. Сжатие и отношение отверстий, скорость до диафрагмы, остающаяся потеря давления.	170
§ 77.	Число Рейнольдса Пленочия и вязкость. Число Рейнольдса и граница ламина.	172

§ 78.	Нормы для датчика измерительной разности давления Нормальные насадки, нормальные диафрагмы. Помехи. Границы допусков. Таблицы 12—15. Правила для измерения протекающих количеств. Таблицы 16 и 17. Границы допусков и вязкость.	174
§ 79.	Труба Вентури Количество воды, воздуха и газов. пар. Мультипликатор разрежения.	177
§ 80.	Измерение количеств воды методом Гибсона	179

VII. Счетчики для длительных измерений количеств

§ 81.	Обзор Весы или объемы, область применения счетчиков; конструктивные формы; моторные счетчики, опрокидывающиеся измерители, измерители потоков; потери энергии и давления; поведение при малых протекающих количествах, чувствительность, независимость от удельного веса. Номинальная мощность, рабочая мощность, наивысшая мощность; водомеры для питательной воды; градуировка.	180
§ 82.	Поршневые расходомеры Поршневые водомеры: Шмидта, Еккардта; измерение хода вместо счета ходов. Измерители сжатого воздуха.	183
§ 83.	Скоростные водомеры Скоростной водомер с обратным отсчетом, водомеры с неразделенной струей, номинальная мощность; сухоходы и мокроходы, двоянные водомеры, водомер Вольмана, рассолы в холодильных установках.	185
§ 84.	Капсюльные расходомеры Принудительная подача; дисковый водомер; применение для сжатого воздуха.	187
§ 85.	Газомеры Мокрые газомеры; потери давления; барабан Кросслея, экспериментальный или стационарный газомер; наблюдение давления и температуры; переливное устройство Кинга. Сухой газомер. Градуировка. Кубицирующие приборы.	190
§ 86.	Опрокидывающиеся расходомеры Открытые водомеры, измерители для зерновых и сыпучих товаров.	193
§ 87.	Постоянное и автоматическое взвешивание Автоматические весы для зерновых товаров. Автоматические весы, полуавтоматические угольные весы Шенка.	196
§ 88.	Указатели расхода Измерители количеств. Измерительное давление. Влияние удельного веса. Парциальные водомеры. Делительные газомеры. Газомер Томаса.	199
§ 89.	Поплавковые расходомеры Измеритель с конусом. Конусный рота-измеритель. Указатель питательной воды. Паромер Байера-Сименса. Сальники. Условия, равновесия чувствительности, потери давления.	201
§ 90.	Дроссельные паромеры Датчики действующего давления; соединительные трубки, уравнительные сосуды или трубки, замерные органы. Указывающий прибор. Поправка на давление и температуру, наполняющая жидкость. Точность, незаметная уценка. Погрешности измерения. Приемочные испытания.	205
§ 91.	Поплавковые и дроссельные измерители, как паромеры Контроль производства. Пароуказатель — паровые часы. Влияние удельного веса.	210
§ 92.	Подсчет диаграмм Постоянная прибора, дневная постоянная.	213
§ 93.	Потери энергии Потери давления = потере энергии. Обесцвечивание пара.	214
§ 94.	Особые случаи Течение пара в обоих направлениях. Близость поршневых машин.	215

VIII. Измерение силы, вращающего момента, работы, мощности

§ 95.	Обзор Сила, работа, мощность при равновесии и установившемся состоянии; состояние ускорения или замедления; вращательное движение при установившемся состоянии, при ускоренном и замедленном движении.	216
§ 96.	Единицы Метрическая и английская системы мер.	217
§ 97.	Динамометры для измерения сил Пружинные динамометры, влияние температуры. Изменение упругих свойств пружин со временем. Периодическая поверка динамометров. Влияние трения, теория. Некоторые типы динамометров. Гидравлические динамометры. Мессдоза, динамометр с высоким собственным числом колебаний. Тяговые динамометры для изучения работы сельскохозяйственных машин.	218
§ 98.	Тормозной динамометр Двойная задача: возбуждение и измерение вращающего момента; нажим Прони, постоянная тормоза; упругость, статические отношения; ленточный тормоз, надежное ограничение хода, размеры тормозного нажима, производство тормозных испытаний; саморегулирующийся тормоза, уравновешение собственного веса; канатный тормоз, водяной тормоз, индукционный тормоз, магнитный тормоз; совместная работа тормоза с тормозимой силовой машиной. Таблица 18. Размеры тормозных нажимов.	227
§ 99.	Приводные динамометры и соответствующие динамометрические методы измерения Приводной (трансмиссионный) динамометр, динамометрические методы, типы приводных динамометров; динамометр, измеряющий давление на зуб; собственное трение; ременной динамометр; взвешивающий динамометр, динамометр Фштингера; торсионный динамометр; приспособления для оптического отсчета. Использование приводного вала или соединения в качестве измерительной пружины; динамометр Феттингера. Значение приводных динамометров.	236
§ 100.	Определение мощности по величине реакции Маятниковый подвес станины динамомашин, маятниковый подвес станины исследуемой машины, подвесная динамо, подвесный мотор. Теоретические замечания. Испытательный станок DVG для авиомоторов.	241
§ 101.	Электрическая нагрузка; уничтожение электрической энергии Металлические реостаты, ламповые реостаты, водные сопротивления.	245

§ 102.	Определение силы и вращающего момента из уравнений ускорения, особенно для определения собственных потерь Поступательное и вращательное движение, испытание на разгон и замедление. Определение момента инерции; пример: определение собственных потерь индукционного тормоза; образование разностей; метод двойного испытания на замедление.	247
§ 103.	Измерение сил в частях строений; сотрясения Измерители напряжений с механическим увеличением, акустический измеритель напряжений	252

IX. Индикатор

§ 104.	Диаграмма хода поршня. Индикаторная и эффективная мощность Индикаторная диаграмма, индикаторная мощность, эффективная мощность, тормозная мощность, рабочая мощность.	256
§ 105.	Конструктивные формы индикаторов Пишущий механизм, роликовый и рычажный ходоуменьшители, индикаторный край, атмосферная линия, сменные ролики, масштаб пружины; пишущий механизм. Приборы с горячей и холодной пружиной. Сменные втулки, уменьшенные поршни, поршни большие, чем нормальные, рычажная передача пишущего механизма, прямолинейное направление, пропорциональность; барабан, остановочные устройства; диаграммная бумага; конструктивное исполнение в разных размерах.	257
§ 106.	Обращение с индикатором Шнуровой провод. Съемка диаграмм	264
§ 107.	Обработка и вычисление диаграмм Среднее индикаторное давление, индикаторная мощность. Пример: машина тройного расширения. Действующая площадь поршня; ход поршня; машины внутреннего сгорания, пучек диаграмм и диаграммы со слабой пружиной при газовых машинах; ступенчатый поршневой насос. двухтактная машина внутреннего сгорания, компрессор дизельмашины, конденсаторные и штатные насосы паросилового устройства, вспомогательный цилиндр. Таблица 19. Вычисления диаграммы цилиндра поршневой машины.	266
§ 108.	Вычисление при длительных испытаниях Пример определения расхода пара, удельный расход пара = потреблению пара. Смещение по времени отсчетов по указывающим и суммирующим приборам. Таблица 20. Определение расхода пара.	269
§ 109.	Масштаб пружины. Выверка Выверка давлением, выверка грузами, сравнение обоих методов; правила определения масштаба индикаторных пружин, равномерность пружины, средний масштаб пружины; истинный масштаб пружины. Учет неравномерности, взвешенное среднее значение масштаба пружины.	271
§ 110.	Смещение диаграммы; диаграммы по времени и по пути Сменная диаграмма; диаграмма по времени, диаграмма по пути поршня; индикатор с вращающимся барабаном, метчик; ленточный индикатор, метчик с колеблющейся пружиной, запаздывание метчика; диаграмма по времени газовой машины, перерисовка в диаграмму по пути поршня, сравнение диаграммы по времени с диаграммой по пути поршня.	274
§ 111.	Погрешность движения штифта Колебания пружины, индицирование при жидких рабочих веществах. Причины погрешности (кроме инерционного действия масс), перекрытие отверстия для индикатора.	279
§ 112.	Обратное действие индикатора на ход машины	282
§ 113.	Погрешности в движении барабана	283
§ 114.	Графическое исключение инерционных колебаний Трение и демпфирование; пример; исправление диаграммы газовой машины, определение масштаба.	285
§ 115.	Особые применения индикатора Динамометр, диаграммы подъема клапанов.	289
§ 116.	Особые конструкции индикаторов Холодильные компрессора, последовательное снятие диаграмм; индикаторы для высокого числа оборотов: микроиндикатор, индикатор с алмазным острием, оптический индикатор, емкостный индикатор. Индицирование по точкам.	290
§ 117.	Счетчики работы Теория, область применения, счетчик работы, связанный с индикатором. Теория ошибок.	292

X. Измерение температур

§ 118.	Единицы Градус. Международная температурная шкала. Термодинамическая температурная шкала, размерность температуры. Шкала Фаренгейта. Нормальная температура.	300
§ 119.	Жидкостные термометры Ртутно-стеклянный термометр, термометр с заполнением азотом. Температура ртутного столбика, поправка на выступающий столбик. Другие жидкости, кроме ртути.	302
§ 120.	Электрические термометры сопротивления Мост Уитстона, гальванометр со сращенными рамками. Термометр сопротивления. Точность измерения и выбор электрического прибора. Большое сопротивление моста, малое сопротивление моста; очень малые разности температур. Измерение разностей температур. Рабочее напряжение, нагревание измерительным током. Таблица 21. Изменение сопротивления электрических термометров сопротивления.	305
§ 121.	Измерение температур термоэлектрическими методами Пирометр. Таблица термоэлектродвижущих сил разных металлов. Таблица термоэлектродвижущих сил и поправочные коэффициенты на температуру свободного конца наиболее употребительных термопар. Пирометры из благородных металлов. Пирометры из благородных металлов. Пирометры из редких металлов. Пирометры из огнеупорных материалов и комбинационные с металлами. Система термопара — гальванометр. Потенциометрический метод измерения электродвижущих сил. Компенсационные приборы. Погрешности при измерении температур термоэлектрическим методом. Погрешность от сопротивления термопары и соединительных проводов. Погрешность от сопротивления термопары и гальванометра. Влияние температуры свободного конца термопары. Погрешности, обусловленные прибором. Погрешности от неправильной установки пирометра. Измерение температуры поверхностей.	310
§ 122.	Измерение температуры металлических поверхностей	323

§ 123.	Дилятметрические пирометры	325
	Показывающий пирометр. Пирометр с сигнализацией и терморегулированием. Самопишущий сигнальный пирометр-терморегулятор. Самопишущий сигнальный пирометр-терморегулятор с репродукцией термического цикла. Дифференциальный самопишущий пирометр.	
§ 124.	Оптические и радиационные пирометры	330
	Конструктивные формы радиационных и оптических пирометров. Цветовая пирометрия. Конструктивные формы цветных пирометров.	
§ 125.	Погрешности при измерении температуры радиационными и оптическими пирометрами	337
	Погрешности от неполной черноты излучения, отражения посторонних лучей и дыма. Таблица коэффициента лучеиспускания в лучах воды $\lambda_s = 0,65$. Таблица поправок на неполноту излучения. Влияние размера фотометрируемого объекта и ориентировки прибора. Погрешности от нагревания пирометра. Погрешности от субъективных отсчетов.	
§ 126.	Преимущества и недостатки оптических и радиационных пирометров	339
	Измерение температур фотоэлектрическим методом.	

XI. Измерение количеств тепла

§ 127.	Определение количеств тепла из повышения температуры	342
	Теплоемкость и водный эквивалент, средняя и истинная теплоемкость, теплосодержание.	
§ 128.	Единица теплоты. Удельная теплоемкость воды	343
	Килокалория; средняя калория. Теплосодержание воды.	
§ 129.	Производство измерений	343
	Теплообмен с окружающей средой; пример: испытание охлаждением, водной эквивалент; исследование при установившемся состоянии.	
§ 130.	Счетчики тепла	346
	Водяное отопление, холодильные установки. Воздух как теплоноситель. Паровое отопление низкого давления.	
§ 131.	Количества тепла в воздухе, влажность воздуха	347
	Смесь воздуха и водяных паров. Распирение закона Дальтона. Относительная влажность. Расчеты по количеству тепла и по теплосодержанию, примеры. Температура ниже 0°. Таблица 27. Пример расчета свойств влажного воздуха. Таблица 28. Пар над водой и льдом.	
§ 132.	Психрометр	350
	Психрометрическая разность, коэффициент доброкачественности. Теория психрометра. Упрощения при низких температурах, психрометрическая формула Шпрунга. Температуры ниже 0°. Формула Шпрунга для замерзшей оболочки. Применение к холодильным установкам. Правовой психрометр, аспирационный психрометр, длительное пользование. Таблица 29. Коэффициенты доброкачественности психрометров. Таблица 30. Психрометрические константы Шпрунга для воды и льда.	
§ 133.	Гигрометр	357
	Водосной гигрометр, градуировка. Ввод измерителей влажности в каналы.	
§ 134.	Примеры. Тепловая производительность воздухоохладителя холодильной установки	358
	Источники ошибок. Сушьные установки.	
§ 135.	Определение количеств тепла из количеств пара	360
	Теплосодержание пара; пример: паровой котел, теплота парообразования; отдача тепла нагревателями, холодильная мощность холодильной машины.	
§ 136.	Определение влажности пара	361
	Дроссельный калориметр. Пример: пар при атмосферном давлении; водоотделяющий калориметр, прочие методы; отбор пробы.	
§ 137.	Измерение тепловых потерь	363
	Потери тепла и холода, вычисление потерь. Изоляция, коэффициент теплопроводности изоляционных материалов, часовые теплотери частями строений. Метод добавочного слоя (стенки), измеритель теплового потока.	

XII. Измерение теплотворной способности горючих материалов

§ 138.	Единицы	366
§ 139.	Максимальная и минимальная теплотворная способность	366
	Значение обеих для непосредственного производства работы и для использования для нагревания.	
§ 140.	Твердое топливо	368
	Калориметрическая бомба, аспиратор, обращение с бомбой; вычисления; водной эквивалент, железная проволока, графическая поправка на излучение; пример: отбор и обработка пробы, влажные угли. Сокращенный анализ. Сжигание в струе кислорода при атмосферном давлении. Калориметр Страра.	
§ 141.	Состав угля	374
	Содержание влаги, явная влажность, сухое вещество, гигроскопическая влажность, летучие вещества, содержание золы, содержание углерода, содержание водорода.	
§ 142.	Газообразное топливо	375
	Калориметр Юнкера; пример; точность калориметра Юнкера, источники ошибок; специальные устройства, регуляторы давления, силовой газ. Автоматический калориметр Юнкера. Калориметр «Унион».	
§ 143.	Жидкое топливо. Союзная формула	379
	Сжигание в калориметре Юнкера, в бомбе.	

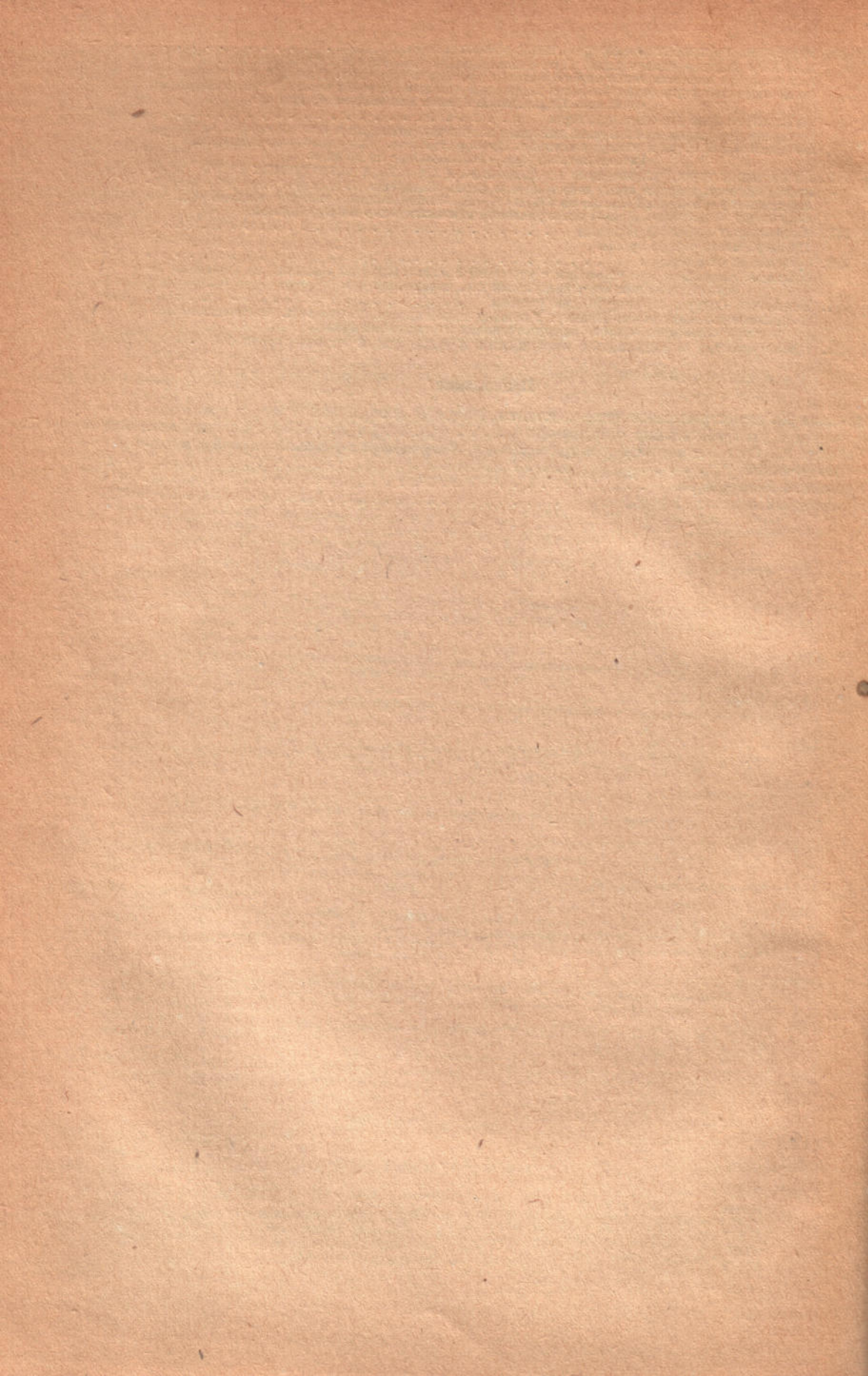
XIII. Анализ газов

§ 144.	Общие соображения	381
	Задачи, цели, методы; приведение к условно сухому газу.	
§ 145.	Прибор ОРСа	382
	Прибор Орса для дымовых газов, расширенный Орса для генераторного газа. Подробности конструкции. Приборы Орса для газового анализа. Погрешности при анализе, запорные жидкости. Расширенный прибор Орса для анализа генераторного газа. Труба для сжигания; обращение. Пример анализа светильного газа. Отбор пробы, газозаборная труба с водяным охлаждением, быстрый последовательный отбор проб, отбор для получения средней пробы, аспиратор, газозаборник.	

§ 146.	Наиболее употребительные реактивы для отдельных газов	388
	Для CO_2 : раствор едкого кали. Для углеводородов: дымящаяся серная кислота. Для O_2 : пирогалловая кислота, гипосульфит, натрий. Фосфор в палочках. Для CO : аммиачный раствор хлористой меди, пятиокись ванадия, хлористый палладий. Для H_2 : коллоидальный палладий, сжигание. Палладиевая бумага как индикатор для CO .	
§ 147.	Автоматические газоанализаторы	389
	Механизм, доставляющий энергию, запорная жидкость, насосный и измерительный механизм, поглотительный сосуд и камера сжигания. Прибор Душлеве. Газоанализатор Юнгерса. Газоанализатор Зав. «Теплоприбор» на аммиак.	
§ 148.	Газоанализаторы, основанные на физических свойствах исследуемых газов	394
	Интерферометр, газовые весы, газостолбовые весы, «Ранарекс», «Униграф», электрический газоанализатор «Сименс и Гальске» на CO и $\text{CO} + \text{H}_2$. Запаздывание, влияние влажности. Газоанализатор «Ранарекс». Новый электрический газоанализатор на O_2 Сименса.	
§ 149.	Коэффициент избытка воздуха	398
	Пример. Место отбора пробы.	
§ 150.	Объемные отношения	399
	Объемные отношения при сжигании с избытком воздуха. Избыток воздуха при сжигании газов, содержащих азот; воздушный газ, смешанный газ.	
§ 151.	Тепловые потери с отходящими газами	403
	Количество дымовых газов. Пример. Удельная теплоемкость. Таблица 31. Физические свойства составных частей, присутствующих в отходящих газах.	
§ 152.	Преимущества и недостатки химических и физических газоанализаторов	405

Приложение

Таблица 32.	Некоторые важнейшие константы. Наиболее достоверные в данное время значения и употребительные сокращения	407
Таблица 33.	Соотношения между метрическими системами мер: $c-g-s$, технической и тепло-технической	409
	Указатель литературы	411
	Предметный и именной указатель	425



ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Размеры пятого, еще сравнительно умеренно разросшегося издания повели к тому, что до появления настоящего, шестого издания, прошло десять лет. Так как эти десять лет характеризуются быстрым развитием измерительной техники как в смысле широкого охвата новых установок, так и в смысле развития самой техники измерений, то возникла и необходимость значительно расширить содержание. 170 новых рисунков наглядно свидетельствуют об этом пополнении содержания; к их точному и наглядному воспроизведению приложены все старания.

С другой стороны, желанием издательства и моим было, чтобы объем книги, которая все-таки уже разраслась с 222 страниц до 565, больше не увеличивать, так как это затруднило бы для многих приобретение книги и уменьшило бы ее потребительную ценность. Поэтому, несколько пространно кое-где написанный текст, был тщательно пересмотрен и во многих местах изложен более сжато и точно, а также даны более сжато и математические выкладки; благодаря чему сэкономлено много места. Сверх того, следующие большие отделы были радикально сокращены или вовсе вычеркнуты:

Измерение длин и поверхностей сведено к 1 параграфу вместо 1 главы.

Электрические измерения сильных токов отпали полностью.

Измерение протекающих количеств, благодаря ссылкам на соответствующие инструкции, оказалось возможным изложить более сокращенно, как § 91 о парамерах.

Описание форм индикаторов сокращено.

Измерение влажности воздуха (§ 131) точно так же.

Глава о газовом анализе переработана заново и в более краткой форме.

Таким путем было выиграно место для следующих добавлений:

§ 14 о сервомоторных устройствах.

§ 15 о вспомогательных электрических устройствах.

§ 16 о математических приспособлениях у измерительных приборов.

§ 24 об анализаторе.

§ 32 о манометрах для измерения количеств.

§ 57 ff о весах (по Циглеру).

§ 125 о радиационной пирометрии.

§ 137 об изменении тепловых потерь.

Сюда надо прибавить мелкие дополнения, разбросанные по всей книге. В общем, однако, книга сократилась на 86 страниц.

То, что может отсутствовать в тексте, пополнено ссылками на литературу; указатель литературы тщательно пополнен согласно новейшим данным, с опущением многих устаревших данных, за которыми в случае нужды можно обратиться к предыдущим изданиям.

Почти 30 лет тому назад, при первом издании этой книги, я высказал пожелание, чтобы физики также заинтересовались областью технических измерений и способствовали их усовершенствованию. Сейчас для техника вторжение физики в искусство технических измерений часто кажется слишком большим, когда уже многие задачи являются неразрешимыми без новейших физических вспомогательных средств, вроде токов высокой частоты, и когда возрастание утончен-

ности технических методов под влиянием физических стало общепризнанным. В этой книге этим физическим вспомогательным средствам могло быть посвящено лишь ограниченное место и ее основным стержнем остается описание специфических технических методов, предъявляющих к измерительному искусству экспериментатора другие и не всегда более скромные требования. Ссылки и указатель литературы могут и здесь помочь тому, кто не удовлетворится предложенным.

Я надеюсь, что книга в своей существенно обновленной форме окажется полезной и в дальнейшем.

Франкфурт на Майне
Декабрь 1922 г.

Антон Грамберг

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКОВ

Настоящее издание представляет полный перевод с последнего 6 немецкого издания классического труда проф. А. Грамберга со многими дополнениями.

Последние оказались необходимыми, во-первых, потому, что книга закончена автором в декабре 1932 г. С того времени в области контрольно-измерительной техники имеются серьезные достижения как в смысле усовершенствования описанных в книге приборов, так и появления целого ряда новых приборов, которые не могли попасть в книгу проф. А. Грамберга, во-вторых, потому, что автор приводит описания приборов почти исключительно немецкого происхождения и изготовления.

Между тем, за последние 10 лет в США, Англии и Франции приборостроение далеко шагнуло вперед и, например, в США появилось много весьма интересных контрольно-измерительных приборов, значительно превосходящих немецкие, по своей оригинальности, своеобразной практичности и особенно выносливости в самых тяжелых производственных условиях.

В последние годы советское приборостроение также сделало большие успехи и сейчас нет никаких оснований базироваться исключительно на приборах германского происхождения.

Считая, что в качестве образцов следует брать самое практическое и подходящее для нашей промышленности из того, что дает мировая техника в целом, переводчики, наряду с немецкими приборами, дали описание американских и французских, если они более отвечали требованиям производства, а также всегда указывали и изготавливаемые в СССР приборы.

Кроме того, имея в виду нужды нашей тяжелой промышленности и главным образом нашей металлургии, выполнение некоторых существенных изменений изложено несколько полнее, чем чрезмерно иногда сжатое изложение автора, могущее даже затруднить пользование книгой в производственной обстановке.

Дополнения и примечания переводчиков отмечены петитом или сноской.

За исключением измерения температуры ртутными термометрами и термометрами сопротивления остальная часть главы «Измерение температур» написана заново инж. Б. Е. Кинкулькиным кроме вводной части § 124, написанной редактором т. Гапоном А. Н.

Здесь прежде всего дана, проверенная, исчерпывающая таблица термоэлектродвижущих сил наиболее употребительных термопар, а также таблица поправочных коэффициентов на t° свободного конца термопары.

Описание общераспространенных типов термоэлектрических, оптических и радиационных пирометров пополнено описанием термоэлектрических пирометров для измерения температуры поверхности металлов и t° расплавленных черных и цветных металлов, цветовых пирометров, сравнительно нового фотоэлектрического метода измерения высоких температур, а также весьма практических для термической обработки дилатометрических пирометров Шевенара.

В заключение подробно проработан вопрос о погрешностях измерений пирометрами, а в конце главы дан сравнительный анализ достоинств и недостатков оптических и радиационных пирометров и области их применения.

В главе «Анализ газов», кроме описания обычных типов газоанализаторов заграничного и советского производства, добавлено описание специальных газоанализаторов на O_2 , на хлор и [советского на аммиак.

Соответственно с этими дополнениями пополнен и указатель литературы.

Инж. Н. П. Коняевым заново переработана глава о динамометрах, а при описании счетчиков работы изложена и теория ошибок приборов с фрикционным роликом.

Мелкие дополнения и примечания имеются во многих других местах текста.

Все это вызвало некоторое увеличение объема книги.

Переводчики заботливо старались сохранить своеобразный язык проф. Грамберга, для чего иногда приходилось отступать от дословного перевода характерных немецких выражений с целью лучше сохранить подлинный стиль автора ¹.

Харьков

Б. Кинкулькин, Н. Коняев

¹ Главы I, II, III, V, VIII, IX, XI, XII переведены инж. Н. П. Коняевым IV, VI, VII, X, XIII — инж. Б. Е. Кинкулькиным.

1. ЕДИНИЦЫ И РАЗМЕРНОСТИ

§ 1. Измерение и единицы меры. Цель измерения — численно определить измеряемую величину при помощи какой-нибудь единицы меры, т. е. установить, сколько раз взятая единица содержится в измеряемой величине. Если длина какого-либо стержня определена в 3,5 м, то метр является единицей меры; он также представляет некоторую длину. Число 3,5 показывает, что метр содержится в измеряемой величине три раза нацело и сверх того еще остается 0,5 м.

В результате измерения мы получаем, как и в большинстве случаев, некоторое именованное число. Наименование указывает единицу меры, посредством которой произведено измерение.

Однако, эта размерность не всегда выражается таким простым наименованием, как в вышеуказанном случае. Для скоростей мы выражаем результат измерения в метрах в секунду. Если железнодорожный поезд проходит путь в 250 м в течение 25 сек, то для получения скорости необходимо разделить оба

числа друг на друга: скорость будет равна $\frac{250 \text{ м}}{25 \text{ сек}} = 10 \text{ м/сек}$.

Единица меры — метр в секунду — называется *производной единицей*. Она действительно производится из двух *основных единиц* — метра — для измерения длины и секунды — для измерения времени. Письменное обозначение этой производной единицы через м/сек кроме преимущества, выражающегося в его краткости, имеет и другое: такое обозначение указывает, что для получения числовой величины скорости надо разделить число метров на число секунд. Если мы употребляем выражение — столько то метров в секунду, — то это длинновато, но правильно; сократить же его можно только так: м/сек.

Для измерения работы единицей меры обыкновенно служит килограммометр. Если мы поднимаем груз в 3 кг на высоту 5 м, то мы производим работу $3 \text{ кг} \cdot 5 \text{ м} = 15 \text{ кг} \cdot \text{м}$. Способ написания кг · м опять прямо показывает, как получается единица работы из основных единиц, именно в данном случае путем перемножения. Начертание кг/м поэтому будет неправильно, а правильно — кг · м.

Если груз в 18 кг действует на плечо рычага в 4 м, то получается момент вращения, изгибающий момент и т. п., также умножением $4 \text{ м} \cdot 18 \text{ кг} = 72 \text{ кг} \cdot \text{м}$.

Таким образом две различного рода величины могут иметь однообразное наименование. Несмотря, однако, на такое формальное совпадение они, естественно, остаются величинами различного рода. Вообще же наименование обычно вполне характеризует измеряемую величину; численное обозначение с наименованием кг · м ни в коем случае не может быть скоростью.

§ 2. Размерности. Выше мы вывели новые единицы из основных единиц: метр — для измерения длины, килограмм (вес) — для измерения сил и секунду — для измерения времени. Подобным же образом можно любую величину, подлежащую измерению, свести к этим же трем основным единицам технической системы мер, сокращенно обозначаемой *МКС*.

Если (это было выше показано на нескольких примерах) мы будем писать наименование мер так, чтобы было видно, как единица меры выведена из основных единиц, то мы будем иметь размерность измеряемой величины: м/сек

или $м \cdot сек^{-1}$ — размерность скорости, $кГ \cdot м$ — размерность работы или $м \cdot кГ$ — статического момента.

При вычислении результатов испытания необходимо обращать внимание на размерность. Этим часто можно предотвратить ошибки и сократить многие вычисления. Каждое уравнение должно быть однородным, т. е. размерность обеих его частей должна быть одинакова. В противном случае в уравнении будет ошибка.

Скорость можно выражать вместо $м/сек$ также $км/час$, как это обычно принято на железнодорожном транспорте. Равенство $100 км/час = 27,8 м/сек$ однородно; дело не в абсолютной величине единиц мер по одну и другую сторону равенства, а в том, что длина по обе стороны равенства делится на время. Действительно $100 км/час = 100 \frac{1000 м}{3600 сек} = \frac{100000}{3600} м/сек = 27,8 м/сек^1$.

Каждое уравнение должно быть однородным относительно основных единиц, входящих в него.

Если левая часть уравнения имеет размерность $м/сек$ и мы хотим перейти на единицу $см/сек$, то стоящее перед ней число будет в сто раз больше. Численный коэффициент правой части уравнения также возрастет при переходе от метров к сантиметрам. Уравнение останется численно правильным только в том случае, если и в числителе правой части его длина будет также в первой степени.

Правильное определение размерности имеет большое значение, например, при расчетах масштабов диаграмм. На координатной сетке (фиг. 1) мы откладываем силы P как ординаты, пути s , проходимые точкой приложения силы, как абсциссы. Ограниченная ординатами площадь F под кривой представляет произведенную работу Ps , масштаб которой определяется следующим образом. Если P выражено в масштабе $1 см = 100 кГ$ и s в масштабе $1 см = 0,5 м$, как путь точки приложения силы, то после соответствующего перемножения обеих левых и обеих правых частей равенства получим:

$1 см \cdot 1 см = 100 кГ \cdot 0,5 м$; $1 см^2 = 100 \cdot 0,5 кГ \cdot м$, как [масштаб для выражения работы.

Можно привести следующий аналогичный пример: объем газа или пара в цилиндре поршневой машины изображается абсциссами в масштабе $5 см = 1 м^3$. Соответствующие давления представлены ординатами в масштабе $2 см = 1 ат = 1 кГ/см^2 = 10000 кГ/м^2$. Площадь, ограниченная кривой, как известно, представляет работу, масштаб которой получается перемножением обеих частей равенства: $5 см \cdot 2 см = 1 м^3 \cdot 10000 кГ/м^2$; $10 см^2 = 10000 \frac{м^3 \cdot кГ}{м^2}$; $1 см^2 = 1000 кГ \cdot м$. Более трудные случаи исчисления масштабов и других вычислений, из которых вытекает практическая применимость понятия размерности, будут приведены на стр.

§ 3. Практические единицы. Не все применяемые при технических расчетах единицы выведены из основных единиц; еще и теперь широко применяется ряд старых единиц, как лошадиная сила $1 л. с. = 75 кГ \cdot м/сек$.

В последнее время для выражения не только электрических, но и механических мощностей вместо лошадиной силы входит в употребление киловатт, который выведен из системы $c-g-s$ и поэтому в технической системе единиц также не выражается круглым числом. Именно (стр. 16) $1 кВт = 1,36 л. с. = 102 кГ \cdot м/сек$. Это есть единица мощности.

Если, например, паровая машина развивает в течение часа мощность равную $1 кВт$, то она производит работу, которая обозначается, как киловатт-час и представляет единицу работы. Для нее можно вывести размерность — $квт \cdot час$, так как для определения произведенной работы необходимо умножить

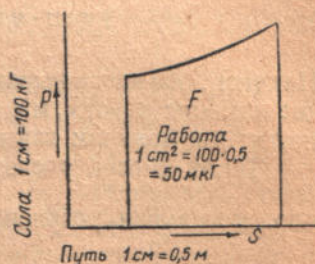


Рис. 1. Графическое вычисление масштаба диаграмм.

¹ Точно = 27,7...

мощность на число часов работы; поэтому писать — $\text{квт}/\text{час}$ — неправильно. Эту размерность (в широком смысле) можно также применять, как и ту, которая непосредственно составлена из основных единиц. Чтобы показать, насколько полезен расчет размерности, произведен пересчет киловатт-часов в вышеупомянутые единицы работы, как килограммометр и даже в тепловые единицы, которые обозначаются как килограмм калория (§ 128). Мы имеем

$$1 \text{ квт} = 102 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{сек};$$

$$1 \text{ квт} \cdot \text{час} = 102 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}} \text{ час} = 102 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}} 3600 \text{ сек} = 102 \cdot 3600 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}} \text{ сек};$$

$$1 \text{ квт} \cdot \text{час} = 367\,000 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

Так как

$$1 \text{ кг} \cdot \text{м} = \frac{1}{427} \text{ ккал}, \text{ или } \frac{1 \text{ ккал}}{427 \text{ кг} \cdot \text{м}} = 1,$$

то

$$1 \text{ квт} \cdot \text{час} = 367\,000 \text{ кг} \cdot \text{м} \frac{1}{427} \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{м}} = 860 \text{ ккал}.$$

Наконец, обе части выражения $1 \text{ квт} \cdot \text{час} = 860 \text{ ккал}$, в котором сравниваются две единицы работы, мы можем разделить на часы и перейти к единицам мощности; мы получим таким образом $1 \text{ квт} = 860 \text{ ккал}/\text{час}$.

Такой способ расчета приложим и к чисто практическим задачам. Например, котельная установка производит $18 \frac{\text{кг пар}}{\text{м}^2 \text{ пов. нагр. час}}$; паровая турбина потребляет пар $9 \frac{\text{кг}}{\text{квт} \cdot \text{час}}$; делением получим, что требуется $\frac{9 \text{ кг}/\text{квт} \cdot \text{час}}{18 \text{ кг}/\text{м}^2 \text{ пов. нагр. час}} = 0,5 \frac{\text{м}^2 \text{ пов. нагр.}}{\text{квт}}$, т. е. для производства 1 квт требуется $0,5 \text{ м}^2$ поверхности нагрева.

Если мы хотим размерность (в широком смысле) использовать для упомянутого контроля, то, естественно, мы должны позаботиться о ясном представлении и о точном и исчерпывающем наименовании каждой величины. Однако, очень часто применяются неточные и неполные наименования не только в обыденной жизни, но и в технике. Говорят, что оплачивают электрический ток за киловатты вместо $\text{квт} \cdot \text{час}$, что поезд идет со скоростью 80 километров вместо $\text{км}/\text{час}$. Как менее наглядный пример можно привести следующий: электрический ток стоит тем дешевле, чем равномернее (во времени) он расходуется потребителем; чем больше его потребляется при пиках нагрузки, тем дороже он тарифицируется; для этого вводят *продолжительность пользования* (загрузки) в часах. Предприятие, имеющее загрузку 8760 , будет потреблять ток без прерыва в течение круглого года. При продолжительности 4380 часов средняя годовая нагрузка предприятия составит половину фактической (или наибольшей допустимой). Правильным полным наименованием здесь будет: $4380 \text{ час}/\text{год}$; эта величина — безразмерна, так как и в числителе и в знаменателе стоит время, и мы можем написать $4380 \frac{\text{час}}{\text{год}} = 4380 \frac{\text{час}}{8760 \text{ час}} = 0,5$. Это число также употребляется под наименованием *коэффициента загрузки*. Если, например, средняя использованная нагрузка была 300 квт , а пиковая (возможная или фактическая) была 600 квт , то $\frac{300 \text{ квт}}{600 \text{ квт}} = 0,5$.

Наименование и размерность по смыслу не одно и то же; продолжительность пользования хотя и безразмерная, но тем не менее величина именованная.

Необходимо обратить внимание на то, что в последние годы Валло (Wallot) разработал своеобразную и, как кажется, полезную систему вычислений с именованными величинами и выражениями; им установлено разграничение уравнений величин — от уравнений численных значений (Л.).

Тепловые величины плохо поддаются установлению их размерностей; размерность единицы количества тепла должна бы выражаться в $\text{кГ} \cdot \text{м}$ соответственно эквивалентности тепла и работы. Между тем температура по Кельвину определяется (§ 118), исходя из второго начала термодинамики, только тем, что для $\log \frac{T}{T_0}$, т. е. для отношения искомой температуры T к некоторой нормальной температуре T_0 , может быть выведено некоторое, естественно безразмерное, выражение (Л.); размерность T остается таким образом неопределенной. Относительно энтропии s также можно только сказать, что из соотношения для обратимых процессов $T ds = dQ$ следует, что произведение T на s должно иметь то же наименование $\text{кГ} \cdot \text{м}$, как и Q . Если принять T за величину безразмерную, то получим выражение размерности $\text{кГ} \cdot \text{м}$ также для энтропии; отсюда получаются некоторые противоречия в понятиях. Поэтому тепловые величины, если они входят в обозначение какого-нибудь наименования, оставляют пока без изменения; размерность удельной теплоемкости, таким образом, будет $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$, размерность теплопроводности строительных материалов, например термоизоляционных материалов, будет $\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{°C} \cdot \text{час}}$.

Когда приходится несколько раз сокращать одинаковые величины в числителе и знаменателе дробного выражения размерности, то в результате не всегда возможно распознать строение размерности.

В выражении коэффициента теплопроводности $\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{°C} \cdot \text{час}}$, например, термоизоляционных материалов, нередко считают упущением то, что в знаменателе не стоит м^2 , между тем нас интересует, сколько прошло тепла сквозь м^2 . Но коэффициент теплопроводности обозначает, сколько проходит тепла сквозь сечение в 1 м^2 , в случае теплового потока при температурном градиенте 1 °C/м .

Поэтому получается $1 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{час}} = 1 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{°C} \cdot \text{час}}$. Или другой пример: едини-

цей вязкости жидкостей служит выражение $1 \frac{\text{сек} \cdot \text{кГ}}{\text{м}^2}$; такое наименование

ничего нам не говорит. Если же мы напишем $1 \frac{\text{кГ/м}^2}{\text{м}}$, тогда вязкость будет определена как напряжение сдвига в кГ/м^2 , которое проявляется между передвигающимися, один вдоль другого, слоями потока, когда разность их скоростей, взятая при расстоянии в 1 м между этими слоями, достигает величины 1 м/сек .

Другими словами, когда градиент скоростей составляет $1 \frac{\text{м/сек}}{\text{м}} = 1 \text{ сек}^{-1}$.

Обозначение градуса температуры через $^\circ$ неудачно для выражения размерностей, так как плохо воспроизводится в показательных, дробных и отрицательных выражениях размерностей. Попытки дать лучшее обозначение остались безрезультатными, поэтому теперь нередко полностью пишут слово «градус». Автор считает большее С (выговаривается градус), К (выговаривается градус Кельвина) наиболее подходящей заменой $^\circ$.

Коэффициент теплопроводности выразится тогда:

$$\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{°C} \cdot \text{час}} \text{ или } \text{ккал} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{час}^{-1}.$$

§ 4. Технические и физические основные единицы. В качестве основных единиц в технике приняты, как сказано, метр, килограмм-сила и секунда. В физике применяются вместо этого в CGS системе, сантиметр, грамм-масса и секунда. В технической системе килограмм представляет единицу силы; это — такая сила, с какою груз в один килограмм, под средней широтой и на

¹ В СССР принята международная температурная шкала, а потому $^\circ\text{C}$ обозначает градус международной стоградусной шкалы (а не градус Цельсия). Прим. ред.

уровне моря, следовательно, при ускорении силы тяжести кругло $9,81 \text{ м/сек}^2$ давит на свою подставку ¹.

За единицу массы в технической системе (MKS) следует принять массу, которой сила в 1 кг дает ускорение $1 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$. Единица массы в системе MKS, следовательно, равняется $9,80665 \text{ кг}$, или приблизительно $9,81 \text{ кг}$.

В CGS системе, наоборот, грамм является единицей массы. По формуле сила = масса \times ускорение = $1 \text{ г} \cdot \text{см} \cdot \text{сек}^{-2}$ единицей силы будет $1 \text{ г} \cdot \text{см} \cdot \text{сек}^{-2}$; такая единица называется диной.

В технической системе мер единица массы не выражается круглым числом и ее размерность является сложным выражением; в физической системе это имеет место в отношении единицы силы. Этого не следует упускать из виду при соответственных перерасчетах.

При теплотехнических расчетах в качестве единицы времени, преимущественно вместо секунды, служит час; поэтому во многих случаях говорят о теплотехнической системе мер с основными единицами м , кг и час , куда также всегда входит ккал и градус. Чтобы облегчить пересчеты по этим трем различным системам, на стр. 411 этой книги дается таблица (Л.). Устранению неудобства таких пересчетов путем всеобщего применения CGS системы также и в общей технике препятствуют следующие соображения. В смысле технического понятие силы предшествует и является первоначальным по отношению к массе. Понятие масса, например, в строительной технике вовсе не применяется.

Из единицы физической системы мер в технике пользуются киловаттом как единицей мощности, которая в последнее время все более и более вытесняет лошадиную силу.

У нас в СССР введена система механических единиц, основанная на основных единицах: единица массы — тонна
» длины — метр
» времени — секунда,

сокращенно обозначается MTS (метр-тонна-секунда).

Единица силы в системе MTS называется стен, сокращенно обозначаемой через стн^1 или стн . Стен есть сила, сообщаящая массе в 1 т ускорение $1 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$. Стен, очевидно, равен 10^8 дн или $101,972 \text{ кг}$.

Единицей работы будет стенометр или килоджоуль — работа, производимая силой в 1 стн при перемещении точки ее приложения на 1 м по направлению этой силы. Тысячной долей килоджоуля будет джоуль.

Единицей мощности будет килоджоуль в секунду или киловатт.

Единица давления, называется пьезой, обозначается через пз или пз . Пьеза равняется давлению, которое испытывает плоская поверхность в 1 м^2 под действием равномерно распределенной нагрузки в 1 стн .

Гектопьеза (гпз), равная ста пьезам, весьма близка к технической атмосфере, а именно $1 \text{ гпз} = 1,0197 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$.

Единицы системы MTS гораздо ближе к величинам, с которыми оперирует техника, чем единицы системы CGS, а перед технической системой имеет то преимущество, что она полностью связана с метрической системой (Прим. ред.).

Английская система мер пользуется для своего построения английским футом, английским фунтом и секундой и их высшими и низшими подразделе-

¹ Выражаясь точнее, килограмм является силой, сообщаящей массе в 1 кг ускорение $9,80665 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-2}$.

Последняя величина Всеобщей конференцией по мерам и весам в 1901 году принята как ускорение для нормальной силы тяжести.

Это соглашение делает значение кг величиной постоянной и независимой от величины ускорения в данном месте, а следовательно стабилизирует и все производные величины.

Такое местное ускорение, которое просто и с большой точностью может быть определено с помощью оборотного маятника и которое прямо пропорционально длине маятника, отбивающего секунды, не является постоянным даже на 45 параллели и на уровне моря, а меняется от меридиана к меридиану, в зависимости от геологического строения.

При всей принципиальной важности указанного различия между условным узаконением килограмма и местными его значениями, количественно эти различия не велики.

Так, разница в величине ускорения между Ленинградом и Харьковом (см. прилож. т. 32, и. 1) меньше $0,1\%$ и при технических расчетах и измерениях такие различия не следует принимать во внимание. (Прим. перев.).

ниями. Для измерения температур служит градус Фаренгейта. {Сводка дана в таблице 34 на стр. 411.

Основные единицы утверждены правительством и их неизменность гарантирована; для метра и килограмма эта неизменность покоится на известных парижских эталонах; что касается секунды или часа, то об этом заботится официальная служба времени. Килограмм-калория установлена законом; в ее величине мы уверены, поскольку Государственный физико-технический институт (у нас в СССР Всесоюзный научно-исслед. институт метрологии) практически осуществляет термометрическую шкалу, проверяет и паспортизирует термометры. Кроме того, величина ампера, вольта, ома и, прежде всего, киловатта также твердо установлена международным соглашением, поэтому в смысле теоретическом вся система измерений согласована.

II. СВОЙСТВА ПРИБОРОВ

§ 5. Общие сведения. Измерительные приборы (измерительные инструменты) охватывают необходимую для измерения известной величины совокупность приспособлений которую иначе приходилось бы собирать и налаживать от случая к случаю. Такой прибор должен быть всегда легко доступен осмотру, удобен в работе и, в целях сохранения наибольшей точности, переносным в собранном виде. Все отдельные части обыкновенно заключаются в одном пыленепроницаемом футляре.

Мы различаем показывающие приборы, компарирующие (компенсационные) и интегрирующие приборы (счетчики).

При физическом исследовании конечной целью часто является наивысшая достижимая точность измерения. При технических измерениях такая требовательность в большинстве случаев отступает на второй план. Главным требованием здесь выдвигается быстрота отсчета, с одной стороны, из-за большого числа отсчетов, с другой, потому что большие машины не могут без больших издержек надолго задерживаться для исследовательских целей; кроме того, часто приходится иметь дело и с определением колеблющихся величин.

Поэтому, техническим потребностям лучше всего удовлетворяют показывающие приборы, при которых измеряемая величина непосредственно отсчитывается на некоторой шкале или записывается на бумаге; отсчет или запись может также передаваться на расстояние.

§ 6. Показывающие приборы указывают мгновенное значение величины. Указатель (в широком смысле, например, хотя бы конец некоторого столба жидкости) устанавливается на определенном делении шкалы и непосредственно указывает соответствующее значение измеряемой величины. Шкала может быть равномерной, расширяющейся или суживающейся. Черты делений, отмечающие равные разности значений, отстоят друг от друга, при равномерной шкале, везде одинаково; при расширяющейся шкале эти расстояния увеличиваются в сторону возрастающих величин, т. е. к концу шкалы, а при суженной шкале, наоборот, уменьшаются.

Равномерная шкала дает во всех своих частях *отсчеты* одинаковой абсолютной точности, например, при обыкновенном чертежном масштабе мы можем отсчитать расстояние между двумя тонкими чертами с точностью до 0,1 мм, безразлично как велико самое расстояние; самое измерение зависит от того, имеются ли ошибки в масштабе. В данном случае мы масштаб считаем вполне точным. Относительная точность отсчета увеличивается при возрастании измеряемой величины, например, при измерении расстояния в 10 мм ошибка отсчета $\pm \frac{0,1 \text{ мм}}{10 \text{ мм}} = \pm 0,01$ или $\pm 1\%$; при измерении — 50 мм ошибка будет только $\pm \frac{0,1 \text{ мм}}{50 \text{ мм}} = \pm 0,002$ или $\pm 0,2\%$. Таким образом, если мы отсчитываем величину m с ошибкой $\pm \Delta m$, то относительная ошибка отсчета будет $\pm \frac{\Delta m}{m}$.

Расширяющаяся шкала дает большую точность отсчета преимущественно при больших значениях величины, поэтому отсчеты вблизи нуля неточны. Как пример могут быть названы электрические тепловые инструменты. Эти инстру-

менты хорошо пригодны для проверки постоянства какой-нибудь величины, например, напряжения на электроцентрале, но мало пригодны для наблюдения сильно колеблющихся величин, например силы тока на той же электроцентрале, нагрузка которой может иногда падать почти до холостого хода.

Суживающаяся (или суженная) шкала имеется на счетной линейке. Шкала линейки, как известно, суживается логарифмически, поэтому дает во всех частях одинаковую относительную точность. Если на расстоянии l от нуля шкалы находится деление m шкалы, то $l = a \log m$, где a есть постоянная величина; следовательно, по правилам дифференциального исчисления $dl = a \frac{1}{m} dm$ или

для малого, но конечного значения $\Delta l \sim a \frac{1}{m} \Delta m$, поэтому относительная точность

будет $\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta l}{a}$, иначе говоря она постоянная, если возможная, выраженная в миллиметрах абсолютная ошибка отсчета Δl везде одинакова.

Суженная шкала дает при более высоких значениях уменьшающуюся абсолютную точность отсчета.

Другим примером суженной шкалы является манометр, состоящий из U-образной трубки, с одной стороны закрытой, с другой — открытой и наполненной жидкостью. Сужение шкалы идет здесь в обратном отношении к давлению p ; если пренебречь весом столба жидкости, то $l = \frac{l_1}{p}$, где l_1 представляет длину закрытого колена (при постоянном сечении в свету) при давлении $p = 1$. В этом случае $\frac{\Delta p}{p} = p \frac{\Delta l}{l_1}$; относительная точность измерения уменьшается при возрастающем давлении, что, конечно, нежелательно.

Равномерная *безнулевая* шкала начинается с какого-нибудь деления выше нуля. Здесь, как и при расширяющейся шкале, наиболее употребительная область шкалы наилучше развита; недостаток таких приборов в том, что невозможно произвести проверку нулевой точки, или, как выражаются, последовательно проверить, действительно ли указатель при разгрузке возвращается на нуль. Это — самый простой способ проверки неповрежденности прибора.

Существуют также приборы, подвижная система которых вблизи нуля делается неустойчивой; такие приборы также не допускают возможности проверки нулевой точки (ср. § 32, рис. 90—93).

Весьма неудобно, когда у манометра отсутствует небольшая часть шкалы, у самого начала делений, и упорный штифт заставляет указатель останавливаться у искусственной нулевой точки, которая не является истинной нулевой точкой шкалы. Здесь сознательный расчет дать прибору возможность казаться всегда исправным. Упорный штифт должен располагаться несколько ниже нуля шкалы, правильно доведенной до нулевого пункта.

Точность отсчета может быть повышена посредством наложения шкалы на *зеркальную поверхность*. *Параллактическая ошибка* исчезает, когда указатель (лучше всего ножевидной формы) перекрывает свое зеркальное изображение или делит пополам изображение зрачка наблюдателя. Если зеркало отсутствует, указатель должен располагаться вплотную над шкалой. Точность отсчета при равномерной шкале может быть повышена применением нониуса.

Колебания указателя около его среднего положения ухудшают точность отсчета.

Для исследования свойств указывающих приборов воспользуемся следующими обозначениями. Пусть будет:

- x — подлежащая измерению величина; в отдельных случаях здесь мы будем ставить обычно употребляемые буквы, в роде p для давлений;
- m — обозначение делений шкалы, которые должны согласоваться с x ; определение $x = f(m)$ называется *градуировкой* (калибровкой, тарировкой);
- l — расстояние данного деления шкалы от нулевой точки, измеренное в единицах длины; соотношением $m = \varphi(l)$ характеризуется равномерная, суживающаяся или расширяющаяся шкала.

