

КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 85 (145)





КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
при СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 85 (145)

Под редакцией
к. т. н. **Е. Ф. ДОЛИНСКОГО**



ИЗДАТЕЛЬСТВО КОМИТЕТА СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

1966

ж 135189

Редакционный совет

П. Н. Агалецкий, Н. Н. Александрова, В. О. Арутюнов, С. В. Горбачевич,
Е. Ф. Долинский, М. К. Жоховский, Л. М. Закс, В. В. Кандыба,
Л. К. Каяк, И. И. Киренков, Д. К. Коллеров, Е. Т. Чернышев,
К. П. Широков, Б. М. Яновский

Ответственный редактор
д-р техн. наук проф. В. О. АРУТЮНОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник посвящен исследованиям в области механических измерений: силы, давления, расходов газа и параметров вибраций.

В работах по измерению силы рассмотрены: методика и погрешности измерения силы несколькими динамометрами, включенными параллельно и способами, основанными на пьезоэлектрическом эффекте; измерения ударных нагрузок методом, основанным на формуле Герца.

Обзор современных методов и средств для измерения переменных во времени давлений, а также вывод формулы, определяющей приведенную площадь поршня переменного сечения, и оценка погрешностей расчета по этой формуле составляют содержание статей, посвященных измерениям избыточных давлений.

Область вакуумных измерений представлена работами, в которых дан обзор новейших методов градуировки вакуумметров, анализ погрешностей манометров компрессионных и с электрическими преобразователями, оценка суммарной погрешности этих приборов, а также даны результаты исследований абсолютного мембранного и записывающего манометров. Кроме того, приводится обзор работ по измерению коэффициента аккомодации.

В статьях, относящихся к измерению расхода газа, публикуются результаты опытного исследования двух газомерных установок (с двумя мерниками каждая) непрерывного действия с повышенной (по сравнению с обычными одинарными установками) производительностью. Вопросы измерения скоростей газов посвящена статья по определению коэффициентов скоростных трубок.

Описания установок, воспроизводящих угловые колебания, ускорения (до 250 д), а также установки, в которой амплитуды колебаний измеряют стробинтерференционным методом, составляют содержание статей в области виброизмерений.

Редактор

ИЗВЕЩЕНИЕ

Всего в отчетном периоде было выполнено работ на сумму 1000000 руб. из них 500000 руб. на капитальные вложения, а остальное на текущие нужды. В отчетном периоде было выполнено работ на сумму 1000000 руб. из них 500000 руб. на капитальные вложения, а остальное на текущие нужды. В отчетном периоде было выполнено работ на сумму 1000000 руб. из них 500000 руб. на капитальные вложения, а остальное на текущие нужды.

В отчетном периоде было выполнено работ на сумму 1000000 руб. из них 500000 руб. на капитальные вложения, а остальное на текущие нужды. В отчетном периоде было выполнено работ на сумму 1000000 руб. из них 500000 руб. на капитальные вложения, а остальное на текущие нужды.

В отчетном периоде было выполнено работ на сумму 1000000 руб. из них 500000 руб. на капитальные вложения, а остальное на текущие нужды. В отчетном периоде было выполнено работ на сумму 1000000 руб. из них 500000 руб. на капитальные вложения, а остальное на текущие нужды.

В отчетном периоде было выполнено работ на сумму 1000000 руб. из них 500000 руб. на капитальные вложения, а остальное на текущие нужды. В отчетном периоде было выполнено работ на сумму 1000000 руб. из них 500000 руб. на капитальные вложения, а остальное на текущие нужды.

Всего

Итого

Сумма

ПОГРЕШНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЗНАЧЕНИЙ СИЛЫ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦОВЫХ ДИНАМОМЕТРОВ

Рассмотрены погрешности, вытекающие из условий параллельного нагружения группы образцовых динамометров, а также погрешности суммирования показаний динамометров, связанные с их разной жесткостью

При градуировках образцовых динамометров по показаниям группы параллельно нагружаемых динамометров нагрузочное устройство используют лишь как источник силы, стабильной на время данного нагружения. При этом мерой приложенной силы являются показания группы динамометров.

Градулируемый динамометр с верхним пределом измерения, не превышающим nP_n , ставят последовательно с группой из n параллельно установленных динамометров более высокой точности с верхними пределами измерения P_n и нагружают вместе с ними. Последние должны быть предварительно проградуированы силами P_0 . При совместном нагружении ко всему блоку динамометров прикладывают силы nP , приблизительно (в пределах точности нагрузочного устройства) равные nP_0 .

Полагая, что

$$nP = nP_0 + \delta, \quad (1)$$

где δ — погрешности воспроизведения нагрузочным устройством сил, равных nP_0 , получим

$$\left. \begin{aligned} CE &= \sum_{i=1}^n c_i \varepsilon_i = nP_0 + \delta \\ CE_0 &= \sum_{i=1}^n c_i \varepsilon_{0i} = nP_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь ε_{0i} и ε_i — показания параллельно установленных (малых) динамометров, соответственно при нагружении силами P_0 и P ;

i — порядковые номера малых динамометров;

c_i — их жесткости;

E — показаний большого динамометра, наблюдаемые при его нагружении силами nP ;

E_0 — показания большого динамометра при нагружении его силами nP_0 ;

C — жесткость большого динамометра.