Здесь мы не касаемся случая, когда (в лаборатории или на производстве для засекречивания скрывают истинное значение) применяют любую равномерную шкалу без всякого отношения к измеряемой величине.

Точность измерения величины x обуславливается не только точностью отсчета m , о которой мы до сих пор говорили, но еще в большей степени точностью

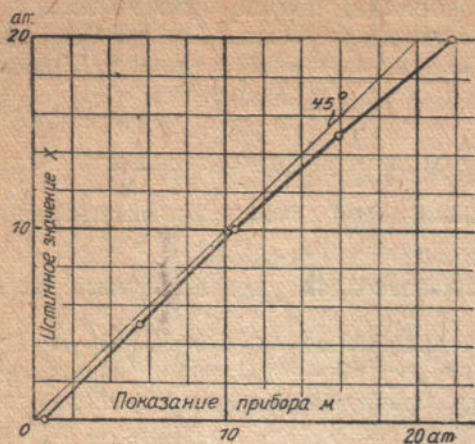


Рис. 2. Графическая характеристика манометра.

установки указателя. Это может зависеть, с одной стороны от отклонений указателя от истинного значения x , которые оказываются всегда неоднозначными и поэтому могут и должны быть сделаны безвредными проверочной калибровкой прибора или заменой шкалы. С другой стороны, это может зависеть от различия показаний m при многократных установках указателя при одинаковом, подлежащем измерению, значении x ; эти погрешности установки \pm могут или располагаться совершенно неупорядоченно внутри некоторых определенных границ или же при ходе указателя вверх может получаться установка $x + \Delta x$, а при ходе указателя сверху вниз — противоположное значение $x - \Delta x$.

В обоих случаях значение подлежащей

измерению величины остается неопределенным в пределах Δx . Δx называется погрешностью прибора или метода измерения, тогда как $\Delta x/x$ его относительной погрешностью.

Неточность установки зависит, с одной стороны, от величины W сопротивления, которое в виде трения мешает точной установке, с другой стороны, зависит от величины переставляющей силы. Сопротивления, вызываемые трением, могут быть сведены к возможно малой величине конструктивными приемами (разгрузкой подшипников, подшипниками на шариках или на камнях, опорами на призмах или подвесом на нитях). При данной величине сопротивления трения переставляющая сила должна быть возможно большей (§ 7).

Статические свойства измерительных приборов могут быть выявлены на примере манометра с пружинной диафрагмой; внешний вид этого прибора, имеющегося на любом паровом котле, хорошо знаком каждому; подробности устройства описаны на стр. 80.

Точность манометра проверяют, приключая его к пространству, в котором по желанию можно устанавливать различные, вполне известные давления (например, определяемые специальным контрольным прибором) и затем сравнивая показания указателя с этим действительным давлением.

При вполне точном манометре показания шкалы совпадали бы с этими действительными значениями давления.

Если мы на рис. 2 будем откладывать по оси абсцисс показания указателя, а по оси ординат — действительные значения давлений, те и другие в одинаковом масштабе, то мы получим наклонную под углом 45° прямую.

Вообще же, после некоторого утолщения деления шкалы становятся неверными: если, например, подвергнуть прибор давлению в 10 ат (§ 25), то манометр покажет, скажем, $10,2 \text{ ат}$. Если откладывать такие значения и соответствующие им отсчеты по осям координат и для других давлений, то получится рис. 2.

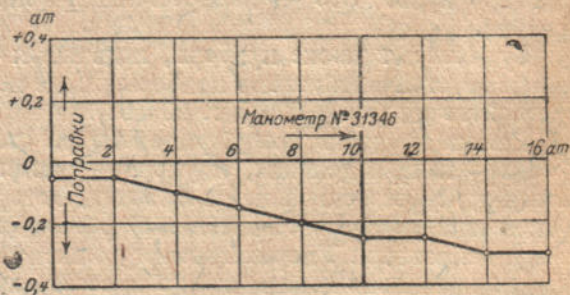


Рис. 3. График поправок.

Кривая, которую мы назовем поверочной кривой или характеристикой прибора, отклоняется от линии в 45° . Свойство измерительного устройства не изменять своей поверочной кривой в течение времени использования называется его постоянством или надежностью (Л. 33).

Если прибор показывает неверно в этом смысле, он тем не менее годен к употреблению, нужно только его выверить. *Поверкой* здесь обозначается построение поверочной кривой. Задача проверки представлена на рис. 2 или лучше на рис. 3; на последнем рисунке даны поправки, которые должны быть прибавлены арифметически к отсчитанным значениям, чтобы получить истинное значение; таким образом, поправки представляют взятые с обратным знаком отклонения показаний прибора от истинных значений.

Так как поправки представляют собой малые величины, то их можно откладывать в большем масштабе, чем величины отсчета, хотя бы в десятикратном; благодаря этому использование поправок, изображенных таким образом, делается более удобным.

Поправочные данные к манометру 31 346 (в ат)

Истинное значение давления	0	2	4	6	8	10	12	14	16
Показания прибора:									
прямой ход	0	2	4	6,1	8,1	10,2	12,2	14,2	16,2
обратный ход	0,1	2,1	4,2	6,2	8,3	10,3	12,3	14,4	16,4
среднее	0,05	2,05	4,1	6,15	8,2	10,25	12,25	14,3	16,3
Отклонение от истинных величин	0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,25	0,3	0,3
Поправки	-0,05	-0,05	-0,1	-0,15	-0,2	-0,25	-0,25	-0,3	-0,3

Таблица 1

Численный пример поверки манометра дает таблица 1. Эти результаты поверки на рисунке изображены весьма скачкообразными, так как поправки даны в увеличенном масштабе. Большие неравномерности в ходе прибора указывают, что здесь что-нибудь не в порядке.

Следует выверять все приборы, которые поддаются поверке, если возможно — до и после проведения исследования. Если обе проверки удовлетворительно согласуются одна с другой, то можно быть уверенным, что прибор во время переноски или исследования не потерпел повреждений, которые могли бы изменить его ход. Кроме того, проверка перед испытанием предохраняет от ошибок, которые могут сделать бесполезной всю работу.

При приборах с неравномерной шкалой необходимо быть особенно осмотрительным во время внесения поправок в отсчеты. Так, например, имеются манометры, которые одновременно служат как термометры, где по давлению насыщенного пара судят и об его температуре. Деления для давлений в этом случае равномерны, но для температур сужаются. Если при поверке нулевая точка оказывается не на месте, то это редко зависит от неправильности шкалы, а чаще указатель оказывается сдвинутым на некоторый небольшой угол; поправка везде снижает этот малый угол. Для давлений поправка таким образом постоянна, и мы вычитаем везде из показаний прибора столько, насколько указатель отклоняется от нуля в положении покоя. Для температур же поправка, вследствие неравномерности делений, будет в каждой точке различной; нельзя механически вычитать столько же градусов, сколько дает отклонение от нуля.

Если в лаборатории и при руководящих исследованиях нельзя уклоняться от подобных проверок, то при производстве и ремонте необходимо стараться

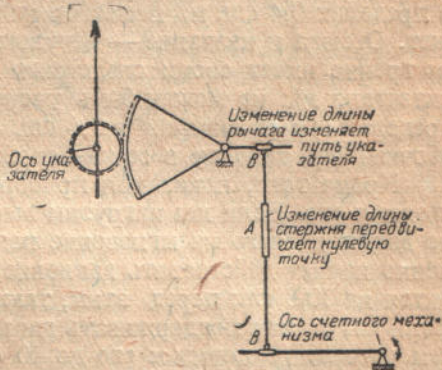


Рис. 4. Юстировочное устройство в соединительных частях между измерительным и указывающим механизмом.

данную шкалу настолько подогнать, чтобы прибор был верен по крайней мере в производственном масштабе. При такой выверке (юстировке) необходимо подогнать и нулевую точку и расстояния между делениями. В изобретенном измерительном механизме это достигается установочными устройствами А и В рис. 4, которые повторяются в многочисленных дальнейших рисунках (рис. 65, 66, 67) и которые имеют целью воздействовать в двойном направлении на связь между измеряющим и указывающим механизмом.

При нагруженных грузом измерительных механизмах вместо этого употребляются выверочные грузы, горизонтально и вертикально передвигающиеся на самом измерительном механизме (рис. 5, 127, 140). Такая перестановка сама должна быть доступной измерению; поэтому винтовое выверочное устройство на рис. 140, а также А на рис. 4 лучше, чем кулисная перестановка на рис. 140 или чем В на рис. 4.

Неверные показания прибора еще не делают его негодным к употреблению. Иначе обстоит дело с особенностью, которую мы обозначаем как *неточность* или *нечувствительность*. Этим названием определяется свойство инструмента показывать иначе при возрастающих показаниях (при прямом ходе), чем при убывающих (при обратном ходе). Если нагрузить манометр давлением в 10 ат, то он может показать 10,2 ат. Если теперь сперва повысить давление до 11 ат и затем *осторожно* сбавить его до 10 ат, то указатель может теперь остановиться на 10,6 ат, т. е. выше чем первый раз. Разница в 0,4 ат между обоими отсчетами зависит от трения: при отсутствии трения указатель в обоих случаях устанавливался бы постоянно около 10,4. Постукиванием прибора можно вполне или частично устранить влияние трения.

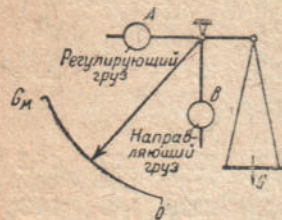


Рис. 5. Юстировочное устройство для выверки на измерительном механизме.

Следствием влияния трения является то, что мы можем изменять давление в пределах 0,4 ат, и, несмотря на это, указатель никакого изменения не покажет. Отсюда и название — *нечувствительность* — для такого свойства прибора; но трение имеет своим следствием также и то, что при известном показании указателя мы не можем быть уверены в действительной величине давления в пределах игры указателя в 0,4 ат, отсюда и другое название — *неточность* — для обозначения того же в основе свойства прибора.

Кроме того, показания прибора могут зависеть еще и от предыдущего состояния его. Если мы нагрузим вышеупомянутый манометр не только до 11 ат, но дадим на него на мгновение подействовать давлению в 20 ат и затем постепенно начнет действовать давление в 10 ат, то в этом случае указатель остановится на 10,8 ат; перед этим, также при обратном ходе, он показывал 10,6 ат. Если мы станем поддерживать давление в 20 ат в течение долгого времени и затем осторожно понизим его до 10 ат, то указатель может теперь остановиться даже на 11,1 ат. На показания такого прибора влияет не только *величина* ранее действовавшего давления, но также и *продолжительность* действия такого повышенного давления. Такие неправильности, вероятно, проистекают из того, что пружина, как действующая часть манометра, была использована выше ее предела упругости. Существует также *упругое последствие*. Оно в хороших приборах держится в узких пределах, но сотрясением совсем или почти совсем не устраняется.

* *
*

Упругое последствие является в сущности аperiodическим молекулярным демпфированием, так как оно только замедляет, иногда значительно, достижение нового положения равновесия.

Весьма важным источником погрешностей является мертвый ход передаточного механизма или так называемый *люфт*; это выражение в последнее время весьма прочно у нас укоренилось благодаря его краткости и выразительности. Этим выражением обозначают зазоры, неизбежно остающиеся между составными частями всякого подвижного соединения. В манометрах, изображенных на рис. 55 и 56, такими соединениями являются два шарнира (один из них обозначен В) и зубчатый сектор с шестерней. Как диаметр оси всякого шарнира, всегда немного

меньше диаметра его отверстия, так и зубец зубчатой передачи не может всегда заполнять соответствующую впадину; иначе движения передаточного механизма были бы невозможны; все эти зазоры и представляют собою люфт прибора.

При возрастании давления, т. е. при прямом ходе прибора подвижные части шарниров и зубцы передачи соприкасаются своими определенными сторонами. При обратном ходе, когда зубчатая пружина манометра уже толкает, а не тянет, эти части соприкоснутся теперь своими противоположными сторонами, при этом они должны пройти величину зазоров, еще не передвигая стрелки. Этот мертвый ход, когда измеряющий механизм уже начал двигаться обратно, а стрелка еще не сдвинулась с места благодаря зазорам, и есть люфт.

У манометра его легко определить, осторожно передвигая пальцем стрелку вперед и назад; всегда обнаруживается некоторое качание, определяющее величину люфта.

Таким образом, благодаря люфту, указатель при ходе вперед показывает несколько меньшую величину, а при обратном ходе несколько большую, другими словами люфт вызывает те же неточности показаний, как и трение. По мере изнашивания прибора люфт увеличивается и может достигать значительных величин. Поэтому необходимы меры, устраняющие этот недостаток.

Самым простым и обычным средством является постановка противолюфтовой пружины; такая спиральная пружина (волосок) видна на оси стрелки рис. 65 и 66. Эта пружина всегда прижимает шарниры и зубчатую передачу друг к другу одними и теми же сторонами и, таким образом, устраняет вредное влияние люфта. При ходе вперед манометр передвигает стрелку против усилия противолюфтовой пружины, а при обратном ходе стрелку двигает эта пружина.

Там, где применение противолюфтовой пружины почему-либо неудобно, употребляют разрезные гайки, разрезанные или вдоль (микрометр со скобой) или поперек (в делителях машинах и компараторах), которые можно чуть-чуть сдвигать и раздвигать, уменьшая этим люфт, а также разрезные шестерни (у сферометров и циферблатных микрометров).

Подобно трению действует также *упругий гистерезис*, который имеет свойство измерительных пружин несколько изменять величину деформации в зависимости от того, получается ли эта деформация при ходе вперед или при обратном ходе. При одних и тех же нагрузках эти деформации при ходе вперед получаются меньше, а при обратном ходе они получаются больше, т. е. деформации запаздывают.

Таким образом характер погрешности, вызываемой гистерезисом, в точности подобен погрешностям от трения. В этом нет ничего удивительного, так как упругий гистерезис в сущности и представляет внутреннее трение материала пружины; подобное трение можно непосредственно слышать при сгибании палочки олова.

Обычно упругий гистерезис у хороших пружин практически незаметен, не превышая долей процента, поэтому о нем редко упоминают. Однако, пишущему эти строки пришлось иметь дело с весьма неприятным случаем, когда у целой партии пружин, поставленных в динамометры, гистерезис часто заметно превышал 1%.

Неприятным свойством гистерезиса является то, что его, в противоположность люфту, нельзя устранить конструктивными мерами, а также нельзя обезвредить, как трение, постукиванием прибора перед отсчетом. (*Прим. перев.*)

* * *

Здесь также следует указать вообще на влияние температуры на ход почти всех измерительных приборов. При индикаторе такое влияние приводит к тому, что приходится заменить старые типы индикаторами с холодной пружиной, у которых собственно измеряющая часть, именно пружина, достаточно удалена от теплового воздействия индицируемой машины. Несмотря на это остается еще одно влияние, происходящее из-за теплового расширения поршня индикатора.

В общем из тепловых воздействий можно назвать следующие: воздействие на упругие силы измеряющих пружин; тепловое расширение частей, абсолютная величина которых имеет влияние на результаты измерений; разница в расширении частей, относительная величина которых заметно влияет на результаты измерений; имеющиеся особенно плохие последствия изменения положения центра тяжести вращающихся частей по отношению к оси вращения. Все сказанное имеет в виду влияние внешних источников теплоты или также просто температуры окружающей среды. При электрических измерительных приборах имеет также значение и внутреннее нагревание проводников протекающим рабочим током, так как этим изменяется и омическое сопротивление, что может вызвать значительные погрешности измерения¹.

§ 7. Статическая теория показывающих приборов. *Перестанавливающая сила* R есть та сила, которая переводит указатель из его нулевого положения

¹ Нужно заметить, что вредное влияние расширения частей иногда может быть устранено применением инвара с практически нулевым температурным коэффициентом расширения (нивеллирные рейки со шкалой на инварной ленте), а изменение упругих свойств — применением элинвар (волоски часовых балансов). (*Прим. перев.*)

к установке в должном положении. Она возникает из разности внутренней и внешней направляющей силы и исчезает при окончательной установке указателя, так как тогда обе эти силы становятся равными друг другу. *Внутренняя направляющая сила* P_i есть та сила, при помощи которой измеряемая величина воздействует на указывающий механизм и которая вообще стремится передвинуть указатель до конца шкалы и даже дальше за ее предел. *Внешняя направляющая сила* P_a есть противодействующая передвижению указателя сила и является собственно измеряющей силой, в большинстве случаев в виде груза или пружины. Обе направляющие силы должны уравниваться только при окончательной правильной установке указателя, при которой переставляющая сила

$$R = P_i - P_a \quad (1)$$

становится равной нулю.

Вышеуказанные понятия не могут прямо прилагаться к оптическим и некоторым другим измерительным устройствам (например, к омметрам со скрещенными рамками, рис. 28, логотметрам и др.) без рассмотрения специфических особенностей таких приборов.

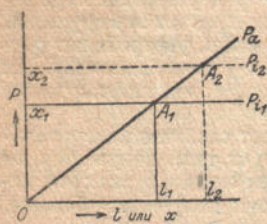


Рис. 6. Направляющие силы в приборе с возрастающей внешней направляющей силой.

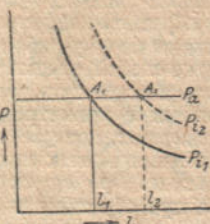


Рис. 7. Направляющие силы в приборе с уменьшающейся внутренней направляющей силой (Паромер Байера-Сименса, рис. 216).

В ртутном манометре такой внутренней направляющей силой P_i , передвигающей ртутный столб, и является самое измеряемое давление. Эта внутренняя направляющая сила остается неизменной и тогда, когда ртутный столб колеблется вверх и вниз, а следовательно изменяется и высота подъема l , т. е. она независима от l и изображается горизонтальной прямой P_i (рис. 6). Внешняя направляющая сила есть вес ртутного столба,

т. е. производимое им давление, которое пропорционально неуравновешенной высоте столба, т. е. подъему l , поэтому изображается поднимающейся прямой P_a .

Обе линии резко и определенно пересекаются в точке A_1 , на которой должен остановиться столб, когда обе направляющие силы наконец уравниваются. При более высоком давлении P_i будет больше, но опять останется постоянным по отношению к l , соответственно прямой P_{i2} ; ей соответствует точка пересечения A_2 и подъем l_2 .

При индикаторе или при поршневом манометре с пружинной нагрузкой, внутреннюю направляющую силу является измеряемое давление, производимое жидкостью на поршень, умноженное на площадь сечения этого поршня.

При определенном измеряемом давлении эта сила независима от положения поршня, а следовательно и от установки l указателя, поэтому опять изображается горизонтальной линией P_{i1} (рис. 6). Внешней направляющей силой является сила P_a , с какой давит на поршень измерительная (эталонная) пружина, и которая возрастает пропорционально подъему l поршня (т. е. деформации пружины). Указатель устанавливается на подъеме l_1 , который соответственно обозначается через x_1 . Для другого давления x_2 подъем будет l_2 .

Несколько иначе выражаются соотношения при поплавковом парометре (рис. 216); вес груза, обременяющего поплавок, является постоянной внешней направляющей силой P_a , тогда как внутренняя направляющая сила P_i , развиваемая действующим на поплавок определенным измеряемым количеством пара x_1 , уменьшается при возрастающем подъеме поплавка, а при убывающем — быстро возрастает, асимптотически приближаясь с обеих сторон к осям (рис. 7).

В обоих случаях устанавливается (рис. 8) то положение l указателя, которое соответствует точке пересечения A_1 кривых P_a и P_i , причем последняя изменяется вместе с изменением значения измеряемой величины.

При отклонении указателя на некоторую малую величину dl , между величинами P_a и P_i возникает разность, отвечающая отрезку BC , т. е. равная алге-

браической разности обоих приращений dP_a и dP_i , которая возникает при таком произвольном отклонении dl указателя от должного значения. Поэтому переставляющая сила, отнесенная к единице длины шкалы, будет

$$R_1 = \frac{dP_a}{dl} - \frac{dP_i}{dl}. \quad (2)$$

Она может быть определена по правилам дифференциального исчисления или чисто опытным путем.

Каждому значению $x_0, x_1, x_2 \dots$ измеряемой величины отвечает своя кривая $P_{i_0}, P_{i_1}, P_{i_2} \dots$ некоторого семейства или системы кривых. Как видно из начерченной на рис. 8 системы кривых, переставляющая сила R убывает с уменьшением l , так как угол пересечения кривых P_a и P_i делается все острее; получается изображение, как на рис. 9; точка A_1 рис. 8 соответствует точке A_1' рис. 9. Для l , равного нулю, кривые P_a и P_i соприкасаются в точке A_0 , и тогда по формуле (2) $R_1 = 0$.

Следует избегать, чтобы кривая P_i имела где-нибудь точку касания с кривой значений P_a , когда R_1 становится равным нулю. Установка на соответствующее значение шкалы становится неудовлетворительной. Она вообще становится тем более неточной, чем меньше делается R_1 . Именно, если на рис. 10 сопротивление трения имеет определенную (принимаемую постоянной, безразлично со знаком \pm) величину W , то кривые $P_a + W$ и $P_a - W$ лягут рядом с кривой P_a ; неопределенность установки определяется в каждый момент ординатами l_1' и l_1'' , между их точками пересечения соответствующей кривой P_i ; область ненадежности показаний, изображенная на рис. 10 жирной чертой, тем менее, чем больше $\frac{dP_a}{dl} - \frac{dP_i}{dl}$ или чем круче следовательно кривая P_i пересекает область от $P_a + W$ до $P_a - W$.

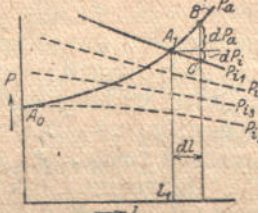


Рис. 8. Внутренние и внешние направляющие силы.



Рис. 9. Переставляющие силы по рис. 8.

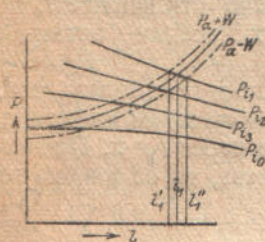


Рис. 10. Действие трения W .

Такое благоприятное пересечение может, как показывает рис. 6 и 7, быть достигнуто или увеличением внешней или внутренней направляющей силы, при возрастающем отклонении l , либо и тем и другим вместе.

Для малых значений W , как это свойственно хорошим электрическим измерительным приборам, пригоден следующий вывод для величины ошибки Δl установки. Рассмотрим треугольник, имеющий вершину A_1 на рис. 8. На рис. 11 аналогичный треугольник вычерчен в увеличенном виде. Здесь в этой области, где части кривых P_a и P_i можно рассматривать как прямолинейные,

$$-W = \overline{BZ} + \overline{ZC} = \overline{AZ} (\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \gamma),$$

$$-W = \Delta l \left(\frac{dP_a}{db} - \frac{dP_i}{db} \right),$$

$$\Delta l = -\frac{W}{R_1}. \quad (3)$$

Отрицательный знак перед правой частью равенства дает при отрицательных значениях W положительное значение Δl .

(При $l = 0$ для точки A_0 (рис. 8) получается $\Delta l = \infty$, так как $R = 0$; другими словами там, где кривые P_a и P_i имеют точку касания, ошибка (абсолютная) в отсчете велика, даже при весьма малом сопротивлении трения. В особом

случае (рис. 8 и 10), где это касание сверх того имеет место при $l = 0$, относительная ошибка установки

$$\frac{\Delta l}{l} = - \frac{W}{l \cdot R} \quad (3a)$$

становится особенно большой, а именно теоретически $\infty/0$. Прибор в этом случае за отсутствием направляющей силы больше не возвращается к нулю. Это случается со всеми измерительными приборами, работа которых зависит от квадрата измеряемой величины; показывать они должны квадратный корень из действительной величины P_a . Сюда принадлежат приборы с нагреваемой проволокой, применяемые в электротехнике, затем те волюмометры (измерители количества), которые определяют количество протекающих через дроссельное устройство жидкостей или газов, из получающегося при дросселировании повышения давления, как его квадратный корень. Здесь отклонения прибора стараются сделать пропорциональными корню из измерительного давления; но это всегда приводит к неопределенности около нулевой точки, как это разъясняется в § 32.

Диаграммы, изображенные на рис. 14, получены с измерителем количеств Гере, что к тому же дает пример обработки результатов точно произведенных измерений.

Если относительная точность измерения должна быть везде одинаковой, то согласно формуле (3a) необходимо сделать $\frac{W}{lR_1} = \text{const}$; так как в большинстве случаев W более

Рис. 11. Пересечение кривых P_a и P_l рис. 8 в увеличенном масштабе.

или менее постоянно, то должно быть $lR_1 = \text{const}$, т. е. направляющая сила при изменяющихся значениях l должна возрастать по равносторонней гиперболе и для $l = 0$ должно $R_1 = \infty$. Этот случай и осуществляется в паромере Байера-Сименса (рис. 7).

В общем дело идет не о том, насколько точно определено отклонение l , но насколько точно определяется соответствующее этому отклонению истинное значение x измеряемой величины.

Только при равномерном делении шкалы, которое выше и предполагалось, x и l друг другу пропорциональны и рис. 6, при некотором изменении масштаба, пригодный для x , поэтому на рис. 6 абсциссы обозначены и через l и x . При неравномерном делении дело идет уже не об ошибке Δl в отсчете, но об ошибке Δx в самой измеряемой величине. Она равна

$$\Delta x = - \frac{W}{R_1}, \quad (4)$$

а переставляющая сила R_1 должна на этот раз быть найдена по формуле

$$R_1 = \frac{dP_a}{dx} - \frac{dP_l}{dx} \quad (5)$$

из диаграммы, на которой отложены те же данные, как и раньше, но только с величинами x в качестве абсциссы, определенными соответственно из соотношения $x = f(l)$.

Примером может служить опять волюмометр (измеритель количеств) с дроссельной диафрагмой. Если для измерения давления мы применим прибор, дающий пропорциональные ему отклонения, то надо сделать перемещения указателя, именно пишущего пера, пропорциональными количеству, т. е. корню квадратному из давления, для чего в § 16 и 32 будут описаны соответствующие передачи, в виде профильной шайбы по рис. 40 или 222.

Необходимо однако заметить, что в этом случае не только точность отсчета, благодаря мелким делениям шкалы при малых измеряемых давлениях, становится неудовлетворительной, но при этом исчезает также и переставляющая сила. Поэтому плохой становится и установка. Поэтому прежде всего невозможно посредством какого-либо механизма, вроде соответствующей передачи, превратить деления в пропорциональные без того, чтобы еще не уменьшить

перестанавливающую силу; перестанавливающая сила, равная нулю, сохраняет это значение при любых передачах, поэтому при любом мыслимом приспособлении установка вблизи нуля будет становиться ненадежной, тем более что всякая передача увеличивает трение.

Измерительные приборы и методы измерения, которые связаны с квадратичной зависимостью или повинуются подобному же показательному закону и, таким образом, дают расширяющую шкалу, становятся поэтому принципиально неприменимыми, когда измеряемая величина подходит близко к нулевому значению. Рис. 12 и 13 разъясняют эти соотношения. Для измерения давления сохраняется рис. 6. Здесь же (рис. 12), благодаря квадратичному соотношению между перепадом давления и скоростью протекания, отклонение и внешняя направляющая сила изображается параболой. Внутренняя направляющая

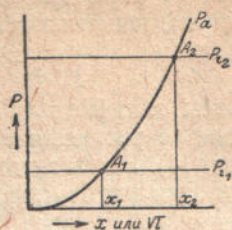


Рис. 12. Направляющие силы при квадратичной зависимости.

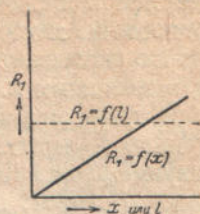


Рис. 13. Перестанавливающие силы при квадратичной зависимости.

сила дается теперь, как и раньше, в виде прямой, например P_{i1} , соответственно точке пересечения A_1 и показанию x_1 ; при удвоенном протекающем количестве $x_2 = 2x_1$; P_a делается вчетверо выше, т. е. дает также $P_{i2} = 4P_{i1}$.

В то время, как при измерении давлений (рис. 6) угол пересечения между P_i и P_a постоянно одинаков и перестанавливающая сила также остается без изменения, при измерении количества (рис. 12) пересечение тем острее, а перестанавливающая сила тем меньше, и измерение тем более неточно, чем меньше измеряемое количество x . При $x = 0$, P_i совпадает с осью абсцисс и P_i становится касательной к P_a . Как уже было сказано, перестанавливающая сила, взятая по отношению к количеству, здесь становится равной нулю и точность установки при любом заданном трении совершенно недостаточна.

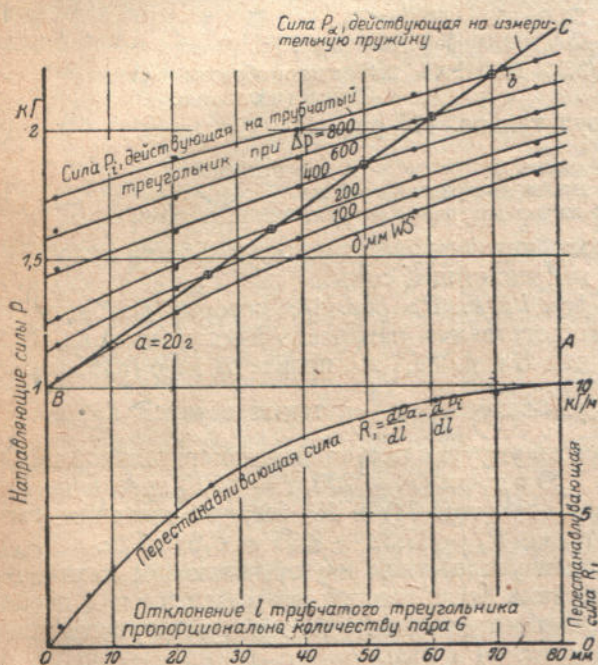


Рис. 14. Взаимоотношение сил в дифференциальном манометре Гере.

По математическим свойствам параболы $P_a = c \cdot x^2$; отсюда $\frac{dP_a}{dx} = 2cx$; далее постоянно $\frac{dP_i}{dx} = 0$; отсюда будет $R_1 = 2cx$, поэтому перестанавливающая сила будет представлена восходящей прямой, для $x = 0$ будет и $R_1 = 0$ (см. рис. 13); при определенном значении W для трения, при $x = 0$, ошибка измерения становится $\Delta x = \infty$.

Ход семейства кривых P_i может быть найден путем испытаний готового прибора; получаемый отсюда ход изменений R_1 важен для оценки прибора. Для производства таких испытаний разъединяют связь между P_a и P_i , т. е. отцепляют измеряющую пружину или измеряющий груз от подвижной системы. К точке подвеса каждой из обеих частей присоединяют какое-либо устройство для измерения сил, например, весы или непосредственно нагружают разновесками,

Исследование измерительной пружины дает соотношение между силой и перемещениями, которые наносят над соответствующими значениями шкалы измеряемой величины x . При исследовании подвижной системы получается соотношение между силой и перемещением для каждого значения того влияния, которое оказывается измеряемой величиной x ; все такие соотношения наносятся над значениями x .

В дифференциальном манометре Гере подвешивают измеряющую пружину отдельно и определяют ее растяжение под действием измеряющих сил; это дает кривую P_a (рис. 10 или 14). Затем задают на манометр давление в 0, 100, 200... мм водяного столба, приводят трубчатый треугольник дифманометра в положения 0, 20, 40 . . . мм от нулевой точки и измеряют, хотя бы опирая на подставленные весы, силы P_i , которые при этом проявляются; это дает семейство кривых, косо поднимающихся слева направо.

В отмеченных крестиками точках пересечений определяют наклоны пересекающихся линий; разница этих наклонов есть перестанавливающая сила, как это дано нижней кривой. Так как кривая P_i для значения давления нуля и P_a при $l = 0$ взаимно соприкасаются, то здесь перестанавливающая сила равна нулю. В остальном отмеченные крестиками точки дают следующие соотношения:

для отклонения $l = 0$	25,6	35,6	50	60,6	70 мм	
необходимо $\Delta p = 0$	100	200	400	600	800 мм H_2O ,	
отношение $l/\sqrt{\Delta p} =$	2,56	2,54	2,50	2,47	2,47	таким образом в сносной степени постоянно.

Определение единиц также поучительно. На рис. 14

по горизонтали:	8 мм на диаграмме = 10 мм отклонения
	или 32 мм на диаграмме = 40 мм »
по вертикали:	32 мм на диаграмме = 1 кг направляющей силы.

Делением двух последних строчек получаем угол наклона в 45° или $\text{tg } 45^\circ = 1$ отвечает 1 кг/40 мм или 25 кг/м направляющей силы.

Таким образом, $dP/dl = 25 \cdot \text{tg } \alpha$ кг/м. По рис. 14, который изображает результаты исследований, мы непосредственно измеряем наклон прямой BC , именно C лежит на 46,3 мм выше, чем B и на 66,7 мм правее от него (изображение по сравнению с оригиналом уменьшено на $\frac{1}{3}$); таким образом $dP_a/dl = 25 \cdot (46,3 : 66,7) = 17,38$ кг/м; это есть упругая постоянная измерительной пружины. Наклон кривой $P = 200$ мм H_2O в точке ($P = 200$, $l = 35,6$) определяется посредством призматического дериватора (стр. 74) в $20^\circ 30'$, что соответствует тангенсу 0,374 и $dP_i/dl = 9,35$. Отсюда $R_1 = 17,38 - 9,35 = 8,03$ кг/м.

Если связь между измерительным устройством и укладываемым механизмом не жесткая, то ее деформации также учитываются при рассмотрении перестанавливающей силы. Это наиболее отчетливо видно на примере ртутного манометра с поплавокым указателем (рис. 94 и 218).

Ртуть, как весьма подвижная жидкость, точно устанавливается на правильном уровне, пока не применяется поплавок. При погружении поплавка в зеркало ртути имеют силу соображения, аналогичные рассуждениям о статических и динамических свойствах измерительных приборов: поплавок с указателем есть измерительный прибор для указания положения зеркала ртути; только отклонения от должного положения освобождают перестанавливающую силу. В конструктивном отношении необходимо иметь в виду, что эти отклонения, а, следовательно, и перестанавливающие силы, тем больше и тем скорее будут проявляться, чем уже будет кольцевое пространство вокруг поплавка. Впрочем оба ртутных зеркала также стоят неправильно, пока поплавок и указатель не стоят в должном положении; только разность их уровней имеет должную величину.

§ 8. Динамические свойства показывающих приборов. Как будет вести себя прибор, когда измеряемая величина изменяется? Пусть она изменяется от некоторой постоянной величины скачком до некоторой другой величины, которая дальше тоже остается постоянной; при этом желательно, чтобы прибор возможно быстро установился на новом значении и его указатель стал в новом положении.

Лучше всего для рассмотрения взять индикатор или поршневой манометр с пружинной нагрузкой.

Пусть жирная линия $XABN$ на рис. 15 изображает ход давления в зависимости от времени. От A до B давление возрастает весьма быстро, т. е. в неизмеримо короткий промежуток времени. Прибор может следовать за этим возрастанием лишь в меру переставляющих сил, которые проявляются как некоторая разность между внешней направляющей силой, данной линией давления ABC , и внутренней направляющей силой измерительной пружины, изображенной ходом пишущего пера AC . Так как вертикальные расстояния между BC и AC являются мерой переставляющих сил и так как они действовали в течение времени t , то заштрихованная площадь $ABC = \int R dt$

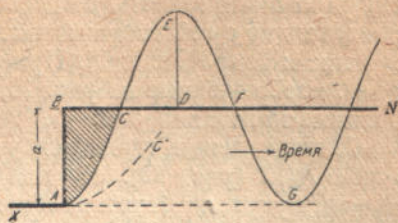


Рис. 15. Ход недемпфированного прибора.

по закону импульсов является мерою скорости (вернее количества движения mv), которую механизм приобрел при C в том случае, когда нет потерь энергии от трения; кинетическая энергия в C позволяет пишущему органу перескочить дальше C , пока он не остановится в E и затем совершит обратный путь EFG . Колебания никогда бы не прекратились, если бы механизм работал без сопротивлений.

Если заменить пружину более мягкой¹, оставив все остальное без перемен, то частота колебаний уменьшится при возросших одновременно амплитудах (перемещении поршня), и кривая AC заменится кривой AC' ; то же случится, если при одинаковой пружине масса всех движущихся частей возрастет. Если при той же пружине и при прочих равных условиях уменьшить внутреннюю направляющую силу, хотя бы применением меньшего поршня (рис. 281), то частота колебаний не изменится, но амплитуды уменьшатся. Сводя воедино все возможности, можно сказать, что колебания будут тем быстрее, чем меньше инерция движущихся частей прибора и чем больше переставляющая сила (отнесенная к единице перемещения), т. е. $R_1 = \frac{dP_a}{dx} - \frac{dP_i}{dx}$.

Обе эти величины, при передаче, условно работающей без сопротивления, определяют ход кривой AC и тем определяют число синусоидальных колебаний — его собственное число колебаний, производимых в секунду указывающим механизмом. (Прим. перев.).

Если масса подвижных частей будет m (причем различные скорости различных частей должны быть учтены приведением всех движущих масс к одной, например, расположенной в точке прикрепления измерительной пружины), и c будет упругая постоянная пружины, т. е. та сила, которую необходимо приложить к пружине, чтобы растянуть или сжать ее на единицу длины, то собственное время колебания (период колебания) определится выражением

$$t_s = 2\pi \sqrt{\frac{m}{c}}$$

Собственное число колебаний $1 : t_s$ возрастает при уменьшении инерции или массы и при увеличении переставляющей силы.

¹ В оригинале «более слабою» «eine schwächere». Если винтовую пружину укоротить, разрезав пополам, то обе половинки, естественно, окажутся вдвое жестче, чем целая, тогда как нельзя сказать, что пружина сделалась вдвое сильнее, от того что ее обрезали на половину. Жесткость пружины понятие более определенное, чем сила пружины; пружина тем жестче, чем выше ее упругая постоянная; размерность и той и другой — $k \Gamma / M$.

Если заменить пружину более мягкой, то переставляющая сила, при прочих равных условиях, не может остаться «тою же самою» «die gleichen» как сказано в оригинале.

Действительно, из формулы (5) для переставляющей силы $R_1 = \frac{dP_a}{dx} - \frac{dP_i}{dx}$ можно видеть, что $\frac{dP_i}{dx}$ здесь равно нулю, так как внутренняя направляющая сила P_i представляет

давление на поршень индикатора и не изменяется от перемещения поршня, поэтому переставляющая сила целиком определяется $\frac{dP_a}{dx}$; последнее выражение представляет не что иное, как упругую постоянную пружины. Заменить пружину более мягкой значит уменьшить ее упругую постоянную, уменьшить $\frac{dP_a}{dx}$, уменьшить переставляющую силу.

Одна и та же величина, очевидно, не может одновременно и уменьшиться и остаться «той же самой». Поэтому мы переделали весь абзац оригинала и освободили его от противоречий. (Прим. перев.).

В каждом приборе имеются *сопротивления*; неизбежно трение в каких-либо подшипниках и сопротивление воздуха, в котором совершает свои движения передающий механизм. Сопротивления передачи тормозят колебания и заставляют амплитуду постепенно затухать; однако, лишь при очень сильном демпфировании заметно меняется число происходящих в секунду колебаний сравнительно с собственным числом колебания прибора, условно воображаемого без всяких сопротивлений. При этом возникают движения указывающего механизма, изображенные на рис. 16, причем кривая 1 опять представляет недемпфированные колебания рис. 15.

Сопротивления стремятся уничтожить колебания, поглощая площадь скоростей ABC (рис. 15). Но для пригодности прибора представляется не безразличным, будут ли сопротивления с уменьшением скорости сами уменьшаться, например, пропорционально скорости или пропорционально ее квадрату или какой-либо другой ее степени скорости нуль, при спокойном состоянии указывающего механизма, соответствует сопротивлению, равное нулю. Либо эти сопротивления не стремятся к нулю вместе со скоростью передающего механизма, так что они даже в положении покоя имеют некоторую конечную величину.

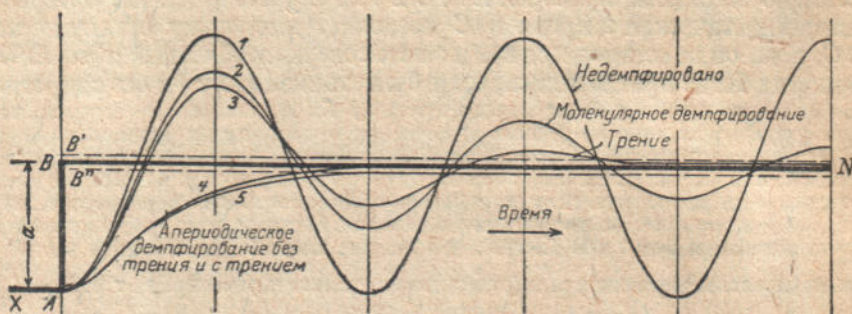


Рис. 16. Ход прибора при внезапных изменениях.

Последнее, как известно, является свойством трения между твердыми телами, величина которого более или менее независима от скорости. Можно даже сказать, что трение покоя больше трения движения. Напротив того, сопротивления, которые оказывают движению жидкости или газы, например, воздух, обращаются в нуль вместе со скоростью. Поэтому они только при *быстром* движении оказывают существенное сопротивление, медленному же движению передающего механизма они вовсе не мешают. Такой род сопротивлений, в противоположность трению в передающем механизме, называют его *демпфированием* (в узком смысле).

Однако, обычно также под понятием демпфирования (в широком смысле) объединяют и трение вместе с настоящим демпфированием. Говорят также о механическом и о молекулярном демпфировании и называют прибор, в котором происходят оба рода демпфирования, *вдвойне демпфированным*.

Пример исследования по Вагенеру механически записанных вдвойне демпфированных колебаний будет дан в § 114.

Для пригодности прибора, таким образом, существенно, будут ли колебания уничтожаться или чисто молекулярным демпфированием, или трением, или тем и другим вместе. В первом случае ход прибора изображается кривой 2, в последнем — кривой 3. Трение является причиной нечувствительности прибора (§ 7); оно ведет к тому, что указатель может остановиться не только в его должном положении BN , но также настолько же выше или ниже, сколько соответствует величине трения. Пусть B' и B'' будут показания прибора, когда давление постепенно приводят к величине BN , один раз повышая его снизу вверх, другой раз понижая сверху вниз. Колебания тогда прекращаются где-нибудь между B' и B'' , как только развившаяся энергия колебаний будет поглощена. Трение таким образом является причиной неуверенности относительно истинного значения измеряемой величины, ибо последняя заключается в пределах между B' и B'' .

Если бы мы захотели в интересах быстреего отсчета усилить трение, то, конечно, колебания быстро прекратились бы, но одновременно расширилось бы расстояние между B' и B'' и отсчеты стали бы еще более неточными. Таким образом, как это опять обнаруживается, трение является вредным.

Ход прибора, свободного от трения, но тем не менее демпфированного (молекулярно), может быть представлен кривой 2. Ограниченные кривой площади выше и ниже должного положения BN делаются все меньше и меньше, однако эти площади никогда не исчезнут, потому что порождаемое сопротивление стремится к нулю вместе со скоростью.

Таким образом, в чисто демпфированном приборе колебания никогда совсем не прекратятся. Чем сильнее демпфирование, тем скорее размахи убывают, становясь незаметными. Следовательно, не трение, а молекулярное демпфирование является действительным средством для погашения, в интересах скорейшего отсчета колебаний указателя.

Затухание чисто демпфированных колебаний происходит таким образом, что участки синусоидальной кривой, изображающие последовательные амплитуды, касаются своими вершинами двух, лежащих выше и ниже оси BN , кривых, определяемых показательной функцией, дающей для их расстояний y от

оси B выражение $y = ae^{-\frac{\epsilon}{2m} \cdot t}$; ϵ означает коэффициент демпфирования и представляет сопротивление, которое надо преодолеть в точке прикрепления измерительной пружины (к этой точке приведена также и масса m), чтобы передвинуть эту точку против сопротивления передаточного механизма со скоростью, равной единице.

Можно написать: $t = -2 \frac{m}{\epsilon} \ln \frac{y}{a}$. Промежуток времени, необходимый чтобы отклонение уменьшилось на некоторую дробную часть y/a наибольшего отклонения a , пропорционален, таким образом, отношению m/ϵ ; это отношение можно уменьшить или усилением демпфирования или уменьшением инерции; упругая постоянная не имеет влияния на время получения отсчета. Высокое число собственных колебаний прибора не имеет в этом смысле никаких безусловных преимуществ.

При более сильном демпфировании бывает, что вся энергия, освобождающаяся от замедления хода прибора, целиком поглощается уже при первой части колебания. Прибор становится *апериодическим*. Его ход выясняется на кривой 4: указатель без колебаний, плавно переходит в свое новое положение.

Вполне или приблизительно апериодический ход указателя является весьма желательной особенностью прибора. Помимо преимуществ быстреего отсчета, следует также упомянуть и о том, что колебания изнашивают механизм указателя. Демпфированием можно повысить еще больше достижения апериодического хода; это привело бы лишь к тому, что прибор приходил бы уже позднее в свое новое положение покоя, т. е. отсчет оказался бы бесполезно задержанным. Если апериодический прибор имеет еще и трение, то он совершает свое движение по кривой 5, не доходя до должного положения на величину, соответствующую величине трения.

Там, где имеется заметное трение, вполне апериодический ход прибора менее хорош, чем у прибора, менее, но еще достаточно демпфированного: ход согласно кривой 3 лучше, чем такой же ход согласно кривой 5. Поэтому всегда стремятся устранить трение или по меньшей мере установить наличие трения, заставляя прибор многократно приходить в новое положение и проверяя согласованность отдельных отсчетов. Прибор, демпфированный по кривой 3, приходит в различные, лежащие между линиями B' и B'' положения покоя, позволяя этим установить наличие трения и дает возможность обезвредить ошибку от трения путем определения среднего значения.

Прибор же демпфированный, согласно кривой 5, всегда будет приходить в положение B' , если только его нельзя приводить в новое положение—попеременно то сверху, то снизу — и будет благодаря этому *казаться* особенно хорошим, тогда как именно с таким прибором даже путем многократных отсчетов и выведением среднего значения вовсе невозможно получить лучшие результаты.

Рассмотрим еще следующее. Ход измеряемой функции по линии $XABN$ (рис. 16) с вертикальным скачком от A к B практически невозможен. Приблизительно такие условия встречаются у электрических измерительных приборов. Хотя изменение силы тока тоже не может произойти совершенно внезапно благодаря влиянию емкости и явлениям самоиндукции, но время, протекающее после выключения рубильника до наступления нового состояния, весьма мало в сравнении с собственным временем колебаний любого прибора, если не говорить об осциллографах; можно, таким образом, для электрических измерительных приборов признать кривую рис. 16, приблизительно, пригодной. Там же, где при измерении механических величин появляется влияние механической инерции, новое состояние измеряемых соотношений может установиться лишь по истечении некоторого времени, и переход в новое состояние совершается

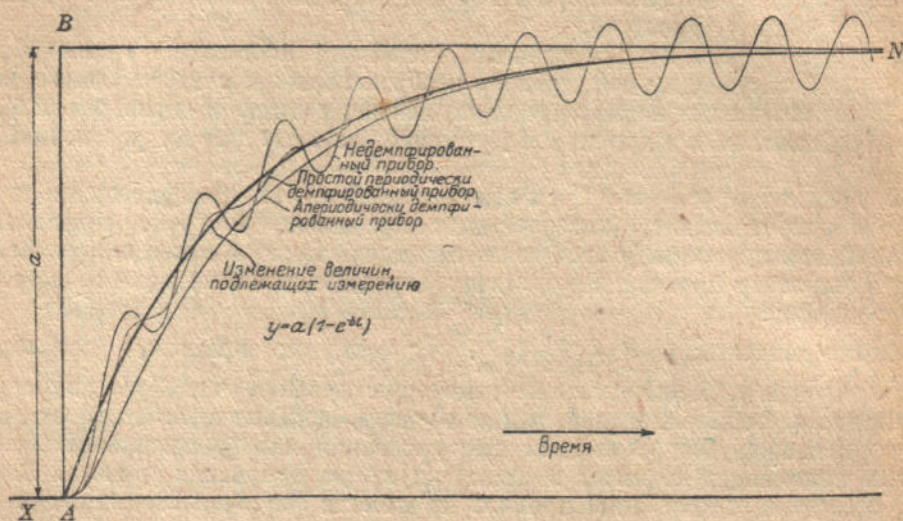


Рис. 17. Ход прибора при постепенных изменениях (по Гофману).

в форме колебательного процесса, который периодически или аperiodически демпфируется. Если в воздушном резервуаре повышается давление, то для этого необходим приток известного количества воздуха, который требует времени. Вообще давление в резервуаре будет асимптотически приближаться к своей новой должной величине. Когда шунтовой электромотор переводят на другое число оборотов, то это число, как показывает тахометр, асимптотически приближается к новому значению.

На рис. 17 представлен ход приборов, когда имеется такого рода постепенное изменение измеряемой величины. В виде закона изменения принята некоторая логарифмическая кривая AN , на которую теперь налагаются собственные колебания прибора. Кривая изображает движение недемпфированного, периодически и аperiodически демпфированного прибора, в предположении отсутствия всякого трения.

Число собственных колебаний прибора имеет теперь гораздо большее значение, чем прежде. Как видно на рис. 15 и 16, даже столь большое число собственных колебаний не могло ничего изменить в том, что амплитуды длительно сохраняют величину начального скачка a , если не позаботиться их демпфировать. На рис. 17 амплитуды, даже при вовсе не демпфированном приборе, падают значительно ниже величины скачка; и именно падают тем ниже, чем выше собственное число колебаний по отношению к ходу нарастающей логарифмической кривой. Таким образом, можно простым повышением собственного числа колебаний прибора достигнуть таких качеств его, которые равны качествам хорошо демпфированного прибора и даже превосходят их, без необходимости вообще прибегать к их демпфированию. На практике тут всегда приходится на помощь некоторое, хотя бы и небольшое, демпфирование. Во всяком случае, нельзя доходить до совершенно аperiodического демпфирования; необходимо, чтобы

прибор еще совершал слабые колебания, когда измеряемая величина достигает своего нового значения. Тогда можно путем многократных отсчетов исключить влияние трения. Совершенно бесцельно слишком сильно демпфировать приборы; ведь пока измеряемая величина приблизительно не достигла своего нового значения, все равно нельзя производить отсчеты. Степень демпфирования нужно поэтому выбирать, сообразуясь со скоростью изменения измеряемой величины.

Нужно еще упомянуть, что в рис. 15—17 нет ничего о каком-либо определенном масштабе, а лишь об относительных величинах, в частности в отношении времени.

§ 9. Конструктивные приемы. Результаты всех вышеприведенных рассуждений можно резюмировать в следующих правилах для конструирования показывающих приборов, к которым предъявляется требование быстрых и точных отсчетов: собственное число колебаний прибора следует возможно увеличивать путем уменьшения его инерции и увеличения перестанавливающей силы; сопротивления от трения уменьшать сколько возможно, демпфирование доводить почти до границ апериодического хода, но не дальше.

Инерцию конструктивно можно уменьшить подходящим расположением частей и делая их возможно легкими, хотя бы путем применения легких металлов. Направляющие силы можно увеличивать путем увеличения всего измерительного прибора, именно его действующих частей при одновременном усилении измерительных пружин, где такие предусмотрены; в индикаторе увеличением площади поршня, в электрических приборах — числа витков и т. п. Конечно, такие меры имеют следствием также увеличение массы, что отчасти понижает действие направляющей силы. Вследствие применения грузов вместо пружин, в известной мере, хотя и не изменяются показания, но увеличивается масса, особенно когда для увеличения перестанавливающей силы приходится увеличивать и грузы ¹.

Очень часто, однако, выбор конструктивно более совершенно измерительного устройства бывает целесообразнее, чем возможно тщательное выполнение прибора, менее совершенного по идее.

Уменьшения трения можно достигнуть тщательной работой, применением подшипников с камнями или опорами на острие, часто лучшим конструктивным устройством, которое может уменьшить давление на опоры (например, разгрузкой частей) или которое может сократить путь трения. Что касается, наконец, демпфирования, то наиболее применимыми средствами для его усиления является устройство масляных или воздушных успокоителей. При воздушных успокоителях — с помощью вращающихся в воздухе крыльчаток — часто приходится заботиться об увеличении совершаемого крылышками пути, посредством промежуточной передачи зубчатыми колесами или рычажной системы, так как дело идет о поглощении известного количества работы. Металлические диски, вращающиеся перед постоянными магнитами, хорошо демпфируют за счет возбуждения вихревых токов; диски хорошо делать из алюминия. В манометрах можно увеличивать демпфирование в любых размерах путем сужения живого сечения манометрического крана.

Часто обстоятельства возникновения колебаний и их демпфирования больше зависят от способа применения прибора, чем от самого прибора; при таких обстоятельствах перемена прибора принесет мало пользы. Так на стр. 283 говорится о большом влиянии, которое производят большие массы воды на динамику индикатора при индицировании водяных насосов.

Надо принять за правило, что работать можно только с хорошими приборами. Никакие поправки не могут ликвидировать ошибки плохого прибора. В особенности не следует пытаться исправлять поправкой более значительные величины трения.

Величина его колеблется и редко известно точно, достиг ли указатель своего положения при прямом или обратном ходе. Есть хорошее правило — делать поправки только тогда, когда они *наверное* вносят улучшение.

¹ Не нужно забывать, что никаким грузом невозможно обеспечить абсолютного ускорения больше, чем $9,81 \text{ м/сек}^2$. (Прим. перев.).

§ 10. Измерение периодически колеблющихся величин. Когда измеряемые величины подвергаются регулярным колебаниям, то задача измерения может быть двоякого рода: или желательно знать среднее значение или необходимо исследовать самые колебания, например, установить законы, которым они подчиняются. В первом случае прибор, по возможности, не должен сам участвовать в колебаниях, в последнем случае он должен принимать в них участие и затем чаще всего записать их графически.

Для измерения средних значений прибор должен обладать достаточно сильным демпфированием. У манометра паровой машины прикрывают манометрический кран до тех пор, пока движения стрелки не станут достаточно малыми, чтобы произвести отсчет. Часто отсчет только тогда становится удовлетворительным, когда почти совсем заглушают колебания. Поэтому при более сильно колеблющейся стрелке стараются непосредственно на глаз отсчитать арифметическое среднее крайних положений стрелки; такое среднее, однако, вовсе не всегда совпадает со средним значением наблюдаемой величины за время наблюдения; так, на манометре для острого пара у паровой машины давление в течение большей части времени имеет наивысшее значение и только в течение короткого периода наполнения соскакивает вниз.

Нечувствительность прибора по отношению к периодическим колебаниям может быть впрочем достигнута, кроме усиления демпфирования, также уменьшением соответственного числа колебаний (увеличение инерции и уменьшение перестанавливающей силы).

Однако, это средство делает прибор менее пригодным для измерения отдельных импульсов (§ 8).

Как бы то ни было, у приборов для измерения средних величин не следует стремиться к слишком высокому собственному числу колебаний.

Термометр также не поспевает за быстрыми колебаниями температур. Такое свойство следует из того, что на передачу тепла ртути требуется время.

Когда дело идет не об измерении средних величин, а об исследовании колебаний, такой прибор также (как и в случаях, изображенных на рис. 15—17) не может точно зарегистрировать ход изменения измеряемых величин.

Отклонения соответствующего положения движущегося механизма от его должного значения и являются причинами, освобождающими перестанавливающую силу и, таким образом, ускоряющими движущиеся массы в приборе. Возникающая работа обращается и здесь в колебания, которые должны быть уничтожены демпфированием. Только в настоящем случае нельзя слишком далеко заходить с демпфированием, если не хотят вместе с собственными колебаниями прибора остановить также и движение механизма, который должен указывать измеряемую величину; демпфирование также увеличивает запаздывание показаний прибора. Когда демпфирование колебаний, которые накладываются на график исследуемого явления, таким путем является невыполнимым, то надо, по возможности, устранить самую причину колебаний. Такой причиной при объяснениях к рис. 15 мы признали появление площади импульсов ABC. Мы должны поэтому заставить прибор более быстро перемещаться путем уменьшения массы движущихся частей и увеличения перестанавливающей силы. Это значит, что мы уменьшаем обрабатываемую в колебания энергию увеличением собственного числа колебаний прибора. Во всяком случае собственное число колебаний прибора должно быть значительно больше по сравнению с частотой главного периода подлежащих исследованию изменений.

Важнейшими случаями, где приходится исследовать периодически изменяющиеся величины, являются изменения давления в цилиндре поршневой машины и колебания скоростей на ходу машин. Первые исследуются с помощью индикатора (§§ 104, 110), последние при помощи тахографов, вибрографов и осциллографов.

§ 11. Компенсационные приборы и нулевой метод. Особая точность измерений достигается при подходящей их постановке, когда измеряемую величину компенсируют (уравновешивают) другой ей однородной и точно известной величиной и устанавливают равенство обеих или измеряют последнюю оставшуюся разницу посредством очень чувствительного метода. Известный пример та-

кого метода представляют обыкновенные весы. Измеряемый груз или точно уравновешивается известными грузами (*нулевой метод*) или в заключение взвешивания последние части определяются из наклона коромысла. Другой пример: измерение сопротивлений мостом Уитстона, в котором большею частью просто констатируют отсутствие тока в мосту, но при котором также, в случае недостаточно мелкого подразделения эталонных сопротивлений, отклонение стрелки гальванометра может служить для определения лишнего десятичного знака.

Согласно наших прежних объяснений порядок взвешивания на коромысловых весах можно представить следующим образом. Положенные с обеих сторон грузы G_1 и G_2 уравновешиваются между собой до малой разницы $G_1 - G_2$ между ними и, по отношению к этой разнице $G_1 - G_2$, коромысловые весы следует рассматривать как очень чувствительные маятниковые весы; разница $G_1 - G_2$ является теперь внутренней направляющей силой P_1 . Она измеряется возникшим при наклоне коромысла моментом, который соответствует весу коромысла G_a , умноженного на величину действительного расстояния центра тяжести коромысла от вертикальной прямой, проходящей через ребро средней опорной призмы. Этот момент $G_a \cdot s = P_a$ представляет внешнюю направляющую силу, он увеличивается с возрастанием положительных отклонений коромысла и почти пропорционален им.

Сущность компенсационного метода состоит, следовательно, в том, чтобы непосредственное измерение заменить измерением малых разностей. Необходимой предпосылкой, однако, является уменьшение в широких пределах трения, что в коромысловых весах возможно применением опор на призмах.

Не имеет никакого смысла доводить измерение разностей так далеко, чтобы наличное трение, по сравнению с остающейся разницей, получило значительную величину.

Различие между показывающими и компенсационными приборами можно рассматривать или в отношении чувствительности или в отношении пределов области измерения. При показывающих приборах повышение чувствительности влечет за собою удлинение шкалы, если хотя бы добиться повышения точности отсчета. Это приводит к подразделению на наборы приборов, примыкающих друг к другу, так как один прибор для всей области измерений был бы неудобен из-за чрезмерной длины шкалы. Такие наборы весьма употребительны для термометров и ареометров: большая чувствительность обуславливает и более узкую область измерений прибора. При компенсационных приборах область измерений весьма сильно ограничена, чтобы соответственно повысить точность отсчета. Соответственной компенсацией можно перемещать пределы измерений как раз в нужную область и тем избежать употребления многочисленных приборов.

Таким образом различие между показывающими и компенсационными приборами количественное; существуют переходные формы и рекомендуется всегда снабжать компенсационные приборы и вспомогательной шкалой, которой пользуются только дополнительно. Примерами здесь будут весовой ареометр (поплавковые весы, ареометр Никольсона). (Наш акцизный металлический спиртометр — с 10 гирьками. — *Прим. перев.*), термометр Бекмана, десятичные мостовые весы с передвижной вспомогательной гирей и новейшие маятниковые весы со сменными грузами (рис. 140). Чисто компенсационные приборы и нулевой метод при подходящей установке дают самые точные измерения. Однако, измерение длится долго и бывает утомительным; без длительных наблюдений нельзя определить количественных изменений измеряемой величины; изменения же, принимающие характер заметно выраженных колебаний, вовсе не поддаются измерению нулевым методом, так как невозможно оценить на глаз среднюю величину.

Наоборот, для измерения колеблющихся величин подходит одно изменение нулевого метода, при котором измеряемую величину компенсируют в ее главной части, а остающийся избыток, по отношению к которому колебания теперь делаются относительно значительно большими, регистрируется графически в зависимости от времени.

Выверка при показывающих приборах имеет другой смысл, чем при компенсационных приборах; весы могут иметь предписанное отношение плеч или вполне

точно или с некоторой точно известной погрешностью. Поэтому ошибка будет одинаковой для всех нагрузок; о специальном влиянии деформаций коромысла будет сказано в § 59. Сопротивления, служащие для сравнения плечей моста Уитстона, могут быть известны более или менее точно, но для всех областей измерения одинаково точно, если только нет недопустимых изменений их температуры. Что касается чувствительности компенсационных приборов, то к ней можно отнести все то, что говорилось относительно показывающих приборов. Зависимость собственного числа колебаний от инерции и от переставляющей силы, возникающей вследствие отклонений от положения равновесия, свойственны и этим приборам также, как и демпфирование, хотя эти свойства имеют при их употреблении меньшее значение.

§ 12. Интегрирующие приборы (суммирующие приборы, счетчики). Интегрирующие приборы дают интегральное значение $i = \int y dx$ там, где до сих пор рассматриваемые приборы измеряли мгновенные значения y . В роли величины x , по отношению к которым берется интеграл, являются обыкновенно время t или путь s . Величины i и y при этом стоят друг к другу в таком отношении, как путь к скорости или как работа к силе или мощности.

Суммирующие приборы отличаются тем, что их указатель постоянно движется только вперед; поэтому шкала не имеет конца и имеет замкнутую круговую форму с движущейся по ней стрелкой. Видоизменения следующие: числовой диск, вращающийся перед неподвижным указателем или окном, а также колеса с перескакивающими цифрами и указателями.

По отношению к тахометру, как прибору, дающему мгновенные значения числа оборотов $n/\text{мин}$ или угловой скорости вращения ω , суммирующим прибором является счетчик оборотов, который показывает все сделанное число оборотов в течение промежутка времени z , от t_1 до t_2 , если в моменты t_1 и t_2 отсчитаны показания указателя u_1 и u_2 . С особенной точностью определяется тогда посредством счетчика (§ 41) среднее (минутное) число оборотов.

$$n_m = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} \omega dt}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

Дроссельной диафрагме или трубе Вентури, как прибору для определения мгновенных значений протекающих количеств, отвечают водомер и газомер как суммирующий прибор. В качестве интегрирующего прибора можно также назвать паромер, который часто приспособляют для записи на диаграммной ленте, с последующим интегрированием полученной диаграммы от руки, при помощи планиметра.

К амперметру или ваттметру, как приборам для определения мгновенных значений, относятся счетчики амперчасов и киловаттчасов, как приборы для определения суммарных значений.

Индикатор паровой машины определяет мгновенную мощность машины N (которая, впрочем, сама выводится как интегральное значение $\int P ds$, распространенное на один оборот машины), выраженную в лошадиных силах или киловаттах, тогда как некоторые работомеры ¹ указывают непосредственно всю доставленную в течение определенного времени работу $L = \int N dt$ в лошадиных силах-часах или киловаттчасах.

Отсюда всегда можно получить среднюю мощность за время испытания путем деления на это время:

$$N_m = \frac{\int_{t_1}^{t_2} N dt}{t_2 - t_1} = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

Таким образом, мощность N (измеренная в лошадиных силах или киловаттах) находится в таком же отношении к работе L (измеренной в лошадиных силах-часах или киловаттчасах), в каком стоит скорость к совершенному пути.

¹ Например типа непрерывного индикатора Теодоровича для измерения работы паровоза.

В счетчиках также необходимо точно установить, путем выверки, насколько прибор показывает больше или меньше.

Для испытания машин, работающих при постоянном режиме, можно такую выверку произвести при той скорости, при которой прибор будет постоянно в деле; тогда неверные показания прибора приносят столь же мало вреда, как и в показывающих приборах.

Когда же суммирующие приборы приходится употреблять как при медленном, так и при быстром ходе, тогда необходимо требовать, чтобы при всякого рода ходе показания отличались от истинных значений на одинаковую величину и при том в процентном отношении, а не абсолютно. Это необходимо для того, чтобы употребляемый поправочный множитель был одним и тем же при всяком характере хода. Если в течение всего времени исследования скорость хода превосходит пусковую, то достаточно, если зависимость между отсчетами прибора и истинными значениями будет оставаться линейной. Таким образом, для каждой минуты наблюдения приходится делать вполне определенную прибавку к отсчету. Вообще, конечно, это достаточно для приборов при опытных исследованиях, но не для приборов в производственной работе. Сравните со свойствами вертушки Вольтмана (рис. 115), а также водомеров (рис. 191).

Счетчик не работает, когда импульс измеряемого потока падает ниже известного предела; это крайне неудобно. От этого недостатка свободны только мокрые газомеры.

Таким приборам хорошо сообщать *вспомогательный импульс*, который позволяет им и вблизи нулевого значения измеряемой величины приходить в движение.

Этой цели служит соединение *aa* у счетчика тока на рис. 224; с такой же целью анемометр обдувают вспомогательным воздушным потоком посредством маленького вентилятора с пружинным заводом.

В § 16 будет изложена задача, как показывающий прибор превратить в суммирующий или наоборот — при суммирующем приборе, кроме окончательного значения, изобразить также ход измеряемой величины. Дело идет здесь о механическом интегрировании или дифференцировании.

§ 13. Самопишущие приборы частью служат для нахождения, посредством планиметрирования площади, ограниченной кривой, такой величины, которая относится к непосредственно зарегистрированной, как путь к скорости, и которую суммирующий прибор дает готовой.

Таким образом находят разность $u_2 - u_1$ или $L_2 - L_1$ формулы (7) и (8), как площадь, ограниченную кривой диаграммы, обращая внимание на соответственный масштаб.

Однако, в ряде случаев самопишущие приборы служат лишь для получения *среднего значения*, так как интегральная величина тут не имеет никакого конкретного значения. Так, самопишущий термометр дает температуру T в зависимости от времени и средняя величина

$$T_m = \frac{\int_{t_1}^{t_2} T dt}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

есть среднее значение температуры за время наблюдения; сам по себе интеграл $\int_{t_1}^{t_2} T dt$ не имеет никакого физического значения. Только в особом случае, когда температура T является температурой постоянного количества жидкости, изменения температуры обозначают также и изменения количеств тепла; тогда интегральное значение дает изменение теплосодержания ¹.

При самопишущих манометрах площадь, ограниченная кривою, изображающей давление, в зависимости от времени, сама по себе не имеет физического

¹ При этом, конечно, интегрируются все-таки не температуры, а произведение температур на теплоемкость этой постоянной массы жидкости, что и дает количество тепла. Интегрируются калории, а не градусы. (Прим. перев.).

значения; из нее лишь находят, например, среднее значение давления пара в течение дня.

Только при явлениях ускорения интеграл $\int P dt$ дает полный «импульс» силы, когда давление p , действуя на площадь поршня F , развивает силу $P = Fp$. Этот импульс, как известно, равен приращению количества движения

$$\int P dt = F \int p dt = mv;$$

отсюда обыкновенно находят скорость

$$v = \frac{F}{m} \int p dt. \quad (10)$$

Если же прибор записывает действующее на поверхность поршня давление или вообще записывает ход изменения усилий в зависимости не от времени, а от проходимого точкой приложения силы пути (сила тяги на крюке паровоза или парового плуга — рис. 229 — относительно пройденного пути), то полученная площадь представляет полезную работу, отнесенную к точке приложения силы $L = \int P ds$; точно так же, при круговом движении, момент вращения M , отнесенный к сделанным оборотам n , дает работу

$$L = c \int M du = c_1 \int M ndt.$$

При вычислении площадей при помощи планиметра необходимо, чтобы масштаб ординат был одинаков по всей их высоте; в противном случае необходима перерисовка диаграмм на равномерную сетку или употребление специальных планиметров (рис. 59, 60).

Регистрирующие приборы должны развивать достаточную для записи переставляющую силу (§ 7) так, чтобы трение пишущего штифта о бумагу было в сравнении с нею незначительным (ср. стр. 41).

Ширина диаграммной бумаги определяется, исходя из соображения, что достижимая точность отсчета должна соответствовать чувствительности прибора. Поэтому очень часто бесцельно бывает идти дальше 100 мм по высоте диаграммы (Л. 16). Конечно, большей частью измерение представленных на диаграмме величин ограничивается точностью, с какой отпечатана на диаграммной бумаге шкала, и особенно тем, как точно во время наблюдения совпадает нулевая линия напечатанной шкалы с нулевой точкой указателя прибора. При диаграммной бумаге, надеваемой на барабан, это достижимо только в умеренной степени. Поэтому наилучшим способом, но, конечно, не самым удобным, является способ, применяемый у индикаторов, когда применяют бумагу без шкалы, нулевую линию, а иногда и продольные отметки (например, время) наносят одновременно с записью собственно диаграммной кривой и готовую диаграмму измеряют масштабом или при помощи измерительной окулярной лупы. При сбегавшей диаграммной ленте стараются обеспечить правильное положение бумаги в обоих направлениях при помощи ряда отверстий по краю бумаги, в которые входят шипы подающего ленту барабана (рис. 112).

Точность приборов, применяемых на стационарных установках в промышленности, редко превышает 1%; в большинстве случаев точность даже меньше 1%. Наименьшей величиной, еще ясно усматриваемой при технических измерениях, можно считать 0,6 мм. Для прибора, дающего точность в 1%, поэтому требованию удовлетворяет минимальная ширина ленты в 60 мм.

Можно принять, что правильно выбранный прибор обеспечивает точность показаний на трех четвертях всей шкалы. Следовательно, для охвата всего интервала нужна лента шириной в 80 мм.

Если измеряют сильно колеблющиеся величины, то для увеличения чувствительности можно идти на увеличение ширины ленты вдвое, т. е. до 120 мм.

Таким образом, мы получаем нижний предел ширины ленты в 80 мм и верхний 120 мм. В общем случае, наиболее целесообразным размером для прибора, дающего точность в 1%, будет ширина ленты в 100 мм.

Аналогично разрешается вопрос о скорости передвижения ленты. Суточная запись изменения какой-либо измеряемой величины должна быть легкой (при обработке диаграммы за столом) замечена взглядом работника с нормальным зрением.

Наиболее приемлемым размером будет 50 см, что дает скорость спадания ленты 20 мм/час. Скорость в 20 мм/час желательна и из других соображений. Можно считать, что суточная запись должна охватывать 1000 измерений. Две черты еще «разделяются» глазом, когда расстояние между ними равно 0,1 мм. Обычное трехгранное перо дает черту, шириной в 0,4 мм. Поэтому, для регистрации двух колебаний необходима длина в 0,5 мм. Для тысячи измерений получаем суточную длину диаграммы в 50 см.

Так как большинство приборов в теплотехнике дают точечную запись, то, при большой скорости спадания ленты, расстояния между точками будут слишком велики и диаграмма будет мало наглядна. При записи же быстро меняющихся величин кроме того ее трудно будет разобрать (Прим ред.).

По проекту новых правил для испытаний паровых котлов предусмотрено, что самопишущие измерительные приборы не должны употребляться на ответственных местах.

Это постановление вызвано двойным недостатком приборов: ненадежностью положения шкалы и повышенным трением. Постановление кажется необоснованным в отношении специальных конструкций, в которых трение преодолевается вспомогательной силой сервомотора (§ 14) или в отношении приборов с падающей (нажимной) дужкой (электрические—стр. 51, механические на рис. 400).



Рис. 18. Пишущее устройство с умеренным потреблением чернил «Гартман и Браун».

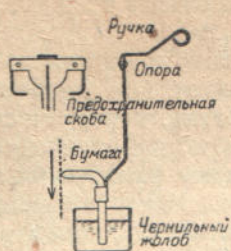


Рис. 19. Пишущее устройство с продолговатым чернильным жолобом, в котором ходит стеклянный пишущий штифт «Гартман и Браун».

которые дают точечную запись кривой. Подобные приборы не пригодны для записи быстро меняющихся величин. В приборе «Пирроверк» сделана попытка устранить влияние трения встряхиванием поверхности, на которой производится запись.

Вместе с записью в виде непрерывной линии или ряда точек имеет место также обычная для газоанализаторов запись, изображенная штрихами через определенные промежутки времени, причем длина штрихов служит мерой наблюдаемой величины, а их концы изображают кривую или даже несколько кривых. Когда приходится записывать непрерывно нарастающие интегральные величины и мгновенные величины нужно дифференцировать, то это можно сделать, как показано на рис. 21: водомер или весы медленно передвигают пишущее перо вверх, в то время как диаграммная лента продвигается горизонтально, наклон кривой дает мгновенные значения протекающего количества. Когда пишущее перо дойдет до края шкалы, оно падает, и процесс начинается сначала. Расстояние от одного падения до другого определяет средний поток, число падений дает количество, которое прошло через прибор. Более неудобной для вычисления, но пригодной и для больших и быстро меняющихся скоростей, является запись при помощи хронографов (рис. 104 и 105).

По форме поверхности для записи, регистрирующие приборы устраиваются для записи на бумаге в виде роликов, полос и дисков. При рольной бумаге бумажная лента свободно сбегает с прибора, так что запись легко наблюдать и, если нужно, — отрезать. При лабораторных приборах с быстрым ходом ленты, последнюю обыкновенно снова наматывают на второй ролик, чтобы она не запуталась. Смотанными в ролики лентами удобнее пользоваться, чем размотанными, сцепление трения помогает наматыванию. Полосы надеваются на барабан и склеиваются концами, образуя таким образом непрерывную поверхность для записи. Для того, чтобы пользоваться более длинными полосами, устраивают два барабана на некотором расстоянии друг от друга. Круглые диаграммы (обычная в США форма записи) у нас мало употребительны (рис. 60); у таких диаграмм положение нулевой линии наиболее устойчиво.

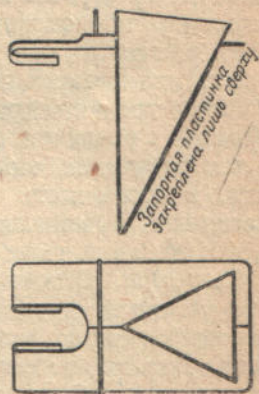


Рис. 20. Пишущее перо с подвижной запорной пластинкой для прочистки. 2,5×л величины «Аскаанияверке».

Запись производится чернилами посредством перьев, которые легко касаются бумаги (рис. 18—20). Чернила малопригодны при высоких температурах (рис. 216, паромер Байера), при быстро колеблющихся величинах, так как тогда размазывают запись, при быстро движущейся бумажной ленте, потому что чернило не успевает достаточно быстро стекать с пера. В последнем случае приходится пользоваться твердым карандашом, но предпочтительнее серебряный штифт, который на препарированной бумаге пишет лучше (индикаторная бумага), однако на такой препарированной бумаге трение больше (30 г против 12 г).

Бумага для чернил должна быть хорошо проклеена и часто необходимо, чтобы она была прозрачной. На препарированной бумаге хорошо пишут мягкие металлы как серебро, красная медь, латунь, тогда как стальной штифт планметра следов не оставляет. На бумаге с красной грунтовкой от нажима или царапины выступает красная краска. Поэтому такая бумага не годится для диаграмм, подлежащих планиметрированию. Шкала времени должна позволять легко отличать день от ночи (также и в том случае, когда время считается до 24 часов); но прежде всего должно быть обеспечено правильное положение диаграммной бумаги в обоих направлениях, что лучше всего достигается рядом дырочек по обеим сторонам ленты, за которые захватывают шипы ведущего барабана.

§ 14. Измерительная энергия; сервомоторы, особенно электрические. При всяком измерении происходит некоторый оборот энергии или потребление энергии; показывающие приборы требуют энергии для всякой установки, измерители количества сверх того потребляют энергию в течение некоторого времени, счетчики же потребляют ее непрерывно.

При *установке* подвижная система показывающего прибора забирает столько работы, сколько необходимо для сжатия измерительной пружины, поднятия измеряющего груза или столба жидкости. Величина работы дается площадью, ограниченной кривой внешней направляющей силы, взятой по пути т. е. выражается через $\int Pdl$. При движении подвижной системы внутри прибора, следовательно, происходит некоторый оборот энергии, значение которого может быть увеличено, например, выбором более сильной и длинной пружины, соответственно которой подобраны и прочие части. С увеличением оборота энергии влияния трения и других случайностей относительно уменьшается. Если, таким образом, с увеличением оборота энергии и возрастает точность отсчета, то только в том случае, если одновременно при этом не возрастают и мешающие влияния, в особенности трение. Поэтому увеличение направляющей *силы* следует предпочесть увеличению *пути*.

Некоторые указывающие приборы и все счетчики имеют *постоянный расход энергии*. Статический вольтметр требует энергии для заряжения только при установке и при возвращении к нулю отдает ее обратно. Вольтметр с вращающейся рамкой *сверх этого* длительно расходует энергию протекающего тока. Паромер имеет *длительный* расход энергии, соответственно потере давлению пара. Суммирующие приборы как водомеры, газомеры, электрические счетчики имеют существенно только последнюю, длительную, форму расхода энергии.

У иных приборов, как например, у некоторых паромеров и у приборов переменного тока такие потери энергии не являются малыми. Следует иметь в виду как возможное влияние на ошибки измерения, так, и при длительной затрате энергии, возникающие отсюда расходы энергии. Следует обращать внимание, входит ли эта теряемая энергия в учет при измерении или нет, т. е. является ли результатом измерения значение энергии до или после места отбора измерительной энергии. (Воздушная защита — по рис. 254, хотя здесь, конечно, дело идет не о собственно измерительной энергии).

Измерительную энергию приходится отбирать именно в том месте, где производится измерение. Если имеются только ограниченные количества энергии, то *отъем энергии* может вызвать заметную *погрешность* в измерении, хотя бы самое измерение было произведено правильно, так как измеряется величина, отклоняющаяся от требуемой на величину отъема энергии. Так, чтобы измерить

давление в воздушном колпаке, приходится открыть кран, ведущий к манометру. Чем больше переставляющаяся сила манометра, тем более точно будет измерено давление, которое установится в результате соединения резервуара и внутреннего пространства манометра. Однако, это давление отклоняется от давления, бывшего в колпаке до открытия крана тем более, чем было больше отобрано воздуха при открытии, т. е. чем больше был манометр. Таким образом, существует определенная величина прибора, способного дать наилучшие результаты, при малых резервуарах легко может случиться, что эта наилучшая величина будет перейдена; например, емкость индикаторного цилиндра никак нельзя считать всегда исчезающе малой в сравнении с емкостью цилиндра машины, а тем более с емкостью его вредного пространства (ср. § 112).

В последнее время все чаще избегают трудностей, возникающих из-за недостаточности доставляемой прибором измерительной энергии тем, что энергию, доставляемую измеряемой величиной, употребляют только для управления подводимой извне *вспомогательной энергии*. Поэтому, благодаря большому количеству вспомогательной энергии, можно увеличить переставляющие силы и сделать измерения более точными.

При переходе на вспомогательную энергию сервомотора первоначально ставилось целью только усиление измерительной энергии при одновременном сбережении измеряемой. С этим переходом теперь часто соединяют разрешение задач, которые требуют особенно больших затрат энергии. Эта задачи таковы:

Интегрирование при приборах, не суммирующих сами по себе (ср. § 50).

Регистрация результатов измерений (ср. § 13).

Передача на расстояние как мгновенных значений, так и суммированных результатов, а также передача записей в отдаленные пункты.

Так как эти задачи всегда приводят к аналогичным во многих отношениях решениям (путем применения вспомогательной энергии), некоторые из этих решений придется рассмотреть здесь в их взаимной зависимости.

Дальнейшая область применения следующая.

Регулирование различных устройств, имеющих целью поддержание на постоянном уровне известных измеряемых величин.

Эта задача выходит за пределы измерительной техники, но за последние годы развилась в обширную специальную отрасль, которую нельзя обойти молчанием.

В качестве *сервомоторной* вспомогательной энергии прежде всего заслуживает внимания электрический ток. В простейших случаях применяется часовой механизм. Часто имеются подвижные части, которые отдают требуемую энергию.

Простейшим видом сервомоторной энергии является работа человека, который, например, при взвешивании, переключивает гири. Но можно заменить руку человека электромотором; последний вращается вперед или назад, когда нулевой указатель замыкает правый или левый контакт.

Если речь идет о весах, то электромотор может передвигать скользящий груз, однако, при этом подвод энергии к подвижной части весов не должен оказывать никакого обратного действия на установку коромысла весов. Если энергия для перестановки подвижного груза подводится зубчатыми колесами в подвижной балке, то соприкосновение начальных окружностей колес должно лежать в плоскости, проходящей через ребро опорной призмы коромысла.

В подобном же смысле можно уравнивать прирост нагрузки на правом плече весов (рис. 21) при помощи электромотора, который выпускает больший или меньший конец цепи для воздействия на левое плечо коромысла; ось счетчика следует за нагрузкой, счетчик показывает приращение и при посредстве

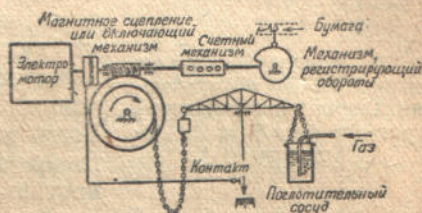


Рис. 21. Устройство для последующей записи у анализатора на следы газов (печочные весы Л. 140) фирмы «Юнкерс».

профильного диска записывает этот прирост на бумажной ленте, чего добиться иначе было бы затруднительно.

Однако, самодействующие весы используют различными способами в качестве сервомотора самый взвешиваемый груз; так, при описанных весах, взвешиваемый вагон немного опускается и этим доставляет силу для передвижения подвижного груза, который затем по достижении равновесия задерживается рычагом.

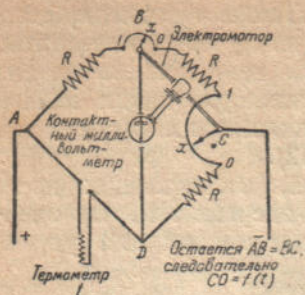


Рис. 22. Мостик Уитстона с сервомоторным обслуживанием. Схема для термометров сопротивления «Лидс и Норструп».

Другой важный пример нулевого метода представляет мост Уитстона (стр. 48); здесь также уравнивание сопротивлений от руки можно заменить электромотором. Четырехугольник сопротивлений моста имеет свои вершины в A, B, C и D , причем в одну диагональ включается батарея, а в другую — гальванометр; последний, при каждом отклонении от нулевого положения, заставляет работать скользящие контакты B и C и именно так, чтобы сопротивления AB и BC оставались друг другу равными. Тогда изменения сопротивления в CD будут равны таким же изменениям подлежащего измерению сопротивления в ветви DA . Положение, в котором оста-

навливается скользящий контакт C , служит мерой сопротивления, а отсюда и мерой температуры термометра сопротивления. C управляет установкой пишущего указателя или датчика сопротивления, изображенных, например, на рис. 23 и 24. Для термоэлектрических измерений употребляются аналогичные схемы, основанные на принципе потенциометра.

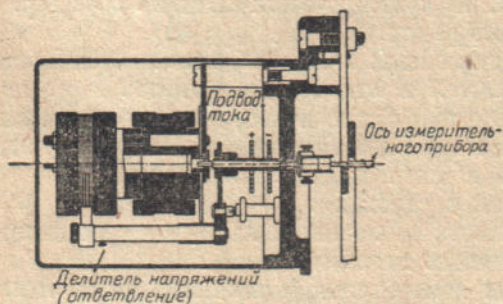


Рис. 23. Спиральный реостат «Гартман и Браун».

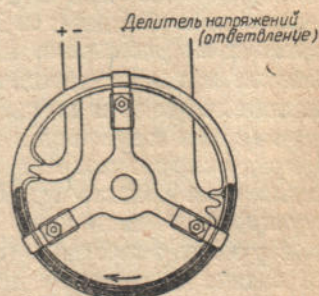


Рис. 24. Кольцевая трубка «Сименс и Гальске».

Рис. 23 и 24. Датчики сопротивления для электрического преобразования величин.

Здесь с полным правом можно также говорить о *принципе повторения*, выражающемся в том, что часть, богатая энергией, принудительно повторяет ход другой, бедной энергией части, — будь это при изменениях вверх и вниз или при таких, которые протекают более или менее быстро в одном направлении.

§ 15. Электрическая передача измеряемых величин. В последние годы в измерительной технике используются в широком масштабе электрический ток, как вспомогательное средство; оно отличается большими возможностями для удобной передачи на расстояния, позволяет удобно применять самопишущие приборы для самых различных величин, значения которых предварительно выражены в электрических формах, оно удобно для проведения математических операций при помощи соответствующих схем и для суммирования таких превращенных величин электрическими счетчиками, дешевыми благодаря их массовому производству.

Если желательно использовать эти преимущества электрического тока при измерении механических или теплотехнических величин, то предварительно

необходимо измеренные величины перевести в электрические, в математическом смысле слова, когда каждому значению измеряемой величины будет соответствовать определенное значение величины электрической. Превращение может быть линейно пропорциональным или подчиняться какому-нибудь другому закону. Во многих случаях, и во всяком случае при счетчиках требуется, чтобы нулевому значению измеряемой величины соответствовало и нулевое положение величины превращенной, в которое она должна переходить непрерывно и плавно.

Для такого *перехода на ток* (или напряжение) часто применяются оба изображенные на рис. 23 и 24 устройства.

Когда кольцевая трубка (Л. 37) поворачивается, то проволока сопротивления в 17 ом продвигается навстречу заполняющей трубку ртути. Кольцевой реостат имеет сопротивление в 38 ом, по обмотке которого скользит щетка. Обе детали компактны и удобны для изготовления; они легко приходят в действие и не оказывают вредного влияния на точность обслуживаемого ими прибора, а также не оказывают на него никакого обратного действия, которое могло бы изменить его шкалу.

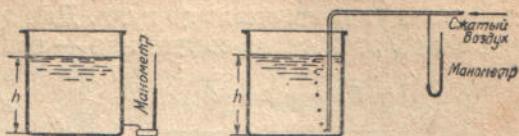


Рис. 25 и 26. Устройство для передачи величины уровня жидкости.



Рис. 27. Простой датчик сопротивления для гальванометра с вращающейся рамкой.

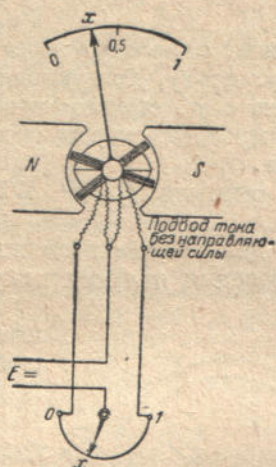


Рис. 28. Делитель напряжения для прибора со скрещенными катушками.

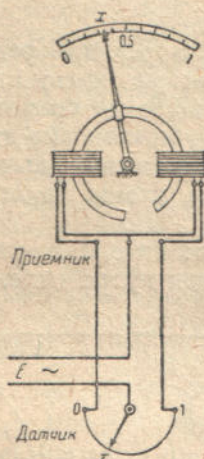


Рис. 29. Делитель напряжений для переменного тока с измерителем отношений с кольцевым сердечником «Joens».

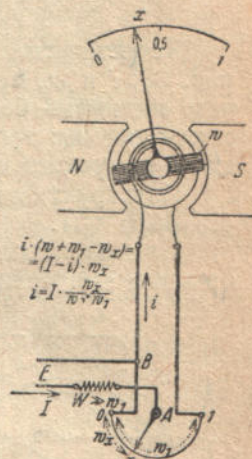


Рис. 30. Схема преобразования фирмы «Еккардт».

Высоту уровня жидкости можно превратить в сопротивление, согласно рис. 25 и 26, посредством наполненной ртутью трубки, которая закорачивает электрические контакты с промежуточными между ними сопротивлениями. Когда эти приборы употребляются как реостат со свободным концом и с отводящим контактом, получается соединение по схеме рис. 27; вместо прибора с вращающейся рамкой может быть поставлен счетчик. Если сила тока должна быть пропорциональна отклонению x датчика, то сопротивление w_x от 0 до x должно быть обратно пропорционально x ; при 0 сопротивление должно стать бесконечным, что, естественно, может быть сделано только приблизительно, а требование непрерывного перехода к нулю становится невыполнимым. Кроме того, ток, идущий к измерительному прибору, зависит и от рабочего напряжения. Напряжение не может считаться вполне постоянным ни при заборе тока от сети, ни от аккумуляторов. На рис. 28 изображено применение прибора со скрещен-

ными катушками (крейцшпульт-омметр). Положение контакта при x определяет отношение сопротивлений w_x к $w_1 - w_x$, а следовательно и отношение токов в обеих скрещенных катушках, которое обуславливает их установку. Так как обе катушки одинаково зависят от E , то показания прибора от E независимы; показания идут непрерывно до нуля. Для проводки необходимо иметь три провода, счетчики в этой схеме соединения — неприменимы. При переменном токе, прибор со скрещенными катушками заменяется измерителем отношений с железным кольцом, рис. 29 (Л.).

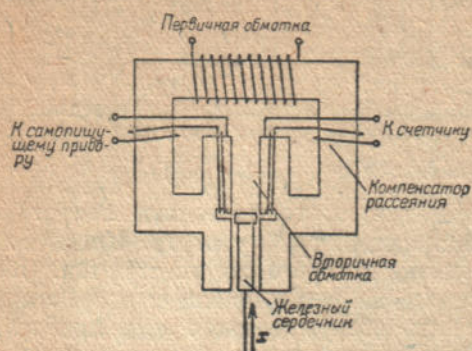


Рис. 31. Датчик передатчика на расстояние переменным током фирмы «Сименс и Гальске».

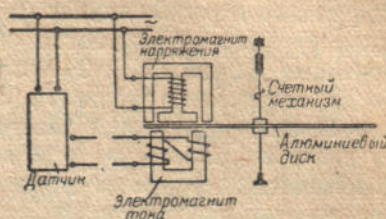


Рис. 32. Схема счетчика, независимого от напряжения.

Теоретически совершенное решение вопроса о превращении дается на рис. 30; i и w_x пропорциональны друг другу, при условии постоянства I , для чего включено большое по сравнению с w_x сопротивление W . Преимущества схемы таковы: требуется только два провода, подход к нулю — непрерывный, схема допускает применение счетчика.

Конструктивные схемы такого решения (DRP 522468) даны на рис. 42—44 и 371.

При переменном токе являются дальнейшие возможности электрического превращения величин путем использования явления индукции.

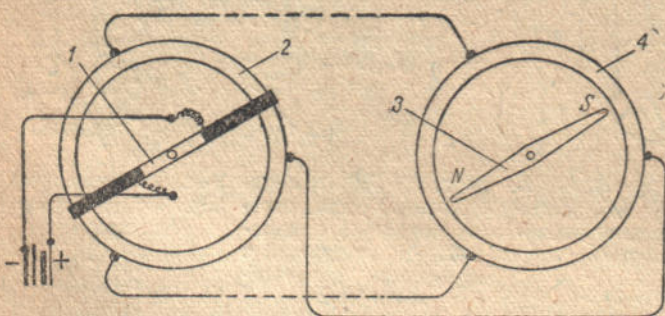


Рис. 32а. Передатчик Соколовского постоянного тока.

Для этого понижают напряжение посредством трансформатора.

Преимуществом включения в сеть переменного тока (по сравнению с отбором постоянного тока из сети при помощи делителя напряжения) является то, что измерительные приборы совершенно изолированы от сетевого напряжения. Датчик на рис. 31 соединяет вместе с передачей и трансформацию напряжения; он представляет собой трансформатор, в котором силовой поток соответственно установке железного сердечника захватывает в большей или меньшей степени вторичную обмотку. Соответственным профилированием железного сердечника возможно влиять на форму зависимости i от x ; на рис. 31 сердечник имеет сверху головку, так как датчик, подобно датчику измерителя давлений рис. 218, должен выравнять искажения в нижней области отсчетов (рис. 94). Схема соединений этого прибора со счетчиком переменного тока дана на рис. 32; посредством применения тормозящего магнита, возбуждаемого от сети, показания

Можно изменять самоиндукцию соленоида, опуская в него железный сердечник; можно изменять взаимную индукцию между двумя катушками, вращая одну относительно другой, что, как известно, применяется в радиосхемах. При переменном токе вопрос, естественно, идет о питании передатчиков током из городской сети.

счетчика делаются независимыми от сетевого напряжения. Индукционные датчики производят обратное действие на измерительный прибор; изображенный на рис. 31 сердечник производит на свою державку давление, меняющееся в зависимости от его установки, и поэтому требует переградуировки измерительного прибора, в зависимости от обстоятельств.

Здесь необходимо добавить описание еще двух отличающихся большей простотой передатчиков на расстояние, — одного для постоянного тока, другой — для переменного.

Датчик передатчика А. П. Соколовского состоит из кольцевого реостата 2 (рис. 32) с отводами, расположенными на 120° один от другого. По реостату скользит двухполюсный контакт 1, ползунки которого посредством мягких безмоментных соединений приключены к полюсам вспомогательной батареи постоянного тока. Реостат и скользящие контакты образуют, таким образом, делитель напряжения и от взаимного их положения зависит распределение напряжения в отводах. Отводы через линейные провода любой длины присоединяются к кольцевой обмотке, равномерно намотанной на кольце из мягкого железа 4, и точно так же в точках, отстоящих друг от друга на 120° .

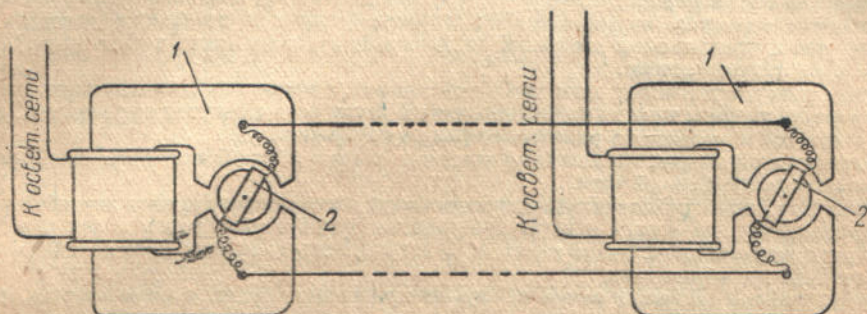


Рис. 326. Передатчик Соколовского постоянного тока.

В центре кольца, на оси, может вращаться с ничтожным трением магнитная стрелка 3. Можно также располагать один над другим два кольца и соединять на оси две магнитных стрелки, обращенных одноименными полюсами в разные стороны в виде астатической системы.

При повороте подвижного контакта датчика на какой-либо угол изменяется распределение напряжения в отводах и одновременно изменяется направление диаметрального магнитного поля в кольце приемника, вдоль которого и устанавливается магнитная стрелка.

При любых поворотах скользящего контакта датчика стрелка приемника в точности повторяет все его движения.

При этом, как легко видеть, согласованность движений датчика и приемника не зависит от колебания напряжения батареи.

Также не зависит она и от сопротивления линейных проводов, хотя последнее и не следует делать слишком большим, чтобы не уменьшать полезной рабочей части тока.

К трем линейным проводам можно присоединить по пути несколько приемников, причем механическая нагрузка датчика не увеличивается.

Точная установка стрелки приемника зависит от мягкости железа кольца; наличие некоторого остаточного магнетизма действует аналогично трению — стрелка чуть-чуть не доходит до положения равновесия при движении как в одном, так и в другом направлении. При хорошем мягком железе это запаздывание ничтожно.

Если желают избежать его полностью, можно вовсе устранить сердечник, оставив только обмотку в виде кольцевого соленоида или в виде трех рамок, расположенных звездой под 120° .

При этом только значительно уменьшается направляющая сила магнитного поля.

Этот передатчик весьма прост и удобен везде, где для датчика обеспечена переставляющая сила, достаточная для передвижения ползунка по реостату, например, у динамометров, кольцевых весов, указателей уровня и т. д.

Он может быть весьма полезен для метеорологических станций, как повторитель указаний направления ветра.

Ввиду своей исключительной простоты он может получить весьма широкое применение в области диспетчеризации для всевозможных повторителей.

Другой передатчик работает от осветительной сети (рис. 326).

Электромагнит 1 с расслоенным сердечником включается в осветительную сеть, между полюсными наконечниками помещается круглый сердечник и подвижная рамка 2, совершенно такие же, как в гальванометре Вестона. Рамка имеет безмоментные вводы. Датчик и приемник вполне одинаковы по устройству и всем размерам, оба включаются в осветительную сеть и цепи их рамок также соединяются проводами.

Такая система отличается интересными свойствами.

Переменный магнитный поток возбуждает в рамках переменный ток, причем взаимодействие таково, что каждая рамка стремится стать в положение, когда ток в ней будет минимальным.

Совершенно очевидно, что, благодаря симметричному соединению рамок, общий ток в них будет равен нулю, когда рамки станут параллельно.

Поэтому, при всяком изменении положения любой из рамок, вторая будет становиться ей параллельно.

При этом, к первой рамке достаточно приложить лишь усилие, достаточное для преодоления трения в опорах обеих рамок.

Из сказанного вытекают как достоинства, так и недостатки этого передатчика.

Так как датчик и приемник присоединяются к существующей осветительной сети, то добавочно нужно *только два* провода, что является основным важным преимуществом.

Система уравновешена, поэтому, кроме трения в игловых опорах обеих рамок, не оказывает обратного действия на основной прибор.

Затем любые общие колебания напряжения в сети не влияют на показания, так как равномерно отражаются как на датчике, так и на приемнике.

Зато падение напряжения вдоль проводов отражается на показаниях.

Если датчик расположен в центре сети, а приемник на периферии, то напряжение и магнитный поток у приемника будет меньше, чем у датчика и при параллельном положении рамок ток, индуцируемый в рамке приемника, окажется меньше встречного тока датчика, и рамка приемника выйдет из параллелизма.

Для смягчения этого явления следует магниты датчика и приемника доводить до насыщения, когда относительное измерение напряжения будет вызывать только незначительные изменения магнитного потока.

Затем, если к сети, между датчиком и приемником, приключить самоиндукцию, например, трансформатор, то фазы тока до трансформатора и после него окажутся смещенными, а вместе с этим сместятся и положение равновесия рамки приемника.

Поэтому такой передатчик можно присоединять только к сети без индукционной нагрузки; т. е. только к осветительной сети.

Кроме того, хотя принципиально можно к одному датчику присоединить два и более приемников параллельно, но всякое неравенство сопротивлений в цепи рамок обоих передатчиков вызовет расхождение, причем одна рамка не будет доходить до правильного положения, а другая на столько же переходить.

При случайной задержке рамка одного из приемников будет, в свою очередь, работать как датчик и исказит показания другой.

Поэтому у такого передатчика лучше ставить один приемник¹.

В измерительной технике приходится обращаться к мостовым схемам, особенно при употреблении счетчиков. Однако, соединение счетчиков с указывающими приборами всегда представляет некоторые трудности, когда при этом требуется и точность. Обыкновенный мост Уитстона состоит, как известно, из четырех расположенных четырехугольником сопротивлений a, b, c, d ; в диагонали между углами ab и cd находится источник тока, в другой диагонали между ac и bd включен гальванометр с сопротивлением g . Как известно $i = 0$, когда $a : b = c : d$ ². Вопрос здесь идет не о применении нулевого метода, наоборот изменение одного (или многих) сопротивления должно указать желаемый результат на установленном на расстоянии гальванометре или счетчике.

Общая теория дает

$$e = E \frac{ad - bc}{k}; \quad i = \frac{E}{g} \cdot \frac{ad - bc}{k},$$

откуда

$$k = (a + c)(b + d) + \frac{ac}{g}(b + d) + \frac{bd}{g}(a + c).$$

Обыкновенно придают четырем ветвям моста почти равные сопротивления, так как при этом, по известным основаниям, можно рассчитывать на наибольшую чувствительность. Поэтому ветви $b = c = a$ могут иметь равные сопротивления, тогда как d отличается от них небольшим избытком x , т. е. $d = a + x$. Тогда напряжение на мосте будет

$$e = E \cdot \frac{1}{\left(4 \frac{a}{x} + 2\right) + \frac{a}{g} \left(4 \frac{a}{x} + 3\right)}, \quad (11)$$

¹ Такие передатчики ставит завод КИП в Харькове на выпускаемые им кольцевые весы. (Прим. перев.).

² Здесь через i и e обозначена сила тока в гальванометре и напряжение на его зажимах; E — напряжение на вершинах моста. (Прим. ред.).

отсюда

$$i = \frac{E}{g} \cdot \frac{1}{\left(4 \frac{a}{x} + 2\right) + \frac{a}{g} \cdot \left(4 \frac{a}{x} + 3\right)} \quad (12)$$

Чувствительность измерения выражается через

$$\frac{di}{dx} = \frac{E}{g} \cdot \frac{4a + 4 \frac{a^2}{g}}{\left(4a + 2x + 4 \frac{a^2}{g} + 3 \frac{ax}{g}\right)^2}, \quad (13)$$

$$\frac{de}{dx} = E \cdot \frac{4ag + 4 \cdot a^2}{(4ag + 2gx + 4a^2 + 3ax)^2} \cdot g. \quad (14)$$

Оба выражения будут наибольшими при $x = 0$, т. е. тогда, когда четвертое (измеряемое) сопротивление будет равно трем остальным: $d = a$. Этого можно было ожидать и на основании соображений симметрии. Именно при $x = 0$ будет

$$\frac{de}{dx} = E \cdot \frac{1}{4a \left(1 + \frac{a}{g}\right)}; \quad \frac{di}{dx} = \frac{E}{g} \cdot \frac{1}{4a \left(1 + \frac{a}{g}\right)}.$$

Кроме того, теперь a представляет сопротивление моста для тока в целом, поэтому при ($x = 0$ и малом e или i , как предельное значение) полный расход тока $I = E/a$.

Как предельные случаи, можно рассмотреть следующие.

1. Сопротивление моста велико по сравнению с a , поэтому можно положить $g = \infty$, тогда измеритель напряжения в мосту даст вблизи нулевой точки отклонения согласно

$$\frac{de}{dx} = E \cdot \frac{1}{4a};$$

2. Сопротивление моста мало в сравнении с a ; таким образом принимаем $g = 0$, тогда измеритель тока в мосту около нулевой точки дает отклонение согласно

$$\frac{di}{dx} = E \cdot \frac{1}{4a^2} = I \cdot \frac{1}{4a};$$

3. Средние отношения пусть будут представлены прибором с внутренним сопротивлением $g = a$, тогда вблизи нулевой точки будет

$$\frac{de}{dx} = E \cdot \frac{1}{8a}; \quad \frac{di}{dx} = I \cdot \frac{1}{8a}.$$

Формулы для e и i аналогичны, если один раз поддерживают постоянным E (малое сопротивление проводки) в другой раз I (включено балластное сопротивление, большое в сравнении с a); в обоих случаях источник тока должен быть достаточно сильным. Среднее соотношение схемы (3 случай) дает в сравнении с предельными случаями чувствительность вдвое меньшую.

Выводы из сказанного будут приведены в § 120 при рассмотрении термометров сопротивления.

Если притиволежащие друг к другу сопротивления a и d одновременно изменить в $a + x$, тогда как оба остальные b и c останутся равными первоначальному сопротивлению a и постоянными, то получится

$$\frac{e}{g} = i = I \left(2 \frac{a}{x} + 1\right) - E \cdot \frac{2}{x},$$

откуда можно исключить I или E , сделав другую величину постоянной. Здесь получается удвоенная чувствительность, но, несмотря на симметрию, здесь нет простой или линейной зависимости.

Большое разнообразие возможных схем заложено в соединении мостовой схемы с прибором со скрещенными катушками. В *мостовой схеме с крещ-шпуль указателем*, предложенной Сименс и Гальске, скрещенные рамки прибора включены в обе диагонали моста, следовательно, одна из них — последовательно или параллельно с источником тока (рис. 394, измеритель количества тепла). Можно решать специальные задачи, например, в случае психрометра задачу — сделать показываемую прибором разность температур независимой от самых температур (рис. 357). Сименс и Гальске претендуют на большую чувствительность такой схемы, по сравнению с простыми скрещенными катушками, при независимости обеих схем от рабочего напряжения батареи (Л.).

Еще большее разнообразие дает возможность сделать подвод тока к вершине моста через скользящий контакт сопротивления, задача которого — изменять сопротивления a и b так, чтобы их сумма $a + b = \text{const}$ оставалась постоянной.

Для измерений служит *постоянный и переменный ток*. Постоянный ток имеет то большое преимущество, что соединительные проводки и сами измерительные приборы друг на друга не влияют; при переменном необходимо при вводах всех проводов заботиться от устранения влияний индукции. Удобнейшим источником тока всегда является обычная осветительная сеть. При сети постоянного тока остается все таки та трудность, что при отборе более низкого напряжения в потенциометрической схеме остается высокое напряжение относительно земли. Кроме того, большая часть энергии пропадает, если в интересах постоянства отбираемого напряжения e при изменяющемся потреблении тока стараются, чтобы отбор был мал по сравнению с током, протекающим в балластном сопротивлении.

Во всяком случае, результаты искажаются колебаниями сетевого напряжения, если пользуются сетевым током непосредственно, поэтому и употребляют при счетчиках устройства для компенсации напряжения (рис. 32).