Из выражений (2) следует:

$$C(E_0 - E) = \sum_{i=1}^n [c_i(\varepsilon_{oi} - \varepsilon_i)] = -\delta$$

и, после подстановки в него

$$C = \frac{nP_0}{E_0} \text{ и } c_i = \frac{P_0}{\varepsilon_{oi}},$$

получим

$$\frac{nP_0}{E_0}(E_0 - E) = P_0 \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_{oi} - \varepsilon_i}{\varepsilon_{oi}} \quad (3)$$

откуда

$$E_0 = E - \frac{E_0}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{oi}}{\varepsilon_{oi}} \quad (4)$$

или

$$E_0 = \frac{E}{1 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{oi}}{\varepsilon_{oi}}} \quad (4')$$

что весьма неудобно для вычислений.

Приближенно

$$E_0 \approx E - \frac{E}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{oi}}{\varepsilon_{oi}} \quad (5)$$

Относительную погрешность приближения Θ , т. е. замены уравнения (4) приближенным уравнением (5) определим, вычитая уравнение (4) из (5) и поделив результат на E_0 . В итоге получим:

$$\Theta = \frac{E_0 - E}{E_0} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{oi}}{\varepsilon_{oi}},$$

но из уравнения (4) следует

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{oi}}{\varepsilon_{oi}} = - \frac{E_0 - E}{E_0},$$

а из уравнений (2) и (3)

$$\frac{E - E_0}{E_0} = \frac{\delta}{nP_0}.$$

Следовательно

$$\Theta = - \left(\frac{\delta}{nP_0} \right)^2 \quad (6)$$

Числовое значение Θ , если исходить из нормированных погрешностей нагружающих устройств, определится из условий:

для рабочих силоизмерительных машин $\frac{\delta}{nP_0} \leq 0,01$;

для образцовых машин 2-го разряда $\frac{\delta}{nP_0} \leq 0,002$.

Уравнение (5) является расчетным для вычисления значений E_0 . При этом предполагается, что условия нагружения и степень линейности градуировочных характеристик всех участвующих в градуировке динамометров допускают линейную интерполяцию их показаний.

При рассматриваемом методе градуировки, помимо обычных погрешностей, связанных с невоспроизводимостью деформаций динамо-

метров, передающих значения силы*, возникает группа дополнительных погрешностей, включающая погрешности, вытекающие из условий параллельного нагружения, и погрешности суммирования показаний, связанные с разной жесткостью динамометров.

Погрешности, вытекающие из условий параллельного нагружения динамометров

Эти погрешности являются следствием возможного нецентрального приложения сил к отдельным динамометрам в связи с неодинаковой жесткостью нескольких параллельно нагруженных динамометров, а также недостаточно надежной конструкцией шарнирных креплений, трения в шарнирах и т. п. Определить их аналитически не представляется возможным. Это обстоятельство вызывает необходимость экспериментальной оценки общей погрешности передачи силы каждой данной группой параллельно нагружаемых динамометров при данной конкретной конструкции средств их установки и закрепления. Для этого была разработана следующая методика.

Группу из n параллельно поставленных динамометров нагружали силой nP_0 на эталонной установке, на которой предварительно каждый из динамометров группы был аттестован при нагружении силой P_0 . Полагая случайные погрешности воспроизведения силы эталонной установкой пренебрежимо малыми по сравнению с погрешностями динамометров, получим равенство

$$\sum_{i=1}^n c_i \varepsilon_i - \Delta = \sum_{i=1}^n c_i \varepsilon_{oi},$$

где Δ — погрешность передачи группой динамометров силы, равной nP_0 .
Искомая погрешность

$$\Delta = \sum_{i=1}^n c_i (\varepsilon_i - \varepsilon_{oi})$$

и после подстановки сюда $c_i = P_0 / \varepsilon_{oi}$ получим

$$\Delta = P_0 \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{oi}}{\varepsilon_{oi}} \quad (7)$$

и ее относительное значение

$$\nu = \frac{\Delta}{nP_0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{oi}}{\varepsilon_{oi}} \quad (8)$$

Очевидно, что при условии равной жесткости всех n динамометров ($c_1 = c_2 = \dots = c_n = nP_0 / \sum_{i=1}^n \varepsilon_{oi}$) будем иметь

$$\Delta = nP_0 \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{oi}}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{oi}}, \quad (7')$$

$$\nu = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{oi}}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{oi}} \quad (8')$$

* Максимов Л. М., Набор образцовых динамометров 1-го разряда, «Измерительная техника», № 12, 1964.

При экспериментальном определении значений v по результатам достаточно большого числа нагружений они получаются со знаком минус, характеризующим то обстоятельство, что часть силы, приложенной к параллельно установленным динамометрам, не воспринимается ими и рассеивается по указанным выше причинам.