В лабораториях речь идет только о постоянном токе, так как здесь обычно пользуются небольшими аккумуляторными батареями напряжением от 4 до 12 в. На производстве обмен для зарядки многочисленных небольших аккумуляторных батарей становится неудобным, если точки замера разбросаны. Дело обстоит иначе, если наблюдение за приборами сосредоточено, главным образом, в одной измерительной центральной, где тогда и устанавливается центральная батарея. Поэтому, до последних лет оставались известные затруднения в обслуживании разбросанных точек замера, особенно при сети переменного тока. Усовершенствование «сухих» и ламповых выпрямителей привело к тому, что как раз при переменном токе обслуживание стало наиболее удобным, когда получаемый через понизительный трансформатор переменный ток затем обращается в постоянный.

Многие поставляющие фирмы отдают преимущество переменному току, при котором конструкция счетчиков проще (рис. 32) и при котором сетевое напряжение легко понижается трансформаторами в любом отношении. Можно сказать, что при разбросанных точках замера переменный ток имеет больше преимуществ и причиняет меньше хлопот, в измерительных же центрах, при тесно расположенных проводках, индукционные воздействия говорят против него и постоянный ток здесь лучше.

Для питания измерительных центральных разработаны специальные аппараты, в подробности устройства которых мы здесь не можем входить (Л. 43). Так как выпрямители дают несколько колеблющееся напряжение, то рекомендуется присоединять небольшую аккумуляторную батарею, служащую в качестве буфера и которую приходится только несколько раз в год хорошо подзарядить. В случае отсутствия такой батареи эксплуатация при переменном токе дешевле. Батарея, однако, имеет еще то большое преимущество, что при порче в сети она всегда остается в качестве аварийного резерва.

Большие измерительные установки, потребляющие свыше нескольких ампер, снабжаются вращающимся умформером, и тогда являются и без батареи независимыми от колебаний высокого напряжения. Эта зависимость является большим местом всех прочих способов питания как при постоянном, так и пере-

менном токе. Колебания сетевого напряжения передаются в том же отношении и трансформаторами и выпрямителями и требуют специально компенсированных счетчиков или указывающих приборов, если не хотят мириться с заметными неточностями в измерениях.

Приборы, показания которых могут быть переданы в более или менее отдаленный пункт, могут быть указывающими, самопишущими и суммирующими или счетчиками; к ним относится все, что в §§ 7—13 было сказано относительно отдельных форм. Об особых свойствах электрических приборов можно упомянуть следующее.

Самопишущие приборы с падающей дужкой позволяют стрелке с пишущим штифтом свободно колебаться над бумагой и только время от времени прижимают ее к бумаге особой дужкой. Запись, таким образом, получается в виде ряда точек, и нажимающее усилие достаточно велико, чтобы можно было применить красящую ленту, которая подобно ленте пишущей машины дает вполне опрятные отпечатки.

Самопишущие аппараты с падающей дужкой имеют то большое преимущество, что они могут быть устроены как приборы с записью на несколько кривых (рис. 33), причем попеременно один контакт включает ленту следующего цвета и соответственно следующий датчик тока, после чего другой контакт опускает нажимную дужку.

Самопишущие аппараты с падающей дужкой делаются как с вращающейся рамочкой (катушкой), так и со скрещенными катушками (крейцшпульт) и изготавливаются также и для переменного тока. Можно обойтись без устройства с падающей дужкой и пользоваться непосредственной записью, если только прибор развивает достаточную перестанавливающую силу, по сравнению с которой можно пренебречь трением о бумагу.

Самопишущий прибор с сервомотором изображен на рис. 22.

Самопишущие приборы с падающей дужкой требуют между двумя отсчетами промежутка времени от 0,5 до 1 мин, в крайнем случае не менее 0,1 мин, чтобы указатель успел установиться. Если явление протекает быстрее, чем 0,1 мин, то приходится прибегать к записи при помощи искр или к световой записи. Заставляют электрическую искру проскакивать с пишущего штифта на барабан, причем искра пробивает бумагу. Результаты получаются удовлетворительными лишь при больших масштабах диаграммы в обоих направлениях, так как искра, из-за неодинаковой толщины бумаги, может уклоняться до $1/2$ мм от кратчайшего пути; искра особенно легко проскакивает в предыдущую дырочку или, при частом расположении дырочек, разрезает бумагу.

При фотографической записи диаграммной кривой, записывающий луч, большей частью, направляется подвижным зеркальцем на сбегающую чувствительную ленту. Осциллограф и служит именно для изображения весьма быстро протекающих явлений, вроде электрических колебаний, но может быть полезным и при более медленно протекающих явлениях механической или термической природы. В исполнении фирмы «Сименс и Гальске» действующей частью является измерительный шлейф по рис. 34. Между вытянутыми вдоль полюсами стального магнита натянута посредством пружинки могущая колебаться взад и вперед тонкая металлическая ленточка. Ток, проходящий через шлейф, заставляет подаваться одну часть ленточки вперед, а другую — назад. Приклеенное к ним зеркальце получает, таким образом, некоторый поворот (3° — при высшей

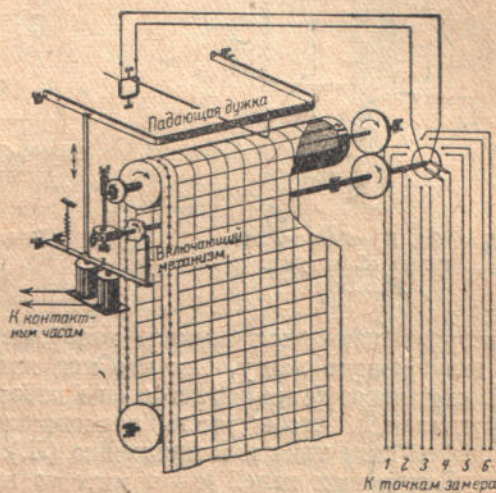


Рис. 33. Шестикрасочный самописец с падающей дужкой «Сименс и Гальске», аналогично «Гартман и Браун».

силе тока в 100 ма, сопротивление шлейфа 1 ом). Такой или несколько измерительных шлейфов устанавливаются в аппаратуре, дающей узкий световой пучок, направляемый на зеркальце шлейфа; отраженный световой луч, при перемещениях зеркальца, ходит поперек светочувствительной ленты, передвигающейся в продольном направлении. Для того, чтобы иметь возможность выбирать момент записи, часть отраженного луча выделяется и, посредством набора

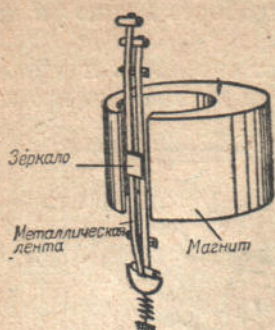


Рис. 34. Шлейф осциллографа «Сименса и Гальске».

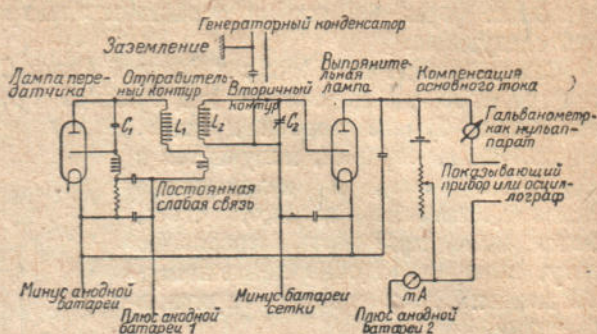


Рис. 35. Высокочастотная схема для метода половинного резонанса.

быстровращающихся зеркал, изображение известным способом растягивается в зазубренную ленту, так что ход явления может наблюдаться и визуально. К осциллографу прилагается еще набор последовательных и параллельных сопротивлений, чтобы иметь возможность шунтировать шлейф применительно к любой силе тока и напряжению (Л).

Для наших целей имеет интерес возможность записать с помощью осциллографа почти без инерции и совершенно без трения всякие изменения механических или теплотехнических величин, после того как они будут превращены в напряжения или силы электрического тока.

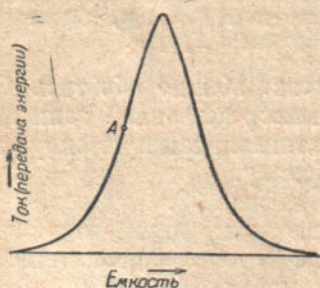


Рис. 36. Резонанс вторичного контура с генерирующим контуром рис. 35.

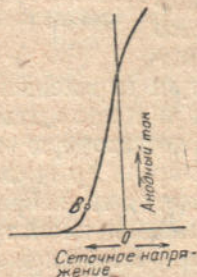


Рис. 37. Усиление выпрямительной лампой.

существует потребность в самописце, который, с одной стороны, не записывает, подобно приборам с падающей дужкой только через каждые 6 секунд и, с другой стороны — не настолько сложен и деликатен, как осциллограф.

В приборе для быстрой записи диаграммная бумага быстро сотрясается, так что перо непрерывно по ней прыгает. Преимущества оптической записи здесь могут быть достигнуты тем, что собственное число колебаний системы поворотной рамочки (у гальванометра) во много раз меньше, чем у измерительного шлейфа (нормально 5500 герц у S&N и 350 у Шпренгера).

Применение осциллографа для записи механических величин целесообразно лишь тогда, когда механические импульсы даются с быстротой, сравнимой с быстротой его работы. Столь же быстро должны превращаться механические величины в электрические, для чего, например, кольцевая трубка и скользящий реостат

¹ У нас в Советском Союзе изготавливаются мастерскими Харьковского электротехнического ин-та им. Постышева.

(фиг. 23 и 24), очевидно, непригодны. Необходим, следовательно, практически безинерционный механический датчик, который способен переводить весьма малые механические перемещения в достаточно сильные электрические импульсы. Такие устройства описаны в §§ 97, 103, 117 и на рис. 228 и 325 в том виде, как они были разработаны в качестве динамометров; но их можно рассматривать как вообще высококачественные указатели положения. Они воздействуют на сопротивление некоторого контура и тогда применимы при постоянном и обыкновенном токе или имеют емкость между парой пластинок и тогда требуют тока высокой частоты.

Для осциллографов переменные токи должны быть выпрямлены. При переменном токе обыкновенной частоты для этого применяется, например, пластинчатый выпрямитель.

Нужно позаботиться, чтобы энергия всегда была в избытке.

Токи высокой частоты можно выпрямлять и усиливать их действие методом резонанса, рис. 35 (Л. 48). Колебания высокой частоты возбуждаются посредством обратной связи отправительного контура на сетку лампы. Вторичный контур получает энергию из отправительного; в зависимости от качества их настройки, при точном резонансе, достигается максимум на кривой резонанса (рис. 36); оставляют оба контура немного расстроенными так, чтобы остановиться на половинной высоте кривой резонанса, у точки А. Когда при таком положении конденсатор датчика меняет свою емкость и тем влияет на частоту вторичного контура, а, следовательно, на его настройку, то переходящая во вторичный контур энергия изменяется, в меру крутизны резонансной [кривой у точки А, сравнительно сильно и даже, если А лежит на точке перегиба кривой, изменяется практически линейно. Таким образом изменения положения пластинки конденсатора вызывают сильные изменения энергии во вторичном контуре, энергия которого теперь может быть выпрямлена лампой и затем записана осциллографом.

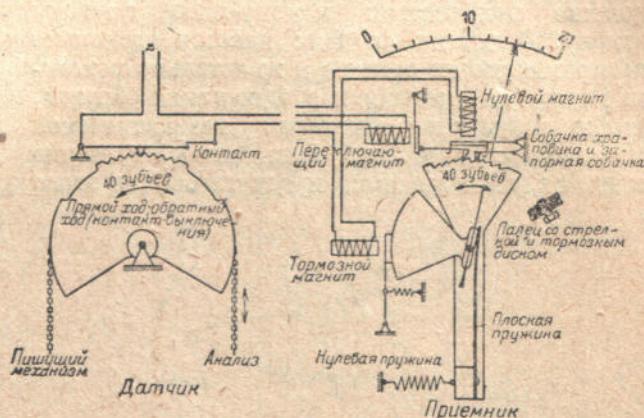


Рис. 38. Передача на расстояние показаний газоанализатора Моно.

Усиление остается относительно линейным, если колеблющиеся амплитуды, достигающие рабочего пункта В, благодаря предварительному отрицательному напряжению, будут достаточно велики, чтобы лежащей ниже В кривой частью можно было пренебречь, по сравнению с используемой наиболее прямой частью.

Совершенно особый род передачи на расстояние оказался необходимым при газоанализаторах. Здесь нет плавного передвижения стрелки или пишущего пера, которое необходимо куда-то передать; здесь после каждого анализа пишущее перо продвигается вперед настолько, сколько предписывает результат анализа, и затем падает обратно; передаче подлежит только точка окончания его хода. Найденное решение этой задачи изображено на рис. 38. Цепочка пишущего механизма передвигает зубчатый сегмент, который дает контакты соответственно длине хода пишущего пера. Эти контакты возбуждают в отдаленном приемнике подающий магнит, передвигающий храповый сегмент, который идет вперед, преодолевая противодействие пружины нулевого положения, и удерживается от обратного хода храповой собачкой. Указатель не сопутствует этому движению, потому что его положение пока фиксируется тормозным магнитом. Только когда тормозной магнит освобождает тормозную шайбу, а с ней и указатель, тогда последний сразу остановится на деление шкалы, определенное

положением сегмента; к этому его побуждает плоская нажимная пружина, которая отжимается кулачком при его движении и всегда стремится поставить кулачок и указатель параллельно себе. Как только тормозной магнит опять фиксирует новое положение стрелки, нуль-магнит подымает запорную собачку, и храповой сегмент возвращается назад. Само собой понятно, что при обратном ходе зубчатого сегмента датчика его контакты должны бездействовать, для чего их контур размыкается в другом месте. Это размыкание и включение магнитов в надлежащее время обуславливается действием особых управляющих частей, на взаимодействии которых мы не можем здесь останавливаться.

§ 16. Математические приборы. Измерительные приборы состоят из воспринимающего и указывающего органов; установка этих органов часто не должна быть пропорциональной, но должна подчиняться какому-либо другому закону. В других случаях имеется несколько воспринимающих органов и желательно скомбинировать их показания в одно таким образом, чтобы результат некоторой математической операции с ними мог быть непосредственно отсчитан, записан или подсчитан. Для этого

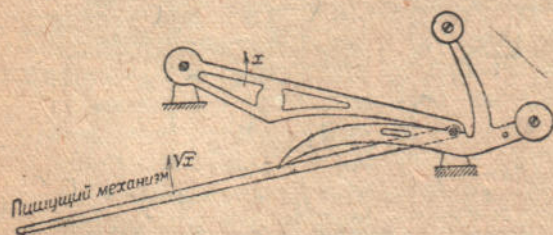


Рис. 39. Пара профильных шайб паромера Зеленка для извлечения корня, фирмы «Клинкгоф».

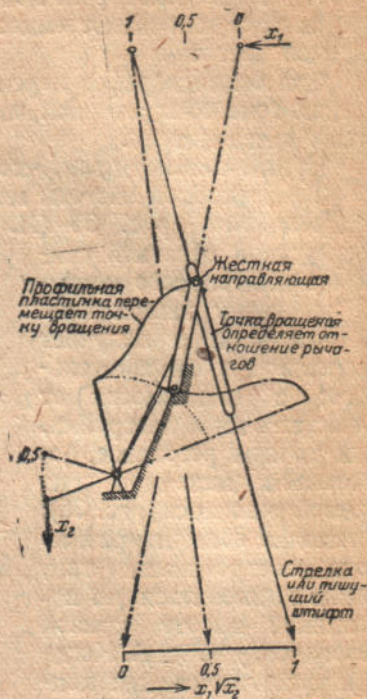


Рис. 40. Передача для умножения.

применяются специальные электрические схемы. Дальше будут описаны также и чисто механические устройства.

Если вместо величины x должна быть указана определенная функция последней, то этого обыкновенно можно достигнуть посредством кулачной передачи (перекачивающимися рычагами, рис. 39) или применением профильной пластинки (рис. 40, 222).

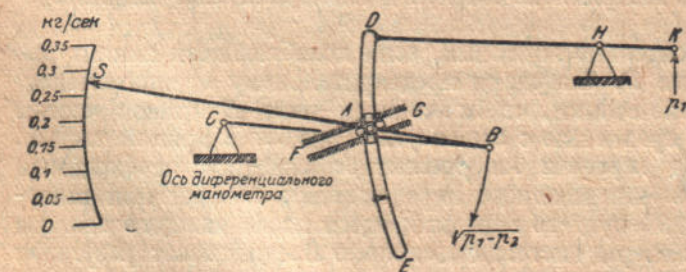


Рис. 41. Передача для умножения старого паромера Гере.

Подобными устройствами стремятся превратить непропорциональные соотношения в пропорциональные, как например, на рис. 31, посредством уширенной головки на железном сердечнике. Однако, чаще встречающимся примером является извлечение корня из числовых показаний давления x для того, чтобы иметь возможность интегрировать $\int \sqrt{x} dt$. Для указывающих приборов образование какой-либо функции имеет мало значений, так как у них можно просто соответственно сузить или расширить шкалу, т. е. получить требуемую функцию простой градуировкой. Если же необходимо производить дальнейшие операции, как например,

интегрирование, тогда надо иметь правильную линейную зависимость. Всегда возникают затруднения, когда, вследствие особенностей требуемой функции, перестанавливающая сила исчезает, как это имеет место у функции \sqrt{x} при $x=0$ (§ 7).

Суммирование показаний многих приборов лучше всего достигается электрическим путем. В котельной, где отдельные котлы или отдельные исходящие паропроводы снабжены паромерами, иногда кочегарам необходимо знать общую подачу пара всей котельной. Очень часто нет такого пункта, через который должен проходить весь пар или, по крайней мере, он проходит через него не всегда.

Датчики от отдельных паромеров дают токи (предварительно уже сделанные пропорциональными корню квадратному), которые, действуя на прибор со скрещенными рамками, позволяют ему показывать сумму токов, если выполнены известные условия, касающиеся отношения сопротивлений. При переменном токе, отдельные токи можно суммировать посредством трансформатора, имеющего соответственно несколько первичных и одну вторичную обмотку (Л. 38). Разность получается переменной направления одного из токов. Кроме того, уже упоминавшаяся при рис. 30 схема с обращенным отводом, которая

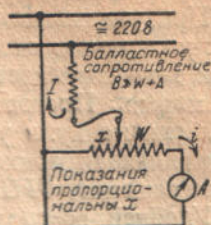


Рис. 42. Потенциометрическая схема фирмы «Экардт».

$$\text{Здесь } i \cdot (W+A-x) = (I-i) \cdot x,$$

$$i = I \frac{x}{W+A} \text{ пропорционально } x.$$

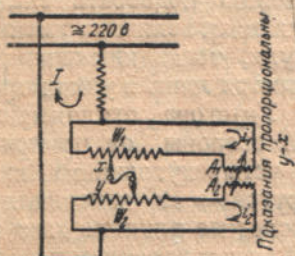


Рис. 43. Двойная потенциометрическая схема для измерения разностей.

$$\text{Пусть } W_1 + A_1 = W_2 + A_2 = W + A,$$

тогда

$$(I+i_1) \cdot x = i_1 \cdot (W+A-x),$$

$$(I+i_2) \cdot y = (W+A-y);$$

следовательно

$$I \cdot x = i_1 (W+A); \quad I \cdot y = i_2 (W+A)$$

$$i_2 - i_1 = \frac{I}{W+A} \cdot (y-x).$$

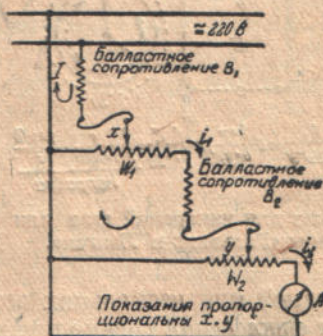


Рис. 44. Двойная потенциометрическая схема для измерения произведений.

Здесь

$$B_1 > W_1 + B_2 > W_2 + A_1;$$

тогда

$$I \cdot x = i_2 \left[\frac{(W_1 + B_2)(W_2 + A_1)}{I} (W_2 + A_1) - y \right]$$

$$i_2 = \frac{I}{(W_1 + B_2) \cdot (W_2 + A_1)} \cdot xy.$$

снова представлена на рис. 42, дает возможность получить разность, согласно схеме рис. 43, при которой в качестве указывающего прибора употребляется счетчик с 2 катушками.

Произведение может быть получено многими способами. Прежде всего, всякое интегрирование представляет произведение интегрируемой величины на время или на путь. Суммирующие весы рис. 21 образуют величину $\int G ds$ или, при равномерном ходе, также $\int G dt$, как произведение из G , с одной стороны, и ds или dt с другой (такоже рис. 212). В противоположность этому, при действительном образовании произведения можно получить мгновенное значение некоторого произведения; при измерителе количества тепла мгновенный поток dG/dt должен быть умножен на температурный перепад между притоком и оттоком, так что $W = dG \cdot \Delta T/dt$ представляет мгновенное часовое значение

теплого потока. Его можно отсчитать по некоторой шкале или просуммировать каким-либо методом. Рис. 369 представляет пример преимущественно механического решения; приборы рис. 370 и 371 действуют чисто электрически.

При указывающих приборах можно механически перемножить результаты двух воспринимающих органов, например, по рис. 40. Профильная пластинка сверху тогда извлекает предварительно из одной из полученных величин квадратный корень. Произведение получается в общем случае только приближительным, однако нуль указывает правильно, если $x = 0$, так как неподвижная направляющая приходится в соединении обеих нулевых точек. Рис. 41 дает более старое решение, $OFGH$ лежат на прямой.

Удобней всего умножение достигается электрически: ваттметр умножает силы тока в своих обеих катушках (одну на другую), и обе эти величины могут изменяться от нуля до наибольшего значения.

Счетчик ваттчасов одновременно умножает произведение также на время. Нужно помнить, что когда обе величины сами приходят к нулю, то и доставляемая ими энергия также обращается в нуль — неудобство, которое при указывающих приборах обходят тем, что нижнюю часть шкалы удаляют.

Схема с обращенным отводом также дает возможность, при изменении обеих величин от нуля до высшего значения, указывать произведение двух механических величин, предварительно обращенных в сопротивления W_1 и W_2 (рис. 44).

Легче можно подобрать схемы, где только одна главная величина уменьшается вплоть до нуля, тогда как одна или две другие изменяются лишь в узких пределах.

В мосте Уитстона отклонение зависит, с одной стороны, от приложенного к вершинам четырехугольника напряжения, а с другой — от изменения сопротивления

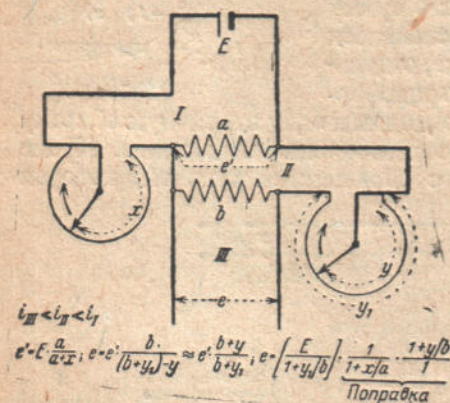


Рис. 45. Схема для измерений газа или пара, фирмы «Гальвакс и Ланген».

тивления одной или нескольких ветвей моста. Последнее влияние дает пропорциональные отклонения только в узких границах. В узких границах показание E

[или $E / (1 + \frac{y_1}{b})$, где, однако, y_1/b должно быть постоянным], как главной вели-

чины, можно видоизменять в узких границах, в виде поправки путем умножения на дополнительные показания, согласно схемы рис. 45. Прилагаемое к схеме напряжение E определяется количеством газа, и сопротивления x и y , зависящие от температуры и от давления, только вносят поправку. При этом различными способами отвода достигается то, что для x поправка получается прямо пропорциональной, а для y обратно пропорциональной. Результат, в виде e , может быть непосредственно отсчитан или просуммирован счетчиком.

Чтобы получить отношение и частное двух величин, можно вместо знаменателя ввести его обратную величину и получить результат как произведение. Типичным прибором, указывающим отношения, и является гальванометр со скрещенными рамками Бругера (рис. 28). Он не имеет никакой направляющей силы, и, пока в катушках нет тока, стрелка остается ненаправляемой и может находиться безразлично в любом положении. Вспомогательная пружинка прижимает стрелку к упору, когда прибор не работает, во избежание повреждений при перевозке. При прохождении тока магнит освобождает пружинку. Тогда обе катушки с указателем приходят в должное положение, определяемое отношением сил обоих токов.

Катушки колеблются в междуполюсном пространстве, как и в гальванометре с вращающейся рамкой; сердечник и здесь стоит неподвижно, но сделан не круглым, а особенной овальной формы для того, чтобы распределение силовых линий поля отвечало в известных границах желаемой шкале. Аналогичным прибором при переменном токе служит измеритель отношений по рис. 29. Пре-

имуществом измерителей отношений является их независимость от рабочего напряжения¹; здесь, однако, речь идет не об этой особенности, но об их пригодности для измерения отношений.

Некоторые суммирующие приборы суммируют измеряемые величины, выражаясь научно — интегрируют непосредственно. Таковы измерители, действующие подобно мотору, как обыкновенные водомеры, газомеры, счетчики тока,

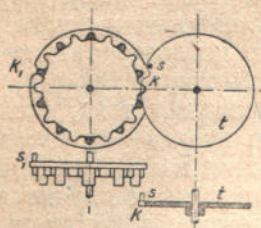


Рис. 46. Десятичная передача.

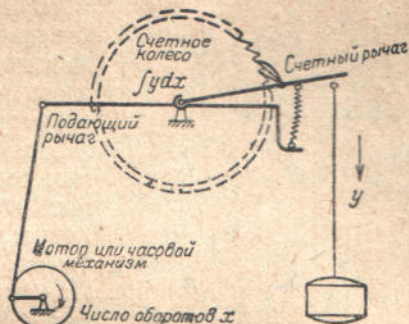


Рис. 47. Интегрирующий механизм, фирмы «Бопп и Рейтер».

при которых последним звеном, служащим для указания измеряемых величин, является счетчик, сам представляющий такой интегратор для скорости. Движущий механизм измерителя, во всех этих случаях, действует на собственно счетчик (счетный механизм), снабжаемый или перемещающимися цифрами, или равномерно передвигающимися цифровыми колесами, или вращающимися по циферблату стрелками. Числовые колеса, особенно работающие от вспомогательной силы, допускают более уверенный, отсчет, чем стрелочные указатели, обнаруживающие случайные торможения, когда, например, при переходе от 99 999 к 00 000, всем десятичным передачам приходится работать одновременно.

Зацепление при десятичной передаче представлено на рис. 46: когда колесо единиц переходит от 9 к 0, десятовое колесо передвигается штифтом s вперед.

Это возможно тогда, когда зарубка k освободит в надлежащее время десятовое колесо, которое удерживается от вращения диском t . Десятовое колесо имеет 20 зубцов, из которых каждый второй шире, чем соседние.

Штифт s передвигает колесо

всегда на два зуба вперед, т. е. на $2/20$ оборота. Штифт s_1 и впадина k_1 служат для того, чтобы таким же образом передвигать сотенное колесо.

На окружности колеса, соответственно зубцам, нанесены цифры от 0 до 9; при каждом обороте машины перед окошечком показывается следующая цифра. Каждый раз, когда колесо единиц опять переходит от 9 к 0, оно передвигает десятовое колесо на одну цифру вперед и, таким образом, после каждых десяти оборотов, устанавливает перед окошечком следующую цифру. Поэтому после отсчета 0 9 не получается опять 0 0, но 1 0, как и должно быть. После десяти оборотов десятового колеса сотенное колесо передвигается на 1 вперед и получается 100, и так дальше до 99 999, после чего опять появляется 00 000.

При всех счетчиках, так же как при газовых часах и т. п., при отсчете замечают прежде всего последнюю цифру или положение последней стрелки, которая движется быстрее всего; более медленно движущиеся — сотни; тысячи записыва-

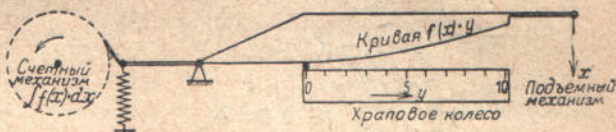


Рис. 48. Управление счетным устройством посредством указывающего механизма самописца с падающей рамкой.

¹ В отношении прибора на рис. 29 это утверждение не верно. При изменении напряжения меняется сила тока в катушках, что при наличии железного сердечника, втягиваемого в катушки, приводит к значительному изменению коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции. При напряжении сети 110 в, колебания напряжения ± 10 в дают изменение показаний $\approx 0,7\%$. (Прим. ред.).

ваются вслед затем. Нужно обращать внимание на то, чтобы в промежутке какое-нибудь число не изменилось с 9 на 0, оттого, что изменилось предыдущее.

Среди суммирующих приборов электрические счетчики тока играют выдающуюся роль. Все старания сделать электрическое изображение величин пропорциональным измеряемым значениям объясняется желанием иметь возможность суммировать измеряемые величины. Для визуального отсчета пропорциональность шкалы не играет никакой роли. Счетчики тока сами по себе здесь описываться не будут (Л.). Принцип некоторых счетчиков переменного тока выявляется на рис. 32, из которого также видно, как необходимо сделать ход счетчика независимым от рабочего напряжения тока, колебания которого не могут быть вполне устранены. Для этой цели и служит магнит напряжения рис. 32. При приборах, которые сами не являются суммирующими, интегрирование достигается соответствующими вспомогательными устройствами. Они должны всегда давать $\int u dx$, поэтому абсцисса x должна равномерно возрастать, а соответствующие значения u при этом умножаться на приращение x .

Часто для этого употребляется основной диск, вращение которого дает приращение абсциссы. По нему катится измерительный ролик, приводимый в движение трением диска, ролик вращается тем быстрее, чем дальше от центра

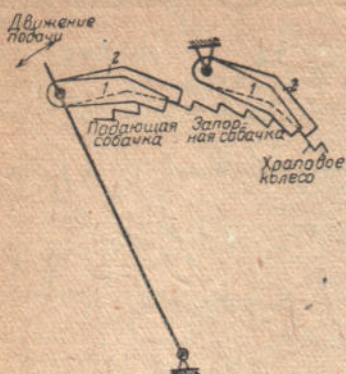


Рис. 49. Храповик со сложной собачкой для тонкой перестановки.

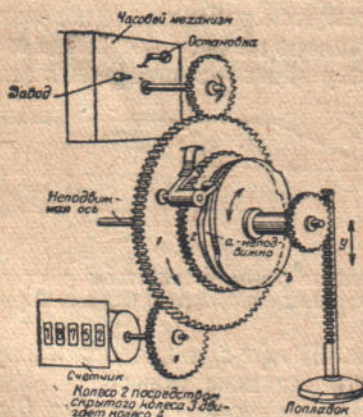


Рис. 50. Интегрирующий механизм «Сименса и Гальске».

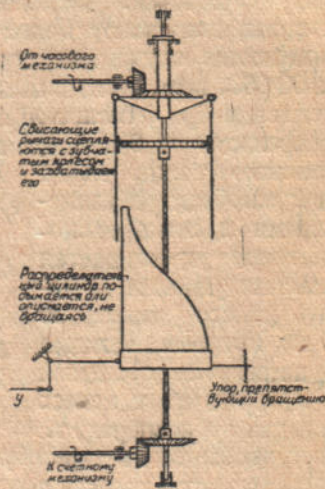


Рис. 51. Интегрирующий механизм по Боде.

отстоит точка касания ролика и диска. Счетчик, приводимый в движение от измерительного ролика, идет поэтому пропорционально произведению скорости x основного диска на расстояние y измерительного ролика от центра диска. Измерительный ролик, придя к центру диска, больше не вращается. Этот способ интегрирования находит применение у паромера рис. 219 и у работомера рис. 337; при первом осуществлено интегрирование по времени, а при последнем по пути движущегося туда и обратно поршня машины ¹.

Ряд интегрирующих устройств суммируют отдельные ходы распределительного рычага по числу и по величине, посредством храпового механизма, который

¹ Теория таких счетчиков с фрикционным роликом дана в конце параграфа.

состоит, как у счетчика ходов, из подающей и запорной храповой собачки. Первая собачка проворачивает храповое колесо вперед, в то время как последняя — препятствует обратному ходу (рис. 47, 48, 193, 212); обороты колеса суммируются счетчиком.

Чтобы придать точное значение ходу распределительного рычага, храповое колесо должно быть нарезано мелкими зубцами. Так как всегда отсчитываются только целые зубцы, то, при захвате 10 зубцов на стозубом храповом колесе, всегда остается неопределенность до 10%. Поэтому как подающую, так и запорную собачку разделяют на ряд из n отдельных собачек, переднее ребро каждой из которых отстоит на $1/n$ деления колеса от ребра соседней. Посредством устройства двойной собачки (рис. 49) число зубцов храпового колеса практически удвоено. Если устроить стозубое храповое колесо и $n = 10$ собачек, то это будет равноценно применению $10 \cdot 100 = 1000$ -зубого храпового колеса. Захваты, действующие трением вместо зубчатых защелок, могут работать точнее только в теории.

Подающий рычаг (рис. 47) постоянно совершает одинаковый ход, тогда как ход счетного рычага твердо ограничен установкой у некоторого поплавка и, таким образом, определяет продвижение вперед храпового колеса. Аналогично работает устройство, изображенное на рис. 48, при котором кроме того можно осуществить любую функцию от x . Сравните также рис. 212.

Другие устройства позволяют равномерно вращающемуся колесу действовать на счетчик более короткое или более длительное время.

В изображенном на рис. 51 устройстве захватывающая собачка может включаться от нуля до полуоборота, в зависимости от поворота профильного колеса b , относительно такого же неподвижного колеса a .

Изображенный на рис. 51 направляющий цилиндр заставляет висячие рычаги, в зависимости от своего положения, раньше или позже захватывать зубчатое колесо; освобождается же оно всегда одинаково, следовательно опять колесо будет захватываться в течение различного времени. При всех таких устройствах результат определяется только одной точкой каждого целого оборота, поэтому они непригодны для быстроменяющихся величин. При рис. 51 можно, придавая кривой соответствующее очертание, получить любую функцию, даже корень квадратный из подъема цилиндра для дальнейшего интегрирования.

III. НАБЛЮДЕНИЕ И ВЫЧИСЛЕНИЕ

§ 17. Отсчет. Измерение заключается в наблюдении какого-либо прибора; сюда же включается и вычисление, если прибор не указывает искомую величину непосредственно и притом совершенно точно, что бывает лишь в редких случаях. Даже самый простой отсчет требует некоторого внимания, когда ставят задачей, при возможно меньшей затрате времени, достигнуть возможно большей (или, по крайней мере, соответствующей цели) точности.

При многих приборах, как при манометрах или толстых масштабах отсчет бывает не точен, если при наблюдении не смотреть под прямым углом на соответствующее место шкалы. Устранить эту общеизвестную *параллактическую ошибку* и является целью установки зеркала параллельно шкале, как это можно видеть у гальванометров. Если стрелка закрывает свое изображение или делит пополам изображение зрачка наблюдателя в зеркале, то наблюдатель смотрит на шкалу правильно.

Иногда шкала выстраивается непосредственно на стеклянной поверхности зеркала: при этом на шкалу смотрят правильно, если штрихи шкалы совпадают с их собственным зеркальным изображением. Приспособление для отсчета, изображенное на рис. 52, также устраняет ошибку параллакса.

Нониус на рис. 52 также должен делать отсчет более точным: установка в 0,6 делений нулевой точки маленькой шкалы нониуса получается в том случае, когда шестой штрих этой шкалы совпадает со штрихом (безразлично каким) главной шкалы. Нониус имеет длину, соответствующую 9 делениям главной шкалы, но разделен на 10 равных частей.

При отсчете у таких приборов, ход которых подвержен влиянию трения (манометры, барометры, гигрометры), им сообщают осторожным постукиванием легкие сотрясения, чтобы устранить трение или, по крайней мере, уменьшить его.

Приведем пример того, как можно *простыми мерами* повысить точность отсчета, сберегая время.

Требуется определить число оборотов машины (в минуту). В распоряжении имеется секундомер (§ 36) и, может быть, машина снабжена счетчиком оборотов; в противном случае обороты придется определить непосредственно счетом.

Часто производят наблюдение в течение одной минуты и отмечают разность показаний счетчиков или сосчитанные обороты.

Если мы насчитали 51 оборот, то даже при самом тщательном наблюдении следует рассчитывать на ошибку до $\pm 1\%$. Так как можно заметить только полные обороты, то мы всегда насчитаем 51, когда машина делает между 50,5 и 51,5 оборотов в минуту. Если для сбережения времени мы сократим наблюдение до полминуты, то, как видно, мы насчитали бы 25 оборотов и должны были рассчитывать на ошибку до $\pm 2\%$.

И все же можно в такое же время получить удовлетворительные результаты, если переменить порядок наблюдения. Для этого будем определять время, не-

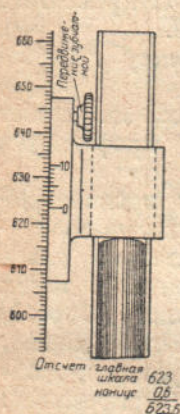


Рис. 52.
Приспособление для отсчета уровня ртуты у ртутного манометра. Свободная от параллакса установка; отсчет по нониусу.

обходимое на 25 полных оборотов, простым нажатием на кнопку секундомера. Пусть отсчет будет 29,2 сек. Ошибку отсчета мы можем оценить меньше, чем в $\frac{1}{2}\%$, так как секундомер имеет деления на 0,2 сек. Поэтому отсчет должен предположительно отклоняться от истинного значения не больше, чем на 0,1 сек в ту или другую сторону, что дает около 0,35% от 29,2 сек. Таким образом число оборотов вычисляется как $\frac{25}{29,2} \cdot 60 = 51,4/\text{мин}$ с наибольшей возможной ошибкой в 0,35%. В обоих случаях можно одинаково предполагать возможность неточного наблюдения, что может несколько увеличить наибольшую ошибку. Второй способ наблюдения дает более точные результаты потому, что отсчитываются полные обороты, а с другой стороны можно отсчитывать 0,2 сек, что является относительно меньшей единицей. При высоком числе оборотов, наблюдение числа оборотов за определенный отрезок времени будет точнее, по крайней мере теоретически¹, именно тогда, когда на одну пятую секунды приходится больше чем один полный оборот, следовательно при числе оборотов свыше 300 об/мин.

Другой пример: в поверочной диаграмме индикаторной пружины нужно измерить последовательные расстояния между линиями, отвечающими повышению давления на одну атмосферу. В известном смысле самым естественным будет взять масштаб и измерить расстояние между линиями, изображающими 0 и 1 ат, затем переложить масштаб и измерить расстояние между линиями 1 и 2 ат, и так до конца. Если теперь сложить вместе все отсчеты, то, как легко предвидеть, мы не получим верного значения для расстояния между линиями 0 и 12 ат, так как случайные ошибки при каждом наложении масштаба едва ли будут компенсировать одна другую. Всегда имеется ошибка наблюдателя, которая все время будет последовательно суммироваться. Лучше будет приложить начало масштаба только раз к линии 0 ат и затем сразу произвести отсчет положения всех линий с точностью до 0,1 мм; затем, взяв разности отсчетов, получим расстояния одной линии от другой. Таким образом избегается ошибка при наложении масштаба, которая неустранима, если штрихи масштаба не слишком тонки.

Оба примера должны, как сказано, служить подтверждением, что и простейшие и элементарнейшие измерения нужно проводить обдуманно, когда нужна точность измерений.

Здесь мы считаем необходимым указать на одну элементарную ошибку, которую нам часто приходилось наблюдать при счете оборотов.

Сделав отметку мелом на вращающемся колесе и уловив ритм хода машины, нажимают секундомер и одновременно начинают считать вслух — раз, два, три, четыре и т. д., при счете, скажем 25, опять нажимают секундомер и вычисляют число оборотов в минуту.

Если теперь за отсчитанное число оборотов принять 25, как это часто не задумываясь делают, то будет допущена ошибка в 4%, так как действительное число оборотов будет 24.

Поэтому считать нужно с нуля, — нуль, раз, два, три... и т. д., или лучше так: начинают считать — раз, два, три и, по счету три, нажимают секундомер и затем считают снова — раз, два, три, и так до конца.

Этот способ — лучший, так как, войдя в ритм, гораздо точнее нажимают секундомер по счету три, чем только начиная счет. (Прим. перев.).

§ 18. Обычные ошибки при вычислении. После простых разъяснений по поводу производства наблюдений идут некоторые, столь же простые, разъяснения касающиеся вычислений.

Выражая результаты в процентах, нужно следить за тем, от какой величины взяты эти проценты.

Если требуется 100 лошадиных сил на валу машины и установленная машина имеет коэффициент полезного действия 60%, т. е. в ней теряется 40%, то машина должна развивать в цилиндрах не $100 + 40 = 140$ л. с., а $\frac{100}{0,6} = 166,7$ л. с.

Коэффициент полезного действия и потери даются в процентах именно от полной развиваемой в машине мощности², а не от мощности, отдаваемой на привод.

¹ Практически нажатие на кнопку секундомера можно произвести точнее, чем ловить глазом прохождение стрелки через нуль. (Прим. перев.).

² Индикаторная мощность.

Если паровая машина требует 200 кг пара в час и потери от конденсации в паропроводе оцениваются в 10%, то котел должен давать не 220 кг, а $\frac{200}{0,9} = 222$ кг пара.

Данные о конденсационных потерях в паропроводе выражаются в процентах от поступающего в паропровод количества пара, а не от исходящего.

Если для парового котла обусловлен коэффициент полезного действия в 70%, с допуском в 5%, то условия поставки считаются выполненными, если измеренная величина окажется ниже обусловленной в пределах 5% от 70, т. е. при фактическом коэффициенте полезного действия не ниже 66,5%; коэффициент полезного действия не может быть просто $70 - 5 = 65\%$.

Ошибки, большей частью незначительные, вкрадываются при выводе средних величин. Чтобы определить емкость цилиндрического сосуда, нужно измерить его высоту, а также его диаметр в свету. Если сосуд изготовлен неточно, то его диаметр может не везде быть один и тот же; поэтому измеряют ряд диаметров, хотя бы через каждые 20 см по высоте, исчисляют средний диаметр d_m и отсюда получают емкость $V = \frac{d_m^2 \pi}{4} h$. Этот прием математически неверен, а как практический приблизительный способ применим лишь тогда, когда отдельные измеренные диаметры не слишком отклоняются один от другого. Правильно, но несколько кропотливо будет вычисление для каждого измеренного диаметра d площади сечения $f = \frac{d^2 \pi}{4}$, получение среднего значения f_m этой площади и затем нахождение объема $V = f_m h$.

Другой, иногда более удобный прием — это вывести *квадратичную среднюю* диаметра — это выражение заимствовано из техники переменного тока — и использовать ее для получения средней площади сечения. Среднее квадратичное — это корень квадратный из средней арифметической квадратов. Это можно пояснить одним примером и одновременно показать примерную величину ошибки при обычном приближенном вычислении.

Пусть высота сосуда будет 140 см, при проектном диаметре в 100 см; измерения на 6 различных высотах, через 20 см, дали диаметры 100, 101, 103, 102, 99, 97.

Обычное вычисление: средний диаметр — 100, 33; отсюда среднее сечение — 7905,8 см². Объем сосуда при 140 см высоты 1106,81 л.

Точное вычисление: сечения при измеренных диаметрах будут 7854,0; 8011,8; 8332,2; 8171,3; 7697,7; 7389,8 см²; среднее арифметическое: 7909,5 см². Объем сосуда при 140 см высоты будет 1107,33 л.

Исчисление по квадратичной средней столь же точное. Квадраты измеренных диаметров будут 10000, 10201, 10609, 10404, 9801, 9409; их среднее арифметическое 10070,7. Квадратичное среднее диаметров $\sqrt{10070,7} = 100,35$ см. Отсюда находим среднее сечение в 7909,5 см², а объем сосуда равным 1107,33 л, как и в предыдущем случае.

Из обоих точных способов первый будет удобнее, если имеем таблицу для площадей кругов; если только таблицу квадратов, — то второй. Приближенный способ значительно удобнее и большей частью достаточно точен, пока измеренные отклонения остаются малыми. При больших отклонениях необходимо применять точные способы.

Где зависимости не являются линейными, там можно пользоваться исчислением средней арифметической и только в том случае, если остаются малыми расхождения измеренных величин друг от друга. Это особенно надо учитывать при измерениях количеств воды отливными отверстиями, диафрагмами и насадками. Так как искомые количества воды пропорциональны корням квадратным из отсчитанных давлений, то при вычислении можно пользоваться средней *корнеквадратной* величиной, вполне аналогичной квадратичной средней. В этом смысле можно говорить также о *кубических*, *логарифмических* и т. п. средних величинах.

Когда некоторая величина зависит от другой линейно, то обратная величина зависит уже не линейно, а в виде некоторой гиперболической функции. Пусть было измерено такое потребление газа газомотором. При 15,2 л.с. — 9,1 м³/час.

соответственно $9,1 : 15 = 0,599 \text{ м}^3/\text{л.с.} \cdot \text{час}$, при $28,8 \text{ л.с.}$ — $12,1 \text{ м}^3/\text{час}$ соответственно $12,1 : 24,8 = 0,488 \text{ м}^3/\text{л.с.} \cdot \text{час}$.

Самый расход газа, как показывает опыт, зависит линейно от мощности достаточно точно, поэтому можно в случае необходимости интерполировать при 20 л.с. расход — $10,6 \text{ м}^3/\text{час}$, а удельный расход — $10,6 : 20 = 0,530 \text{ м}^3/\text{л.с.} \cdot \text{час}$.

Прямое интерполирование удельного расхода газа дало бы $0,544 \text{ м}^3/\text{л.с.} \cdot \text{час}$; это, очевидно, неправильно, так как зависимость удельного расхода газа от мощности не линейна.

Там, где какая-либо величина a определяется как произведение двух других: $a = bc$, часто выводят среднюю величину из всех b , которую мы обозначим через $M(b)$; таким же образом выводят $M(c)$ и умножением обоих находят среднее значение a : $M(a) = M(b) \cdot M(c)$. Так поступают, когда находят среднюю электрическую мощность в течение более длинного времени из отсчетов напряжения и силы тока; к делению приходится прибегать при вычислении индикаторных диаграмм (§ 108, таблица 20). Однако, математически средняя величина произведений не равна произведению средних величин, $M(b \cdot c) \leq M(b) \cdot M(c)$. Здесь также обычный приближенный способ применим лишь до тех пор, пока отсчитанные величины не слишком разнятся друг от друга; 10% отклонение отсчитанных величин друг от друга, т. е. $\pm 5\%$ от средней величины, часто составляет допустимую границу, которой следует придерживаться, по крайней мере, для одного из обоих множителей b или c .

§ 19. Обобщение: установившееся состояние машин. Сказанное об отдельных отсчетах имеет силу и для ряда опытов. Если при какой-нибудь машине в течение долгого времени делают отсчеты разнообразнейших величин, выводят из них средние значения и полагают, что таким образом можно получить соответствующие друг другу данные, то такое предположение может быть правильным только тогда, когда в линейной зависимости друг от друга находятся все измеряемые величины. При этом получают достаточно точные результаты, если каждая из измеряемых величин колеблется лишь незначительно, так что в этих тесных границах можно принять зависимость линейной.

При длительных испытаниях машина, следовательно, должна быть в приблизительно установившемся состоянии. Если это недостижимо (опыты с охлаждением при холодильных установках), то, в зависимости от обстоятельств, можно улучшить результаты сокращения времени наблюдения, достигая этим лучшего приближения к установившемуся состоянию; или нужно установить, как изменяющиеся величины зависят от прочих, и в каких границах можно рассматривать эту зависимость как линейную, или, наконец, при производственных исследованиях необходимо принимать в соображение явления накопления или аккумуляирования.

§ 20. Точность числовых данных. Точность числовых данных следует оценивать по числу значащих цифр, а не по их положению относительно запятой. Если длина моста 1832 м , то точность ограничивается при этом целыми метрами, тогда как диаметр какого-нибудь стержня, равный $18,3 \text{ мм}$, измеряется десятками долями миллиметра. Тем не менее более точным будет не последнее, а первое значение; оно дает четыре десятичных знака, тогда как диаметр стержня выражен только тремя десятичными знаками. Когда диаметр цилиндра — 183 мм , то это данное выражено столь же точно, как и диаметр стержня в $18,3 \text{ мм}$.

Можно считать, что последний десятичный знак еще обладает некоторой надежностью.

Указать длину моста в 1832 м можно только тогда, когда измерение сделано настолько точно, что истинное значение лежит между $1831,5$ и $1832,5 \text{ м}$.

Если мост был измерен только шагами, то длина, самое большее, была бы только 1830 м . Это значило бы, что истинную длину предполагают между 1825 и 1835 м , несмотря на то, что может быть было сделано 1832 однометровых шага и еще осталось $0,1 \text{ м}$, так что собственно результат измерения был бы $1832,1 \text{ м}$. Однако, тут необходимо отнестись критически к точности метода измерения. Даже при известной привычке к метровому шагу нельзя удержать точность большую, чем до 1%. Кроме того, при перемене температуры на 50° , мост удлиняется на $0,6 \text{ мм}$ на 1 м длины, следовательно, в общем свыше одного метра.

Поэтому всегда нужно указывать и температуру, если после запятой пишется еще лишний десятичный знак.

Подобным же образом диаметр стержня указывается в 18 мм, если измерение производится наскоро или при затруднительных обстоятельствах, при помощи кронциркуля; указывается 18,3 мм при измерении штангенциркулем и можно — 18,32 мм при употреблении микрометра, когда стержень обладает правильным круглым сечением. Чтобы быть последовательным, следует также оценивать точность результатов и там, где последними десятичными знаками являются нули; стержень имеет диаметр 18,00 мм при употреблении микрометра; при употреблении штангенциркуля нужно писать уже только 18,0 мм и 18 мм обозначает грубое измерение, при котором истинное значение может лежать в границах между 17,5 и 18,5 мм.

Во всяком случае, указание длины моста в 1800 м может иметь два значения; его можно понимать и как 1,8 км и как 1,800 км; способ написания, принятый в физике, при котором все данные выражаются с одним знаком перед запятой и степенями десяти, в этом смысле является превосходным: мост, измеренный шагами, будет тогда иметь длину $1,8 \cdot 10^3$ м; измеренный точно, с учетом влияния температуры, будет иметь длину $1,800 \cdot 10^3$ или $1,832 \cdot 10^3$ м.

Для ответа на вопрос, какое число десятичных знаков надо употреблять при отсчетах и вычислениях и как далеко надо проводить поправки, необходимо, прежде всего, ясное представление о достижимой или требуемой точности окончательного результата. Часто смазка подшипников (пример: «Испытание машин» § 12) и вообще их состояние имеют значительное влияние на окончательный результат. Часто дело касается определения величин, которые вовсе не могут быть определены с произвольно большой степенью точности, потому что они не существуют в природе с такой точностью. Так бывает с диаметрами круглых кованых резервуаров и даже обточенных цилиндров, которые имеют заметные отступления от круглой формы, а с другой стороны имеют различные значения по длине, а также изменяются в зависимости от способа установки, поэтому совершенно нецелесообразно измерять такой «диаметр» в дробных долях миллиметра. О влиянии температуры на длину уже было упомянуто. Бесцельно добиваться точности измерений за те границы, где подобные случайности становятся заметными. На производстве все такие обстоятельства должны хорошо учитываться и, если готовые части должны быть взаимозаменяемыми, работа должна быть много более точной.

При технических исследованиях результаты часто считаются удовлетворительными, когда точность их (мерой которой является средняя погрешность) составляет $\pm 1\%$, т. е. если результаты отклоняются от истинного значения соответствующей величины в общем не более 1% в ту или другую сторону.

При других исследованиях, особенно если они производились не в лаборатории, а в практической производственной обстановке, следует довольствоваться точностью в $\pm 5\%$, особенно когда приходится считаться с издержками. Когда приемочные испытания производятся согласно правил VDI, то приведенные в них допуски дают необходимые данные относительной требуемой точности. В их основе не лежит мысль, что машина может быть хуже, чем обусловлено на всю величину допусков; но необходимо допускать неизбежные погрешности в измерениях, по которым может казаться, что машина не отвечает нормам, тогда как в действительности она соответствует условиям заказа. Поэтому обусловленные допуски должны принципиально соответствовать возможным погрешностям измерения. Однако, от гарантии допусков по новым правилам измерения, опять нередко уклоняются и не потому, что не надеются на точность измерения, а потому, что считают делом поставщика предусматривать и оговаривать при самом заказе ожидаемые ошибки при измерениях.

Если окончательный результат исследования основан на многочисленных различных замерах, то будет неверно производить все отсчеты с точностью только $\pm 5\%$ или только до второго десятичного знака, если известно, что неточность окончательного результата должна быть не больше, чем 5%. Напротив, чтобы достигнуть такой точности в окончательном результате, необходимо пер-

воначальные отсчеты производить с большей точностью. Не следует полагаться на ожидаемое взаимное уравнивание единичных погрешностей.