Ниже приведены два примера, характеризующих числовые значения рассматриваемой погрешности, полученные во ВНИИМ при параллельном нагружении групп динамометров.

Пример 1. Параллельное нагружение пяти электротензометрических динамометров, работающих на сжатие, приведено в табл. 1.

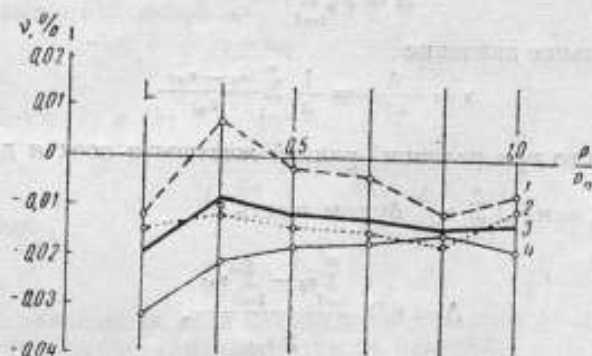
Таблица 1

i	$^*_{oi}$	*_i	$^*_i - ^*_{oi}$	$\frac{^*_i - ^*_{oi}}{^*_{oi}}$
1	6443	7023	580	0,09002
2	6852	6030	-822	-0,11996
3	6730	6326	-404	-0,06003
4	6384	7150	766	0,11999
5	6536	6336	-200	-0,03060

$$\sum_{i=1}^n \frac{^*_i - ^*_{oi}}{^*_{oi}} = -0,00058;$$

$$v = -\frac{0,00058}{5} \cdot 100\% = -0,01\%$$

Пример 2. Параллельное нагружение на эталонной установке трех образцовых динамометров 1-го разряда типа ВНИИМ, работающих на растяжение.



Параллельное нагружение трех образцовых динамометров (к примеру 2).

1, 2, 4 — значения v по рядам нагружений; 3 — средние.

Динамометры нагружали на шести различных ступенях силами $3P_0$, равными $P_n/2$; P_n ; $3P_n/2$; $2P_n$; $5P_n/2$ и $3P_n$. Всего было проведено три ряда таких нагружений. Результаты определений v по каждому из них и по трем рядам, взятым вместе, представлены на рисунке.

**Погрешности суммирования показаний динамометров,
связанные с их различной жесткостью**

Суммирование показаний параллельно нагруженных динамометров с учетом их различной жесткости по уравнению (5) обязательно требует раздельного отсчета показаний по каждому из n динамометров, что иногда практически трудно осуществимо и всегда связано с неудобствами и большой затратой времени. Например, при нескольких параллельно нагруженных электротензометрических динамометрах значительно удобнее производить один общий отсчет показаний всех n динамометров по одному общему отсчетному устройству, получая сразу значения $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i$, выраженные в единицах электрического сопротивления или напряжения. Такой общий отсчет часто позволяет избежать и некоторых погрешностей, связанных с переключениями отсчетного устройства с одного динамометра на другой.

При общем отсчете показаний их суммирование ведется так, как если бы жесткость всех n параллельно нагруженных динамометров была одинаковой, т. е. $c_i = nP_o / \sum \varepsilon_{oi}$. Тогда

$$E_o = E - E_o \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{oi}}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{oi}} \quad (9)$$

или, для удобства вычислений — по формуле

$$E_o \approx E - E \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{oi}}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{oi}} \quad (10)$$

Однако в этом случае появляется погрешность Θ , согласно уравнению (6).

Для оценки относительной погрешности такого суммирования, происходящей от замены уравнения (4) на (9), приведем их к аналогичному виду и сравним между собой.

$$E_o = E - \frac{E_o}{n\varepsilon_{o\text{ ср}}} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{oi}) \frac{\varepsilon_{o\text{ ср}}}{\varepsilon_{oi}} \quad (4'')$$

и

$$E_o = E - \frac{E_o}{n\varepsilon_{o\text{ ср}}} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{oi}) \quad (9')$$

где $\varepsilon_{o\text{ ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{oi}}{n}$.

Вычитая уравнение (4'') из (9') и поделив результат на E_o , получим искомую относительную погрешность

$$\xi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{oi}) (\varepsilon_{oi}^{-1} - \varepsilon_{o\text{ ср}}^{-1}) \quad (11)$$

Уравнение (11) является расчетным для оценки относительной погрешности суммирования показаний группы динамометров без учета их различной жесткости. Его множители $(\varepsilon_{oi}^{-1} - \varepsilon_{o\text{ ср}}^{-1})$ характеризуют различия в жесткости динамометров и для данной группы могут быть

определены заранее. Множители ($\varepsilon_i - \varepsilon_{oi}$) характеризуют условия нагружения; они могут быть определены только после данного нагружения при раздельном отсчете показаний каждого динамометра.

Для характеристики возможных числовых значений погрешности суммирования показаний динамометров без учета их различной жесткости, определим ее значение для приведенного выше случая параллельного нагружения пяти электротензометрических динамометров, где жесткости отдельных динамометров значительно (до 4%) отличались от средней (табл. 2).

Таблица 2

i	ε_{oi}	ε_i	$\varepsilon_i - \varepsilon_{oi}$	$\varepsilon_{oi}^{-1} \cdot 10^{-7}$	$\varepsilon_{o\text{cp}}^{-1} \cdot 10^{-7}$	$(\varepsilon_{oi}^{-1} - \varepsilon_{o\text{cp}}^{-1}) \cdot 10^{-7}$	$\frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_{oi})}{(\varepsilon_{oi}^{-1} - \varepsilon_{o\text{cp}}^{-1})}$
1	6443	7023	580	1552		33	0,00191
2	6852	6030	-822	1460		-59	0,00485
3	6730	6326	-404	1486	1519	-33	0,00133
4	6384	7150	766	1566		47	0,00360
5	6536	6336	-200	1530		11	-0,00022

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_{oi} = 32945; \varepsilon_{o\text{cp}} = \frac{32945}{5} = 6589; \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{oi}) (\varepsilon_{oi}^{-1} - \varepsilon_{o\text{cp}}^{-1}) = 0,01147;$$

$$\xi = \frac{0,01147}{5} \cdot 100 = 0,23\%$$

Таким образом, при данном нагружении группы динамометров погрешность ξ оказалась весьма большой, а именно в 23 раза больше ранее вычисленной погрешности ν .

Проведенный анализ показывает, что при метрологических измерениях силы общий отсчет показаний группы параллельно нагруженных динамометров в принципе допустим лишь в том случае, когда имеется возможность составить группу из динамометров практически одинаковой жесткости. В противном случае для оценки величины ξ по формуле (11) необходимы предварительные исследования. При этом показания динамометров следует отсчитывать раздельно.

Поступила в редакцию
24/III 1964 г.

ОБРАЗЦОВЫЙ ДИНАМОМЕТР 1-го РАЗРЯДА
С ПРЕДЕЛАМИ ИЗМЕРЕНИЯ ДО 30 тс

Изложены методика и результаты выполненной во ВНИИМ аттестации образцового динамометра 1-го разряда посредством группы параллельно нагруженных динамометров с меньшими верхними пределами измерений.

В 1961 — 1962 гг. во ВНИИМ был разработан и создан образцовый динамометр 1-го разряда с пределами измерения до 30 тс ($\sim 294 \cdot 10^3 \text{н}$)*,

работающий на растяжение (рис. 1). Для аттестации прибора использован метод его градуировки по нескольким меньшим динамометрам, установленным параллельно друг с другом и последовательно с аттестуемым (рис. 2). Это, насколько известно, была первая успешная попытка косвенной аттестации динамометра столь высокой точности, к тому же работающего на растяжение. Ниже перечислены условия, обеспечившие возможность такой аттестации.

1. В результате ранее проведенной работы** имелись три образцовых динамометра 1-го разряда до 10 тс, хорошо воспроизводящих деформации (табл. 1).

В табл. 1 и далее приняты обозначения:

P_j — сила, приложенная на ступени нагружения j ;



Рис. 1. Внешний вид динамометра 1-го разряда.

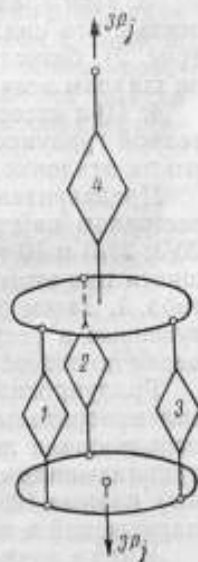


Рис. 2. Схема установки. 1-4 — номера динамометров.

* Конструктор Г. Я. Созинов, механик А. М. Дроздов.

** Максимов Л. М., Набор образцовых динамометров 1-го разряда, «Измерительная техника», № 11, 1964.

- P_n — наибольшая сила, передаваемая каждым динамометром;
 ε_j — средние значения деформаций динамометров при данном значении P_j (ε_{0j1} — в начале и ε_{j1} — в конце работы через 5 месяцев);
 σ_j — средние квадратичные отклонения деформаций;
 c_i — жесткость динамометров;
 индексы $i=1; 2; 3; 4$ — номера динамометров (рис. 2).

Таблица 1

$\frac{P_j}{P_n}$	Воспроизводимость деформаций, %						
	при 5 рядах нагружений				во времени		
	$\frac{\sigma_{j1}}{\varepsilon_{j1}}$	$\frac{\sigma_{j2}}{\varepsilon_{j2}}$	$\frac{\sigma_{j3}}{\varepsilon_{j3}}$	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \sigma_{ji}^2}{\sum_{i=1}^3 \varepsilon_{ji}^2}}$	$\frac{\varepsilon_{j1} - \varepsilon_{0j1}}{\varepsilon_{0j1}}$	$\frac{\varepsilon_{j2} - \varepsilon_{0j2}}{\varepsilon_{0j2}}$	$\frac{\varepsilon_{j3} - \varepsilon_{0j3}}{\varepsilon_{0j3}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1/3	0,015	0,015	0,015	0,009	0,03	-0,02	0,03
1/2	0,013	0,013	0,011	0,008	0,03	-0,02	0,03
2/3	0,011	0,012	0,011	0,007	0,01	-0,02	0,02
5/6	0,010	0,011	0,009	0,006	0,02	-0,02	0,02
1	0,009	0,009	0,009	0,005	0,02	-0,01	0,02

2. Была разработана и осуществлена специальная методика экспериментального исследования общей погрешности передачи силы тремя параллельно поставленными динамометрами при данной конкретной конструкции средств их установки и закрепления. Само исследование проводили на эталонной установке до 10 тс. Указанная погрешность оказалась порядка 0,02% передаваемой динамометрами силы.