Поэтому, необходимо делать отдельные отсчеты настолько точно, насколько это возможно без затраты слишком большого времени. Необходимо оценить степень влияния, которое может оказать на общий результат погрешность каждого отдельного наблюдения. Необходимо быть особенно внимательным при отсчете именно тех величин, которые могут оказать наибольшее влияние на точность общего результата. Всегда необходимо отдельные величины отсчитывать с такой точностью, чтобы в отдельности погрешности по возможности в равной мере влияли на общий результат. Поэтому необходимо стремиться улучшить наименее точный отсчет и подтянуть его к общему уровню остальных.

На примере § 17 об определении числа оборотов в минуту уже был разъяснен тот факт, что точность результатов, которые требуют многих наблюдений, ограничивается как раз точностью наименее точного отсчета. Там обе величины образовали частное, поэтому одинаково сильно влияли на общий результат; то же самое будет при получении произведения. Там, где относительно малая величина *арифметически* складывается с другой, значительно большей, т. е. или прибавляется или вычитается, то при определении меньшей из этих величин можно довольствоваться значительно меньшей точностью. Именно в этом случае достаточно обе величины определять до одного и того же знака после запятой. Особенно следует соблюдать умеренность в *точности поправок*. Если ртутный манометр при 18° С показывает 467 мм (отсчет возможен только в целых миллиметрах благодаря колебаниям в ходе машины) и этот отсчет желательно привести к нормальной температуре 0° С ртутного столба, то можно подсчитать, пользуясь коэффициентом расширения ртути = 0,000180, поправку минус $18 \cdot 0,000180 \cdot 467 = 1,512$ мм; однако, будет неверно написать теперь результат $467 - 1,512 = 465,488$ мм; ведь точность ограничена с точностью отсчета в целых миллиметрах и результат можно записать только как 465, или самое большее 465,5 мм. Последнее делают тогда, если желательно ввести степень точности в пол-единицы, так как скачок через целую декаду кажется большим, и тогда считают 465; 465,5; 466 ...

При определении коэффициента полезного действия *парового котла*, давление и температуру произведенного котлом пара можно измерять менее тщательно, чем количество угля и питательной воды, так как теплосодержание пара сравнительно мало возрастает вместе с обеими величинами. Измерение температуры в целых градусах, хотя бы посредством термометра, разделенного на 5°, и измерение давления в десятых атмосферы и даже в полуатмосферах очень часто бывают достаточными. Между тем расход пара *машиной* заметно зависит как от рабочего давления, так и от температуры перегрева; поэтому при измерении этих величин нужно быть особенно внимательным, если дело идет об определении расхода пара *машиной*.

Необходимо стремиться к особенной точности, когда искомая величина находится как разность двух, мало друг от друга отличающихся, величин, т. е. при *дифференциальном методе*. Потери трения в паровой машине определяются как разница между работой, определенной при помощи индикатора N_i , и эффективной работой N_e , измеренной на тормозе. Если $N_i = 100$ квт и $N_e = 90$ квт, то потери трений будут 10 квт. Если N_i и N_e определены с точностью около $\pm 1\%$, но погрешности случайно получились в противоположных направлениях, то вместо истинных значений мы получим $N_i = 101$ квт и $N_e = 89$ квт. Отсюда потери на трение получатся $101 - 89 = 12$ квт, следовательно на 20% неверно. Из маленьких ошибок получилась одна значительно большая.

§ 21. Обработка результатов; величина погрешностей. Цель какого-нибудь измерения может быть двоякой. В одном случае хотят определить свойства исследуемого объекта, скажем какой-нибудь машины, в одном определенном состоянии. Так будет в случае, когда проверяют расход пара паровой машиной при указанной определенной нагрузке, чтобы убедиться, удовлетворяет ли этот расход гарантированным условиям. Единственное испытание здесь может дать только недостаточно надежный результат: поэтому делают несколько испытаний, ничего не изменяя во внешних условиях, и берут *среднюю величину*. Если при

этом отдельным наиболее надежным значениям путем их повторения придадут повышенный вес, то получается *взвешенное среднее значение*. То, насколько отдельные значения отклоняются от среднего, дает масштаб для суждения о точности результатов. В математике, в учении о способе наименьших квадратов, доказывается, что за меру погрешности должны приниматься не отклонения отдельных результатов, а квадраты этих отклонений, если не хотят впасть во внутренние противоречия. Отсюда, с одной стороны, следует, что наиболее вероятным значением какой-нибудь многократно измеренной величины нужно считать такое, для которого сумма квадратов отклонений является возможно малой (отсюда и название способа) и что средняя величина удовлетворяет этому требованию; с другой стороны, следует, что *средней погрешностью*¹ должно считать квадратичную среднюю из отклонений, т. е. величину $f'_m = \sqrt{\frac{\sum f^2}{m}}$; здесь f должно обозначать отдельные отклонения от *истинной* величины и m —число наблюдений. Но, так как известна не истинная величина, а найденная, как среднее значение, приближенная величина, то, на основании выкладок, которые мы здесь не приводим, при выводе n значений из m наблюдений $f_m = \sqrt{\frac{\sum f^2}{m-n}}$; если вообще, как при выводе простого среднего значения $n = 1$, то получается

$$f_m = \sqrt{\frac{\sum f^2}{m-1}}, \quad (1)$$

где под f нужно понимать отдельные отклонения от средней величины; естественно, что $f_m > f'_m$.

Пусть при определении часового расхода пара машиной при постоянной нагрузке в 200 *квт* последовательно измерены следующие величины: 1831; 1842; 1828, 1810; 1840 *кг*, среднее значение будет 1830,2 *кг*, где отклонения от среднего значения будут: $f = +0,8; +11,8; -2,2; -20,2; +9,8$, а их квадраты = 0,64; 139,14; 4,84; 408,04; 96,04.

Таким образом будет $\sum f^2 = 648,80$ и можно легко убедиться, что эта величина делается больше, если вместо арифметической средней 1830,2 *кг* принять какую-либо большую или меньшую величину в качестве вероятнейшего значения для расхода пара. Средняя погрешность нашего ряда наблюдений будет $f_m = \sqrt{\frac{648,80}{4}} = \pm 12,7$ *кг*. Погрешность охотно дают в процентах или в дробных частях абсолютных значений; тогда получается:

$$f_m = \pm \frac{12,7 \cdot 100}{1832,2} = \pm 0,69\%.$$

Во всяком случае лучше проделать такое же, отнимающее немного времени вычисление, чем просто взять разницу между наивысшим и наименьшим отсчетом как масштаб точности выполненных измерений. То, что одна какая-нибудь величина (в нашем примере 1810) особенно далеко отклоняется от средней, всегда является случайностью.

Отбрасывать такую сильно отклоняющуюся величину *только* вследствие ее большого отклонения будет принципиально неправильно; ее влияние уже достаточно ограничено, потому что единичное значение слабо влияет на среднее значение².

Сильно отклоняющиеся величины должны отбрасываться только по действительным основаниям, например, если впоследствии оказалось, что весы были не в порядке или что не была измерена незамеченная утечка тока.

Определение весов ошибок и величины погрешности предусматривают только *случайные ошибки наблюдения*; ошибки *систематические*, имеющие основание в самой постановке исследования, при этом остаются неустраненными. Такой систематической ошибкой было бы, если бы во всех вышеупомянутых исследованиях, кроме пара, работающего в цилиндрах, забыли измерить также пар, обогревающий паровые рубашки или если бы весы оказались неверно

¹ Вероятная ошибка равна 0,674 средней.

² И к тому же никогда не известно — смещается ли этим среднее значение по направлению к истинному или наоборот. (*Прим. перев.*)

уравновешенными. Систематические ошибки не могут быть устранены многократным повторением опыта, а скорее различным способом его проведения. Личные ошибки наблюдателя могут быть и случайными и систематическими, но в большинстве случаев они принадлежат к последнему роду, когда наблюдатель в силу привычки производит отсчет по ртутному манометру, визируя снизу или наблюдая прохождение указателя, по привычке нажимает секундомер с опозданием, или может быть в начале наблюдения нажимает его слишком рано, а при конце слишком поздно. Как можно полагать, личные ошибки, особенно столь грубые, могут быть обучением и упражнением в значительной степени устранены, но во всяком случае неполне (Л.).

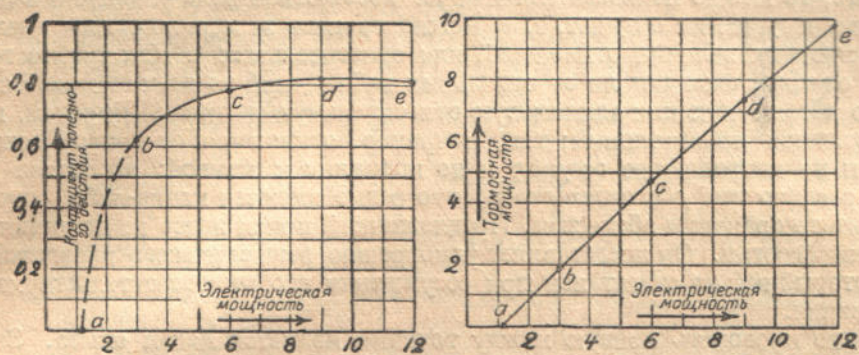


Рис. 53а — 53 б. Тормозные испытания электромоторов.

В другом случае задачей является определение поведения исследуемой машины при изменениях одного из исследуемых условий. При этом, результаты исследования нельзя выразить каким-либо одним числом, но для этого необходима таблица или лучше графическое изображение — диаграмма. На диаграмме по горизонтали откладывают, как абсциссы, те величины, которые искусственно изменялись, а искомые величины откладывают как ординаты и, таким образом, получают, как результат каждого отдельного опыта, некоторую точку (рис. 53а и 53б и таблица 2).

Проводя через эти точки плавную непрерывную кривую, мы получим результат целого ряда исследований, выраженный этой кривой. Часто при этом отдельные точки бывают расположены неравномерно, так что провести через них плавную линию без изломов оказывается невозможным, а получается только извилистая, змееобразная линия. Тогда линия прокладывается на глаз так, чтобы отдельные точки располагались возможно равномерней по обе ее стороны (Л. 50).

Этот прием проведения плавной кривой между точками никак нельзя рассматривать, как средство для улучшения результатов. Такое неравномерное расположение точек происходит от неточностей при измерениях и в общем имеет своей причиной не поведение самой машины. Проводя кривую плавно между точками, мы как бы отсеиваем случайные погрешности и получаем из опытов наивероятнейшее изображение результатов: мы как бы образуем среднее значение.

Подобно тому, как при образовании среднего значения из многочисленных наблюдений, отклонения отдельных значений от среднего давали масштаб точности, с какой производились исследования, так и в настоящем случае: плавно проложенная кривая является вероятнейшим результатом исследований; чем дальше расположены точки по обеим сторонам кривой, тем меньшую точность можно приписать как отдельным наблюдениям, так и всей совокупности исследований.

Таблица 2
Тормозные испытания электромотора

	Электрическая мощность N_{el}	N_b	$\frac{N_b}{N_{el}} = \eta$	$N_{el} - N_b$
	Wk	kW		kW
a	1,1	холостой ход	0	1,1
b	3,0	1,9	0,63	1,1
c	6,0	4,7	0,78	1,3
d	9,0	7,4	0,82	1,6
e	12,0	9,8	0,81	2,2

Если построение кривой аналогично выведению среднего значения, то и среднюю погрешность можно также принять за масштаб точности. Там, где мы, после нанесения на координатную сетку, сомневаемся в том, какая из двух возможных кривых лучше отвечает наблюдениям, — а часто возникают сомнения и относительно типа кривой, — тогда можно для каждой кривой измерить отклонения всех отдельных точек и вывести сумму квадратов всех отклонений; та кривая будет лучше, для которой сумма квадратов окажется наименьшей. В дальнейшем, из этой суммы квадратов можно найти среднюю ошибку наблюдений совершенно так же, как и при многократном повторении отдельного исследования. Что касается величины отклонений, которые приходится измерять на бумаге, то можно пользоваться или их абсолютной величиной или выводить отношение к длине их ординат, т. е. можно принять за мерилу сумму квадратов или абсолютных величин отклонений или относительных ¹. Как тут поступить, зависит от того, ожидают ли от отдельных наблюдений во всех отношениях одинаковую абсолютную или одинаковую относительную точность. Впрочем, многое здесь остается произвольным; так, например, отклонения от кривой можно измерять и по направлению ординат и по нормальям к кривой; последнее может быть оправдано тем обстоятельством, что редко имеются какие-либо основания предпочитать ординаты абсциссам. Предложенный прием вовсе не является математически строгим. Он представляет усмотрению вычисляющего известный простор, который весьма желателен при обсуждении особых обстоятельств каждого исследования.

Удачно проводить кривую между точками является делом опыта. Заметно влияет на качество результатов исследований, если, при дорогом стоящих технических измерениях, приходится довольствоваться незначительным числом точек. Ненадежность в этом отношении часто можно уменьшить *переменю изображаемых величин*.

При построении кривой коэффициента полезного действия электродвигателя (рис. 53а) мы как раз чувствуем неуверенность в отношении хода нижней, обозначенной пунктиром, ветви кривой. Но если изобразить на рис. 53б определенную на тормозе мощность, как функцию подведенной электрической мощности, то теперь неуверенность отпадает, так как эта кривая идет почти прямолинейно. Теперь уже можно по рис. 53б вычислить еще несколько точек для нижней ветви кривой коэффициента полезного действия, которое путем опыта установить было бы трудно, и таким образом сделать нижнюю ветвь кривой надежнее.

Возвращаясь к примеру с электродвигателем, можно сказать, что цель достигается еще лучше, если образовать разности $N_{el} - N_b$, которые выражают потери в моторе; это сделано в последнем столбце таблицы. Приблизительное постоянство потерь позволяет здесь опять вставить между a и b еще одну лишнюю вспомогательную точку.

В общем, при ряде исследований вроде вышеописанных, всегда произвольно изменяется только *одна* величина, в настоящем случае тормозная мощность. Прочие обстоятельства, как возбуждение, напряжение, должны поддерживаться постоянными. Если хотя бы при втором ряде испытаний изучить влияние различной степени возбуждения, то на этот раз было бы нужно поддерживать постоянной тормозную мощность и результат изобразить другой диаграммой.

Там, где будут *произвольно изменяться две величины*, одновременно уже нельзя изобразить результаты испытаний одной кривой, и это приходится делать в форме одного или нескольких пучков кривых (говорят также о семействе кривых. (Прим. перев.).

¹ Такие затруднения обычно наблюдаются у той ветви кривой, которая или круто падает или круто поднимается. Небольшому изменению абсциссы отвечает весьма большое изменение ординаты. Такими кривыми являются кривые гиперболического и параболического типа, весьма обычного при изображении результатов исследований (кривые расширения пара).

В этом случае хорошим средством является применение логарифмической координатной сетки. На такой сетке, как известно, гипербола изображается наклонной прямой и семейство однородных гипербол превращается в пучок параллельных прямых, что часто весьма облегчает обработку результатов, особенно когда приходится интерполировать и экстраполировать. Соответственным выбором сетки можно выпрямить и параболу. Такие логарифмические сетки бывают готовыми, подобно миллиметровой бумаге. (Прим. перев.).

Пример такого рода изображения будет дан в § 140 «Исследования машин», где рассматриваются особенности центробежного вентилятора. Три величины, которые линейно зависят друг от друга, особенно когда они дополняют друг друга до единицы, изображаются координатным треугольником Гиббса: для каждой точки внутри треугольника сумма ее расстояний от трех сторон всегда одинакова, именно равна высоте равностороннего треугольника (Л. 445).

§ 22. Измерение размеров машин. Длина в технической системе мер измеряется в метрах; метр есть одно из трех основных единиц этой системы. При надобности, в технике применяются также в качестве единиц миллиметр, сантиметр и километр, в некоторых особых случаях считают также в английских дюймах, 1 дюйм английский = 25,4 мм.

Точное значение английского дюйма, установленного Национальной физической лабораторией в Англии в 1922—26 году, следующее:

$$1 \text{ дюйм} = 25,399956 \text{ мм.}$$

Конгресс в США в 1866 году установил следующее значение для американского дюйма:

$$1 \text{ дюйм} = 25,400051 \text{ мм}$$

на основании соотношения $\frac{1 \text{ ярд}}{1 \text{ метр}} = \frac{36}{39,37}$.

У нас, в Советском Союзе принято среднее между американским и английским значением дюйма, т. е. 1 дюйм = 25,4 мм.

Конечно, незначительная разница между английским и американским дюймом может сказаться только при очень точных измерениях.

В отношении приборов для измерения длины отметим, что при простейших измерениях, именно при обмерах длин, а также при взвешивании, в большинстве случаев грешат тем, что пользуются покупными, фабричного производства, масштабами и поврежденными гириями, без того чтобы поверкой убедиться в их правильности. Складные масштабы часто бывают неточными в сочленениях. Правильное измерение размеров машины имеет столь же важное значение, как и определение правильного масштаба пружины индикатора или градуировка термометра.

Поэтому следует употреблять надежные масштабы, всего лучше стальные, при том не складные. Эти масштабы должны иметь деления только в целых миллиметрах, десятые можно оценивать на глаз. Более мелкие деления, например, на полумиллиметре, затрудняют отсчет, не делая его более точным.

В производственной технике не столь важно точное числовое определение какого-либо размера, как то, чтобы прилежащие друг к другу части могли получить возможно точную взаимную пригонку и чтобы раз произведенный в действительности размер затем мог быть вновь воспроизводимый из года в год. Для этого служит система предельных и нормальных калибров и прочие методы современной заводской техники.

Иначе представляются обстоятельства в тех случаях, которые относятся к предмету настоящей книги: при исследовании машин. Здесь выдвигается редкий в машиностроении случай, когда желательно знать точное числовое значение действительных линейных размеров при действительно наблюдаемой температуре. Так при индицировании машины необходимо дать числовое значение диаметра цилиндра или при пользовании тормозным нажимом длину плеча рычага.

Это различие существенно, если принять во внимание влияние температуры. В производственной машиностроительной технике, в большинстве случаев, бывает достаточно просто позаботиться об одинаковой температуре измеряемых предметов и масштаба, при условии, что калибр и изготовленная деталь сделаны из одного и того же материала, например, стали. При измерении же деталей из цветных металлов стальными калибрами необходимо все точные измерения производить или при нормальной температуре 20° или вводить поправки на различие коэффициента линейного расширения.

В нашем же случае влияние температуры должно быть хорошо учтено. При индицировании паровой машины необходимо ввести в расчет диаметр

цилиндра, примерно, при 200° . Для этого нельзя применять масштаб, имеющий приблизительно одинаковую температуру с измеряемым предметом. Если обе части, измеряющая и измеряемая, сделаны из одинакового материала и обе имеют *одинаковую* температуру, то измерение дает один и тот же числовой результат, при какой бы температуре оно ни производилось.

При измерении масштабом, имеющим температуру теплового цилиндра, всегда получится размер диаметра холодного цилиндра. Если желательно измерить диаметр горячего цилиндра, то необходимо позаботиться, чтобы масштаб имел *свою* нормальную температуру, а такой является 20° .

Малые изменения длины и положение измеряются зеркальным методом или ему аналогичными, которые известны из практики испытания материалов. Весьма малые длины измеряются при помощи микроскопа или миниметра Гирта. Были предложены также винтовые микрометры без скобы, которые позволяют, будучи укреплены на какой-либо части, точно следить за ее движением, как например, при наблюдении за открыванием кулачным валом вентилей машины. Изменение расстояния между конденсаторными пластинками, в соединении с методом полурезонанса, также может служить для измерения очень малых изменений длины; при этом, способе характерным является высокое собственное число колебаний и практически безинертная передача и увеличение, поэтому такой способ хорош для динамических целей, для статических же в большинстве случаев слишком сложен.

§ 23. Измерение площадей. Величина какой-нибудь площади, которая дается в квадратных сантиметрах, квадратных метрах, а также в квадратных футах и дюймах, может быть найдена из

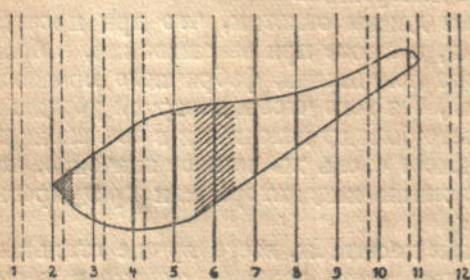


Рис. 54. Обмер площадей (планиметр Вагенера).

линейных размеров или посредством простого перемножения или при помощи *правила Симпсона* или из других математических формул. Видоизменением правила *Симпсона* является способ *Вагенера*: заготавливают раз навсегда начерченную на кальке или на целлулоиде сетку, как на рис. 54, состоящую из некоторого числа равностоящих параллельных линий; пунктирные линии отмечают четверти расстояния между соседними параллелями. Эта сетка накладывается на измеряемую фигуру таким образом, чтобы она уложилась как раз между какими-нибудь двумя параллелями, касаясь их своими концами. Теперь нужно сложить отрезки толстых линий, тогда как первый и последний отрезки, лежащие на пунктирных линиях, следует взять только в половинном размере. Затем полученную сумму умножить на известное расстояние между параллелями и полученный результат будет представлять величину площади. Обоснование весьма просто: толстый отрезок из параллели b представляет собой среднюю ширину заштрихованной трапеции, высота которой равна расстоянию между параллелями. Последовательным сложением толстых отрезков получается сумма таких трапеций, вернее их средней ширины. По обоим концам диаграммы остаются площадки половинной высоты, поэтому нужно отрезки, лежащие на пунктирных линиях, брать только в половинном размере. Суммирование отрезков можно производить циркулем или последовательно нанося их на полоску бумаги.

Величина какой-нибудь площади механически определяется посредством *планиметра* (Л. 52). Его действие основывается на том, что колесико, движущееся по поверхности, будет поворачиваться пропорционально этому движению, если оно направлено перпендикулярно к его оси, но оно совсем не будет поворачиваться при движении в направлении его оси. При косом перемещении будет регистрироваться только перпендикулярная к оси слагающая этого движения. Кроме того, если вдоль линейки укрепить в одной плоскости несколько одинаковых колесиков, то они всегда будут совершать одинаковое число оборотов потому, что любое движение линейки можно представить, согласно рис. 56,

как составленное из продольного продвижения с одинаковым вращением всех колесиков и из поворота без их вращения.

Линейный планиметр (рис. 57) имеет колесико или ролик с осью, параллельной линии FG , соединяющей подвижной штифт F , которым обводят измеряемую фигуру, с точкой G , движущейся по прямой вдоль линейки. Если эта соединительная линия составляет с осью x угол α , то ролик поворачивается вперед на дугу $b = dx \cdot \sin \alpha$; обведенная штифтом площадь будет $y dx = l \sin \alpha \times dx = lb$; на этот отрезок b поворачивается ролик, когда будет обведена площадь $FF'BA$; последовательный проход отрезков $F'B$ и AF не дает в результате приращений оборотов ролика. Таким образом поворачивание ролика и площадь всегда друг другу пропорциональны, очевидно и тогда, когда площадь $FF'B'A'$ не достигает нулевой линии, так как при обратном движении $B'A'$ нижняя площадь автоматически вычитается, а также и тогда, когда площадь $FF'B''A'$ переходит ниже нулевой линии. Таким образом измерительное колесо можно прямо отградуировать в квадратных сантиметрах. Конечно, предполагается, что всегда возвращаются *точно* к исходной точке, которую для этого при начале обвода отмечают уколом, и что ось ролика строго параллельна FG .

Линейный планиметр служит для обмеров ленточных диаграмм и для этой цели предпочтительнее полярного (более употребительного); если вести G по нулевой линии вдоль диаграммы, то не надобно возвращаться по основной линии; конечные вертикали можно также обводить только до любого, в обоих случаях одинакового по высоте деления, — приемы, которые при массовом планиметрировании могут иметь существенное значение. Другой, приспособленной для обработки ленточных диаграмм формой, является **планиметр на роликах**. Шарнирное сочленение ведется прямолинейной кареткой на цилиндрических роликах. Для очень длинных ленточных диаграмм электрических самописцев разработаны специальные конструкции, при которых не планиметр движется

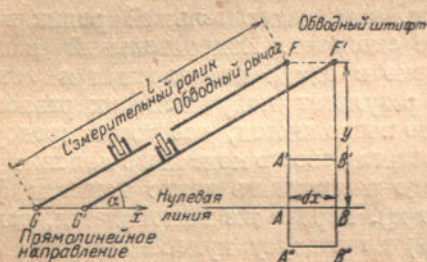


Рис. 57. Линейный планиметр.



Рис. 55.

Рис. 56.

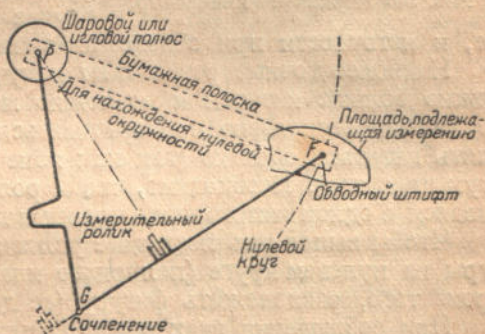


Рис. 58. Полярный планиметр.

по бумаге, но наоборот, лента проводится под планиметром. Впрочем при ленточных диаграммах, при некотором упражнении, можно получить, с удовлетворительным приближением, среднюю высоту на глаз, прикладывая к диаграмме натянутую нить.

Для обмеров коротких диаграммных полос или индикаторных диаграмм служит полярный планиметр, у которого точка сочленения G ведется по дуге круга полюсным стержнем вокруг полюса P (рис. 58). Полюс осуществляется или в виде иглового полюса, т. е. груза с острием, которое вкалывается в бумагу, или в виде шарового полюса, при котором находящийся на конце полюсного стержня шарик точно входит в свое шаровое гнездо в неподвижно лежащем грузе; шаровой полюс предпочтительнее, если желательно его передвигать для возможности точной установки на нуль измерительного ролика.

У полярного планиметра ролик вовсе не вращается в том случае, когда обводящий штифт передвигается по нулевому кругу, который определяется тем, что полюс лежит в плоскости измерительного ролика и который может быть найден таким путем, что обводный штифт F заставляют при помощи полоски бумаги описывать круг, подбирая радиус так, чтобы ролик при этом вовсе не вращался. Согласно рис. 56 действительный ролик должен двигаться совершенно так же, как и воображаемый, лежащий в его плоскости и находящийся в точке P , т. е. совсем не вращаться. Отклонения обводящего штифта от нулевого круга заставляют измерительный ролик вращаться в ту или другую сторону. Не следует думать, что и в этом случае обведенная площадь $j = lb$, как и в предположении, что полюс расположен вне обводимой фигуры; здесь к отсчету нужно прибавить площадь нулевого круга πR_0^2 .

В нормальном случае, т. е. когда полюс лежит вне фигуры, соответствующий определенной площади поворот измерительного ролика зависит только от длины l обводящего рычага, считая от сочленения до обводного штифта. Отношение b/l не зависит от местоположения измерительного ролика. Последний может быть расположен как внутри, так и вне отрезка GF , его ось может лежать в направлении GF , но может быть также расположена и ей параллельно (но зато точно!). Безразлична также длина полюсного (ведущего) стержня; если сделать ее бесконечной, то мы получим линейный планиметр, как предельный случай полярного.

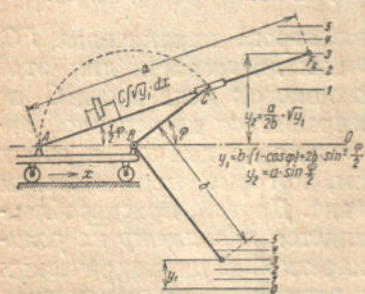


Рис. 59. Корневой планиметр.

ше, и неточности при обводе

Наиболее точные результаты получаются, если измерительный ролик возможно больше катится и возможно меньше скользит. Измерительный ролик не должен бесполезно проворачиваться далеко в одном направлении и затем опять катиться обратно (так как конечный результат получится как разность двух прокатов). Необходимо, чтобы ролик, по возможности, все время проворачивался в одном направлении вперед и так достигал своего конечного положения.

Чтобы выполнить последнее условие, надо располагать центр тяжести фигуры на нулевом круге (полярного планиметра), первое же выполняется, если, кроме того, расположить фигуру (ее длиной) по радиусу нулевого круга.

При соблюдении этих правил, площади, у которых отношение периметра к диаметру благоприятно, определяются простым полярным планиметром с точностью почти до $1/5\%$, в других же случаях легко получается погрешность в 1% . Более точные значения получаются при многократном обводе измеряемой фигуры; лучше всего производить отсчет после каждого обвода, однако при этом не останавливаясь для производства отсчета. Таким образом, в постоянстве разностей последовательных отсчетов можно иметь и контроль точности вращения к исходному пункту.

При всех типах весьма существенно, чтобы ось измерительного ролика, если глядеть сверху, была *точно* параллельна линии, соединяющей точку сочленения и обводной штифт. На этом основании построен *компенсационный планиметр*: у него обводящий рычаг можно переключать так, что полюсный стержень приходит один раз справа, другой раз слева от него. Разница результатов измерений при обоих положениях означает косую установку измерительного ролика. Среднее значение обоих отсчетов свободно от ошибки, что может быть полезно в данный момент, так как, конечно, это должно побудить произвести выверку прибора.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
73	Рис. 60—61, подпись	Гармонический анализатор Мадера	Рис. 60. Радиальный планиметр фирмы Отт. Рис. 61. Гармонический анализатор Мадера
75	8 св.	γ кг/м ³	γ кг/м ²
101	9 св.	3 ч. 25 м. 21 с.	3 ^ч 25 ^м 21 ^с
101	10 св.	5 ч. 47 м. 32 с.	5 ^ч 47 ^м 32 ^с

Чаще всего определение площади диаграммы не является самоцелью, так как из площади желательно найти *среднюю высоту* диаграммы. Для этой цели применяются приборы с окружностью измерительного ролика, в точности равной 60 мм. Если установить длину обводящего рычага равной длине диаграммы, то средняя высота диаграммы будет равна отсчету, деленному на два. Этот прием кажется очень удобным для вычисления большого количества диаграмм равной длины. (Такой случай, например, как раз имеет место при планиметрировании индикаторных диаграмм. — Прим. перев.). Однако, диаграммы редко имеют точную равную длину, чтобы постоянная установка обводящего рычага не вызвала заметных погрешностей.

С помощью *корневого планиметра* (рис. 59) можно вычислять записанные дифференциальными манометрами диаграммы количеств, если диаграмма уже сразу не была изображена в корневой зависимости, как при измерителях количеств (§ 32). Если диаграмму обводит штифтом F_1 , то измерительный ролик интегрирует корневые значения, как это следует из формулы, написанной на чертеже.

Наконец остается еще упомянуть *радиальный планиметр*, которым определяется средняя высота, измеряемая от центра диаграммы или от какой-либо определенной основной окружности — при круглых диаграммах. Соответственным профилированием прореза можно достигнуть того, что будет измеряться или обведенная площадь или какая-либо функция от нее. На рис. 60 изображен прибор, который интегрирует значение $\sqrt{r \cdot d\varphi}$.

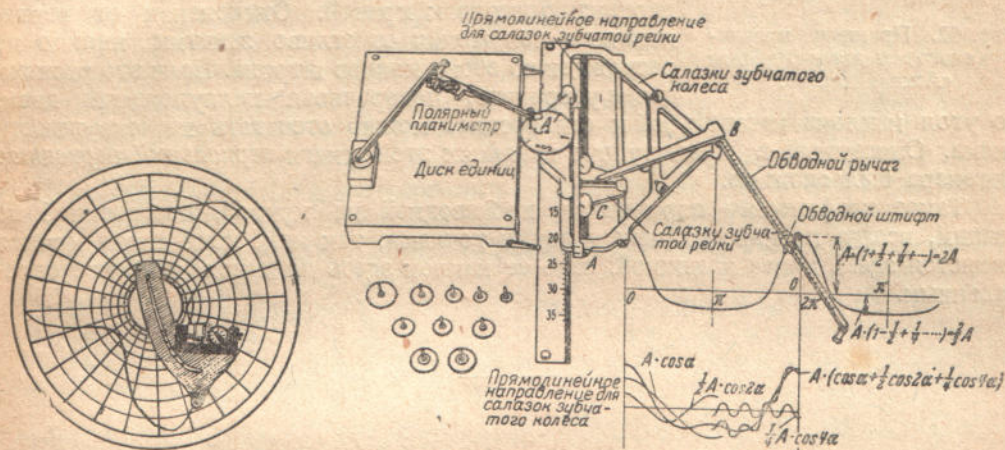


Рис. 60—61. Гармонический анализатор Мадера.

§ 24. Другие математические вспомогательные средства. Кратко упомянем о применении планиметра при исследовании кривых на их гармонические колебательные компоненты в связи с *гармоническим анализатором* Мадера (рис. 61, Л. 56). В нем длина 2π исследуемой кривой устанавливается путем изменения длины обводящего рычага. При обходе кривой обводящим штифтом, точка B салазок зубчатого колеса передвигается по своим градуированным направляющим, и точка C передвигает меньшие салазки зубчатой рейки по салазкам зубчатого колеса. Вследствие этого, анализирующее колесо A получает своеобразные вращательные движения. В общем оно поворачивается на 360° , но это вращение различно распределяется по высоте, и планиметр, обводящий штифт которого помещается в ямку S (= синус) или в ямку C (= косинус), дает отсчеты, которые зависят от формы кривой. Вместо колеса 1 можно поставить колеса $2, 3, \dots$ с диаметром в половину, треть \dots , которые тогда делают за время подъема — $2, 3 \dots$ оборота.

Результатом анализа должно быть выражение в форме

$$f(x) = A_1 \cdot \cos x + B_1 \cdot \sin x + A_2 \cdot \cos 2x + B_2 \cdot \sin 2x + \dots$$

Конечные отсчеты планиметра дают коэффициенты A или B в зависимости от того, поставлен ли обводящий штифт в гнездо C или S ; индекс определяется поставленным колесом.

Этот прибор оправдал себя при технических исследованиях. Примером может служить способ, описанный в Л. 58. Исследование колебаний давления в воздушном колпаке насоса указано на рис. 61. Члены B равны нулю. Для членов A получается геометрический ряд.

Уже первые три члена

$$f(x) = A \cdot \cos x + \frac{1}{2}A \cdot \cos 2x + \frac{1}{4}A \cdot \cos 4x + \dots$$

позволяют выявить основную форму кривой, которая была сглажена высшими членами (справа снизу на рис. 61).

В упомянутом месте говорилось, как поступать, если начало диаграммы не видно так отчетливо, как на рис. 61. В подобных случаях имеется некоторый простой закон для высших составляющих колебаний, но который затемняется при передвижении начала.

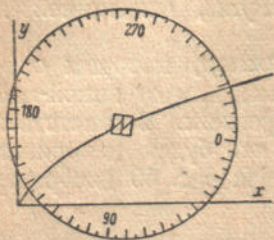


Рис. 62. Принцип призматического дериватора, фирмы «Асканияверке».

Для дифференцирования кривых (Л.) служит призматический дериватор (фиг. 62). В середине прозрачного целлулоидного диска укреплена прямоугольно-равнобедренная призма, положенная на свою гипотенузу; под такой призмой кривая проходит плавно лишь тогда, когда ребро призмы стоит перпендикулярно к кривой. Отклонения от вертикального положения отчетливо заметны именно по расхождению обоих концов штриха. Если это расхождение устранить, поворачивая целлулоидный диск,

то угол наклона касательной к оси абсцисс можно отсчитать на окружности диска. Описанный в предыдущих изданиях этой книги зеркальный дериватор Вагенера был сложнее.

Такое графическое определение производной на кривой, построенной по точкам, всегда производят между двумя точками, так как, хотя самая кривая является здесь менее надежной, зато ее наклон здесь является наиболее определенным.

IV. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ

§ 25. Единицы. Давление, производимое на жидкость в каком-либо месте, передается ею во все направления и через всю жидкость. Вследствие этого частицы жидкости производят давление друг на друга и на стенки сосуда таким образом, что на каждую единицу площади приходится одна и та же сила, независимо от формы и направления площади. В гравитационном поле земли, давление сверху вниз увеличивается соответственно удельному весу γ кг/м³ среды, причем на каждый метр высоты увеличивается на γ кг/м³ = $\frac{\gamma}{10\,000}$ кг/см². Давление, приходящееся на единицу площади, расположенной на определенном уровне жидкости, называется *удельным давлением* или *давлением жидкости* на этой высоте. Изложенное применимо также и к газам, для которых уменьшение давления с увеличением высоты = γ кг/м³ на каждый метр высоты. В твердых телах давление в разных точках может быть различно и даже в одной и той же точке оно может быть различно по разным направлениям. Напряжение твердых тел определяется при испытании материалов. Нас интересует лишь напряжение жидкостей и газов. Эти напряжения всегда являются давлением и даже вакуум также является лишь уменьшенным против атмосферного давлением. У твердых же тел могут встречаться также натяжения, которым придают отрицательный знак. Следовательно, давление является силой, действующей на единицу площади. *Единицей* давления называют давление, производимое силой, равной одному килограмму на площадь, равную одному квадратному метру: 1 кг/м². На практике более употребительной единицей давления является один килограмм на квадратный сантиметр, так как при таком исчислении результаты получаются в менее громоздких числах. Давление в 1 кг/см² = $\frac{1 \text{ кг}}{10\,000 \text{ м}^2}$ = 10 000 кг/м². Эту

единицу давления называют также и *метрической атмосферой*, равной 1 кг/см² = 1 ат. Это название базируется на том, что измеряемое барометром давление окружающей нас воздушной атмосферы равно, приблизительно, 1 кг/см²; как известно, оно меняется в зависимости от места наблюдения, а также от состояния погоды. Кроме указанных единиц, выведенных из технической системы мер, употребляются еще эмпирические единицы, каковыми являются миллиметр ртутного (Hg) или водяного столба (Н₂О). Точно так же считают в метрах или миллиметрах столба и другие жидкости или газы с указанием их удельного веса γ кг/м³. *Столб жидкости или газа* под влиянием собственного веса производит на площадь своего основания давление, зависящее от высоты столба, поэтому измеряют давление этой высотой. Пусть площадь поперечного сечения столба равна 1 м², а высота столба равна h , таким образом, объем столба равен h м³. Если обозначить удельный вес среды, образующей столб через γ кг/м³, то вес столба будет равен $h \cdot \gamma$ кг. Этот вес производит давление, равное $h \cdot \gamma$ кг/м² на 1 м² площади основания столба. Отсюда

$$h_{\text{ м ст. жид}} = h \cdot \gamma \text{ кг/м}^2; 1_{\text{ м ст. жид}} = \gamma \text{ кг/м}^2. \quad (1)$$

Этим уравнением дается одновременно обоснование падения давления с высотой, о чем было сказано выше.

Для холодной воды $\gamma = 1000 \text{ кг/м}^3$, следовательно,
 $1 \text{ м вод. столба} = 1000 \text{ кг/м}^2$, [или $1 \text{ мм вод. столба (холод.)} = 1 \text{ кг/м}^2$. (2)

Если допустим, что площадь в 1 м^2 на высоте 1 мм покрыта холодной водой, то на этой площади будет находиться 1 л или 1 кг . Следовательно, давление водяного столба (холодного) высотой 10 м равняется

$$10\,000 \text{ кг/м}^2 = 1 \text{ кг/см}^2 = 1 \text{ ат.} \quad (3)$$

Удельный вес ртути при 0°С $\gamma = 13\,595 \text{ кг/м}^3$ (13,595 в физическом обозначении); таким образом, давление 1 м ртутного столба $= 1359 \text{ кг/м}^2 = 1,36 \text{ кг/см}^2$, или

$$1 \text{ кг/см}^2 = 735,5 \text{ мм Hg} = 1 \text{ ат.} \quad (4)$$

Давление ртутного столба высотой 760 мм при $0^\circ \text{С} = 1,0333 \text{ кг/см}^2 = 1,0333 \text{ ат} = 10\,333 \text{ кг/м}^2$ принято за *нормальное давление барометра* на уровне моря и также обозначается, как физическая атмосфера. Последнего обозначения следует во всяком случае избегать в технической литературе, так как наличие двух одноименных единиц измерения, отличающихся друг от друга, максимум на 3% , является предпосылкой для погрешностей больших, чем это допускается, и вместе с тем не бросающихся в глаза. Нельзя совершенно обойтись без использования 760 мм Hg в качестве нормального показания барометра, так как к такому нормальному давлению относят объемы газов и точки кипения, точно так же термометрическая шкала основывается на принятии этого показания барометра как нормального. Поэтому, при желании ввести в употребление единственную техническую атмосферу, пришлось бы изменить численные значения механического эквивалента тепла, удельных весов, коэффициентов расширения, короче говоря, изменить значения многих табличных данных. Этого смещения можно избежать, говоря, что объем газов приведен к 760 мм Hg вместо приведенного к давлению одной атмосферы. Кроме того, необходимо пользоваться лишь этим значением нормального давления, но не кратными его величинами. В случае надобности, это давление будет нами в дальнейшем обозначено 1 атм , в отличие от 1 ат .

При указании на ртутный столб всегда имеют его в виду при 0°С ; при указании на водяной столб, таковой большей частью понимается при $+4^\circ \text{С}$ — температуре наибольшей плотности воды. Ничто не препятствует выражению в этих единицах давления среды при любой температуре. Измерение может быть произведено также и посредством ртутного или водяного столба при любой температуре, но тогда необходимо привести измеряющий столб к нормальной температуре. Это приведение незначительно для холодной воды до 20° ; для ртути оно значительнее.

В технической системе метр-тонна-секунда (*MTS*) единицей давления является пьеца (p_2); это — давление в 1 стн на м^2 (стн/м^2).

Пьеца равна $0,0102$ метрической атмосферы или атмосфера равна ~ 981 пьец.

Давление в 100 пьец называется гектопьезой. $1 \text{ гпз} = 1,02 \text{ кг/см}^2$. (Прим. перев.).

В английской системе мер единицей меры давления является один фунт на квадратный дюйм, таким образом $1 \text{ кг/см}^2 = 14,22 \text{ фунт/кв. дюйм}$. Ртутные столбы отсчитываются в дюймах и принимаются — $29,922$ дюйма ртутного столба $= 760 \text{ мм}$ — за нормальное давление барометра. Употребительная в английской системе мер температурная шкала Фаренгейта также имеет свою высшую постоянную точку при давлении в 760 мм Hg .

§ 26. Абсолютное давление, избыточное давление, вакуум. Приборы для измерения давления называются манометрами; приборы, указывающие давления ниже атмосферных, т. е. вакуум (разрежение), называется вакуумметрами. Однако, следует отметить, что манометры по сути дела указывают не давление, а только разности давлений. Обыкновенные манометры, устройство которых будет описано в дальнейшем, показывают разность между давлением в испытуемом пространстве и одновременным давлением окружающей атмосферы. В рабочем пространстве какого-нибудь аппарата с сжатым воздухом они указывают избыток давления в этом пространстве. Показания манометра обозначают как *избыточное давление*, а если это относится к вакууму, то как *разрежение*. Абсолютное давление в испытуемом пространстве является либо суммой — высота барометра плюс избыточное давление — либо разностью — высота барометра

минус разрежение. Поэтому при всяком измерении давления необходимо также следить за высотой барометра. Следовательно, барометр является измерителем давления, указывающим абсолютные давления. Итак, если манометр на паровом котле указывает $4,25 \text{ ат}$, и если в высоко лежащей местности при плохой погоде барометр указывает 705 мм Hg , то это показание барометра равняется

$$705 : 735,5 = 0,96 \text{ ат}.$$

Абсолютное же давление в паровом пространстве котла равняется

$$4,25 + 0,96 = 5,21 \text{ ат}.$$

По данным таблиц насыщенного водяного пара вода в котле закипела бы при $152,6^\circ \text{ C}$.

В последнем случае необходимым условием является химическая чистота воды; такое давление господствует лишь на поверхности воды и увеличивается в нижних частях котла. Возможно наступление запаздывания кипения, но последнее явление в данном случае интереса не представляет. Там, где следует указать отрицательное давление, в особенности как это бывает при конденсационных паровых машинах и при вакуумных варочных аппаратах, это показание дается различным образом.

Прежде всего, можно оставить показание вакуума таким, каким его считали, или же возможно привести это показание к нормальному показанию барометра в 760 мм Hg путем прибавки к произведенному отсчету вакуума разности $760 - b$, т. е. отклонения барометра b от нормального. Этим приведением исключается влияние колебаний барометра. Показание такого приведенного вакуума равноценно показанию абсолютного давления, ибо сумма приведенного вакуума и абсолютного давления всегда равна 760 мм Hg . Кроме того, вакуум можно указывать или в миллиметрах ртутного столба или в процентах, каковые можно исчислять различно, принимая за 100% либо существующее показание барометра либо нормальное его показание в 760 мм Hg .

Между тем из возможных способов вычисления для определенных показаний вакуумметров и барометров правильны лишь два способа и из них тот или другой в зависимости от обстоятельств.

В кипятильнике или цилиндре низкого давления температура пара при переходе в конденсатор зависит от абсолютного давления, т. е. от приведенного вакуума. При исследовании температурных условий вообще приводят показания в мм Hg , а также в кг/см^2 . Давать показания в процентах бесцельно, ибо их надлежало бы давать в процентах от 760 мм . Поэтому наиболее целесообразно давать показание абсолютного давления вместо вакуума. Определенный разрежающий насос, в зависимости от величины его вредного пространства, может производить определенное разрежение, так что наиболее низкое достижимое абсолютное давление является определенной дробной частью давления, против которого насос работает, т. е. частью существующего барометрического давления. Воздушный насос, установленный на вершине горы, дает возможность большего снижения абсолютного давления, чем при его работе в долине. Несмотря на это, показания вакуумметра на вершине горы будут ниже, чем в долине, так как насос, производящий в долине вакуум 720 мм Hg , не в состоянии будет достигнуть того же значения вакуума, работая на вершине горы, где полное давление барометра, пожалуй, не превышает 700 мм Hg . Вследствие этого показание приведенного или неприведенного вакуума или абсолютного давления не является показательным для насоса, если это показание исчислено в мм Hg , или в кг/см^2 . Целесообразно лишь давать показание вакуума в процентах абсолютного вакуума или в процентах существующего барометрического давления.

Пример. Допустим, что произведен отсчет вакуума в 652 мм Hg при барометрическом давлении в 711 мм Hg . В этом случае абсолютное давление равно $711 - 652 = 59 \text{ мм Hg}$, приведенное разрежение равно $760 - 59 = 701 \text{ мм Hg}$ или $\frac{701}{760} \cdot 100 = 92,3\%$, если речь идет о температурах пара. Если же речь идет об испытании воздушного насоса, то необходимо будет указать вакуум^{*} равным $\frac{652}{711} \cdot 100 = 91,7\%$. Как видно, оба точных способа исчисления не особенно

сильно разнятся друг от друга, хотя при плохом вакууме разница эта будет несколько больше. Совершенно неточные результаты получаются при пользовании вакуумметрами с делениями на проценты, шкала которых в пределах от 0 до 760 мм вакуума разделена на 100 частей с соответствующими цифровыми обозначениями. Такой прибор показал бы $\frac{652}{760} \cdot 100 = 85,8\%$ вакуума, откуда

абсолютное давление было бы вычислено равным $760 \cdot \frac{100-85,8}{100} = 108 \text{ мм Hg}$

и температура пара равной 54° , в то время как действительному абсолютному давлению, равному 59 мм Hg, соответствует температура кипения в 42° .

Градуировка шкалы вакуумметра в проценты недопустима, так как она будет правильна лишь при нормальном барометрическом давлении. Цифровое обозначение шкалы от 0 до 760 мм Hg делениями от 0 до 1 дает повод к тем же погрешностям. Шкалы вакуумметров должны иметь деления или в мм ртутного столба или в кг/см^2 , причем деление шкалы должно быть продолжено и дальше 760 мм или 1 кг/см^2 , так как, например, в глубине рудника вакуум может оказаться выше. Не следует ничего изменять для того, чтобы нулевая точка шкалы вакуумметра всецело соответствовала наличному барометрическому давлению, т. е. была бы переменной. Вакуум может быть исчислен в процентах, но измерять его по процентной шкале нельзя.

В холодильных установках встречаются манометры со шкалой с делениями на градусы, соответственно температурам парообразования рабочей среды при различных давлениях.

Из вышесказанного явствует, что применение подобной шкалы теоретически недопустимо; происходящими от этого погрешностями можно пренебречь лишь при измерениях больших давлений, когда колебания атмосферного давления являются незначительными в сравнении с полным давлением.

§ 27. Динамическое и общее давление. Понятие об общем давлении введено правилами для испытания вентиляторов (Л.). Это понятие имеет с точки зрения

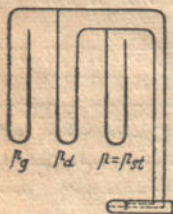


Рис. 63. Показание статической трубки.

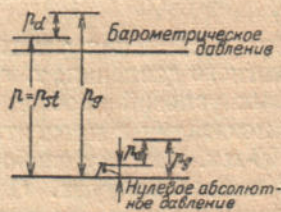


Рис. 64. Расчет избыточного давления и вакуума.

Рис. 63 и 64. Зависимости между статическим, динамическим и полным давлением.

измерительной техники существенное значение. То, что обыкновенно просто понимают под давлением жидкости или газа, что также входит в уравнение состояния и обуславливает собою значение объема, что проявляется так же, как давление на стенку канала, при потоке, параллельном этой стенке, и есть статическое давление ($p_{ст}$ или короче p). Это давление можно измерять только прибором, который перемещается прямолинейно, и с одинаковой скоростью с движущейся средой. О трудностях производства измерений, возникающих при измерениях

у выпускных отверстий из-за вихревых движений, будет сказано в § 34.

Динамическое давление (p_d) относить нельзя рассматривать как давление, существующее в потоке, а лишь как равнозначащая ему скорость v . Это давление проявляется как напорное давление или скоростная высота у центра препятствия, которое противопоставлено потоку в виде вертикальной плоскости или как напорное давление в напорной трубке (рис. 63). Это давление необходимо, чтобы вывести жидкость из состояния покоя и сообщить ей соответствующую скорость.

Динамическое давление у газов при малых скоростях равно $p_d = \gamma \frac{v^2}{2g}$, при больших скоростях (выше, примерно, 60 м/сек) необходимо считаться с изменением объема.

Полное давление (p_n) определяется как совокупность $p + p_d$; оно измеряет энергию, заключающуюся в единице объема движущейся среды. При изменениях поперечных сечений и на закруглениях энергия из вида p переходит в p_d и наоборот, как это бывает при трубах Вентури (§ 79) и трубках Прандтля (§ 46). Од-

нако, сумма p_n обоих давлений остается постоянной; это единственная из трех величин (остающаяся неизменной) безусловно поддается измерению. Полное давление определяет также рабочую мощность насосов и вентиляторов. Сказанное относится к нетурбулентным потокам, а также к содержанию энергии, вызываемому исключительно нетурбулентным движением. Турбулентность может мешать измерению всех трех величин давления, хотя менее всего, пожалуй, p_n . Турбулентность стоит только в некотором отношении к сопротивлениям потоку, которые дают возможность возникнуть завихрениям, в виде потерь статического p и общего p_n давления, и к теплоте, когда грубо турбулентные движения затухают и переходят в молекулярное тепловое движение. В отношении измерительной техники из-за турбулентности возникает ненадежность температурных измерений. При суммировании $p_n = p + p_g$ исходят из абсолютного давления, при разрежении суммирование производится соответственно схеме, показанной на рис. 64. В настоящей главе излагается измерение статического давления p . Измерение динамического давления будет изложено при описании напорных трубок (§ 46), так как динамическое давление здесь рассматривается как помеха.

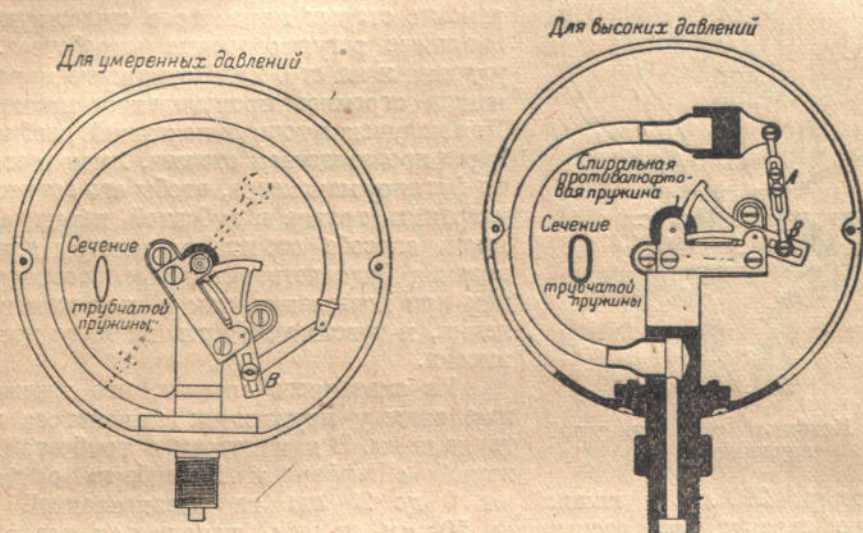


Рис. 65 и 66. Манометры с трубчатой пружиной.