3. При градуировке 30-т динамометра по трем 10-т имелась уверенность, что сила $3P_j$, действующая на блок из четырех динамометров (рис. 2), безусловно стабильна на все время, необходимое для отсчетов по шкалам всех динамометров при одном нагружении.

4. При аттестации имелась возможность сравнивать результаты косвенной градуировки динамометра с результатами прямой градуировки его на эталонной установке при $P_{0j} = 10$ тс и меньше.

Предварительно три 10-т динамометра (1, 2 и 3 на рис. 2) были аттестованы на эталонной установке при нагрузках P_{0j} , равных 10/3; 5; 20/3; 25/3 и 10 тс. В заключение работы они снова были поверены. Имевшиеся при этом расхождения в значениях ε_j указаны в графах 6, 7 и 8 табл. 1. Затем были приняты некоторые усредненные значения ε_{jcp} , полученные в результате совместной обработки данных аттестации и поверки по способу наименьших квадратов.

Градуировка 30-т динамометра была проведена на 50-т образцовой силоизмерительной машине рычажного типа, которую в данном случае использовали лишь как источник силы. К блоку динамометров (рис. 2) прикладывали силы $3P_j$, приблизительно (в пределах точности машины) равные 10; 15; 20; 25 и 30 тс. Всего было проведено десять рядов нагружений в течение 4 дней.

Имея в виду, что

$$3P_j = 3P_{0j} + \delta, \quad (1)$$

получим

$$\left. \begin{aligned} c_4 \varepsilon_{j4} &= \sum_{i=1}^3 c_i \varepsilon_{ji} = 3P_{0j} + \delta, \\ c_4 \varepsilon_{0j4} &= \sum_{i=1}^3 c_i \varepsilon_{0ji} = 3P_{0j}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где δ — погрешности воспроизведения силы машиной при данном нагружении.

Формулы (2) включают значения деформаций:

ε_{j4} — наблюдаемых 30-т динамометра (№ 4) при данных приближительных значениях $3P_j$;

ε_{ji} — то же — 10-т динамометров;

ε_{0ji} — 10-т динамометров, полученные при их аттестации;

ε_{0j4} — в случае нагружения динамометра № 4 силами с точными значениями $3P_{j0}$.

Из выражений (2) имеем

$$c_4(\varepsilon_{0j4} - \varepsilon_{j4}) = \sum c_i(\varepsilon_{0ji} - \varepsilon_{ji}) = -\delta$$

и после подстановки сюда

$$c_4 = \frac{3P_{0j}}{\varepsilon_{0j4}} \quad \text{и} \quad c_i = \frac{P_{0j}}{\varepsilon_{0ji}}$$

получим

$$\varepsilon_{0j4} = \varepsilon_{j4} - \varepsilon_{0j4} \cdot \frac{1}{3} \sum \left(\frac{\varepsilon_{ji} - \varepsilon_{0ji}}{\varepsilon_{0ji}} \right),$$

или, с пренебрежимо малой погрешностью,

$$\varepsilon_{0j4} \approx \varepsilon_{j4} \left(1 - \frac{1}{3} \sum \frac{\varepsilon_{ji} - \varepsilon_{0ji}}{\varepsilon_{0ji}} \right). \quad (3)$$

Для вычислений оказалось удобным уравнение (3) записать в виде

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{0j4} &\approx \varepsilon_{j4} - \frac{\varepsilon_{j4}}{3\varepsilon_{0j3}} \delta\varepsilon_j, \\ \delta\varepsilon_j &= (\varepsilon_{j1} - \varepsilon_{0j1}) \frac{\varepsilon_{0j3}}{\varepsilon_{0j1}} + (\varepsilon_{j2} - \varepsilon_{0j2}) \frac{\varepsilon_{0j3}}{\varepsilon_{0j2}} + (\varepsilon_{j3} - \varepsilon_{0j3}). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Результаты вычислений средних значений деформаций при 10 рядах нагружений, приведенные к температуре 20°C, даны в графе 2 табл. 2. Температурные поправки вводили, исходя из результатов ранее проведенной работы по определению температурного коэффициента модуля упругости динамометров η^* . Для динамометров, изготовленных из стали 35ХГСА, эта величина принята равной

$$\eta = -(275 \pm 25) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}.$$

Случайные погрешности градуировки динамометра № 4 характеризуются значениями средних квадратичных отклонений, приведенных в графе 3 табл. 2. В графе 4 даны средние значения ε_{0j4} , полученные при непосредственной градуировке динамометра на эталонной установке.

Согласование данных граф 2 и 4 в одной общей точке при $\frac{P_i}{P_n} = \frac{1}{3}$ хорошее (расхождение меньше 0,02%).

Дальнейшая обработка результатов измерений имела целью установить монотонный характер зависимости $\varepsilon_j = f(P_j)$ и, тем самым, возможно, обнаружить систематические погрешности проведенной градуировки при некоторых значениях P_j . Все полученные результаты были объединены, причем выяснилось, что они достаточно хорошо описываются уравнением полинома третьей степени. Таким образом, уравнение измерения имеет вид

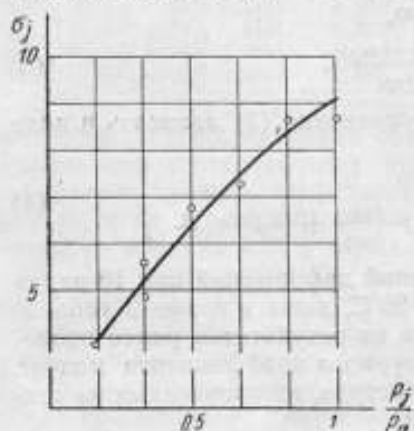
$$a \frac{P_j}{P_n} + b \left(\frac{P_j}{P_n} \right)^2 + c \left(\frac{P_j}{P_n} \right)^3 + \delta\varepsilon_j = \varepsilon_j. \quad (5)$$

* Максимов Л. М., Временная стабильность и температурные погрешности динамометров, «Измерительная техника», № 11, 1963.

Таблица 2

$\frac{P_j}{P_n}$	$\varepsilon_{\sigma_j} \cdot 10^{-4} \text{ мм}$	$\frac{\sigma_j}{\sigma_n} \cdot 100\%$	$\varepsilon_{\sigma_j} \cdot 10^{-4} \text{ мм}$	$\varepsilon_{\text{расч}} \cdot 10^{-4} \text{ мм}$	$\frac{\varepsilon_{\text{расч}} - \varepsilon_{\sigma_j}}{\varepsilon_{\sigma_j}} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5	6
1/6	—	—	14 085	14 080	-0,03
1/3	27 485	0,02	27 489	27 493	0,01
1/2	40 280	0,02	—	40 291	0,03
2/3	52 545	0,01	—	52 525	-0,04
5/6	64 240	0,01	—	64 245	0,01
1	75 500	0,01	—	75 502	0

При разных P_j эти уравнения неравноточные. Их точность характеризуется значениями σ_j (рис. 3). Так как экспериментально полученные значения σ_j в общем пропорциональны значениям $(P_j/P_n)^{0,5}$,

Рис. 3. Вид зависимости σ_j от P_j/P_n .

введение весов в уравнения измерений при каждом значении P_j существенно упрощается. Для этого уравнение (5) достаточно умножить на

$$\rho_j^{0,5} = \left(\frac{P_j}{P_n}\right)^{-0,5},$$

имея в виду, что

$$\rho_j = \frac{1}{\sigma_j^2} = \left(\frac{P_j}{P_n}\right)^{-1},$$

где ρ_j — веса уравнений измерений при данных P_j .

В результате умножения получаем расчетное уравнение, учитывающее точность проведенных измерений при каждом использованном значении P_j :

$$a\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^{0,5} + b\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^{1,5} + c\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^{2,5} + \delta\varepsilon_j = \varepsilon_j \left(\frac{P_j}{P_n}\right)^{-0,5}. \quad (6)$$

Решая уравнение (6) способом наименьших квадратов, получим значения коэффициентов a , b и c уравнения измерения (5)

$$a = \frac{\Delta a}{\Delta}, \quad b = \frac{\Delta b}{\Delta} \quad \text{и} \quad c = \frac{\Delta c}{\Delta},$$

где определители Δ равны:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \left[\frac{P_j}{P_n}\right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^2\right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^3\right] \\ \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^2\right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^3\right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^4\right] \\ \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^3\right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^4\right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^5\right] \end{vmatrix}, \quad \Delta a = \begin{vmatrix} [\varepsilon_j] \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^2\right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^3\right] \\ [\varepsilon_j \frac{P_j}{P_n}] \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^3\right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^4\right] \\ [\varepsilon_j \left(\frac{P_j}{P_n}\right)^2\right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^4\right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n}\right)^5\right] \end{vmatrix}.$$

$$\Delta b = \begin{vmatrix} \left[\frac{P_j}{P_n} \right] \left[\varepsilon_j \right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n} \right)^3 \right] \\ \left[\left(\frac{P_j}{P_n} \right)^2 \right] \left[\varepsilon_j \frac{P_j}{P_n} \right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n} \right)^4 \right] \\ \left[\left(\frac{P_j}{P_n} \right)^3 \right] \left[\varepsilon_j \left(\frac{P_j}{P_n} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n} \right)^6 \right] \end{vmatrix}, \Delta c = \begin{vmatrix} \left[\frac{P_j}{P_n} \right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n} \right)^2 \right] \left[\varepsilon_j \right] \\ \left[\left(\frac{P_j}{P_n} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n} \right)^3 \right] \left[\varepsilon_j \frac{P_j}{P_n} \right] \\ \left[\left(\frac{P_j}{P_n} \right)^3 \right] \left[\left(\frac{P_j}{P_n} \right)^4 \right] \left[\varepsilon_j \left(\frac{P_j}{P_n} \right)^2 \right] \end{vmatrix}$$