§ 28. Пружинные манометры. Рабочей деталью манометра Бурдона является трубчатая пружина (рис. 65 и 66), представляющая собой изогнутую трубку с плоским сечением, внутренняя полость которой нижним концом соединяется с пространством, давление в котором подлежит определению, другой же конец трубки закрыт. Под действием внутреннего избыточного давления эта пружина стремится распрямиться. Этой внутренней силе противодействует упругость материала пружины, как внешняя направляющая сила. Вследствие этого кривизна пружины изменяется соответственно колебанию внутреннего давления, причем свободный конец пружины приводит в действие стрелку, передвигающуюся по шкале (теория, Лоренц, Л. 65). Манометры германской фирмы «Дрейер, Розенкранц и Дрооп» снабжены дополнительной стальной пружиной, помещенной концентрически с трубчатой пружиной и скрепленной с последней с обоих концов и имеющие с ней одинаковое движение, вследствие чего их внешняя направляющая сила повышается.

Имеется возможность изготовлять манометры для разнообразнейших давлений, комбинируя материал, форму, поперечное сечение и толщину стенок трубчатой пружины. Пружина для низких давлений изготавливается из упругого медного сплава, по возможности с длинным загибом — настолько тонкостенной и плоского сечения, чтобы момент инерции ее поперечного сечения становился незначительным (рисунок 65). Для высоких давлений применяются пружины, гисверленные из массивной стали, которым придают форму, указанную на рис.

66, и поперечному сечению которых после сверления придают только слегка эллиптическую форму. При достаточной толщине стенок такие пружины применяются для гидравлических целей до 5000 атмосфер.

На рис. 67 изображена конструкция манометра с пластинчатой пружиной. Сущность конструкции заключается в следующем: тонкая, закаленная пластинка из листовой стали зажата по всей окружности. При наличии давления под пластинкой середина ее выгибается вверх и перемещает стрелку манометра. Для увеличения упругости пластинку делают волнистой, выгибая на ней ряд кольцеобразных волн. Несмотря на это, размах пластинки остается незначительным, всего лишь 1—2 мм. В этом заключается недостаток пластинчатых пружин в сравнении с трубчатыми, размах которых достигает 6—10 мм — от нуля до высшей точки давления. Для достаточно большого передвижения стрелки необходимо применить в конструкции пластинчато-пружинных манометров более сильную передачу для стрелки, что в свою очередь увеличивает ее мертвый ход. Для отрегулирования стрелочного механизма при изготовлении новых, а также при ремонте старых манометров существуют специальные регулировочные устройства А и В, указанные на стр. 23. Пружинные манометры нашли огромное промышленное применение. Для получения точных показаний необходимо, перед производством отсчета, легко постучать по футляру манометра, чтобы его сотрясением устранить трение в зубчатой передаче. При таком способе отсчета манометры дают показания удовлетворительные, совпадающие как при повышении, так и понижении давления, и чувствительность их тогда довольно высока.

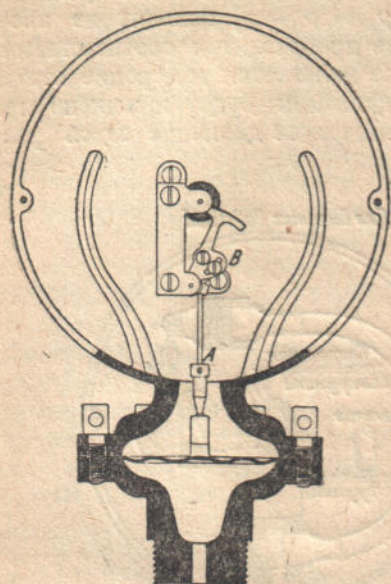


Рис 67. Манометр с пластинчатой пружиной.

Из сказанного следует, что направляющие силы у пружинных манометров достаточно малы. В манометрах с трубчатой пружиной «Шеффер и Буденберг» с диаметром футляра 290 мм и шкалой от 0 до 25 ат на установленной горизонтально стрелке, на расстоянии 50 мм от оси, помещается вес в 5 Г. При моменте в 250 мм·Г стрелка отклоняется до 3,2 ат, что соответствует угловому перемещению в 35,2°; максимальное же отклонение до 25 ат соответствует угловому перемещению в 275° и максимальному моменту, переданному от пружины на ось стрелки, равному $250 \cdot \frac{25}{3,2} = 1960 \text{ мм} \cdot \text{Г} = 0,00196 \text{ м} \cdot \text{кг}$. При отклонении стрелки от 0 до 25 ат на угол в $\frac{275}{360} \cdot 2\pi = 4,8$ угловым единицам и среднем переданном стрелке моменте $= \frac{1}{2} \cdot 0,00196$, работа, произведенная прибором, составляет, следовательно, $\frac{1}{2} \cdot 0,00196 \cdot 4,8 = 0,0047 \text{ м} \cdot \text{кг}$. Если весь размах свободного конца трубчатой пружины равен, примерно, 6 мм = 0,006 м, то наибольшая сила, необходимая для деформации пружины и отнесенная на этот свободный ее конец, будет равна $\frac{2 \cdot 0,0047}{0,006} = 1,6 \text{ кг}$. Результаты этих и некоторых последующих аналогичных измерений приведены в таблице 3. Из последней видно, что трубчатая пружина производит лишь очень незначительные количества работы, независимо от самого высокого давления. Если силы, действующие на свободный конец пружины, являются заметными, то размах конца пружины очень мал. Пластинчатые пружины дают значительно более высокие конечные силы, но вместе с тем еще более незначительные размахи, все же развивают большие количества работы, которые при данном диаметре пружины естественно увеличиваются с конечным давлением.

Направляющая сила и затрата работы пружинных манометров

Наименование прибора	Диаметр футляра (мм)	Предел измерения атмосферы (атм)	Стрелки		Затрата работы (кг.м)	Центр пружины	
			Размах	Наибольший момент (сила) (м.кг)		Размах (мм)	Наибольшая сила (кг)
Трубчато-пружинный манометр «Шеффер и Буденберг»	290	0—25	275°	0,00196	0,0047	6	1,6
Трубчато-пружинный манометр Эккардта	105	0—250	250°	0,00125	0,0027	5	1,1
Трубчато-пружинный манометр-регистратор давления фирмы «Дрейер, Розенкранц и Дроп» . .	120	0—6	60 мм	0,18 кг	0,0054	6	1,8
Пластинчато-пружинный манометр диаметром 75 мм «Шеффер и Буденберг» .	100	0—4	305°	0,0032	0,0085	2,5	6,8
	100	0—15	270°	0,0125	0,029	2,5	23

При нагревании упругость пружин и в особенности трубчатых изменяется, вследствие чего шкала становится неточной и требуется новая градуировка прибора. Если высококачественные манометры и не особенно к этому чувствительны, все же следует избегать непосредственного попадания пара в пружину, для чего перед манометром помещают водяной затвор (рис. 68). В нем собирается вода и только она одна попадает в трубчатую пружину. Между манометром и затвором помещают кран *H*, имеющий боковой ход малого диаметра ($1/2$ мм), так что кран *H* является трехходовым краном. Посредством этого тонкого хода возможно привести манометр или подводящую трубку в сообщение с атмосферой, что необходимо для проверки нуля прибора или для продувания подводящей трубки.

Если измеряемое давление периодически и быстро колеблется, то кран *H* заворачивается настолько, чтобы иметь возможность произвести надежный отсчет среднего значения. Кран *H* действует как гидравлический тормоз и увеличивает демпфирование прибора. Для тех же целей перед манометром устанавливаются небольшие водоприемники, имеющие большей частью тонкий канал и служащие для смягчения резких колебаний давления, могущих повредить прибор.

Ржавление также изменяет упругость пружины, ибо при этом уменьшается толщина ее стенок. Для предохранения стальных пружин гидравлических манометров от ржавчины, внутреннюю часть последних покрывают асфальтом или лучше того вводят в трубчатую пружину тонкую медную трубочку, которую необходимо при помощи водяного давления раздуть настолько, чтобы она плотно прилегала к стенкам трубчатой пружины.

§ 29. Жидкостные манометры. Ртутные манометры состоят из U-образной трубки (рис. 69). Одно ее колено открыто, другое присоединяется к испытываемому пространству. Отсчет показаний производится наблюдением обоих ртутных менисков. Если длина столбов ртути, считая от нулевой точки, одинакова в обоих коленах, то можно производить один отсчет, а затем его удвоить. При пользовании трубками с внутренним диаметром свыше 5 мм, капиллярность не вызывает сколько-нибудь существенных погрешностей, в U-образной же трубке действие ее в обоих коленах уравнивается. Отсчет необходимо приводить



Рис. 68. Монтаж пружинного манометра на паропроводе.

к температуре ртути при 0° С. Так как нагретая ртуть легче холодной, то при одинаковых давлениях показание будет выше и лишь при 0° С — 735,5 мм Hg равняются 1 кг/см²; только при 0° С — 760 мм Hg есть нормальное давление. Соответственно температуре ртути необходимо уменьшить отсчеты, внося в них следующие температурные поправки:

при 10° С 20° С 30° С
в 0,0018 0,0036 0,0054 от показаний барометра.

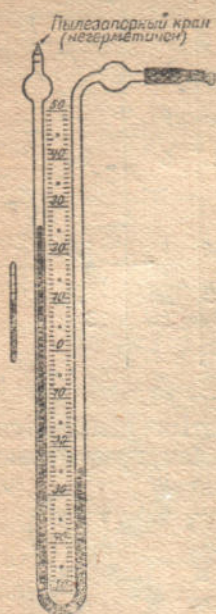


Рис. 69. Ртутный манометр с термометром. Отсчет при воздухе 259 + 243 = 502 мм Hg = 0,681 ат, при воде = 0,603 ат.

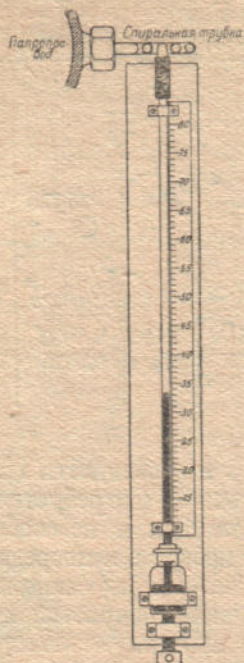


Рис. 70. Вакуумметр со спиральной трубкой для предохранения от колебаний уровня конденсационной воды.

Лишь при тонких измерениях приходится вносить поправку в показания из-за расширения шкалы. При применении латунной шкалы поправка вместо 0,0018 становится равной 0,0016. Температуру ртутного столба определяют по термометру, подвешенному около манометра таким образом, чтобы шарик термометра приходился на середине измеряемого ртутного столба. При измерениях давления в водяном пространстве лучше всего оставлять напорную трубку наполненной около присоединения (рис. 69 справа). Отсчет в таком случае производится в мм (ртутного столба минус водяной столб). Для такого приведения большей частью достаточно поставить:

при 20° С : 738 мм Hg = 1 ат,
797 мм (Hg — H₂O) = 1 ат.

Если на рис. 69 только верхняя часть правой трубки наполнена водой, то необходимо еще учитывать и водяной столб, который в правом колене превышает уровень ртутного столба в левом. На рис. 69 можно тогда произвести следующий отсчет:

$$(259 + 243) \text{ мм (Hg — H}_2\text{O)} - (550 - 259) \text{ мм H}_2\text{O} = 502 : 797 - 290 : 10000 = 0,632 - 0,029 = 0,603 \text{ ат.}$$

или

$$(259 + 243) \text{ мм Hg} - (550 + 243) \text{ мм H}_2\text{O} = 0,603 \text{ ат.}$$

Несколько удобнее производить отсчет по манометру с одним коленом. Этот манометр представляет собой стеклянную трубку, нижним концом погруженную в сосуд с ртутью, верхний же ее конец открыт. Измеряемое давление действует на свободную поверхность ртути и поднимает ее вверх. В этом случае отсчет производится лишь по одной шкале, в то время, как у манометров с двумя коленами, отсчеты должны складываться по двум столбам. Изменения уровня ртути в сосуде обычно очень незначительны, и это следует учитывать при нанесении делений на шкале, разделенной на части меньшие сантиметра. Установка манометра на нуль производится передвижением вдоль стеклянной трубки либо сосуда, либо шкалы (рис. 70), либо погружением в ртуть специального плунжера (рис. 223). Эти манипуляции применяются для установки нуля манометра в состоянии покоя, после наполнения сосуда ртутью, так как иначе было бы обременительно доливать или отливать ртуть с целью регулирования. В том случае, когда давление шкалы соответствует точно одному сантиметру, необходимо перед каждым отсчетом устанавливать манометр на нуль, что является нежелательным для технических целей. На рис. 70 дано изображение манометра с сосудом для измерения вакуума; в этой конструкции верхняя спиральная трубка служит для уменьшения помех при образовании водяного столба

над ртутью при измерении парового вакуума или влажного воздуха. Необходимо позаботиться о том, чтобы вода заполняла как трубку (с ртутью), так и спиральную трубку. После установки нуля манометра при таком положении отсчет снова производится в мм (ртутный столб минус водяной столб). Водяной столб не изменяется тогда также при колебании уровня ртути. Незначительные абсолютные давления, а также высокий вакуум можно измерять как разность между показаний барометра и вакуумметра, т. е. иными словами как разность между атмосферным давлением и вакуумом испытуемого пространства. Рациональнее пользоваться непосредственным измерительным методом, в таком случае лучше применять барометр или укороченный барометр для непосредственного отсчета.

Особенно следует избегать воздушного давления в закрытом колене, поэтому в состоянии покоя не должно быть заметно даже самого маленького пузырька. Так как последний всегда легко может образоваться, то рекомендуется присоединить к нему краник, через который воздух можно удалить (с другой стороны это может дать возможность доступа воздуха). Для этой цели применяется также воронка с фильтром, наполненная ртутью, так что при этом устройстве воздух может только выходить, но не входить.

При конструкции больших ртутных манометров встречаются трудности из-за большой текучести ртути (имеющей лишь одноатомную молекулу), как только с ней приходит в соприкосновение что-либо другое, кроме стекла. Сальниковые набивки трудно держать непроницаемыми, железо зачастую оказывается довольно пористым, особенно в местах сварки; иногда помогает чеканка. Для таких конструкций используются преимущественно легированные стали, выдерживающие давления до 200 ат, при 500° С.

Ртутные загрязнения покрывают поверхность стеклянной трубки жирным налетом, который изменяет неопределенно величину капиллярных сил (появление выпуклого мениска при подъеме и вогнутого мениска при опускании столба, т. е. загрязнения дают переменный мениск при колебаниях), что затрудняет производство отсчета.

Очистка ртути от механических загрязнений (Л.) производится фильтрованием ее через бумажную воронку с проколотым иголкой отверстием. Очистка от растворенных в ртути трудно летучих металлов производится перегонкой; от растворенных благородных металлов — промыванием разведенной азотной кислотой или пропусканием через нее ртути по каплям или воздушной продувкой (Л.). Очистка от жиров производится промыванием ртути в растворе едкого натра с последующим промыванием в воде. Очистка от воды — при помощи пропускной бумаги с последующим нагреванием до 150° С.

Для измерения более низких давлений указанные выше приборы наполняются водой. На рис. 72—74 показаны некоторые типы водяных стеклянных манометров с одним коленом, изготовленных из одного куска стекла с вытравленными на стекле делениями. На газовых заводах вместо воды применяют для наполнения керосин; тогда смолистые части не замазывают прибора, но растворяются. Более широкие деления наносятся так же, как и при водяном наполнении, и деления должны быть приведены к миллиметрам водяного столба либо эмпирически либо путем определения удельного веса керосина. Показание водяного манометра ниже 30° С в весьма слабой степени зависит от температуры, но

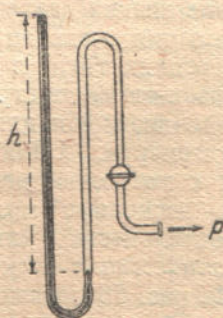


Рис. 71. Укороченный барометр для измерения абсолютного давления.

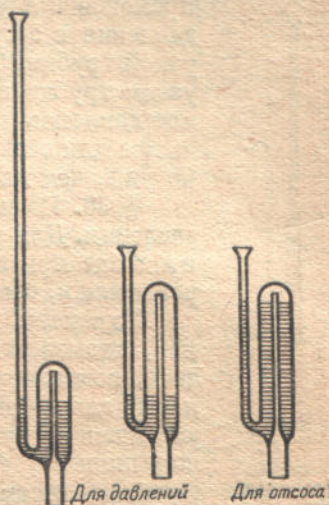


Рис. 72—73—74. Водяные манометры.

керосин при повышении температуры на каждые 11°C становится легче на 1% . Для лучшей видимости при отсчетах воду подкрашивают эозином.

В некоторых случаях измерение давления посредством ртутного столба становится неточным, а с водяным столбом — неудобным, так как измеряющий водяной столб очень высок и, следовательно, громоздок. Ртуть очень тяжела, вода же слишком легка. Между ними (таблица 4) по своим удельным весам расположены некоторые жидкости, как этиленбромид и бромформ с удельным весом $\gamma = 2$ до 3, но с неприятными свойствами, наполнителей же с удельным весом 6—8 вовсе не существует. В таких случаях выходом из положения является применение двух жидкостей (рис. 75) — ртути и воды. При наличии давления в сосуде А, наполненном ртутью, последняя повышается в узкой трубке. Одновременно увеличивается и водяной столб, так как узкая трубка вверху снова суживается. Вследствие этого измеряемое давление уравнивается частично ртутью, частью водой, и шкала для отсчета уровня воды делается шире, чем для одной ртути, но уже, чем для одной воды.



Рис. 75.
Ртутно-
водяной
манометр.

§ 30. Измерение низких давлений и незначительных разностей давления. Для измерения очень низких давлений, встречающихся на практике при измерениях тяги в топочных или вентиляционных устройствах, обыкновенные манометры непригодны.

Манометр, применяющийся для измерения очень низких давлений, называется тягомером. Обыкновенные водяные манометры не дают возможности с точностью измерять очень незначительные разности давлений в несколько миллиметров водяного столба. Для увеличения чувствительности манометров применяют в качестве наполнителей две жидкости с несколько разнящимся друг от друга удельным весом. На рис. 76 показана конструкция двухжидкостного манометра, верхняя часть которого наполняется эфиром, керосином или лучше всего толуолом. Давление отсчитывается в мм (воды минус толуол) из расчета $1 \text{ мм H}_2\text{O} = \frac{1}{0,134} = 7,47 \text{ мм}$ (водяной столб — толуоловый столб).

При измерениях давления воздуха или газа необходимо при наполнении тщательно выравнивать уровни жидкости в обоих сосудах А и В, так как эта разность уровней в сосудах увеличивает уровень жидкостей в трубках в 7,47 раза.

Не следует также пренебрегать малыми разностями уровней, которые могут возникнуть при работе прибора в сосудах А и В. Кроме того, малые разности уровней соответственно отношениям поперечного сечения сосуда к поперечному сечению трубки дают сужение шкалы на трубках.

Перевернутый прибор, наполненный сероуглеродом, служит для измерения разности давления в водяном пространстве. Обычно измеряется разность ($\text{CS} - \text{H}_2\text{O}$) без дальнейших усложнений расчета. Этот порядок наполнения можно применить также и при измерениях давления газа при условии установки в верхней части тягомера уравнивательных спиральных трубок, во избежание нарушения отношения поперечных сечений сосуда и трубки, как это показано на рис. 70. Однако, все эти устройства чувствительны к изменениям вертикального положения прибора, так как даже незначительные боковые его наклоны вызывают тем большие отклонения, чем выше увеличение передачи (рис. 76). С увеличением наклона трубок переставляющие силы снижаются, и приборы очень медленно устанавливаются в новое положение. В таблице 4 дан перечень жидкостей для наполнения манометров.

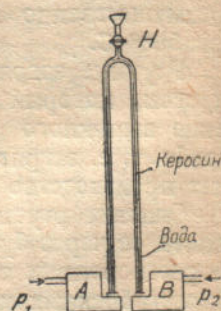


Рис. 76.

Для указанных выше целей необходимым условием для использования той или иной жидкости является несмешиваемость ее с водой. Применяемая жидкость совершенно не должна растворяться в воде или вызывать образование неоднородности жидкости, хлопьев, налетов и т. п.; обе жидкости должны иметь

Жидкости для манометров

	Для наполнения совместно с водой							Для самостоятельного наполнения			
	Эфир $C_4H_{10}O$	Толуол $C_6H_5CH_3$	Керосин	Трикре- зильфос- фат	Нитро- бензол $C_6H_5NO_2$	Сероугле- род C_2S	Хлороформ $CHCl_3$	Вода H_2O	Этилен- бромид $C_2H_4Br_2$	Бромформ $CHBr_3$	Ртуть Hg
Удельный вес при 20°C ($кг/м^3$) . . .	714	864	около 870	1 179	1 206	1 260	1 489	998	2 174	2 903	13 499
Относительная раз- ница по сравне- нию с водой . . .	284	134	—	181	208	262	491	—	—	—	12 501
Коэффициент теп- лового расшире- ния умн. на 1 000 при 20°C	1,65	1,1	0,95	1,2	0,84	1,20	1,27	0,18	2,2	—	0,18
Давление пара при 20°C ($мм Hg$) . . .	432	20	—	0	< 1	295	160	17	11	—	0,04
Точка кипения при 760 $мм Hg$	35	110	—	280° при 20 $мм$	210	46	61	100	132	150	357
Точка плавления (в град. С)	-116	-94	—	-30	9	-112	-64	0	10	8	-39
Относительный вес пара при возду- хе=1	2,6	4	—	—	4,2	2,6	4,1	0,62	6,4	8,7	6,9
Капиллярная по- стоянная	4,8	6,7	6,6	—	7,3	5,0	3,7	14,8	—	3,5	7,5
Вязкость при 20°C для воды равна 100	26	59	—	—	180	38	56	100	170	200	158
Коэффициент пре- ломления при 20°C	1,355	1,49	—	1,557	1,55	1,63	1,45	1,33	1,54	1,60	—
Поведение при со- прикосновении с водой (по Вин- келю)	Слабо раств- ворим	Хоро- шее	—	Хоро- шее	Нале- ты	Хоро- шее	Нале- ты	—	—	Хоро- шее	Хоро- шее
Прочие свойства	Го- рюч.	—	—	Него- рюч.	Ядо- вит	Го- рюч.	Го- рюч.	—	—	Ядо- вит	Хоро- шее

разные коэффициенты преломления, иначе трудно отличить раздел жидкостей, и часть воды может окраситься в цвет другой жидкости. Получение чистого мениска жидкостей зависит от свойства их поверхностного слоя, каковые, в частности, для воды неблагоприятны, но могут быть улучшены незначительной прибавкой едкого кали. В приборах, где две жидкости приходят в соприкосновение, заметное влияние имеет их поверхностное натяжение. Там, где поверхность жидкости не покрыта водой, жидкость должна быть однородной, у керосина легкие составные части улетучиваются, вследствие чего повышается его удельный вес; при 20° давление пара должно быть незначительно и удельный вес его должен быть, примерно, равен удельному весу воздуха; иначе газовые столбы в вертикальных участках трубопровода искажают результаты измерений малых разностей давлений. Применение двух жидкостей представляет впрочем и кое-какие затруднения, так как поверхность раздела их большей частью не может быть резко установлена, вследствие чего не легко производить отсчет точнее чем до 1 мм и то не при узких (тонких) трубках. Точность отсчета при воде над хлороформом составляет в этом случае 0,49 $кг/м^2$ (таблица 4). С другой стороны, в случае ртутного столба, над мениском которого находится вода или воздух, можно без труда производить отсчет с точностью до 0,1 мм. Для этой цели применяется или отсчетная труба или устройство для беспараллактического

отсчета с нониусом, применяемое в хороших барометрах. Точность такого отсчета равна $0,1 \cdot 12,5 = 1,25 \text{ кг/м}^2$. Отношение чувствительностей равно $1,25 : 0,49 = 2,5 : 1$, следовательно не слишком различающиеся между собой; работа же со ртутью гораздо опрятнее. Чистота поверхностей, необходимая в обоих случаях для достижения обусловленной точности, лучше всего получается при частом возобновлении наполнителей с предварительной промывкой трубок водой. Манометры, легко изготовляемые из стекла в любой форме, необходимо сконструировать таким образом, чтобы манипуляции с ними были удобны. Об очистке ртути см. стр. 83.

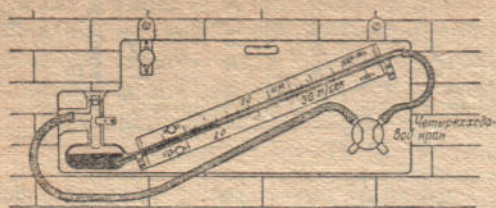


Рис. 77. Тягомер с наклонной трубкой для котельных установок и для измерения скорости.

вода движется вперед под действием какого-нибудь незначительного давления, в зависимости от наклона трубки и соотношения диаметров трубки и сосуда на расстояния, указываемые делениями шкалы, отстоящими друг от друга на много миллиметров. Тягомер снабжен уровнем, а его вторая шкала служит для измерения скоростей посредством трубок Пито (§ 46). При увеличении наклона трубки в отношении, большем чем 1 к 5 до 10, не получаются сами собой более точные показания, так как небезукоризненная прямизна трубки, прилипание воды к стенкам и неточная горизонтальная установка прибора скоро искажают

другим средством для увеличения чувствительности жидкостных манометров является применение в них наклонной шкалы. В тягомере (рис. 77)

вода движется вперед под действием какого-нибудь незначительного давления, в зависимости от наклона трубки и соотношения диаметров трубки и сосуда на расстояния, указываемые делениями шкалы, отстоящими друг от друга на много миллиметров. Тягомер снабжен уровнем, а его вторая шкала служит для измерения скоростей посредством трубок Пито (§ 46). При увеличении наклона трубки в отношении, большем чем 1 к 5 до 10, не получаются сами собой более точные показания, так как небезукоризненная прямизна трубки, прилипание воды к стенкам и неточная горизонтальная установка прибора скоро искажают

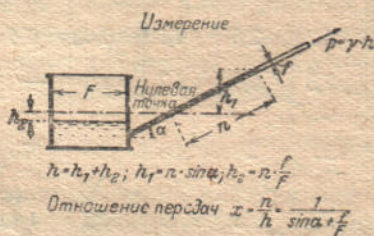


Рис. 78а.

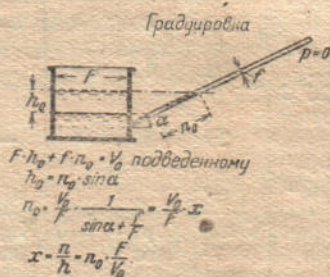


Рис. 78б.

показания. Прилипание воды — явление плохого смачивания — можно устранить весьма незначительной прибавкой едкого кали или другого средства. Прибавлять кали необходимо лишь в таком незначительном количестве, чтобы изменение удельного веса жидкости оставалось ничтожным.

Приводимые на рис. 78 соотношения указывают, что отношения передач n/h в равной мере находятся в зависимости как от отношения поперечных сечений трубки и сосуда, так и от повышения давления. Угол наклона должен быть установлен согласно правила $\sin \alpha = \frac{h}{n} - \frac{f}{F}$, что отнюдь не сводится к тангенсу этого угла. Чувствительность прибора будет тем выше, чем меньше будет $\sin \alpha$, а также отношение f/F . На этом принципе основан микроманометр Рекнагеля (рис. 79).

Манометр состоит из точно обточенного по диаметру в 100 мм металлического сосуда и наклонной трубки с внутренним диаметром около 2 мм. В этом случае отношение сечений $\frac{f}{F} = \frac{1}{2500}$. При наклоне трубки, равном 1 : 1000, переводной коэффициент будет равен $\frac{1}{0,001 + 0,0004} = 713$. Вполне понятно, что величины α и f по всей длине наклонной трубки должны быть совершенно одинаковыми, точно так же трубка должна быть совершенно прямой и иметь неизменяющийся

по ее длине внутренний диаметр. Капиллярность удерживает мениск перпендикулярно к оси трубки, и последняя работает удовлетворительно лишь при ее заметных наклонах, в особенности, когда $\sin \alpha$ становится равным f/F . Микроманометр является старейшим настоящим измерителем низких давлений; с появлением же более удобных приборов (рис. 84, 85, 88) он потерял свое значение. Однако, одним из достоинств микроманометра является то, что он может служить нормальным прибором (эталоном) при градуировке измерителей низкого давления. Градуировка микроманометра производится прибавлением жидкости объемом V_0 к находящейся уже в сосуде; столбик жидкости в трубке с нулевой точки поднимается до точки n_1 , но h_0 остается пока неизвестным. На рис. 78b показано, что при существующем наклоне трубки переводной коэффициент равен $\frac{n}{h} = n_0 \cdot \frac{F}{V_0}$. Для наполнения микроманометров хорошо зарекомендовал себя толуол (таблица 4).

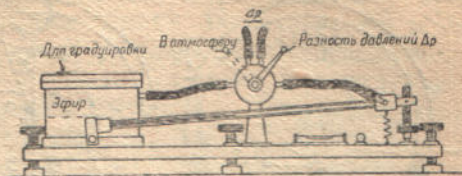


Рис. 79. Дифференциальный манометр (микроманометр) Рекнагеля.

Работа с чувствительными жидкостными манометрами требует много предосторожностей. Чувствительность прибора при производстве отсчета всегда связана с его чувствительностью ко всякого рода помехам. Особенное внимание необходимо обратить на следующие моменты: удельный вес наполняющих жидкостей зависит от температуры; неодинаковый вес воздуха, находящегося в обеих подводящих к прибору трубках при вертикальной установке последних, также нарушает нормальную работу прибора. Такой установки трубок необходимо избегать; там, где этого обойти нельзя, следует позаботиться о том, чтобы обеспечить одинаковые температурные условия обеих трубок, помещая их рядом друг с другом. Следует избегать применения резиновых шланг, в виду их плохой теплопроводности, а также вследствие того, что внутри их изменяется состав воздуха, если ими ранее пользовались для светильного газа или т. п. Для этих целей медная или свинцовая трубка зарекомендовали себя с лучшей стороны. Самый же существенный недостаток микроманометров заключается в том, что они не развивают никакой энергии. Поэтому в последнее время, в особенности при применении самопишущих приборов, пользуются измерителями давления, работающими с большими объемными перемещениями, каковыми являются так называемые кольцевые весы и поплавковые тягомеры. Сущность конструкции *кольцевых весов* или *кольцевого манометра* заключается в следующем: согнутая в полную окружность трубка может вращаться вокруг оси, перпендикулярной к плоскости окружности и проходящей через ее центр; ось опирается на ребро призмы. Так как центр тяжести S этой вращающейся системы лежит ниже оси вращения, то возникающая при вращении направляющая сила стремится вернуть систему в положение равновесия. Нижняя часть кольцевой трубки запирается жидкостью, на обе стороны которой действует измеряемая разность давлений Δp ; кольцевая трубка сверху разделена перегородкой. Давления, разность которых измеряется, подводятся посредством соединительных трубок к обеим половинам трубки, образованным сверху перегородкой, а внизу замыкающей жидкостью. Подводящие трубочки должны по возможности меньше тормозить или влиять на движение всей системы. В качестве подводящих трубок применяются резиновые шланги или довольно длинные капиллярные, спиральной формы, трубки, расположение которых относительно оси вращения таково, что их противодействие является ничтожным. Кольцевая трубка остается в своем среднем положении до тех пор, пока в ней нет никакой разности давлений. Возникающая разность давлений передвигает замыкающую жидкость с удельным весом γ , которая при нулевом положении кольцевой трубки заполняет нижнюю ее половину. Вследствие этого одна сторона кольцевой трубки становится тяжелее и опускается, а жидкость продолжает передвигаться в ту же сторону, что вызывает дальнейшее снижение трубки в том же направлении, пока система не придет в новое положение равновесия.

Благодаря этому своеобразному явлению нарастающего действия кольцевой

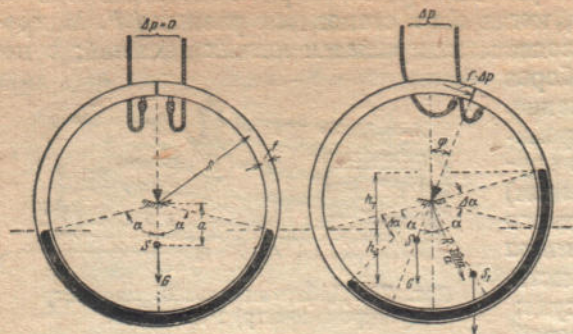


Рис. 80 и 81. Кольцевые весы в положении равновесия в отклоненном положении.

Уравнение моментов:

$$G \cdot a \cdot \sin \varphi = (2R \cdot a \cdot f \cdot \gamma) \left(R \cdot \frac{\sin \alpha}{a} \cdot \sin \Delta \alpha \right).$$

Математический вывод:

$$2R \cdot \sin \alpha \cdot \sin \Delta \alpha = R \cdot \cos(\alpha - \Delta \alpha) - R \cos(\alpha + \Delta \alpha).$$

$$R \cos(\alpha - \Delta \alpha) - R \cos \alpha = h_2.$$

$$R \cos \alpha - R \cos(\alpha + \Delta \alpha) = h_1.$$

$$h_1 + h_2 = \frac{\Delta p}{\gamma}.$$

$$G \cdot a \cdot \sin \varphi = R \cdot f \cdot \Delta p,$$

$$\sin \varphi = \frac{R \cdot f}{G \cdot a} \Delta p.$$

центров тяжести окончательно уравновешиваются при равенстве:

$$\sin \varphi = \frac{R \cdot f}{G \cdot a} \Delta p.$$

Вместо этого можно написать, что значение момента разности давлений $R \cdot f \cdot \Delta p$ на перегородку равно моменту $G \cdot a \cdot \sin \varphi$ центра тяжести S . Отклонение φ прибора зависит, следовательно, от размеров R и f кольцевой трубки, а также от значений G и a . Количество, а также удельный вес замыкающей жидкости, не оказывают влияния на показания φ прибора.

Показания прибора зависят от них лишь постольку, поскольку позволяют довести Δp до определенной величины, пока столб жидкости не начнет разрываться. Максимальное допустимое значение для $h_1 + h_2 = \Delta p / \gamma = R$. Этот возможный прорыв и гарантирует от избыточного давления и от выбрасывания замыкающей жидкости в подводящие трубки. За последние годы кольцевые весы стали весьма излюбленным прибором. Для низких давлений они изготавливаются из жести (рис. 82, 222), для очень высоких — из стали. Для низких давлений они изготавливаются небольших диаметров с водяным наполнением, для больших перепадов давлений — значительных диаметров и с ртутным наполнением. На

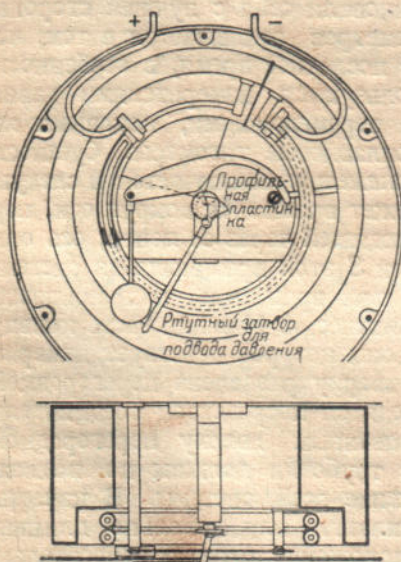


Рис. 82. Кольцевые весы — измеритель количества с подводкой давления посредством жидкостного затвора, фирмы «Бэма» (1/8 натур. величины).

рис. 83 указаны кольцевые весы в качестве укороченного барометра.

манометр является чрезвычайно чувствительным прибором, реагирующим, в зависимости от положения центра тяжести, даже на малые разности давления, давая большие отклонения; он вообще обладает, в зависимости от заполненных объемов газов, большим балансом энергии. Влияние указанного нарастающего действия объяснено на рис. 14, кривая ВА.

Теория кольцевых весов при условии допущения некоторых упрощений, как то, что d (диаметр кольцевой трубки) должен быть мал в сравнении с R (R — радиус закругления), изложена в пояснительном тексте к рис. 80 и 81. При перемещениях центр тяжести S трубки перемещается в одну сторону, центр тяжести S_1 замыкающей жидкости — в другую. Центр тяжести S_1 находится на расстоянии, равном $\frac{R \cdot \sin \alpha}{a}$ от центра кольцевой трубки. Возникающие моменты от обоих

Принцип перемещения жидкости нашел большое применение при конструктивном оформлении многих приборов, указанных для сравнения на рис. 84, 90, 221, о которых дополнительно будет сказано в § 32.

При разработке аналогичных конструкций все же необходимо произвести испытание с целью выяснения, насколько и при каких условиях система трубка + жидкость является устойчивой во всех положениях. Приближением к безразличному равновесию, т. е. соответствующим уменьшением величины a , как это указано на рис. 80, можно добиться любой передачи. Однако, в конструкциях, где наряду с движением стрелки желательнее произвести и некоторую работу, например, привести в движение штифт пишущего механизма, а сил для этого недостаточно, то в таких конструкциях необходимо увеличить производимую

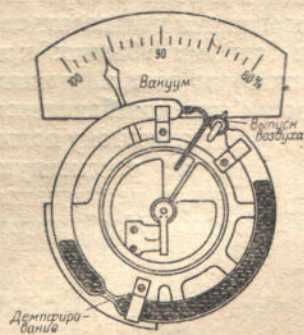


Рис. 83. Кольцевые весы - барометр, фирмы «Гартман и Браун».

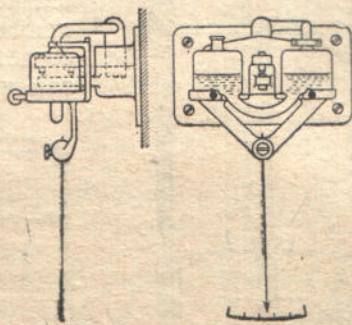


Рис. 84. Измеритель низких давлений с масляным наполнением, фирмы «Унион».

прибором работу, что осуществляется посредством увеличения пути перемещения и перемещающихся масс. То соображение, что для точности измерений существенно необходимо снабдить прибор измерительной энергией (§ 14) (что при очень малых давлениях является затруднительным), находит подтверждение и в том, что можно с надежностью измерить даже малые давления при условии наличия достаточных объемов. Значимость затрачиваемой энергии измерительных приборов часто недооценивается. Поплавковый тягомер является мало хрупким, довольно распространенным промышленным прибором, но область применения его ограничивается лишь такими агрегатами, как например, газопроводами к доменным или мартеновским печам или аналогичными установками, где можно производить отбор для замеров достаточно больших количеств газов, не влияя этим существенно на нормальную работу агрегата. Такой измеритель давления изображен на рис. 85. Конструкция его такова: колокол-поплавок плавает на воде или на масле, и измеряемое давление подымает его до тех пор, пока не уравновешивается увеличивающимся весом колокола. Величина подъема колокола является мерилом давления, а отношение диаметра колокола к кольцеобразному сечению корпуса прибора характеризует переводной коэффициент, расчет которого приведен на рис. 86. Увеличивая диаметр колокола и подъем, можно повышать в широких пределах и произведенную энергию. Колокол диаметром в 200 мм, подъем которого на 100 мм соответствует преодолению давления в 3 мм водяного столба, производит работу, соответственно равную $3,14 \cdot 3 \text{ мм } \text{H}_2\text{O} \cdot \frac{1}{2}$, т. е. $0,00314 \cdot 3 \cdot 0,5 = 0,0047 \text{ кг/м}$. Следовательно, эта произведенная работа равна по величине работе трубчатого пружинного манометра для измерения многих атмосфер давления (таблица 3). Измерители давления с колоколом, как нами ранее было указано, широко применяются на заводах для контроля газопроводов; они пригодны также для работы в котельных установках вместо U-образных и пластинчатых пружинных тягомеров, довольно распространенных при измерении малых давлений, но легко перестающих действовать из-за малости производимой работы. Поплавковые тягомеры, в соединении с дроссельной диафрагмой или трубкой Пито применяются также для измерения протекающих количеств газа в газопроводах (§ 46,

78). При наличии больших количеств они, без сомнения, являются самыми надежными приборами для регистрации малых давлений.

Величина измерительной энергии каждого манометра определяется величиной заполнения его исследуемой жидкостью или газом, т. е. давлением и объемом. В кольцевых весах заполняемый объем велик вследствие передвижения замыкающей жидкости, а в измерителе с колоколом — вследствие выбора соответствующего диаметра колокола. Таким образом все зависит от *объемной емкости* измерительного прибора. Конечно, здесь предполагается, что этими объемами можно распоряжаться, не вызывая слишком больших помех в местах отбора. При недостатке же этой энергии ими пользоваться нельзя; помимо того, при больших объемах прибор работает более надежно, но дает медленные показания, в особенности при колеблющихся давлениях, поэтому пользоваться им не рекомендуется при быстро меняющихся давлениях. Необходимо также

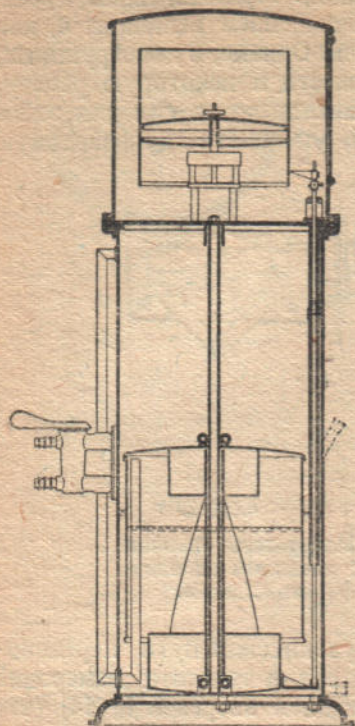


Рис. 85. Поплавковый измеритель давления с колоколом, фирмы «Детро».

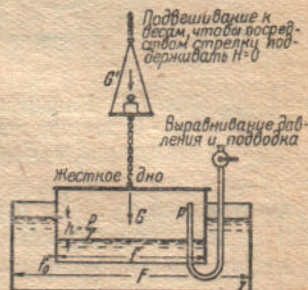
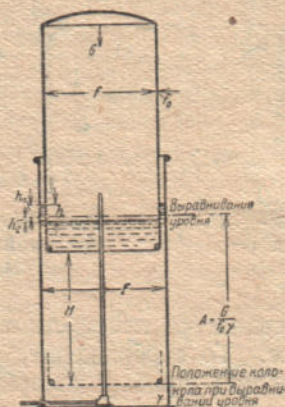


Рис. 86 и 87. К теории измерительного колокола¹.

¹ Вертикально:

$$G = h \cdot f \cdot \gamma + (A + h_1 - H) \cdot f_0 \cdot \gamma.$$

Непрерывность:

$$h_2 f = h_1 \cdot (F - f - f_0),$$

в котором $h_1 = h \cdot \frac{f}{F - f_0}$.

Следовательно главное уравнение:

$$G = h \cdot f \cdot \gamma + A f_0 \gamma + \left(h \cdot \frac{f}{F - f_0} - H \right) f_0 \gamma.$$

Поплавковый тягомер с колоколом (рис. 86): $G = A f_0 \cdot \gamma$ постоянны, отчего передача

$$\frac{H}{p} = \frac{f}{f_0} \cdot \frac{F}{F - f_0} \approx \frac{f}{f_0}.$$

Градировка измерителя для очень малых давлений (рис. 87). $H = 0$, $h = 0$, производится уравниванием давления с $G = A \cdot f \cdot \gamma$.

Подведено измеряемое давление p . Весы сбалансированы на $H = 0$ дополнительным грузом G' , тогда

$$G' = h \cdot f \cdot \gamma + h \cdot \frac{f}{F - f_0} \cdot f_0 \gamma,$$

откуда

$$p = h \cdot \gamma = \frac{G'}{f} \left(1 - \frac{f_0}{F} \right) \approx \frac{G'}{f}.$$

следить за тем, чтобы соединительные трубки не были слишком узкими, иначе заполнение большого объема длится слишком продолжительно.

Можно использовать как тягомеры также приборы с мембраной или с пластинчатой пружиной с тонкими и возможно большими пружинами различных конструкций (рис. 88). При измерении малых разностей давлений относительно атмосферы, в ветреные дни необходимо принимать соответственные меры предосторожности. Когда замечают, что в приключенной к основанию дымовой трубы U-образной трубке жидкость колеблется, то резкие колебания тяги в дымовой трубе могут быть вызваны влиянием шквалов на устье дымовой трубы.

Тогда только можно констатировать, что измеряемая в то время величина тяги не является постоянной. Колебания в приборе могут происходить также под влиянием ветра на открытое колено U-образной трубки, поэтому в подобных условиях такой метод измерения не применим, хотя такого влияния едва ли можно избежать. Если перейти на подветренную сторону дымовой трубы с открытым концом U-образной трубки (несколько удлиненной резиновой трубкой), то в данном случае ветер имеет такое действие, как при трубке Пито (§ 46) в соответствии с положением отверстия трубки к направлению ветра. При переходе на заветренную сторону прибор попадает в зону вихревых потоков дымовой трубы с переменным разрежением. Если зайти в комнату, то в ней, в зависимости от ее положения по отношению к ветру и от того, как открыты окна и двери, существует колеблющееся давление, вообще отклоняющееся от внешнего давления. Иными словами, это — попытка измерить величину, которая отвлеченно вовсе не является настолько определенной, чтобы ее можно было измерять в миллиметрах водяного столба или дробной его частью. Предохранить прибор от действия ветра нельзя, даже помещая прибор в футляр, так как давление внутри его, вне измерительного механизма, зависит от ветра, а также от неплотности футляра, точно так же как давление в комнате.

§ 31. Дифференциальные манометры. Каждый манометр измеряет разность давлений, существующих по обе стороны его измерительного органа. В большинстве случаев на одну сторону манометра действует атмосферное давление. Таким образом разность давлений двух пространств можно определить как разность показаний двух манометров. Дифференциальными манометрами называются такие приборы, которые дают непосредственные показания разности

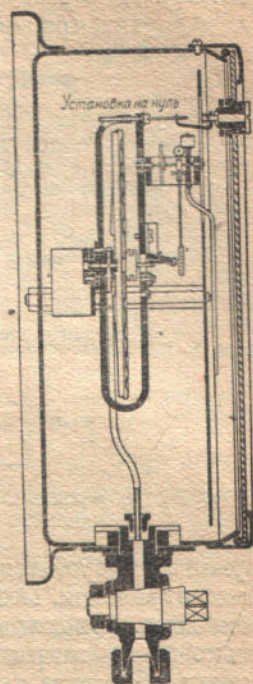


Рис. 88. Измеритель низких давлений фирмы «Аскания».

Уравнивание давления у измерительного колокола (рис. 153) при предположении $h = p/\gamma = \text{const}$, производится уменьшением груза G_1 .

При

$$G_1 + G = h \cdot f \cdot \gamma + A f_0 \cdot \gamma + \left(h \cdot \frac{f}{F - f_0} - H \right) \cdot f_0 \cdot \gamma,$$

где $G = A f_0 \cdot \gamma$.

Искомое

$$G_1 = \varphi \cdot (H) = h \cdot \gamma \cdot f \left(1 + \frac{f}{F - f_0} \right) - H f_0 \gamma.$$

Следовательно

$$- G' = H f_0 \gamma - G_0$$

при $G_0 = p \cdot f \cdot \frac{F}{F - f_0} \approx p \cdot f$; отсюда — кривая рис. 153.

давлений двух пространств относительно друг друга. Без дальнейших изменений жидкостные манометры большинства конструкций могут служить и дифференциальными манометрами (Л.). Для измерения более значительных разностей давления пружинный манометр можно переконструировать в дифференциальный (рис. 90). Из чертежа видно обычное для всех конструкций пружинных манометров и других приборов с круглой шкалой крепление

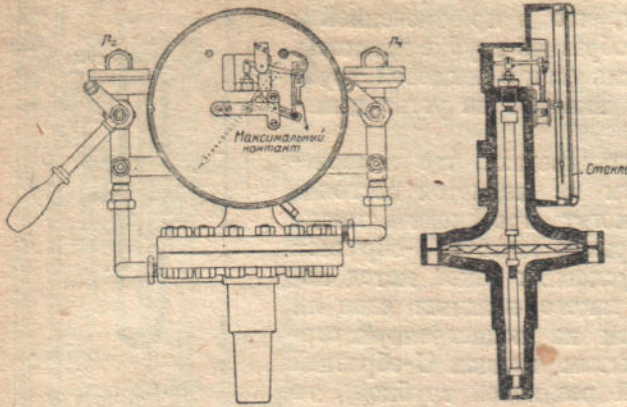


Рис. 89. Дифференциальный пластинчато-пружинный манометр фирмы «Эккардта».

пружина покоробится, а в ртутном манометре ртуть перегонится в пространство низкого давления. Поэтому на рис. 89 оба запорных крана взаимно связаны в своих движениях. Газоход может быть открыт только после закрытия кранов. Если закрыть оба крана, то в совершенно закрытом футляре прибора вследствие повышения температуры могло бы возникнуть давление (стр. 206), поэтому один из кранов делается трехходовым с небольшим боковым отверстием (как у

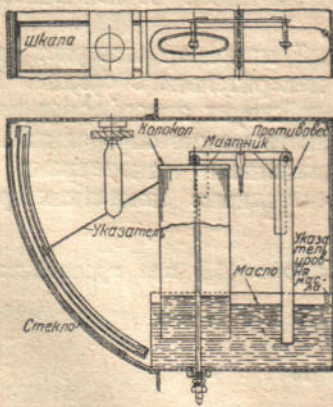


Рис. 90. Тягомер фирмы «Бейли Метерс».

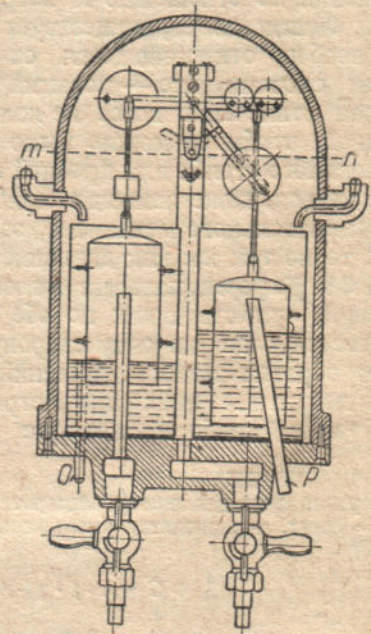


Рис. 91. Сдвоенный дифференциальный тягомер типа Шульце-Дош завода «Теплоприбор».

микроманометра, рис. 79). В соединении с трубкой Вентури (§ 79), дифференциальный манометр можно использовать для отсчета количества пара, протекающего в данный момент времени. При водяном напорном отоплении дифференциальный манометр служит для указания действительного перепада давления.

При установке дифференциальных манометров еще более, чем при установке обыкновенных манометров, необходимо обращать самое серьезное внимание на правильность монтажа (§ 34). В обоих соединениях, поскольку они устанавливаются вертикально, должен быть один и тот же наполнитель, например, вода без воздушных пузырей. Уровень водяного наполнения должен быть одинаковый с обеих сторон [как у шланг (рис. 70) или горшка рис. 100, 217]. Оба отверстия после наполнения манометра газом должны быть настолько широки, чтобы капли жидкости не заполняли их благодаря капиллярным силам.

Как нами ранее было указано, при устройстве центральных измерительных станций бывает необходимо расположить на одном щите большое количество тягомеров. Учитывая такую потребность, американская фирма Бейли - Метерс конструирует очень удобные тягомеры поплавкового типа с профильным футляром, где в одном футляре можно объединить от 2 до 12 тягомеров. У нас, в Советском Союзе, довольно распространенным типом дифференциального тягомера является изготовляемый заводом «Теплоприбор» в Ленинграде тягомер с двумя колоколами типа «Шульц-Дош». Конструкция такого сдвоенного тягомера указана на рис. 91 и заключается в следующем: в герметически закрытом корпусе имеются открытые сверху два цилиндра, наполненные запорной жидкостью (парафиновым маслом). В жидкость погружены два колокола-поплавка, под которые подведены две трубки, — одна для соединения с бором, другая — с атмосферой. Внутреннее пространство корпуса соединено с топкой. Возникающая разность давления и разрежения заставляет колокола перемещаться. Всякое же перемещение колоколов при помощи передаточного механизма вызывает соответственные отклонения стрелок по шкале, градуированной в миллиметрах водяного столба. (Прим. перев.).