Подставив полученные таким образом числовые значения коэффициентов a , b , и c в уравнение измерения (5), получим:

$$\varepsilon_j = 8657,4 \frac{P_j}{P_n} - 1289,4 \left(\frac{P_j}{P_n} \right)^2 + 182,2 \left(\frac{P_j}{P_n} \right)^3 \text{ мкм.} \quad (7)$$

Результаты вычислений ε_j по уравнению (7) приведены в графе 5 табл. 2. Получилось вполне удовлетворительное согласование вычисленных и полученных измерениями значений ε_j . У всех ε_j остаточные расхождения меньше 0,04% (графа 6). Однако, несмотря на малые расхождения, они свидетельствуют о наличии каких-то небольших по величине систематических погрешностей измерений. Так, например, при $\frac{P_j}{P_n} = \frac{2}{3}$ остаточные расхождения равны 0,04%, а $\sigma = 0,01\%$ (графа 3 табл. 2). При наличии только случайных погрешностей градуировки такое соотношение остаточных расхождений и σ в данном случае невероятно. Выяснение источника систематических погрешностей было проведено двумя независимыми друг от друга методами обработки большого числа контрольных измерений, описание которых здесь опускается. Соответствующие поправки учтены при аттестации.

Окончательные округленные результаты аттестации динамометра приведены в табл. 3. В 1962 г. динамометр внедрен в практику поверки образцовых силоизмерительных машин 2-го разряда.

Таблица 3

P_j тс	9	10	12	15	18	20	21	24	25	27	30
ε_j мкм	2485	2749	3268	4028	4769	5254	5492	6194	6424	6880	7550

Поступила в редакцию
23/ХІІ 1964 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРУШАЮЩЕГО УСИЛИЯ
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ КВАРЦА

Изложены результаты экспериментальных исследований образцов кварца, проведенных с целью определения разрушающего усилия для кристаллов, применяемых в пьезоэлектрических датчиках.

Для практического использования кристаллов кварца в датчике пьезоэлектрических измерителей механических величин необходимо знать допустимые на кварц нагрузки соответственно условиям работы и виду деформации кристалла. В частности, при использовании кристаллов кварца в пьезоэлектрических измерителях силы, работающих на сжатие вдоль оси X , необходимо знать прочность кристаллов при сжатии в заданном направлении и найти условия для ее эффективного использования.

Теоретическая прочность кристаллов кварца, имеющих как гетерополярную, так и ковалентную связи, находится в пределах $(1 \div 3) \cdot 10^9$ Мн/м^2 [1,2]. Практически же этот предел не достигается из-за дефектов строения кристаллов и неравномерного распределения усилия на поверхности образца при деформации.

Для определения допустимых нагрузок на кварц были проведены испытания группы образцов, изготовленных из кристаллов естественного и искусственного пьезокварца с размерами рабочей площади $1,0 \div 1,25 \text{ см}^2$ и толщиной $8 \div 10 \text{ мм}$. Образец, испытываемый на сжатие, находился между стальными закаленными пластинами с плоскопараллельными поверхностями. Усилие на образце создавалось образцовой силовой измерительной машиной типа ДО-БН-2-5. Равномерное распределение нагрузки по поверхности образца достигалось благодаря передаче нагрузки на кварц через «подушки», а также за счет достаточно большой толщины

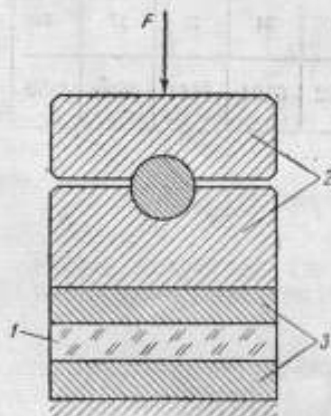


Рис. 1. Схема передачи нагрузки на кварц
1—кварцевый элемент, 2—«подушки», 3—стальные пружины.

ны пластин, между которыми помещен кварцевый элемент (рис. 1). Часть образцов была испытана после термической обработки, предназначенной для снятия внутренних напряжений, а часть — без термической обработки. Состояние кварца после сжатия контролировали че-

рез каждые 5 или 10 Mn/m^2 нагрузки поляризационным микроскопом, позволяющим обнаруживать возникновение в кристалле двойников, микротрещин и внутренних напряжений [3].