§ 32. Измерители количеств. Несколько особенную конструкцию придают дифференциальным манометрам, применяемым в качестве показывающих приборов для дроссельных устройств. Так как количество пропорционально квадратному корню из давления, то и отклонения указывающего прибора должны быть пропорциональны этому корню, если хотят иметь для указания количества равномерную шкалу.

Ход большинства описанных в предыдущем параграфе манометров можно сделать пропорциональным уже не перепаду давлений, а корню квадратному из этого перепада, что особенно ценно при самопишущих приборах. Для прямого отсчета проще всего отградуировать шкалу прибора непосредственно согласно квадратичному закону. Недостаток (по сравнению с равномерными делениями в том, что при этом около нулевой точки деления получаются слишком узкими и отсчет неточным) является, согласно изложенному в § 7, только кажущимся.

На рис. 82 отклонения Δr профильной пластинки, вращаемой кольцевыми весами, пропорционально величине Δp , превращаются в движение пропорциональное $\sqrt{\Delta p}$, что, очевидно, зависит лишь от формы профильной пластинки; то же относится и к рис. 222. Движение ролика по профильной пластинке должно производиться по возможности без трения, так как появяющиеся от давления ролика на пластинку противодействия, по сравнению с перестанавливающими силами, бывают довольно заметными. Поэтому, представляется более удобным осуществить меняющуюся передачу между обеими подвижными частями посредством перекатывающегося рычага (согласно рис. 39), который мог бы выполнять по возможности чистое движение качения.

Для перехода на электрический отсчет показаний применяются обыкновенные ртутные U-образные или с наклонной трубкой манометры с впаянными в них платиновыми контактами. Снаружи эти контакты соединены между собой при помощи ступенчатых сопротивлений, которые, при повышении уровня ртути в манометре, последовательно замыкаются накоротко. Расстояния между контактами и сопротивлениями должны быть связаны квадратичной зависимостью (рис. 221). Внутри стеклянной трубки можно также поместить платиновую спираль с соответственно меняющимся шагом.

Вместо того, чтобы перемещения, сперва полученные пропорциональными давлению, затем превращать согласно квадратичной зависимости, можно отрегулировать прибор для непосредственных показаний пропорционально корню квадратному. Для этого делают либо внешнюю либо внутреннюю направляющую силу (§ 7) соответственно изменяющейся. В капсульных манометрах, изображенных на рис. 88, длина измерительной пружины изменяется посред-

ством переставляющегося упора, таким образом, при увеличении отклонений стрелки пружина становится жестче, и внешняя направляющая сила выше.

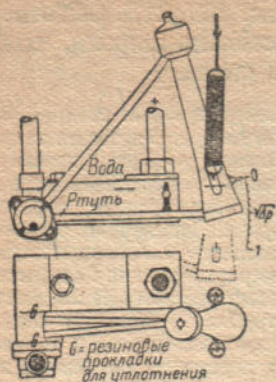


Рис. 92. Трубчатый треугольник с наполнением ртутью. Старая конструкция Гере.

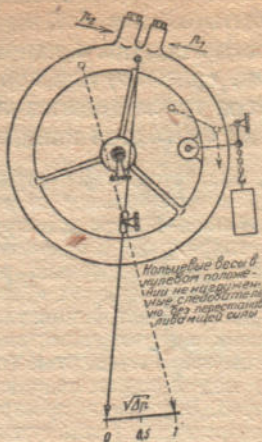


Рис. 93. Кольцевые веса с увеличенной внешней направляющей силой, фирмы «Дебро».

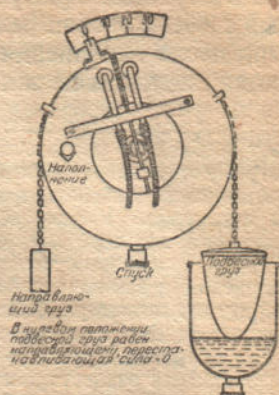


Рис. 94. Кольцевые веса с переменной вспомогательной силой, фирмы «Гидро».

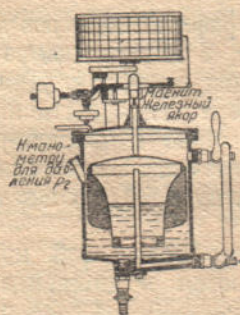


Рис. 95. Манометр с поплавком с переменным объемом фирмы «Фуэсс».

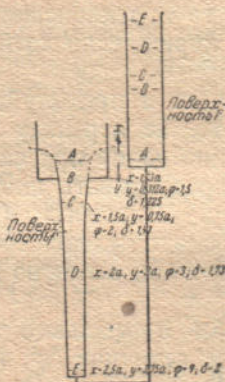


Рис. 96 и 97. К теории ртутного измерителя количества¹.



Рис. 92—97. Расходомеры, основанные на различных принципах действия.

Вместо этого способа внешнюю направляющую силу можно также хорошо регулировать при помощи второй силы; в конструкции кольцевых весов, изображенных на рис. 94, применен погружающийся в ртуть груз, которого возрастающее

¹ Должно быть $x + y = h$; $x^2 = a \cdot h$, следовательно $y = x \left(\frac{h}{x} - 1 \right)$. y становится равным нулю для $x = 0$ и $x = a$ (точка A).

$$y_{\min} = \frac{1}{4} a \text{ при } x = \frac{1}{2} a \text{ (точка S)}$$

$$x = n \cdot a \text{ соответствует } y = n \cdot a (n - 1) = (n - 1) \cdot x,$$

следовательно $\frac{y}{x} = n - 1$; $\frac{h}{x} = n$, следовательно также $x_{\max}/h_{\max} = 1/n$,

на рис. $n_m = 2,5 = EE : EZ = OA : OZ$.

Далее имеем: $f \cdot dy = F dx$; $dy/dx = F/f = \varphi$.

$$\varphi = \frac{dy}{dx} = \frac{2x}{a} - 1; \delta = \sqrt{\varphi} \text{ (отношение диаметров)}$$

$x = a$ соответствует $F = f$ (горизонтальная A), $x = \frac{1}{2} a$ соответствует $\varphi = 0$, т. е. $f = \infty$ (или $F = 0$).

поперечное сечение соответственно влияет на внешнюю направляющую силу. Тот же эффект достигается применением добавочного груза, перемещающегося по профильной пластинке; еще лучше — направляющим устройством, согласно рис. 93, действующим на кольцевые весы. Наконец, внутреннюю направляющую силу у трубчатого треугольника делают переменной таким образом. Подвешенный на измерительной пружине трубчатый треугольник, посредством своей оси, вращающейся в своеобразно уплотненных резиновыми манжетами прокладках, соединен с сосудом, наполненным ртутью и с противодавлением. Возникающая разность давлений производит давление на ртуть и гонит ее в треугольник, заставляя его опускаться, причем продолжающая притекать ртуть усиливает снижение треугольника до тех пор, пока, при соответственном положении, пружина не достигнет равновесия. В противоположность кольцевым весам ртуть находится и во вращающейся прокладке, и это является большим недостатком прибора Гере, в особенности при более высоких давлениях.

При надлежащем профиле сообщающейся трубки можно сконструировать и ртутные манометры с показаниями, пропорциональными корню квадратному (рис. 95 и 96). Указанное на рис. 95 правое колено — цилиндрическое, так как в нем должен перемещаться поплавочек; благодаря форме другого колена достигается движение поплавка согласно квадратичной зависимости. Приводимые при рис. 96 и 97 зависимости (Л.) разъясняют сущность дела. Из этих зависимостей следует, что в противоположном колене уровень ртути должен сначала повышаться, а затем падать, потому что парабола противоположного колена должна, при прямом равномерном подъеме ртути в колене с поплавком, коснуться точки O . Это требование, естественно, противоречит уравнению $F dx = f dy$ для количества содержащейся ртути, так как уровень в противоположном колене должен начать понижаться сразу. Поэтому для нижнего предела должна быть принята другая зависимость между h и x , путем замены участка параболы $OSAB$ наклонной прямой OB .

При наклоне прямой OB , равном $\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{4} \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{4}$, необходимо противоположное колено сделать цилиндрическим с сечением, равным $4F$ кверху от высоты B . Естественно, возникает вопрос, насколько целесообразным является прибор с такой своеобразной теорией. Ни в коем случае нельзя считать удовлетворительным, если, как это указано на рис. 96 и 97, линейное возрастание (ход) достигает 50% предела измерения; это имеет место при предположении, что отношение равно (рис. 97) $OA : OZ = n_m = 2,5$. Чем более высоким выбирают n_m , тем B ближе подходит к O , тем глубже и даже очень быстро также опускается E . Требование осуществить закон квадратичной зависимости близко к нулевой точке приводит, следовательно, к очень длинному и узкому противоположному. Образец такого конструктивного оформления дан на рис. 218 со значением для $n_m = 7,5$.

При конструировании измерителей количества используются многие из вышеупомянутых возможностей. Однако, следует отметить, что все типы оказываются ненадежными в пределах измерения, близких к нулевой точке, так как перестанавливающая сила для нулевого показания становится равной нулю; это обосновывается самим законом квадратичной зависимости и превращает всякий прибор, в пределах близких к нулевой точке, в прибор без направляющей силы, независимо от того, сделаны ли показания прибора пропорциональными корню квадратному непосредственно конструктивным путем или косвенным, при помощи соответствующей передачи.

Если нужно только регистрировать или планиметрировать, без механического суммирования, будет хорош следующий метод, при котором отпадает вопрос о точности такого превращения вблизи нулевой точки; на диаграмме записывается просто разность давлений, а диаграмма затем планиметрируется специальным планиметром (стр. 62), определяющим величину $\int \sqrt{y} dx$.

§ 33. Проверка и градуировка манометров; эталоны. Поршневой манометр. Самопишущий манометр. Пружинные манометры, ввиду исключительно эмпирического деления их шкалы, а также разнообразных изменений, которым подвергается их пружина, нуждаются в проверке. Проверку манометра следует

производить лишь в таком положении, в каком он будет в дальнейшем работать. Уже при изготовлении каждый манометр снабжается шкалой, изготовленной эмпирически, путем сравнения показаний манометра с показаниями нормального манометра. При всяком обследовании котельных установок, показания манометра проверяются по контрольному манометру. *Контрольным манометром* называется таковой, в футляре которого помещены два отдельных механизма и две стрелки, которые в исправном приборе дают совпадающие между собою показания. Для производства же первоначальной градуировки шкала контрольного манометра является слишком узкой.

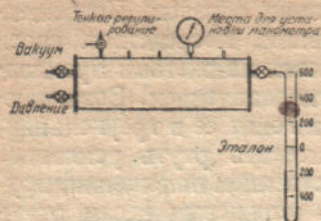


Рис. 98. Проверочная манометрическая станция с воздушным давлением.

Простейшим способом убедиться в исправности манометра, а также и других приборов, является проверка его нулевой точки. Пока стрелка выключенного прибора возвращается в нулевое положение, до тех пор такой прибор нельзя считать совершенно неисправным. Однако, этот контроль становится невозможным из-за наличия в большинстве манометров упорного штифта в нулевой точке. Поэтому следует или вовсе не ставить штифта или установить его позади нулевой точки, точно так же как в электрических приборах, лишь для остановки больших колебаний. При проверке манометров возникает (при измерении давлений) вопрос о том, что считать эталонами, которые дали бы возможность по другим признакам установить и измерить определенные давления. Для этой цели применяются жидкостные манометры. У них необходима лишь проверка длины делений шкалы, так как удельный вес заполняющей жидкости предполагается известным, как это, например, вполне точно установлено в отношении ртути и воды. В одноколенных манометрах необходимо установить правильность шкалы путем проверки соотношения поперечных сечений трубки и сосуда. Об этом, а также о проверке дифференциальных манометров с наклонной шкалой нами было упомянуто на стр. 87. Во всяком случае, жидкостные манометры легко проверяются без контрольного прибора, в то время, как пружинный манометр требует проверки путем сравнения его показаний с показаниями нормального прибора. Вследствие этого жидкостные манометры могут служить нормальными приборами после того, как подвергались проверке. Эта проверка, для умеренных давлений и для вакуума, производится устанавливаемым переменным давлением, лучше всего в динамическом равновесии, посредством поддерживающего давление воздушного резервуара, воздух из которого частично снова выпускается через тонкое, регулируемое отверстие (рис. 98). Пользуясь обоими запорными кранами, можно установить желаемое давление по нормальному прибору и таким путем сравнить с ним показания испытываемого прибора. Для более высоких давлений проверка производится ртутным манометром, изображенным на рис. 99 с отсчетом посредством зрительной трубы.

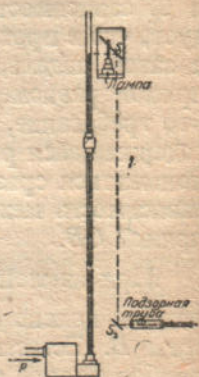


Рис. 99. Ртутный манометр для высоких давлений.

Затруднительно, однако, поддерживать температуру ртутного столба равномерной, или определить среднюю его температуру (например, измеряя сопротивление проволоки, проходящей около трубки), что ставит предел точности этого, кажущегося идеальным, эталонного прибора. Мартенс разделяет такой столб на несколько столбов, стоящих рядом друг с другом. Наконец, удобным нормальным прибором для высоких давлений является *поршневой манометр (поршневой пресс)*, изображенный на рис. 100. Поршень известного поперечного сечения нагружается гириями определенного веса. Под влиянием последнего, в жидкости под поршнем — масле или глицерине — возникает давление, определяемое непосредственно двумя вышеуказанными известными величинами.

При повышении давления поршень опускается все больше и больше, так как из цилиндра переходит в манометр или индикатор столько жидкости, сколько необходимо для заполнения пространства под поршнем индикатора

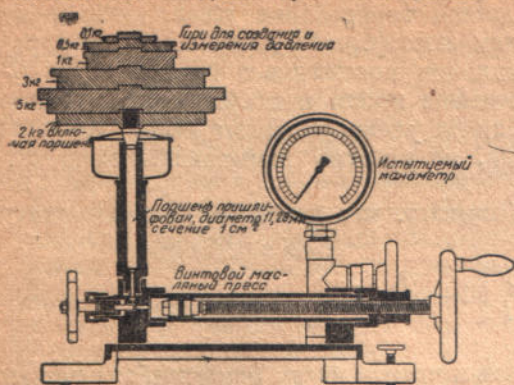


Рис. 100. Пресс Рухгольца.

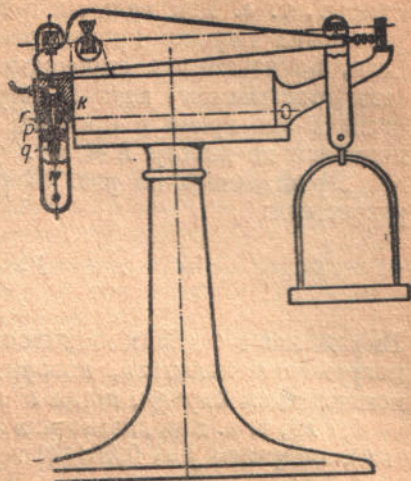


Рис. 101. Поршневой манометр для высокого давления, фирмы «Штюкрат».

и наполнения пространства в расширяющейся манометрической пружине. Вместе с тем потери из-за неплотности должны вызвать также понижение поршня. Вследствие этого возникает прежде всего ошибка, поскольку высота глицеринового столба соответствует величине погружения поршня. Эта погрешность имеет некоторое значение только при весьма малых давлениях, для проверки которых поршневой манометр вообще не пригоден. Кроме того, возможны случаи, когда поршень упирается внизу и дальнейшее измерение становится невозможным. Для устранения этого явления применяется пресс (рис. 100), соединенный с цилиндром. Этот пресс при надобности нагнетает глицерин так, что поршень остается на той же высоте. Поршневые манометры пригодны для использования при проверочных работах лишь в соединении с нагнетательным насосом и запасным сосудом для глицерина.

Кроме того, поршневой манометр непригоден для малых давлений еще и по причине трений, мешающих его нормальной работе, влияющих на поршень, даже если его поворачивать. По этим соображениям поршневой манометр применяется лишь для больших давлений (выше 2—5 ат), при которых ртутные столбы благодаря их длине будут весьма неудобны. Для очень высоких давлений, до 5000 ат, поршневые манометры изготовляются специальной формы с дифференциальными поршнями, у которых грузы подвешены снизу, либо с рычажной передачей для грузов, чтобы иметь возможность манипулировать с меньшими грузами (рис. 101) (Л.). Для измерения возникающей при движении поршня силы можно пользоваться обыкновенными весами с передвижной гирей. Поршневой манометр может быть устроен еще и для пружинной нагрузки. Для обычных измерений давления нерационально заменять удобный и надежный пружинный или мембранный манометр более сложным поршневым манометром; но это применение целесообразно, когда требуются более значительные переставляющие силы. Индикатор (глава VIII) представляет собой регистрирующий поршневой манометр с пружинной нагрузкой. Опыты по замене поршня пластиной не привели ни к чему, так как переставляющие силы в этом случае становятся недостаточными для преодоления инерции движущихся масс. Эти силы едва достаточны для преодоления трения пишущего карандаша. Поэтому, *самопишущие манометры* часто конструируются как поршневые. Точно так же, как и у индикатора, у поршневых манометров больше мешающих явлений, чем у пружинных манометров, вследствие затирания поршня в цилиндре.

Для проверки малых давлений применяют устройство, работающее по принципу поршневого пресса, каковым является *поплавковый поршень* (рис. 88),

состоящий из жесткого не очень слабого дна и тонкостенного точно изготовленного кругового цилиндра. Эта конструкция подвешена к весам, чтобы иметь возможность снова устанавливать ее по стрелке на одинаковую высоту. Первый раз эта установка производится посредством тарирования весов, когда кран открыт, т. е. при наличии под колоколом атмосферного давления; второй раз установка поршня производится при наличии положенного на нем груза G' (или, во избежание опрокидывания, на чашке весов) и посредством вдувания (или отсасывания) воздуха через кран снова уравнивают весы. Колокол стоит в это время в прежнем положении, но уровень замыкающей жидкости поднялся на высоту $h = p/\gamma$.

Приведенный на рис. 87 вывод показывает, что давление p определяется равенством:

$$p = h \cdot \gamma = \frac{G'}{f} \left(1 - \frac{f_0}{F} \right)$$

Выражение в скобках является поправочным членом ввиду меняющейся глубины погружения колокола, которым нельзя пренебречь при малых давлениях, за исключением случая, когда F велико. При внутреннем сечении колокола $f = 0,1 \text{ м}^2$, т. е. при диаметре в 357 мм в свету, применяя 1 мм жель (спай вприпык), получаем $f = 0,001121 \text{ м}^2$; в квадратном сосуде со стороной 400 мм, т. е. при $F = 0,16 \text{ м}^2$ имеем $(1 - \frac{f_0}{F}) = 1 - 0,0070 = 0,9930$. Так как при определении легко сделать ошибку в 5%, то четвертый десятичный знак всегда бывает ненадежен. При работе этим методом (Л.) необходимо следить за тем, чтобы смачивание стенок колокола все время было одинаковым и чтобы колокол не наклонялся. Для этого необходимо, чтобы его центр тяжести был перпендикулярным к центру напора и давления газа.

§ 34. Установка манометров. Для определения высоты напора водяного насоса, у нагнетательного воздушного колпака последнего необходимо установить манометр. Так как давление в воде понижается с высотой, примерно, на 1/10 ат на 1 м высоты, то показания манометра зависят от высоты места его установки. Манометр показывает давление, существующее в месте его установки, при условии, если он установлен ниже уровня воды в воздушном колпаке. Манометр, при соединении с воздушным пространством названного колпака, показывает давление воды на высоте уровня воды в воздушном колпаке. В виду того, что подачу под давлением насоса исчисляють от напорного колпака, то для производства отсчета по манометру исходят из разности высот между нагнетательным клапаном и манометром, в данном случае уровнем воды, причем эту разность следует прибавить или вычесть в зависимости от обстоятельств. Сказанное относится также и к высоте всасывания насоса, которую, как известно, также принято считать до нагнетательного клапана. При отсчете полного подъемного давления насоса необходимо проследить за показаниями манометра на всасывающей трубе и нагнетательно-воздушном колпаке. Недостаточно, однако, суммировать эти показания, но надо еще прибавить к ним разность высот расположения обоих манометров, в данном случае еще и высоту до уровня воды.

С другой стороны, необходимо правильно присоединить манометр к воздушному колпаку, а не непосредственно к водопроводной трубе. Когда вода течет в трубопроводе, то в месте отбора давления легко возникают вихри, которые приводят к измерению слишком малых давлений. Именно это имеет место в случае, когда края просверленных отверстий не очищены тщательно от заусениц. Если приходится отбирать давления в таких узких трубопроводах, где очистка от заусениц невозможна, то приходится просверливать трубы насквозь, используя исходящие отверстия, не имеющие внутри никаких заусениц.

Вследствие мешающих явлений, возникающих у входного отверстия, измерение давления протекающей в трубопроводе жидкости или газа является всегда затруднительным. Так Бюхнер (Л.) констатировал разности от $1/4$ до $1/3$ ат, в зависимости от того, закруглял ли он края входного отверстия или нет; это было, впрочем, при больших скоростях пара (около 400 м/сек), в тур-

бинных насадках. Закругление краев таких отверстий, следовательно, необходимо, но зачастую оно невыполнимо.

Впрочем, и теоретически получаются различные величины; так, например, в трубопроводе текущая вода обладает кинетической энергией и потенциальная ее энергия, т. е. давление будет меньше, чем в воздушном колпаке. При обычных скоростях воды, редко превышающих 2,5 м/сек, эта разность мала, а именно $h = \frac{w^2}{2g} \approx \frac{6,2}{20} \approx \frac{1}{3} \text{ м Н}_2\text{О}$. Этой разностью можно зачастую пренебречь, но в случае необходимости следует обсудить, желательнее ли измерение полной энергии в воде или только измерение чистого давления. В воздушном колпаке, установленном перед трубопроводом, давление при одинаковой высоте расположения манометра совпадает с полным давлением, существующим в трубопроводе; в воздушном же резервуаре, установленном за трубопроводом, по существу измеряется лишь внутреннее давление, подводящееся через трубопровод к воздушному колпаку при условии, что динамическое давление посредством конического расширения не превращено в статическое. При этом рассуждении в расчет не принималось влияние трения в трубе на измеряемые в различных местах давления.

Отсчет давления пара легко может быть искажен под влиянием столбов жидкости, образующихся в паропроводах, ведущих к манометру, от конденсации пара, вследствие чего показания манометра могут быть слишком большими, то слишком малыми, в зависимости от того, подымается ли

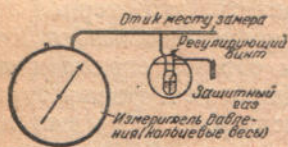


Рис. 103. Защита манометра от коррозии защитным газом.

кверху или опускается книзу паропровод по пути к манометру.

Необходимо поэтому позаботиться о том, чтобы такие столбы не образовались, или нужно вводить поправку на них при вычислениях. Если манометры паровой машины сосредоточены на общем манометрическом щите, то подводка к ним пара осуществляется через тонкие медные трубки, которые легко могут исказить показания на 2 м Н₂О = 0,2 ат. Такая погрешность слишком велика даже и при высоких давлениях. Часто манометры вертикальных трубчатых котлов бывают установлены так

низко, что показывают на $\frac{1}{2}$ ат более, чем давление в котле. Так как манометрическая проводка образует охлаждающую поверхность, то пар конденсируется внутри проводки. Конденсат остается внутри проводки, если последняя идет в направлении сверху вниз к манометру; в другом случае сомнительно, вся ли вода сбежала по направлению к паропроводу или только часть ее. Простого наклона, наклона трубки к манометру достаточно для внесения ясности в этом отношении, коль скоро давление длительное время оставалось постоянным. Если давление уменьшается, то это значит, что вода вытесняется лишь из измерительной проводки, общая же проводка остается заполненной и поправка остается та же. При повышении давления, однако, вода вытесняется из части проводки; для установления поправки достаточно длинную часть измерительной проводки проложить горизонтальной и тогда лишние воды теряет свое значение. Эту часть горизонтальной проводки иногда свертывают еще в форме спирали, если условия испытываемого пространства делают такую форму желательной (рис. 70). Другим средством является установка небольшого водоприемника в начале измерительной установки, который соединен с паропроводом посредством широкой, устроенной в форме водослива, подводящей трубы, в то время как измерительная проводка ответвляется под водой (рис. 101). По установке водоприемники измерительная проводка наполняются водой, в широком же водосливе воды никогда не бывает. Вследствие ширины приемника понижение уровня воды даже при сильном повышении давления бывает лишь незначительным. Однако, широкая проводка не должна быть изолированной, по крайней мере во время измерения давления перегретого пара;



Рис. 102. Уравнительный водоприемник манометрической проводки для измерения давлений пара.

в то время, когда пар в перегретом состоянии поступает в водоем, в последнем вода начинает испаряться. При очень горячем паре, широкие проводки должны быть еще достаточно большой длины и наполнены горячей водой, проводка же к манометру — холодной (Л.).

Возможно еще и появление трудностей из-за явления капиллярности; когда широкая водосливная трубка (рис. 102) соединена с проводкой узким отверстием, в этом узком месте образуются капли, которые, вследствие поверхностного давления, производят заметное избыточное давление на ту или иную сторону. Средством против этого является нагнетание в уравнительный водоем воздуха (лучше азота); даже слабый воздушный поток, направленный в паропровод, сохраняет отверстие свободным. На рис. 103 показано аналогичное устройство с защитным газом. Если газ, давление которого необходимо измерить, действует разрушительно на материал манометра, то в измерительную проводку нагнетают из баллона немного воздуха или какого-нибудь индифферентного газа. Таким образом агрессивный газ удаляется из манометра, не влияя заметно на измерение, даже при большой ширине трубопровода. Эти сложнейшие установки применяются довольно редко при измерении давления пара, при измерении же низких давлений, в особенности вакуума, могут быть существенные погрешности. Такие установки, однако, необходимы в тех случаях, когда желательно произвести измерение незначительных перепадов давления паромерами с нормальной диафрагмой (§ 90).

§ 35. Давление пара и температура; барометрическое давление. Измерение давления насыщенных паров с успехом можно заменить измерением их температуры, так как при низких давлениях повышение температуры особенно велико по сравнению с повышением давления. Помимо того, показания термометров более постоянны, чем манометров. Следует отметить, что термометр в таких случаях измеряет абсолютное давление, манометры же показывают избыточное давление. Термометр должен быть надлежащим образом огражден от явлений лучеиспускания и теплопроводности (§ 121). Давление и температура являются величинами однозначными лишь в том случае, если речь идет о чистом, насыщенном паре. В конденсационных установках или при выпуске пара конденсационной паровой машины, где имеется смесь воздуха с паром, замена измерения давления измерением температуры не всегда допустима. В подобных случаях температура может иметь любое значение между двумя пределами, с одной стороны — границей кипения и с другой — границей конденсации. Кипение наступает тогда, когда температура переходит ту ее величину, которая, согласно кривой давления, соответствует полному давлению паро-воздушной смеси. Конденсация же начинается тогда, когда температура падает ниже ее величины, сопряженной с парциальным давлением пара. Любая из промежуточных температур при данном давлении может быть между указанными двумя границами. Только при полной уверенности в наличии условий для верхней границы, так например, после сильного падения давления (но не после падения температуры), можно определить величину полного давления по температуре.

Определение *барометрического давления*, обязательное при всяком испытании машин, можно произвести посредством наблюдения точки кипения воды, в особенности при переездах, так как ртутный барометр, как известно, плохо переносит перевозку, анероиды же от толчков изменяют свои показания. Если отсчет производится по местному барометру, то необходимо убедиться не только в надежности прибора.

Если для высоты барометра пользуются данными, печатаемыми в метеорологических сводках газет, необходимо учесть, что эта высота барометра указывается приведенной к уровню моря. При испытаниях же интерес представляет исключительно фактическая высота барометра. Необходимо, следовательно, оставить в стороне принятое метеорологами приведение к уровню моря. Необходимо, воздушный столб соответствующего давления и отсчитанной температуры, высотой равной высоте места над уровнем моря, пересчитать на ртутный столб. При умеренных высотах, на каждые 10 м высоты над уровнем моря из давлений, указанных в метеорологических сводках, следует вычесть по 1 мм ртутного столба.

V. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ И СКОРОСТИ

§ 36. Секундомер. Время измеряется часами, минутами и секундами. Секунда — одна из основных единиц технической системы мер.

Для измерения времени служат часы. Простые карманные часы достигают такой точности, как никакой другой технически применяемый измерительный прибор. Если часы уходят вперед или запаздывают на одну минуту в день, то и это кажется очень много, а между тем ошибка здесь только в $\frac{1}{1440}$, или 0,06%.

Так называемое «часовое время» дается, примерно, в форме 3 ч. 25 м. 21 с.; от этого часового времени, до некоторого другого, 5 ч. 47 м. 32 с., протекает промежуток времени в 2 ч. 22 м. 11 с. Таким образом, часовое время отличают от указаний промежутков времени постановкой обозначений единицы времени вверху.

К сожалению, различие между часовым временем и промежутком времени проведено постановлением АЕФ¹ только для наименований, но не символа обозначений этих величин, в качестве которого для обеих величин введена буква t . Эта буква во многих случаях вводит в заблуждение тем, что ею обозначается температура t . Определенности ради, следовало бы удержать t для обозначения времени, а температуру выражать через θ^* . Между двумя часовыми времени t_1 и t_2 лежит промежуток времени $t_2 - t_1$, который мы будем обозначать через z .

Промежуток времени z будет, следовательно, измеряться как разность двух часовых времен. Неточности при таком измерении зависят меньше от самих часов, а больше от того, что отсчеты по часам начального и конечного времени производятся неточно. Эта погрешность будет относительно тем меньше, чем больше промежуток времени, в течение которого производится наблюдение — абсолютная же величина ее остается постоянной.

Точнее, чем обыкновенными часами, можно измерять промежутки времени с помощью секундомера. У секундомера большая секундная стрелка обегает весь циферблат в течение одной минуты. Циферблат разделен на пятые доли секунды. Эта стрелка не движется постоянно, но пускается в ход одним нажимом на кнопку (служащую одновременно и для завода), а вторым нажимом опять останавливается. Промежуток времени между обоими нажимами можно отсчитать с точностью до одной пятой секунды. Третье нажатие ставит большую стрелку на нуль. Маленькая шкала позволяет определить, сколько полных оборотов-минут пробежала большая стрелка.

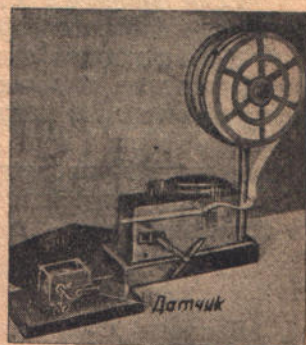


Рис. 104. Хронограф с тремя записывающими перьями.

111

¹ АЕФ — Комитет по единицам и формулам (в Германии).

* ОСТ 6394 рекомендует для обозначения времени применять буквы t или τ ; для температуры по 100° шкале — t или θ ; для абсолютной температуры — T или Θ . Буквы θ и θ применяются в тех случаях, когда T и t заняты для обозначения других величин.

Существуют также двойные секундомеры с двумя останавливающимися стрелками различного устройства.

Там, где при долгих исследованиях делаются отсчеты по секундомеру, рекомендуется сначала сделать одновременно отсчет на обыкновенных часах, чтобы при нечаянном нажиме на секундомер (когда последний остановится) не пропал опыт.

Важнейшим измерителем времени является также движущаяся бумажная лента. Самопишущие приборы должны иметь своей абсциссой время (§ 13), их диаграммные ленты должны быть разделены на часы и подразделения часа. Как собственно измеритель времени, бумажная лента используется в хронографах по рис. 104. Целый ряд перьев, до 18, наносят отметки, одну около другой, на движущейся ленте, причем одна из отметок обозначает время, остальные отметки — наступление определенных явлений (рис. 105), время появления которых таким

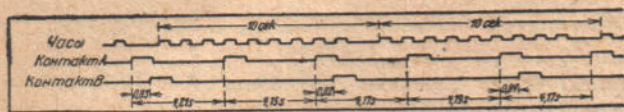


Рис. 105. Ленточная запись хронографа рис. 104.

образом точно устанавливается. Предполагается, что между двумя отметками времени бумажная лента движется равномерно; если бы это можно было принять и для более длинных промежутков времени, то отметки

времени были бы ненужными. Обработка хронографных лент утомительна.

Если движение стрелки приборов регистрируется кинематографически, то одновременно фотографируются и часы.

§ 37. Единицы скорости. Под линейной скоростью v поступательно движущегося тела понимают отрезок пути, пройденный его центром тяжести в единицу времени. Ее можно найти, наблюдая пройденный в определенный промежуток времени z путь s или наблюдая употребленный для прохождения определенного пути промежуток времени z ; оба способа не всегда равноценны (§ 17). Затем определяют частное из пути на промежуток времени. Если путь берется в метрах, а время в секундах, то скорость получается в $м/сек$.

$$v \left[\frac{м}{сек} \right] = \frac{s[м]}{z[сек]} \quad (1)$$

Единица $м/сек$ для скорости поступательного движения является наиболее употребительной. На железных дорогах скорость определяется в $км/час$, для кораблей — в морских милях в час. Один километр в час составляет $\frac{1000 м}{3600 сек} = 0,278 м/сек$; 1 морская миля/час = $\frac{1853 м}{3600 сек} = 0,515 м/сек$; считают 1 морскую милю/час = 1 узлу; узел (но не узел/час) относится всегда к часу и представляет единственное прямое наименование скорости.

При вращении тела около оси, только точки, лежащие на равном расстоянии от нее, имеют равные скорости, точки же, различно удаленные от оси, имеют и различные скорости, пропорционально своему расстоянию от нее. Здесь, следовательно, нельзя попросту говорить о скорости тела. Так как однако, *отношение* скорости v каждой точки к ее расстоянию r от оси одинаково для всех точек, то это отношение характеризует такое движение. Это отношение $\omega = \frac{v}{r}$ есть *угловая скорость* тела. Так как v имеет наименование $м/сек$, а r имеет наименование $м$, то наименование или размерность угловой скорости будет $1/сек$ или $сек^{-1}$. Угловая скорость измеряется углом, пройденным в единицу времени, но угол математически безразмерное число: 180° математически = $\pi = 3,1416$.

Единицей меры технической скорости в технической системе мер является такая скорость, при которой угол в 1 радиан = $180^\circ / \pi = 57^\circ 17' 34'' = 57,296^\circ$ будет пройден в одну секунду времени, она, следовательно, будет $1 рад/сек$; точки, лежащие на расстоянии 1 м от оси, будут при этом иметь скорость $1 м/сек$.

Эта единица не употребительна для измерений, но в отдельных случаях приходится к ней обращаться, именно тогда, когда угловую скорость желательно привести в соотношение с другими единицами, как например, при определении необходимого веса маховых колес или при исследованиях по методу затухания движений (§ 102).

Общепотребительным выражением угловой скорости является выражение ее числом оборотов в минуту. Так как $1 \text{ об/сек} = 2\pi \text{ рад/сек} = 60 \text{ об/мин}$, то

$$1 \text{ рад/сек} = \frac{\text{об}}{\text{мин}} \cdot \frac{60}{2\pi} = 9,55 \text{ мин}^{-1} \quad (2a)$$

или

$$100 \text{ об/мин}^{-1} = 10,47 \text{ рад/сек}. \quad (2b)$$

Относительно наименования величин следует заметить следующее: когда мы говорим о 10 оборотах, которые машина сделала в течение какого-нибудь измерения, то мы мыслим это число независимо от времени, в которое они были сделаны; машина, следовательно, могла идти и медленно и быстро. Число же сделанных в минуту оборотов кратко называется просто *числом оборотов* машины. Это наименование всегда, таким образом, включает в себе ссылку на минуту, как на единицу времени. Наименование числа оборотов будет: *об/мин* или *мин⁻¹*, поэтому следует писать: машина имеет число оборотов 50/мин. Хуже выявляется размерность при способе написания: машина делает 50 об/мин. Для числа оборотов обычным символом является *n/мин*. Для показания счетчиков оборота, т. е. для абсолютного числа оборотов мы будем употреблять букву *u*.

Таким образом, если во время t_1 , показание счетчика будет u_1 и во время t_2 показание счетчика — u_2 , то (если $t_2 - t_1$ исчисление в минутах) будет

$$n/\text{мин} = \frac{u_2 - u_1}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

Здесь следует, пользуясь случаем, указать еще на различие понятий угловой скорости ω и числа оборотов n ; какой-нибудь вал с постоянным числом оборотов может тем не менее иметь меняющуюся в течение одного оборота угловую скорость; постоянная угловая скорость значит больше, чем постоянное число оборотов.

По новому способу обозначения частота какого-нибудь периодического явления измеряется в *герцах*: 1 герц = $1 \text{ сек}^{-1} = 60 \text{ мин}^{-1}$. Для обозначения числа оборотов эта единица пока не находит применения. Трехфазный ток должен иметь период в 50 *гц*, поэтому синхронные двигатели работают с числом оборотов 3000, 1500, 1000, 750 *мин⁻¹*.

§ 38. Обзор методов измерений; соотношение между линейной и угловой скоростью. Линейная скорость газов и жидкостей может быть измерена при помощи специальных приборов, из которых в дальнейшем будет описана напорная трубка Пито. Для измерения числа оборотов служат тахометры. В остальном скорость вообще может быть измерена на основании формулы (1): при жидкостях—вертушкой Вольтмана, при газах—анемометром определяют путь, проходимый через прибор жидкостью или ветром, точно так же корабельным лагом¹; той же вольтмановской вертушкой определяется путь, проходимый кораблем против воды. Поступательная скорость твердого тела может быть также измерена путем перевода ее в угловую скорость и в число оборотов (Л.).

Как производить такой перевод, покажут два примера: скорость паровоза или автомобиля можно измерить, определив число оборотов одного из его колес. Пусть это число будет $n/\text{мин}$, а D м пусть будет диаметр колеса, тогда πD будет окружность колеса, которое оборачивается $\pi/60$ раз в секунду: следовательно $\frac{\pi D n}{60}$ будет окружной скоростью колеса одновременно и скоростью движения поезда в *м/сек*, так как колесо не должно скользить по рельсам. Тахометр, который определяет число оборотов колеса, можно прямо отградуировать в *км/час*. Его показания будут неточными тогда, если колесо изнашивается или будет буксовать. Скорость приводного ремня измеряют, прижимая к ремню ролик известного диаметра D и определяя его число оборотов. Необходимо убедиться в том, что ролик не скользит по ремню. Из числа оборотов ременного шкива

¹ Лаг Марья и др.

нельзя точно определить скорость ремня, так как ремень обязательно скользит по шкиву, если он только передает работу. Благодаря тому же растяжению, скорости обоих шкивов, ведущего и ведомого, также заметно отличаются друг от друга.

§ 39. Счетчики. Число оборотов вала определяется на основе формулы (3), посредством счетчиков оборотов; их десятичная передача была уже выяснена при рис. 46. Колесо единиц посредством храповика (трещетки, анкера) передвигается так, что при каждом обороте машины оно подается вперед на один зубец. Храповик, подобно изображенному на рис. 49, имеет, следовательно,

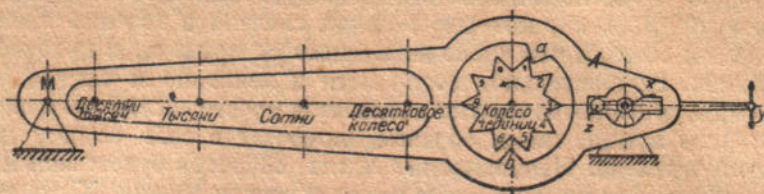


Рис. 106. Анкерная передача.

десятизубое колесо, но составную собачку по рис. 49 при счетчиках оборотов не целесообразно применять. При анкере (рис. 106), который качается около точки *M* вперед и назад, когда палец *z* ходит вперед и назад или же равномерно вращается, выступ *a* нажимает на зуб *1*, вслед за тем другой выступ *b* нажимает зуб *c* вперед по направлению вращения колеса единиц. Основное различие с анкерным ходом часов заключается в том, что анкерный ход только задерживает, в то время как анкер счетчика доставляет также и движущую силу.

Храповики и анкер работают надежно только при умеренных скоростях. Снабженные ими счетчики можно, в зависимости от особенностей конструкции, употреблять до числа оборотов 200 или 400. При *больших числах оборотов* избегают подобных приводов и колесо единиц приводят в движение посредством десятичной передачи (рис. 46). Диск вращается тогда непосредственно самим валом; этот диск цифр не имеет; он передвигает при каждом обороте машины левое колесо на $\frac{1}{10}$ оборота дальше, которое теперь служит как колесо единиц

и приводит в действие десятовое колесо и т. д. Таким образом, отсутствуют части, движущиеся взад и вперед, и получается вполне непрерывная¹ передача (удерживающая скоба храпового механизма не работает принудительно), поэтому достигают значительно высших чисел оборотов, хотя при числах оборотов больших, чем 1000/мин, отсчет единиц на ходу делается невозможным и толчкообразно движущиеся части более изнашиваются. Такие счетчики нельзя также приводить в движение от движущихся вперед и назад машинных частей. Для

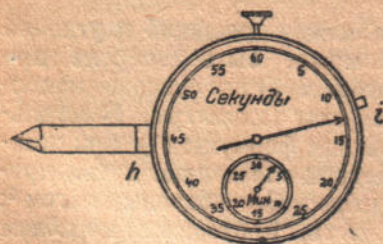


Рис. 107. Ручной счетчик оборотов.

еще больших скоростей применяются только счетчики с равномерно движущимися частями. Отсчет производится по ряду стрелок, оси которых связаны зубчатой передачей с отношением 1 : 10 и которые передвигаются вокруг кругообразных шкал, позволяющих отсчитывать единицы, десятки, сотни Отсчет по стрелкам менее удобен, чем по перескакивающим цифрам.

Чтобы найти число оборотов машины, отсчитывают положение счетчика (стр. 60) в начале и затем в конце какого-либо периода времени, который должен быть по возможности длинным. Так как можно отсчитывать только полные обороты, от отсутствие дробных частей, так же как и неточность в моментах отсчета, теряет свое влияние при более длинных промежутках времени. Чтобы найти среднее число оборотов в течение одного часа, не следует считать через

¹ Принудительная.

каждые десять минут по одной минуте, но надо отмечать каждые десять минут показания счетчика: разница между конечным и начальным показанием, разделенная на 60, дает среднее число оборотов; промежуточные отсчеты после 10, 20 . . . минут служат для контроля равномерности хода машины.

Ручные счетчики состоят большей частью из соединения секундомера и собственно счетчика. Оба одновременно пускаются в ход, если трехгранное острие вжать в керн вала настолько, что маленькая гильза h (рис. 107) будет отжата против действия пружины. Когда трехгранное острие отнимают от вала, то счетчик и секундомер одновременно останавливаются и тогда не торопясь можно произвести отсчет по обоим. Затем полученное количество оборотов делится на время, которое может быть отсчитано с точностью до $\frac{1}{5}$ сек. Отсчет по счетчику производится на стороне прибора, невидимой на рисунке. В отношении приводов сравн. стр. 106.

§ 40. Тахометры. Тахометры дают мгновенное значение скорости машины (ее соответственное число оборотов) простым отсчетом положения указателя. При вращении вала прибора возникают силы, перемещающие указатель, большей частью преодолевая сопротивление пружины, составляющей измерительную часть прибора. На рис. 108 изображен тахометр с центробежным маятником, имеющим крестообразный подвес; вал установлен на шариках, а тахометр, механизм которого делает от 250 до 2000 об/мин, приспособляется к числу оборотов машины, при посредстве зубчатой передачи. Вместо скрещенного маятника применяется также кольцевой маятник (рис. 109), у которого замкнутый кольцевой круг становится с возрастанием числа оборотов все более и более перпендикулярно к своей оси. На рис. 109 изображен ручной тахометр, снабженный переменной скоростью, как у автомобиля, с помощью которой и подбирается область измерения. Воздушное демпфирование крылышками помогает спокойной установке стрелки.

Теория тахометров (Л.) — теория центробежных регуляторов с пружинной нагрузкой. Каждому числу оборотов должна отвечать одна определенная установка указателя. Вращающиеся массы отходят от своей внутренней опоры, как только при определенном числе оборотов n_0 центробежная сила преодолет предварительное натяжение пружины. При расхождении вращающихся масс как центробежная сила, так и противодействующее ей напряжение пружины возрастают, но это еще не значит, что при некотором числе оборотов $n > n_0$ вообще будет достигнуто состояние равновесия. Именно, если центробежная сила будет при расхождении грузов возрастать быстрее, чем сопротивление пружины, то она все больше и больше будет приобретать перевес над последней и, наконец, вращающиеся массы сразу перейдут в свое крайнее положение, до своего внешнего упора. Поэтому сопротивление пружины должно возрастать быстрее, чем центробежная сила. Это должно быть при каждом положении маятника (статическое действие, в противоположность астатическому).

У индукционного тахометра свободно установленный на шариковых подшипниках вал несет на своем конце кольцеобразный стальной магнит, который охватывается сверху алюминиевым колоколом. Вращающийся магнит возбуждает в алюминиевом колоколе вихревые токи Фуко, которые стремятся увлечь последний. Измерительная пружина удерживает колокол от вращения, но позволяет ему отклоняться по направлению вращения, при том тем дальше, чем выше число оборотов магнита. Такое устройство всегда само по себе статично.

Индукционные тахометры, в противоположность почти всем прочим формам, отвечают на оба направления вращения и соответственными отклонениями

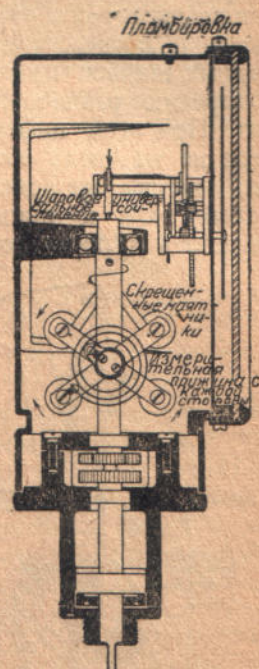


Рис. 108. Тахометр со скрещенными маятниками $\frac{1}{3}$ натур. величины, фирмы Морель.

в разных направлениях. Такие тахометры редко употребляются, шкала их бывает неудобной, так как невозможно иметь безнулевую шкалу.

Как специальную форму можно упомянуть *жидкостные тахометры*; *гиро-метр* Брауна представляет частично наполненный жидкостью стеклянный цилиндр, вращающийся около своей вертикальной оси; по глубине параболического понижения зеркала жидкости можно судить и о числе оборотов.

Привод к тахометрам чаще всего осуществляется посредством ременной передачи от того вала, число оборотов которого желательно измерить. Ременной шкив тахометра подбирается при этом так, чтобы тахометр работал с подходящей скоростью. Поэтому все фирмы выпускают только немногие типы тахометров, отличающиеся друг от друга областью измерения, т. е. *отношением* наименьшего числа оборотов к наибольшему, и посредством различных ременных шкивов приспособляют их к измерению различного числа оборотов. При этом циферблат градуируется не на число оборотов тахометра, но на измеряемое число оборотов вала и показания должны включать и передаточное число; об-

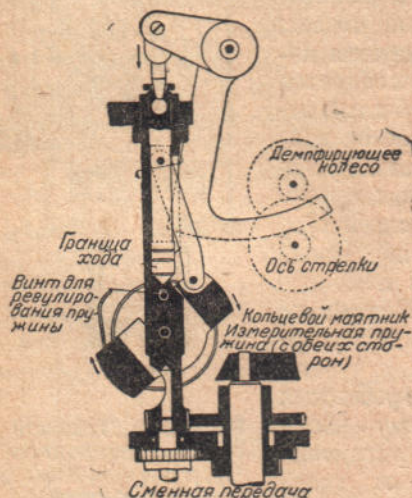


Рис. 109. Механизм ручного тахометра с кольцевым маятником 1,5 натур. величины, фирмы «Пирбом и Шюрман».

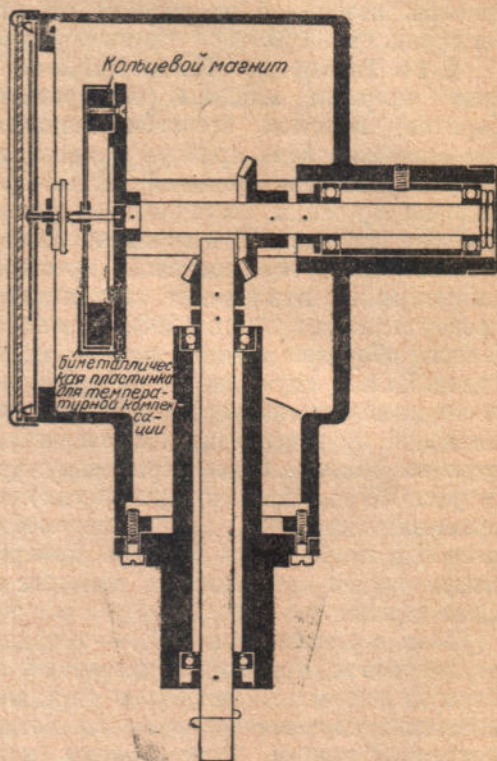


Рис. 110. Индукционный тахометр, $\frac{1}{3}$ натур. величины, фирмы «Шеффер и Буденберг».

ласть измерений тахометра должна лежать между 1 : 2 и 1 : 6. Более широкая область измерений хотя и увеличивает применимость прибора, но только за счет его точности. Индукционные тахометры должны отсчитывать, начиная с нуля.

Приводной ремень должен быть равномерным, сшивка не должна образовывать утолщения; иначе стрелка инструмента испытывает толчки. Употребительны резиновые ремни с пеньковыми прокладками и пеньковыми полосками; кожаные ремни должны быть тонкими и склеиваются, а не сшиваются.

Весьма надежным является гибкое соединение измерительного прибора с валом посредством проволоки толщиной от $\frac{3}{4}$ до 1 мм. Сперва проволока несколько скручивается, затем надежно забирает как при большей длине, так и в том случае, если она любым образом изогнута. Только при этом неравномерности хода тотчас не передаются, и проволока действует как демпфер. Еще лучше стальные спирали из проволоки толщиной в 0,5 мм с диаметром витка в 5 мм. Если их нужно отводить под прямым углом (радиус закругления не менее 30 мм), они снабжаются (для повышения их устойчивости) кожаным сердечником.

Если при этом стрелка тахометра, благодаря резонансу, приходит в колебание, то проволочную спираль укорачивают или насаживают на ось тахометра маховой диск, массу которого подбирают путем проб.

Ручной тахометр должен применяться по возможности для всех машин, начиная от паровой турбины с несколькими тысячами оборотов, до насоса, может быть, лишь с 40 оборотами в минуту. Широкая область измерений обуславливает мелкие деления шкалы и неточность отсчета. Тахометр, механизм которого построен для числа оборотов от 125 до 500, можно применять и сделать пригодным и для других чисел оборотов, применяя сменные зубчатые передачи. При этом тахометр может получать область измерения, примерно, с 40 до 160; 125 до 500; 400 до 1600; 1250 до 5000/мин, и путем включения той или другой зубчатой передачи, простым передвижением кнопки, становится пригодным в общем от 40 до 5000/мин. Во всех этих случаях ось собственно тахометра делает от 125 до 500/мин. Циферблат имеет несколько нумераций, причем по той или другой и производится отсчет. Переключение области измерения производится от руки передвижением особой кнопки; существуют также приборы с самодействующей установкой области измерения.

Керн на валу только тогда надежно удерживает трехгранное острие, когда он сам обработан на три канта. Иначе легко возникает скольжение, особенно если вместо трехгранника употребляют в качестве сцепления резиновый конус. Особенно внимательно нужно следить за тем, чтобы острие или резиновый наконечник вставлялись в керн вала центрально и по направлению оси. Если же резиновый наконечник вертится в ямке керна, несколько не совпадая с осью, то тахометр может показывать совершенно другие числа оборотов в том числе и значительно высшие, чем делает сам вал.

§ 41. Сравнение. *Счетчик и тахометр* дополняют друг друга, и при испытании на машине часто имеются оба прибора. В § 12 уже было рассмотрено различие между тахометром как показывающим прибором, который указывает мгновенные значения скорости и ее колебания, и счетчиком оборотов, который суммирует эти мгновенные скорости и тем позволяет подсчитать среднюю скорость в течение одной минуты, одного часа и т. д. На производстве или при регулировке машины тахометр удобнее; при исследовании же расхода пара желательно знать среднее число оборотов, которое счетчик оборотов дает непосредственно и весьма точно, тахометр же — значительно менее точно особенно, если он нехорошо выверен и если отсчеты берутся недостаточно часто.

Поэтому в правилах для испытания мощности поршневых машин определено установлено, что измерение числа оборотов должно производиться посредством счетчика оборотов. Однако, это следовало бы установить по отношению к методу измерения, а не роду машины: при индицировании и при тормозных испытаниях число оборотов входит в результат измерения, поэтому здесь предпочтительнее определять число оборотов счетчиком. Измерение электрической мощности независимо от измерения числа оборотов, поэтому измерение тахометром здесь вполне достаточно. При определении коэффициента полезного действия важно установить, входит ли число оборотов и в числитель и в знаменатель или только в один из них. У парового поршневого насоса, у которого количество поданной воды определяется из размеров ныряла, на основании известного объемного коэффициента полезного действия, число оборотов входит в результат, как множитель пропорциональности, в индикаторную мощность и парового цилиндра и насосного цилиндра, а также и в полезную работу поднятой воды. Поэтому число оборотов в выражении коэффициента полезного действия взаимно сокращается. У турбодинамо число оборотов не входит ни в измерение количества пара, ни в электрические измерения, поэтому влияет на коэффициент полезного действия только косвенно. При поршневой пародинамо, наоборот, индикаторная мощность определяется при помощи числа оборотов, а электрически отдаваемая мощность — без пользования этим числом. Образованный из них обеих коэффициент полезного действия поэтому зависит от измерения числа оборотов. С другой стороны, *счет* оборотов становится целесообразным, когда поведение машины особенно сильно зависит от числа оборотов, как напри-

мер, при центробежном насосе, который работает при большей геометрической высоте подачи.

Преимущества счетчика оборотов выступают при выводе среднего числа оборотов при колеблющейся скорости.

Для определения постоянного числа оборотов (постоянного как для длинного промежутка времени, так и равномерного в течение одного оборота) приме-

ним и большей частью достаточно точным является тахометр, если он хорошо выверен.

§ 42. Дистанционные тахометры. Для передачи на расстояние при измерении скоростей, как и везде, особенно применимы те методы, которые дают возможность электрической передачи по двум проводам.

Маленький электрический генератор, лучше всего переменного тока (рис. 111), развивает в своем якоре напряжение, возрастающее вместе с числом оборотов. Если использовать его в качестве датчика, то можно в качестве

приемника включить вольтметр и отградуировать его в числах оборотов (рис. 112 внизу).

Как приемник при том же самом датчике (который тогда обязательно должен быть переменного тока), может быть использована резонансная гребенка

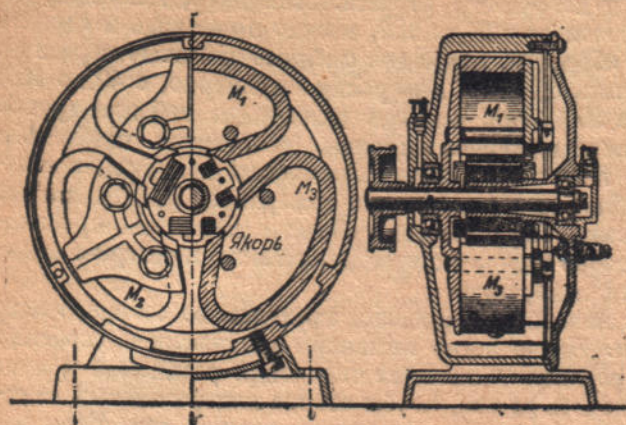


Рис. 111. Датчик для передачи на расстояние показаний тахометра.

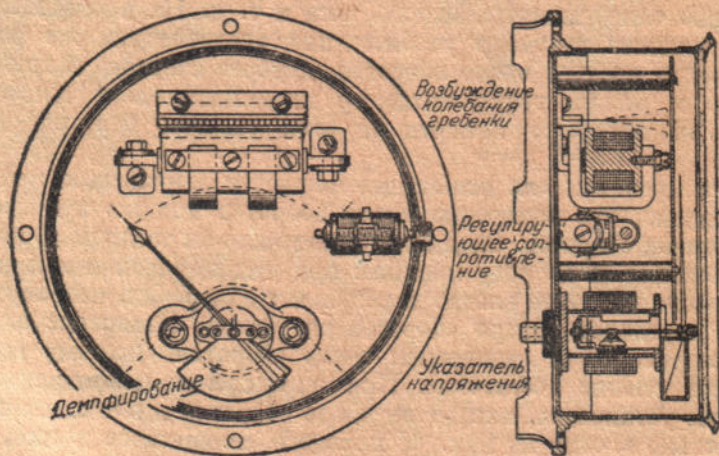


Рис. 112. Приемник дальнего действия тахометра.

Фрама (рис. 112, сверху). На общей поперечине укреплен ряд плоских стальных пружин, которые на своем свободном конце коротко загнуты в виде головки; их вес при помощи напайки и спливания оловянного груза подгоняется так, чтобы собственное число колебаний каждой пружины приняло определенное значение. Если несущая пружины поперечина будет подвержена периодическим импульсам определенной частоты, то в движение приходят те пружины, собственное число колебаний которых будет вполне или приблизительно совпадать с частотой колебаний возбудителя. Наибольшие размахи наступают при полном резонансе. Если каждая следующая из пружин гребенки делает на $1\frac{2}{3}$

колебаний больше, чем предыдущая, то число оборотов можно отсчитывать через каждые 5 оборотов и еще оценивать промежуточные значения. Изображенный на рис. 110 указатель напряжения дает показания с широкой областью измерения, что удобно при пуске машины. Гребенка, при ограниченной области измерения, дает вблизи рабочего числа оборотов очень широкие деления шкалы. Показания гребенки независимы от сопротивления проводки, так как здесь идет речь о своеобразном случае *импульсной передачи*, являющейся противоположностью передаче *интенсивностей*. Импульсная передача менее зависима от источника тока и прочих помех, но часто требует сложной специальной аппаратуры; одна из них приведена на рис. 38. Таким образом можно при помощи регулирующего сопротивления отрегулировать по гребенке указатель напряжения.

Для возбуждения гребенки достаточно поставить прибор на машину, если последняя идет достаточно быстро для числа периодов гребенки (от 900/мин или 15 *гц*) и потому не нужно увеличивающей передачи. Для небольших расстояний может применяться механическое возбуждение при помощи эксцентрика и передачи проволокой.

§ 43. Неравномерные скорости. Для изменения неравномерных движений необходимо пользоваться механическими вспомогательными средствами, так как глаз не в состоянии достаточно быстро и точно улавливать отсчеты.

При изменении нагрузки меняется число оборотов каждой машины, а именно, увеличивается при разгрузке и уменьшается при перегрузке. Этому естественному явлению противодействует регулятор, который имеет задачей при всяких нагрузках удерживать машину на почти постоянном числе оборотов. Пока регулятор этого достигнет, проходит некоторое время. Поэтому число оборотов машины колеблется в ту и другую сторону, но тем менее, чем лучше действует регулятор.

Поршневые машины, кроме того, показывают и в течение единичного хода неравномерности, которые так и называются неравномерностью хода машины. Эти неравномерности вызваны тем, что движущая сила действует периодически и в мертвой точке часто равна нулю в то время, как сопротивление остается постоянным или изменяется по другому закону. Держать эту неравномерность в умеренных границах — по существу задача махового колеса.

Если мы сперва ограничимся менее быстро проходящими колебаниями от регулирования, то излюбленным средством для их наблюдения будет тахограф Горна (рис. 113). На вращающейся раме *B* расположены два маховых груза G_1 и G_2 , притягиваемые друг к другу измерительной пружиной *F*. Центробежная сила грузов преодолевает упругую силу пружины. Перемещение маховых грузов, посредством системы рычагов, проходящих сквозь полый вал, передвигает наполненное специальными чернилами пишущее перо *S*, которое и пишет на бумажной ленте. Пружины рассчитаны так, что при числе оборотов вала тахографа 500 в минуту перо приходится как раз посередине диаграммной ленты; для этого ремень на ступенчатом шкиве *A* переводится на такой шкив, чтобы при нормальном ходе машины число оборотов тахографа было 500 в минуту. Для приведения пишущего пера в его оба крайние положения необходимы отклонения от этого нормального числа оборотов в $\pm 12\%$. Соответственно этому бумажная лента, проходящая перед пером, снабжена делениями, как видно на рис. 114. Пружины тахографа могут сменяться на такие, которые достаточны

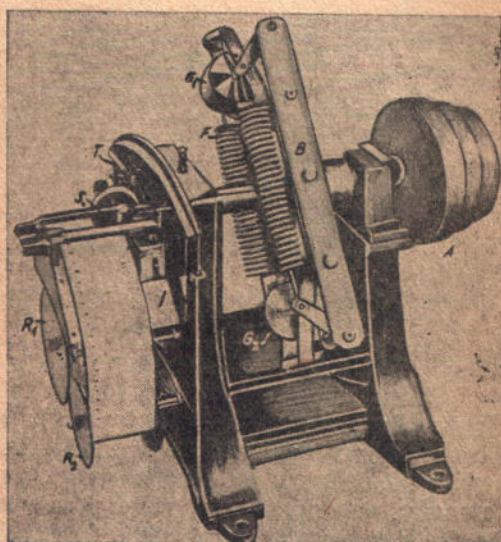


Рис. 113. Тахограф Горна.

только для изменений скорости в пределах $\pm 6\%$ или до $\pm 3\%$. Сходящая с вала тахографа диаграммная лента подается вперед фрикционными роликами, механизм которых у T позволяет регулировать ход ленты, а также его останавливать. Лента сходит с ролика R_1 и в данном случае наматывается на другой ролик R_2 .

После пуска в ход необходимо произвести каждый раз простое определение масштаба передачи. Для этого при установившемся ходе машины замечают, например, положение пера $+ 2,4\%$ и одновременно счетчиком определяют число оборотов машины в 121,2 в минуту. Тогда будет $102,4\% = 121,2/мин$, и отсюда $100\% = 118,2/мин$ будет средним числом оборотов; установка пера на $- 6\%$ будет, таким образом, указывать число оборотов машины $118,2 \cdot 0,94 = 111,1/мин$.

На диаграммной ленте (рис. 113) начерчена кривая, полученная при разгрузке поршневой паровой машины.

Скорость бумажной ленты колеблется вместе со скоростью машины. Поэтому при точных исследованиях предпочтительно привести ленту в движение от отдельного электромотора или от часового механизма.

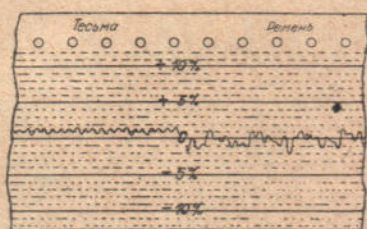


Рис. 114. Влияние привода на тахограмму.

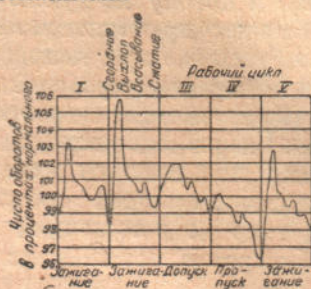


Рис. 115. Тахограмма газового двигателя (по Гюльднеру).

Тахограф не может следовать за колебаниями в промежутке одного отдельного оборота настолько быстро, чтобы можно было выводить заключение о действительных изменениях скорости за такой промежуток. Это объясняется тем, что его собственное число колебаний слишком велико, но главным образом потому, что приводной ремень или лента всегда не вполне равномерны и уже потому вызывают колебания (рис. 114).

Несмотря на эти оговорки, тахограф является полноценным прибором для изучения достаточно медленно протекающих колебаний (рис. 115). Но он недостаточен там, где его область измерения, не превышающая $\pm 12\%$, слишком мала, как при исследованиях пуска в ход или явлений затухания, когда приходится наблюдать ход машины после выключения движущей силы или определять, как быстро можно пустить ее в ход. Для судовых машин весьма важны подобные испытания способности маневрировать. У насосных машин возникает при регулировании гораздо большие неравномерности, чем их может отметить тахограф. При употреблении же других, более жестких пружин, он делается недостаточно чувствительным. В таких случаях можно употреблять самопишущие тахометры (в сущности обычные тахографы, часто так и называемые), имеющие более широкую область измерения.

Для более точных исследований на сбегавшей ленте делают отметки пути и времени. Исследования Фрамом (Л. З) неравномерностей хода валов судовых машин, особенно различий движения вала в различных местах, т. е. колебаний вращения судовых валов, стали для этого метода классическими.

Фрам накладывал вокруг фланца вала цинковую оксидированную полоску. Штифт, благодаря электрическому действию, пишет на полоске белые штрихи, когда через него проходит ток. Этот ток посредством электромотора прерывается определенное число раз в секунду. Поэтому, при постоянной скорости вращения штрихи будут везде на одинаковом расстоянии друг от друга; неравномерные расстояния между штрихами означают неравномерные скорости и позволяют их измерять. Подобно этому Клонне и Рунге натягивали на маховик стальную ленту, а находящиеся на ней отверстия прерывали ток. Для

записи можно пользоваться изображенным на рис. 104 хронографом или при кратковременных записях — осциллографом (сравн. § 103).

§ 44. Гидрометрическая вертушка. Важнейшим прибором для измерения скорости воды в течениях рек, в турбинных лотках и т. п. является гидрометрическая вертушка *Вольмана*.

Рабочей частью ее является лопаточное колесо, изображенное на рис. 116 в двух исполнениях, которые по выбору могут быть установлены в корпусе, где находится измерительный механизм (Л.).

Лопатки образованы как математическая винтовая поверхность, заканчивающаяся на ступице; косые лопатки, отлитые заодно со ступицей, лучше обходят водоросли. Вертушки, у которых жестяные лопатки припаяны к спицам ступицы, менее подвержены влиянию, которое оказывает на показания косая установка вертушки относительно направления потока. Если винтовая поверхность имеет, например, шаг $k = 0,48$ м, то лопатка должна теоретически делать 2,08 оборота на 1 м пути воды, протекающей вокруг лопатки. Для вертушки, работающей без трения и прочих сопротивлений, путь воды, проходящей сквозь вертушку, пусть будет $s = \frac{1}{2}k \cdot u$, где u есть приходящееся на s количество оборотов вертушки. Пусть это соотношение будет независимо от скорости воды v м/сек или от числа оборотов вертушки n сек⁻¹. Беря производную по t от уравнения $s = k \cdot u$, получаем теоретическое уравнение

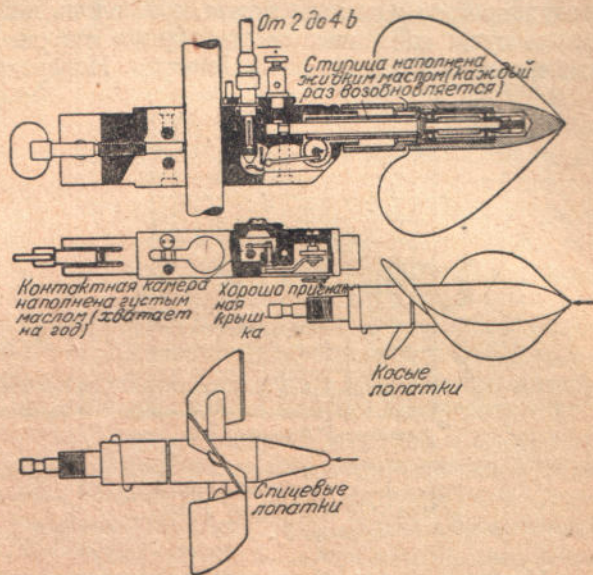


Рис. 116. Гидрометрическая вертушка $\frac{1}{4}$ натур. величины, фирмы «Отт».

$$v = k \cdot n. \quad (4)$$

На диаграмме это изобразится прямой, проходящей через нулевую точку.

Эмпирически уравнение вертушки определяют, буксируя ее в стоячей воде и наблюдая как скорость буксирующей тележки, так и число оборотов вертушки. Из ряда подобных испытаний получается диаграмма в виде ряда точек, которые хорошо укладываются на линию. Последняя, однако, вовсе не является прямой, проходящей через нуль. Характеристическая линия вертушки при более высоких скоростях представляет линию, близкую к прямой, но которая на диаграмме $v = f(u)$ для $n=0$ еще дает для v конечное значение. Этому отвечает уравнение вертушки:

$$v = k \cdot n + a, \quad (5)$$

как это, например, принимает М. Шмидт (Л.) в своей известной работе. При малых скоростях силы трения делаются заметными и характеристическая линия пересекает ось ординат выше O . Согласно выводам Отта (Л. 100) можно написать следующее уравнение

$$v = \frac{a + a'}{2} + \frac{k + k'}{2} n + \sqrt{\left(\frac{a - a'}{2} + \frac{k - k'}{2} n\right)^2 + c^2}, \quad (6)$$

в котором постоянные a , a' , k , k' и c имеют значение, определяемое геометрически по рис. 117а, на котором характеристическая линия вертушки является гиперболой; асимптоты и полуось c гиперболы указаны. Так как гипербола на рис.

117а оказывается слишком плоской, то на диаграмму наносят, одновременно и для определения, на основании измеренных точек пяти постоянных (k уже известно, как шаг винтовой лопатки), следующее соотношение $\Delta = v - k \cdot n = \psi(n)$. Эта кривая (рис. 117б) отчетливо показывает кривизну при малых значениях v . Как из такой полученной градуировкой кривой вывести остальные четыре постоянные, можно прочесть у Отта или Штауса (Л.).

Если характеристическая линия (в той области измерения, в которой вертушкой постоянно будут пользоваться) проходит через нулевую точку или по крайней мере протекает прямолинейно, то это является ценным свойством вертушки.

При колебаниях скорости воды или при завихрениях в массе жидкости, полученной за известное время, путь вдоль лопаток не будет равен пройденному водою пути; найденные средние будут неверны. Необходимо делать более короткие интервалы между наблюдениями. Измерение отнимает больше времени (Л.).

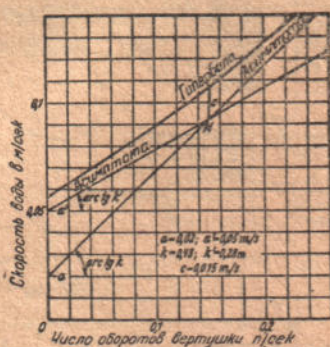


Рис. 117а. Нижняя часть диаграммы вертушки (формула б).

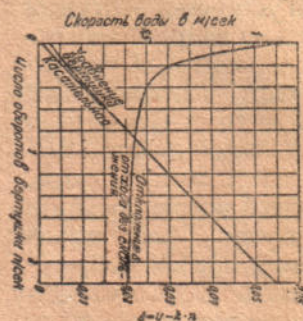


Рис. 117б. Уравнение вертушки по Отту.

Уравнение и характеристика относятся к потоку воды по направлению оси вертушки. При косом направлении потока число оборотов вертушки убывает несколько быстрее, чем косинус угла наклона потока ψ , величина погрешности составляет около 1,5 ($1 - \cos \psi$).

Косого направления потока избегают тем, что делают вертушку поворотной на своей штанге (рис. 116); или можно убрать штангу и, пуская вертушку, снабженную направляющим плавником, совершенно свободно на шнуре (для чего служат видные на рис. 116 отверстия в теле вертушки), можно устранить влияние уклонения потока от горизонтали. Однако, если измерения вертушкой должны служить для исчисления количества жидкости, проходящей через определенное сечение, то вертушка не должна следовать по направлению потока, так как здесь речь идет о слагающей, перпендикулярной к исследуемому сечению, которая, согласно сказанному, точно не улавливается и неподвижной вертушкой. Конечно, существует также подвижной подвес вертушки с регистрацией меняющейся установки. Это может дать наилучшие результаты, если только вычисления не покажутся слишком сложными.

Изображенные на рис. 116 лопатки имеют 120 мм в диаметре. Они бывают и большими, а для употребления в узких желобах или трубах изготавливаются и меньшими. Понятно, что, в известных границах, предпочтительнее вертушка больших размеров (благодаря большему балансу энергии). Существуют также формы вертушек, у которых лопаточная ось расположена далеко впереди. Наряду с электрической регистрацией, применяются и механические счетчики, которые имеют тот недостаток, что для отсчета их вертушку каждый раз приходится вынимать из воды. В общем, электрический отсчет себя зарекомендовал. Даются звуковые сигналы и наблюдают по секундомеру, или лучше по часам, продолжительность от сигнала к сигналу. Для больших рядов наблюдений записывают при помощи хронографа как сигналы времени, так и сигналы вертушки рядом на одной ленте (рис. 105). Именно для измерений скоростей воды применяются хронографы для записи до 18 точек (Л. 87).

§ 45. Анемометр. Анемометр также имеет силовой механизм, на который воздействует измеряемая сила ветра и измеряющий механизм. Как силовой механизм служит или крыльчатое колесо (рис. 118) или крест с чашками (рис. 119). Измерение производится счетчиком (рис. 118), или электрически (рис. 119) или посредством тахометра (рис. 120).

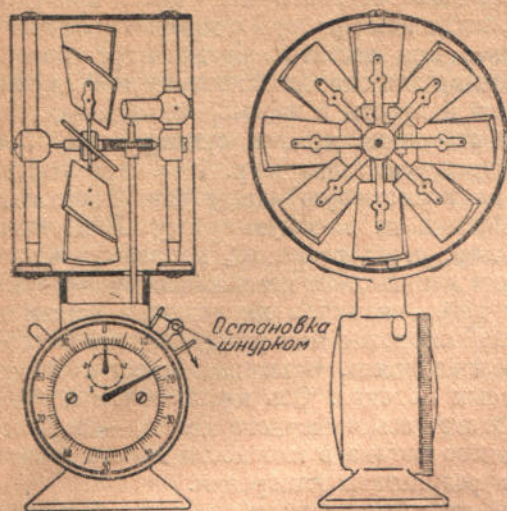


Рис. 118. Крыльчатый анемометр с отсчетом по циферблату, $\frac{1}{2}$ натур. величины, фирмы «Фюесс».

Крыльчатое колесо состоит из ряда звездообразно расположенных вокруг вала крыльев, которые стоят наклонно к плоскости, перпендикулярной к оси. Дующий по направлению оси ветер, попадая на крылья, будет стремиться вызвать вращение, которое, как у вертушки Вольтмана, при свободном от сопротивлений ходе, сообщило бы колесу угловую скорость такой величины, чтобы осевое перемещение винтовой поверхности сравнялось со скоростью ветра. Во всяком случае, здесь можно говорить только о средних величинах, так как лопасти делаются плоскими. При среднем наклоне в 45° к перпендикулярной оси плоскости, центр тяжести лопаток должен получить скорость, равную скорости ветра. Если лопатки будут наклонны под углом меньшим, чем 45° к плоскости колеса, то скорость вращения будет больше скорости ветра. Благодаря этому возникают значительные центробежные силы, а также проявляется давление ветра по направлению оси, пока колесо еще не приобрело скорости ветра, как например, при внесении его в поток, причем такое давление временно бывает односторонним. Поэтому крыльчатым колесом можно измерять только умеренные скорости ветра, так как при больших скоростях прочности колеса угрожает опасность.

Чашечный крест¹ состоит из вращающегося около оси креста, концы которого несут полые шаровые чашки.

Плоскости сечения полушарий проходят через ось и все полушария расположены так, что при одном направлении вращения все впадины приходятся на обратной стороне. Поэтому ветер всегда встречает, с одной стороны, обращенное к нему вогнутое полушарие, а с другой, — выпуклое. На оба он производит давление, которое, однако, бывает больше у того полушария, которое обращено к ветру вогнутой стороной, в полость которой ветер вдувается. Это происходит потому, что обратное взаимное смыкание воздушных струек за шаровой чашкой бывает менее турбулентным тогда, когда струйки обтекают поверхность, следуя кривизне шаровых чашек, чем в противном случае. Отсюда возникает более сильное понижение давления на заветренной стороне того полушария, выпуклая шаровая поверхность которого является направляющей для ветра. Так как только разница действующих на обе половины креста давлений является действующей силой, то скорость центра тяжести чашек отстает от скорости ветра и составляет только около $\frac{1}{3}$ этой скорости. Благодаря меньшим центробежным силам чашечный крест более подходит для больших скоростей ветра, чем крыльчатое колесо. К этому необходимо прибавить и то, что чашечный крест сам по себе устойчивее, а также в особенности то, что при постепенном внесении



Рис. 119. Анемометр с чашечным крестом, с электрическим контактом.

¹ Или крест Робинзона.

его в канал не возникает никаких вредных сил, а только вращающие силы даже тогда, когда прибор еще только частью погрузился в поток.

Крыльчатое колесо применимо для скоростей самое большое до 10 м/сек¹, чашечный крест до скоростей в 50 м/сек. Наоборот, чашечный крест пригоден для скоростей только от 1 м/сек и выше, тогда как приборы с крыльчатым колесом, при применении слюдяных крыльев при достаточном диаметре колеса (например 150 мм) можно сделать пригодными для скоростей воздуха до 0,1 м/сек.

Крыльчатое колесо измеряет среднюю скорость в области охватывающего его кольца оправы. Действие ветра на отдельные крылья суммируется. Это свойство весьма ценно при измерениях перед решетками (стр. 157). При чашечном кресте, напротив, действие ветра на тормозящую чашку (по отношению к ветру — выпуклую) вычитается из действия на ведущую чашку. В местах неравномерном воздушном потоке, например, перед решеткой, показания могут быть поэтому больше, чем наибольшая или меньше, чем наименьшая существующая в потоке скорость. Это зависит от того, окажется ли ведущая чашка в области большей, а тормозящая — меньшей скорости или распределение скоростей по сечению потока окажется противоположным. Чашечный крест поэтому подходит только для свободных воздушных потоков. Ось крыльчатого колеса должна стоять вдоль по направлению потока, ось чашечного креста — перпендикулярно к нему; направление воздушного потока в плоскости колеса может изменяться в пределах 20°, не влияя на результаты измерения.

При пульсирующем потоке чашечный крест показывает слишком большую скорость, доходящую до 22% больше средней; если пульсации протекают синусоидально, то разница падает до нуля (Л.).

Если для отсчета скоростей употребляется счетчик, то последний бывает снабжен вращающимися стрелками. Для исследований не представляет ценности возможность втсчитывать путь ветра в миллионы метров, так как редко имеется надобность измерять пути ветра больше, чем в 100 или в крайнем случае — 1000 метров. С другой стороны, наличие указателей высших порядков отражается на ходе прибора и повышает стоимость. Поэтому следует пользоваться прибором лишь с таким числом указателей, какое действительно необходимо. Наблюдение посредством электрических звуковых сигналов (рис. 119) удобнее, когда приходится производить многократные наблюдения. Для одного единичного отсчета установка батареи и звонка всегда сопряжена с потерей времени. Для того, чтобы сигналы не сливались, контакт дается только каждые десять или сто оборотов. Имеются также реле, которые, как вспомогательный прибор, сокращают число сигналов до $\frac{1}{10}$ или $\frac{1}{100}$.

Приборы (рис. 118 и 119) измеряют путь, пройденный ветром, навстречу которому поставлен прибор. Чтобы найти скорость, одновременно определяют по секундомеру время и подсчитывают из обоих показаний скорость. Как и при вольтмановской вертушке необходимо внести поправки, величина которых определяется предварительной выверкой.

В противоположность таким приборам, *анемометр* измеряет скорость ветра непосредственно. С чашечным крестом, как силовым механизмом, соединен полный тахометр, указывающий число оборотов его оси, шкала которого может быть отградуирована непосредственно в м/сек. Измерение поэтому производится значительно скорей и удобней. К сожалению, прибор показывает скорости, начиная от 3 м/сек, и не может изготовляться очень малых размеров. При малых делениях шкалы анемометра точность отсчета нельзя довести до точности анемометра. В последнем, путем увеличения времени наблюдения, точность отсчета может повышаться почти безгранично. Однако, при увеличении времени отсчета начинает сказываться меняющаяся турбулентность и температура воздуха (§ 46). Однако, очень мало известно, насколько сильно такие влияния изменяют показания анемометров.

Для выверки анемометров нельзя прибегать к буксированию их сквозь неподвижный воздух, так как здесь дело идет о слишком больших скоростях.

¹ Если снабдить анемометр устройством, пропускающим только часть воздуха через щель, то предел применения крыльчатого анемометра можно расширить до 30 м/сек.

Прибор ставят на конец горизонтального рычага центробежного аппарата. Прибор приводится во вращение около вертикальной оси в спокойном состоянии воздуха. По длине рычага и числу оборотов находят скорость, которую сообщил анемометру. То обстоятельство, что движенае анемометра является криволинейным, при не слишком малой длине рычага и подходящей установке прибора (ось чашечного креста в плоскости вращения), должно иметь мало влияния. Более значительным может быть влияние центробежной силы частей анемометра, которая может вызывать заметные добавочные напряжения в осях и заметное добавочное трение в подшипниках.

Затем, благодаря *попутному ветру*, вызываемом вращающимся рычагом, нельзя считать, что анемометр движется в неподвижном воздухе, поэтому при такой выверке он показывает слишком мало. Необходимо, по возможности, защитить анемометр от попутного ветра, помещая его выше или ниже плоскости вращения системы рычагов. Несмотря на это, влияние попутного ветра или поддувания сохраняет свое значение при градуировке.

Другой способ градуировки анемометром заключается в следующем.

При анемометрах с крыльчатым колесом помещают окружающий его ободок на конце трубы такого же диаметра и продувают через эту трубу воздух, количество которого измеряется каким-либо другим способом (глава VI). Если V будет секундное количество воздуха в кубических метрах и F — сечение отверстия трубы и обода анемометра в квадратных метрах, то скорость воздуха будет $v = \frac{V}{F}$ м/сек.

Оказывается, что проверка на центробежном аппарате (градуировка при *свободном течении*) и проверка по количеству воздуха (градуировка при *принудительном течении*) не дают совпадающих результатов. При некоторой скорости воздуха анемометр показывает больше в том случае, когда, при *принудительном течении*, воздух должен пройти сквозь наружную оправу анемометра, чем в том случае, когда при проверке со *свободным течением* воздуху предоставляется избрать более удобный путь около прибора. Поэтому при *свободном течении* в сечении обода анемометра бывают меньшие скорости воздуха, чем снаружи.

Проверка при *свободном течении* является решающей, если поверяемым анемометром пользуются на открытом воздухе, хотя бы для измерения скорости ветра.

Здесь, как и при проверке, внутри обода получатся меньшие скорости, чем снаружи. Если же измерять скорость воздуха в трубе того же диаметра, как оправу анемометра, решающим будут результаты проверки с *принудительным течением*. Наконец, в случае, когда необходимо определить скорость воздуха в сечении, которое нельзя рассматривать как бесконечное по сравнению с размерами анемометра, нужно пользоваться промежуточными значениями между результатами проверки при *свободном* и *принудительном течении*. Правила VDI для вентиляторов (Л.) предусматривают, что, если анемометр, градуированный на центробежном аппарате, показывает в роторе, шириной 300 мм, скорости на 3% больше, а в более узких — до 11% больше, то это удовлетворяет условиям поставки.

Статические анемометры имеют крыльчатое колесо или чашечный крест, как и вышеописанные, но только последние не вращаются, а под влиянием скорости воздуха лишь отклоняются на некоторый угол, сжимая пружину, и отклоняются тем более, чем больше скорость. Значение этой скорости, как и при анемометре, можно непосредственно прочесть по шкале без употребления часов. Однако, точность существующих статических приборов, насколько

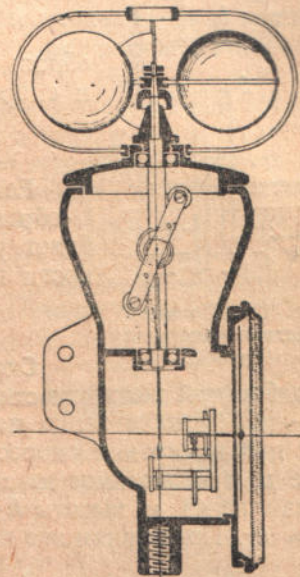


Рис. 120. Анемометр фирмы «Морелль».

нам известно, только умеренная. Их устанавливают скорее как показательные, чем измеряющие приборы на путях воздушных потоков для производственного контроля.

§ 46. Напорные приборы. (Трубки Пито). На рассмотренном в § 27 соотношении между статическим, динамическим и полным давлением основан ряд весьма удобных приборов для измерения скоростей жидкости и газов.

Если две трубки, из которых одна обрезана под прямым углом, а конец другой загнут вперед (навстречу потоку), опустить в жидкость, текущую со скоростью v , то жидкость устанавливается в каждой из них на различной высоте. В трубке a , обрезанной под прямым углом, жидкость устанавливается на высоте зеркала (приблизительно), а в трубке b , изогнутой навстречу потоку, жидкость устанавливается выше на высоту скоростного напора $h = \frac{v^2}{2g}$. Разность h [м] обеих уровней жидкости дает, таким

образом, непосредственно скоростный напор и скорость будет

$$v = \sqrt{2gh} \text{ м/сек.} \quad (7)$$

Если жидкость всосать в перевернутую U-образную трубку по рис. 120, то отчет будет удобнее. Разница высот столбов жидкости представляет скоростной напор:

$$h = v^2/2g.$$

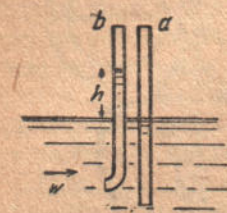


Рис. 121. Принцип действия напорных трубок.

Скоростной напор должен измеряться столбом той же жидкости, скорость течения которой определяется. Если почему-либо нежелательно пользоваться таким столбом или это невозможно, хотя бы при измерении скорости воздуха, переходят к измерению давления. Давление p , производимое на свое основание столбом жидкости или газа удельного веса γ кг/м³ и высоты h [м], дается в кг/м² или в мм вод. столба выражением $p = h\gamma$. Подставляя это в формулу (7), получаем

$$v = \sqrt{2g \frac{p_d}{\gamma}} \text{ м/сек.} \quad (8)$$

Это соотношение сводит измерение скорости на измерение соответствующего ей динамического давления p_d .

Предположение, что напор измеряется столбом той же протекающей жидкости, большей частью не оказывается верным уже при расположении как на рис. 121, так как измеряющий столб может иметь другую температуру, чем поток. Если измерена скорость v воды при 4° и измеряющий столб имел температуру 20°, то следует ожидать разницы в 0,2%. Если v мало, скажем, равно 0,2 м/сек, то $h = 0,00215 \text{ м} = 2,15 \text{ мм}$; величина — хорошо заметная, но не так хорошо измеримая, особенно вследствие образования мениска. Тогда пространство над водяными столбами можно наполнить керосином или толуолом и получить, соответственно разности удельных весов, увеличение отклонений, на которые температура, однако, влияет еще сильнее. Давление измеряется, таким образом, окольным путем, причем верхняя часть рис. 122 играет роль манометра, хотя она не отделена от нижней части.

Пример. Измерена напорная высота $h_1 = 16,3 \text{ мм}$ при воде с толуолом и при их температуре 20°. Вода, скорость которой измерялась, имела температуру 10°; соответственно $\gamma = 999,7 \text{ кг/м}^3$ (таблица 5). Тогда (таблица 4)

$$p_d = (998 - 864) \cdot 0,0163 = 2,18 \text{ кг/м}^2$$

и отсюда

$$v = \sqrt{19,6 \cdot 2,18/999,7} = 0,207 \text{ м/сек.}$$

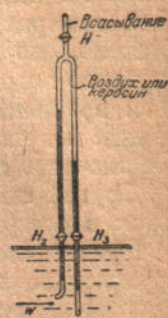


Рис. 122. Напорная трубка.

Здесь поставлен коэффициент $k = 1$.

U-образную часть прибора по рис. 122 можно перевернуть вниз и в качестве запорной жидкости взять сероуглерод или трикрезилфосфат (Л. 107). Естественно, что тогда необходимо устранить все воздушные пузырьки в соединительных трубках.



Рис. 123. Влияние завихрений.

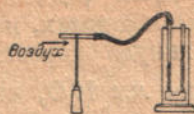


Рис. 124. Прimitивная напорная трубка для воздуха.

На перпендикулярных обрезах статической трубки по рис. 121 и 122 возникают завихрения, в результате которых как это видно на рис. 123, обыкновенно понижается уровень воды внутри трубки по сравнению с наружным. Размер такого понижения зависит от чистоты обработки краев трубки.

Точное измерение статического давления текущей жидкости возможно только посредством заборного отверстия, тщательно сделанного в гладкой стенке, которое совершенно бы не нарушало параллельности струек текущей жидкости.

При измерении скоростей газов, простейшая форма прибора по рис. 124 также служит только для объяснения принципа такого измерения. Навстречу воздушному потоку поставлена простая трубка. Посредством резиновой трубки она соединена с U-образной трубкой, уровни в которой устанавливаются на различной высоте, когда воздух имеет скорость по направлению стрелки. И здесь $v = \sqrt{2gp_d/\gamma}$. Однако, этот прибор будет *неправильно* показывать напорное давление, так как на открытом устье U-образной трубки будут возникать нарушения течения, поэтому статическое давление будет восприниматься неправильно. Если бы мы захотели защитить манометр от такого влияния скорости воздуха, хотя бы окружив его ширмой, то вызываемое ширмой на заветренной стороне понижение давления причинит подобные же помехи. Такой прибор является особенно непригодным, если нужно исследовать поток в трубопроводе, в котором господствует разность давлений по сравнению с наружным воздухом, так что приходится еще раз измерять статическое давление.

Для воздуха и для воды оказался практичным напорный прибор, изображенный на рис. 125.

Для отбора *статического* давления в исследуемом газе служит узкая прорезь в оболочке цилиндрической части на таком расстоянии от головки, чтобы в этой области можно было рассчитывать на параллельное течение струек потока. Можно также распределить отверстия по окружности. Отверстие, направленное навстречу потоку, воспринимает давление, которое больше статического на величину динамического или *напорного* давления

$p_a = \frac{v^2}{2g} \gamma$ и которое в последнее время обозначают как *полное* давление $p_0 = p + p_a$. Оба эти места съема давлений соединены патрубками, от которых резиновые трубки ведут к дифференциальному манометру, измеряющему динамическое давление $p_a = p_0 - p$, как разность давлений между обоими местами съема давлений; из этой разности получается скорость по формуле (8). На рис. 162 видно, как определить изменение скорости по сечению канала, чтобы найти секундное количество протекающей по каналу жидкости или газа.

Таким образом динамическое давление всегда получается как разность двух давлений. Эта разница мала в отношении абсолютных давлений; большей частью она незначительна и по отношению к избыточному или пониженному давлению, господствующему в трубопроводе по сравнению с атмосферой. Так, если генераторный газ удельного веса $1,25 \text{ кг/м}^3$ (при наличных условиях

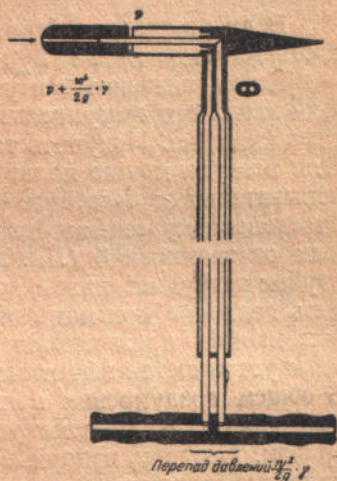


Рис. 125. Напорная трубка Прандтля, фирмы «Розенмюллер».

Острая наставка служит для уменьшения вихреобразования за приборами; она в настоящее время не употребляется, так как создает неудобства, а вихри практически не оказывают влияния.

давления и температуры) течет со скоростью 30 м/сек, то следует рассчитывать на давление $p_d = \frac{30^2}{19,6} \cdot 1,25 = 57,4$ мм H₂O. Таким образом даже при этой большой скорости определение этих обоих давлений должно быть произведено с точностью до 1 мм H₂O. При скорости 10 м/сек разность давлений будет только $p_d = 6,5$ мм H₂O. С другой стороны, в водопроводах, например, в турбинном лотке 3 м/сек представляет уже значительную скорость; ей соответствует напорное давление $\frac{3^2}{19,6} \cdot 1000 = 460$ кг/м² или мм H₂O, что при ртути, как запорной жидкости, которая, находясь в одном колене манометра, уравнивает водяной столб в другом колене, составляет $\frac{460}{13,55 - 1} = 460 : 12,55 = 3,66$ мм (Hg—H₂O), что, при технических средствах измерения, сделать с удовлетворительной точностью не легко.

Таким образом дело здесь идет о действительно трудном методе измерения, который, однако, имеет то преимущество перед измерением количеств дроссельными приборами, что он работает без заметных потерь энергии.

Форма напорных приборов (рис. 125) устанавливается опытным путем так, чтобы их показания соответствовали уравнению (8). Квадратичная зависимость между скоростью и напорным давлением в известной степени соблюдается и при напорных приборах любой формы, однако при этом уже приходится отличать теоретическое напорное давление q от измеренной величины $p_d = p_q - p$, которые друг другу пропорциональны, будучи связаны при помощи коэффициента β уравнением $p_d = \beta \cdot q$.

С другой стороны $q = \frac{\gamma \cdot v^2}{2g}$, откуда

$$p_d = \frac{\gamma v^2}{2g} \cdot \beta \quad \text{и} \quad v = \sqrt{\frac{1}{\beta} \cdot 2g \cdot \frac{p_d}{\gamma}} \quad (9)$$

Если считать коэффициент $\beta = 1,02$ или $1,04$, то скорости получатся выше соответственно на 1 и 2%.

Найти значение β и установить ее независимость от v или p_d — дело опыта. Для этого для градуировки напорную трубку помещают в поток, скорость которого известна. Получить такую известную скорость во всяком случае не легко. Для воздуха можно пользоваться аэродинамической трубой, для воды — рядом испытательных бассейнов¹. Главная трудность в том, что скорость по всему определенному сечению должна быть одинаковой и поток должен быть свободным от завихрений (Л.). Применение центробежных аппаратов для напорных трубок затруднительней, чем для анемометров, так как здесь приходится отводить давление при помощи двойного жидкостного затвора. Однако, центробежные желоба применяются и для воды, причем попутное круговое движение воды устраняется защитными перегородками, поднимаемыми в нужный момент. В общем градуировка вольтмановской вертушки буксированием в испытательном канале и анемометра на центробежном аппарате проще, чем напорных трубок. Поэтому напорные трубки часто градуируют путем сравнения с вольтмановской вертушкой или анемометром, т. е. производят их градуировку косвенным путем.

Для хорошей напорной трубки (Кумбрух, Л.) необходимы следующие существенные условия:

1. Коэффициент β , возможно приближающийся к единице.
2. Нечувствительность показаний к умеренно кривой установке трубки.
3. Независимость показаний от различной силы вихревых движений в потоке воздуха.

Условия 1 и 3 хорошо выполняются у трубки Прандтля. Из чисел Кумбруха можно вывести, что из опытов на центробежном приборе аэродинамического исследовательского института в Геттингене были найдены значения $\beta = 0,982$ до $1,001$, в среднем $\beta = 0,992$. Затем в прекрасном регулируемом воздушном потоке Геттингенского аэродинамического исследовательского института про-

¹ В СССР замечательно оборудованная аэродинамическая труба имеется в ЦАГИ. (Прим. перев.).

изводились искусственные вихревые возмущения. Оказалось, что последние всегда повышают коэффициент β и при сильном завихрении повышение достигает 4,2%.

В отношении второго условия оказалось, что ширина отверстия для отбора полного давления имеет сильное влияние на действие косой установки. Чем меньше отверстие, тем больше убывают показания при косой установке. При большом отверстии, наоборот, они увеличиваются почти до угла наклона в 30°. При диаметре напорного отверстия, равном 0,3 диаметра головки напорной трубки, имеющей полусферическую форму, поворачивание трубки заметно не влияет на результаты измерения. При одной такой трубке получены, например, следующие отклонения от истинных величин.

наклон (в°)	10	20	30
новая напорная трубка Прандтля дает отклонения (в процентах)	± 0	- 4	- 21

Для воды Винкель нашел (Л. 107) при трубке Прандтля диаметром 10 мм и с 3 мм отверстием

при	0	5	10	20	30° наклона
Следующее значение коэффициента $C = \frac{1}{\beta}$	0,960	0,988	0,976	0,965	0,770

Другие формы трубок, как например, Гебера и измененная трубка Дарси, оказались для воды в отношении независимости от направления потока немного лучшими.

Часто желательно измерить не самую скорость, а ее составляющую, приходящуюся на направление трубки и именно тогда, когда конечной целью измерения является определение количества. Согласно вышеуказанному, уменьшение напорного отверстия действует так, что скорость при наклоне трубки относительно направления потока показывается слишком малой. Поэтому может быть найдена такая величина этого отверстия, что при наклоне трубки на угол φ относительно направления потока, напорное давление p_d принимает значение $p_d \cos^2 \varphi$ (при трубках с $\beta = 1$). В этом случае при пользовании уравнением (8) будет получено уже не v , а $v \cos \varphi$; это и есть слагающая скорости по направлению напорной трубки.

По Кумбруху (Л.), у таких напорных трубок, определяющих слагающую скорости, напорное отверстие должно иметь диаметр, равный 0,1 диаметра самой напорной трубки (Л.).

С другой стороны, напорные трубки с возможно большим отверстием работают быстрее; кроме того, прибор делается нечувствительнее к пыли, а это имеет значение при употреблении его в шахтах. При всяком изменении скорости, а также при введении напорного прибора в поток, в манометр и в соединительные трубки должен войти определенный объем газа или жидкости, соответственно вытесненной измерительной жидкости. Поэтому чувствительность включенного манометра существенно обуславливается его балансом энергии, а следовательно и его объемной емкостью.

Поэтому, особенно при меняющихся скоростях, величина напорной трубки должна соответствовать емкости манометра, в качестве которого часто, благодаря их большому балансу энергии, речь идет о манометре с колоколом или о кольцевых весах, особенно если необходима регистрация. При измерении жидкостей или газов нужно, кроме того, избегать больших сопротивлений в проводке. Необходимо уделять всяческое внимание обем соединительным трубкам — между напорным прибором и манометром.

Воздушные пузырьки в наполненной водой проводке трудно устранимы, когда работают со всасыванием согласно рис. 162. Эти остатки газа или водяные мешки в проводках, наполненных воздухом, а также разности температур между обеими наполненными газом или воздухом трубками, где они идут вертикально, нарушают правильность измерения. Эти нарушения становятся значительными, когда малы измеряемые разности давлений. В таких случаях не следует даже дуть в трубы, так как выдыхаемый, богатый углекислотой, воздух, может в вертикальных частях оказать свое влияние.

Напорные приборы в случае крайней необходимости применяются для скоростей до 0,1 м/сек.

При вертушках и анемометрах можно брать меньшие скорости. В последнее время сумели посредством мультипликаторов, подобно изображенному на рис. 190, повысить напорное давление значительно выше динамического, однако в меньших размерах, соответственно относительным размерам трубки Пито и трубы Вентури. Например, увеличивают давление до 9—12 р_а, правда при заметной зависимости коэффициента от v (Петерс, Л.).

В сравнении с *вращающимися приборами* (вертушками) напорные приборы имеют то преимущество, что можно при помощи их производить мгновенные отсчеты и, таким образом, непосредственно следить за изменением скорости; следующее преимущество в том, что измерение производится в определенной точке, тогда как анемометр дает среднюю величину на довольно большой площади. При помощи трубки Пито можно исследовать распределение скоростей по всему сечению сравнительно узкой трубы. Вообще остаются в силе те соображения о сравнительной оценке суммирующих приборов и приборов, дающих мгновенные значения, которые были повторены в § 12 и § 41. В отношении собственно точности трудно отдать предпочтение тем или другим; у вертушек, особенно при малых скоростях, отрицательно влияет трение (рис. 117а), тогда как при трубке Пито обременительным является то обстоятельство, что отсчитываемая величина пропорциональна квадрату величины, подлежащей измерению. Поэтому очень скоро (§ 7) приходят к слишком малым разностям давлений при уменьшении скорости. Анемометры с крыльчатым колесом страдают также от прогибов этого колеса.

Большая точность при измерениях скоростей газов и жидкостей во всяком случае часто не достижима, так как среда одновременно испытывает вихревые движения. Поэтому скорость поступательного движения вообще не имеет однозначной величины: В трубопроводах скорость поступательного движения может быть определена однозначно путем прямого измерения, но как частное от деления подаваемого количества на поперечное сечение трубы. Конечно, скорость можно найти как частное этих величин лишь в том случае, когда, как это большей частью бывает, это количество само не подлежит определению из скорости (§ 19) (Л.).

§ 47. Различные прочие методы. Чтобы при малых скоростях воздуха точно исследовать местные распределения в поле скоростей, Шмидт применяет кварцевую нить, прогиб которой под действием воздушного потока и служит мерою его скорости.

Другими был предложен термический анемометр. Принцип его заключается в том, что нагреваемая электрическим током проволока меняет свою температуру, а следовательно и сопротивление, когда на нее действует воздушный поток (Л.).

Исследования показали, что количество тепла H , отдаваемое единицей длины цилиндрической проволоки, помещенной перпендикулярно потоку, и имеющей температуру по T градусов выше температуры среды, может быть выражено формулой:

$$H = kT + \sqrt{2\pi d \cdot k_{cp}} \sqrt{v} \cdot T, \quad (1)$$

где k — коэффициент теплопроводности,
 d — диаметр проволоки,
 c — теплоемкость среды при постоянном объеме,
 ρ — плотность среды,
 v — скорость движения.

Уравнение (1) может быть написано и так:

$$H = B \sqrt{v} + C, \quad (2)$$

где B и C — функции температуры, свойств среды и диаметра проволоки.

Опыты показали, что уравнение (2) остается справедливым при изменении скоростей от 0,15 м/сек до 30 м/сек. Диаметр проволоки был от 0,025 мм до 0,15 мм.

¹ Такой прибор мог бы быть весьма практичным, если бы его показания не зависели бы и от температуры воздушного потока. (Прим. перев.).

Для измерений применяется обычно проволока, нагреваемая электрическим током. В таком случае $H = kI^2R$, и уравнение (2) напишется так:

$$kI^2R = B\sqrt{v} + C \quad (3)$$

или

$$I^2 = k_1\sqrt{v} + k_2, \quad (4)$$

если температура проволоки поддерживается постоянной.

Если i_0 есть сила тока, необходимая для поддержания постоянной температуры в спокойном воздухе, то $k_2 = i_0^2$, и мы получим уравнение наиболее пригодное для практических целей:

$$I^2 = k\sqrt{v} + i_0^2. \quad (5)$$

Постоянство температуры проволоки осуществляется, если сопротивление R проволоки не меняется. Наиболее удобным прибором будет в данном случае мостик Уитстона.

Можно, наоборот, поддерживать постоянной силу тока в проволоке. Тогда температура проволоки будет меняться в зависимости от скорости газа. Метод постоянной силы тока даст возможность непосредственного отсчета скорости.

Термоанемометрический метод весьма чувствителен к внешним помехам. Если скорость воздуха мала, то конвекционные потоки, возникающие благодаря нагретой проволоке, могут сильно исказить результаты. Для скоростей, близких к скоростям конвекционных токов, прибор должен быть специально градуирован.

Наиболее важным фактором является температура окружающей среды. Если мы допустим, что теплопроводность и теплоемкость воздуха не меняются с температурой, то уравнение (4) можно написать так:

$$I^2R = C_1(T - T_a) + C_2(T - T_a)\sqrt{vp}, \quad (6)$$

где C_1 и C_2 — постоянные величины, причем $C_1 = \frac{i^2R}{T - T_a}$,

а T_a — температура окружающей среды.

Считая T величиной постоянной (метод постоянного сопротивления), мы получим, дифференцируя уравнение (6) по T_a :

$$\frac{d(vp)}{vp} = \frac{2dT_a}{T - T_a} \cdot \frac{i^2}{i^2 - i_0^2}, \quad (7)$$

т. е. уравнение между изменением vp и температурой окружающей среды. Термоанемометры широко применяются в лабораториях и не получили пока промышленного применения из-за сложности аппаратуры.

Кататермометр Хилла. Кататермометр Хилла представляет собой своеобразный спиртовой термометр. Цилиндрический резервуар термометра, длиной в 5,0 см и диаметром 1,5 см имеет полусферическое дно. Капилляр термометра оканчивается значительным расширением. Для того, чтобы термометр можно было нагревать до высокой температуры.

Шкала термометра обычно градуируется для пределов температуры от 35 до 38°.

Если термометр нагреть, а затем поместить в поток воздуха, скорость которого мы хотим измерить, то количество тепла, теряемого термометром, будет зависеть от скорости воздуха.

Обычно наблюдают время, за которое столбик спирта в капилляре опустится от 38 до 35°.

Количество тепла H , теряемое единицей поверхности сухого резервуара в секунду, выражается формулой

$$H = (a + b\sqrt{v})\Delta t,$$

где Δt — средняя величина температурного перепада между термометром и окружающей средой, a и b — константы.

Величина H дается в паспорте на термометр. (Прим. ред.).