Средняя нагрузка, вызывающая начальное разрушение кристаллов природного кварца при сжатии вдоль оси X (табл. 1) без термической обработки, равна примерно 100 Mn/m^2 . После термической обработки,

Таблица 1

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Нагрузка, Mn/m^2	120	90	120	120	100	90	100	100	10	100

Примечание. После нагрузки у всех образцов появилась трещина.

состоявшей в медленном (в течение 12 ч) прогреве образцов до 400 ÷ 500°C и тренировке при максимальной температуре в течение 2 ч, у части образцов обнаружались ранее неприметные механические дефекты и отход образцов составил около 10%. Для образцов же верхний предел разрушающего усилия возрос в 2—3 раза и составил 200 ÷ 300 Mn/m^2 (табл. 2).

Таблица 2

Номер образца	Нагрузка, Mn/cm^2	Состояние кварца после нагрузки
1	190	Трещина
2	270	То же
3	260	Без изменений
4	265	Трещина
5	290	То же

Таблица 3

Номер образца	Нагрузка, Mn/cm^2	Состояние кварца после нагрузки
1	250	Трещина
2	30	То же
3	120	Без изменений
4	200	То же
5	260	••
6	250	••
7	200	••
8	230	••

Таблица 4

Номер образца	Нагрузка, Mn/cm^2	Состояние кварца после нагрузки
1	260	Трещина
2	270	Без изменений
3	210	То же
4	265	••
5	230	••

Результаты испытаний искусственного кварца приведены в табл. 3 и 4. Разрушающее усилие для них оказалось равным 250 ÷ 300 Mn/cm^2 и не зависящим от термической обработки, что наблюдалось для естественного кварца. Это может быть обусловлено условиями кристаллообразования материала образцов.

Кроме термической обработки кристаллов кварца, для повышения их прочности большое значение имеет качество обработки рабочих поверхностей как образцов, так и пластин, передающих нагрузку (рис. 1). В табл. 5 приведены результаты испытания 24 образцов искусственного кварца с различной степенью обработки поверхностей. Отклонение от плоскости стальных пластин во всех случаях не превышало 0,1 мм на 1 см.

У 10 образцов с отклонением от плоскости не менее

Таблица 5

Отклонение от плоскости, $мм/см$	Разрушающая нагрузка, Mn/m^2		
	Прокладки		
	нет	свинцовые	алюминиевые
5	50	50	50
1-2	50-100	50-100	50-100
0,2-0,3	500	—	—

от плоскости не менее

5 мкм/см разрушение наступило при нагрузках не более 50 Мн/м^2 , у 10 образцов — с отклонением 1–2 мкм предел прочности повысился примерно в два раза. Остальные образцы с отклонением от плоскостности рабочих поверхностей 0,2–0,3 мкм/см допускают нагрузку до 500 Мн/м^2 . В табл. 5 показано также влияние на разрушение кварца тонких усредняющих нагрузку прокладок. Применение свинцовых и алюминиевых прокладок толщиной 10 и 20 мкм не повысило заметным образом верхний предел разрушения образцов.

При равномерном распределении нагрузки на поверхности кварцевых образцов разрушение их, как правило, происходит с образованием плоскостей сколов, имеющих между собой угол $\alpha = 76^\circ 26'$ (рис. 2), так

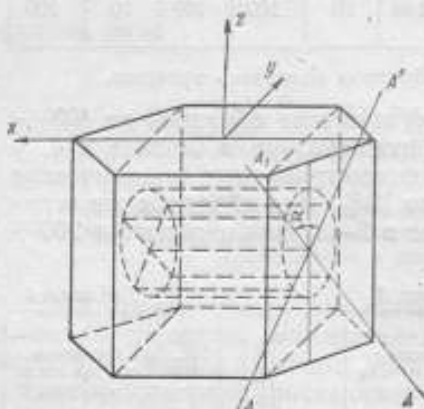


Рис. 2. Ориентация сколов кварцевых образцов (линии AA') относительно кристаллографических осей кварца.

что ось Z делит угол α пополам. Плоскости сколов соответствуют плоскостям ромбоэдров, имеющих наименьшее количество связей между атомами кристаллической решетки [4].

Как правило, высококачественные кварцевые образцы выдерживают и допускают без разрушения многократные (порядка 2–3 тыс.) деформации, вызываемые равномерно распределенной нагрузкой 100–500 Мн/м^2 , что дает основания предполагать возможность и более длительной их эксплуатации в измерительной аппаратуре.

Описанная методика отбора образцов природного кварца из-за дефицита пьезокварцевого сырья не может быть полностью применена к рабочим элементам больших размеров, необходимых для измерения значительных

усилий. Одновременно с размерами кварцевого элемента увеличивается степень его ненадежности, что может приводить к разрушению дорогостоящих изделий, имеющих невыявленные дефекты. Повышение степени надежности пьезокварцевых датчиков возможно путем создания так называемых «мозаичных» датчиков, представляющих набор кварцевых элементов малых размеров с необходимой суммарной рабочей площадью. Однако из-за возрастания боковой поверхности кварцевых элементов такие датчики имеют большие утечки. Поэтому более целесообразным представляется использовать в пьезоэлектрических датчиках большие кристаллы недорогого искусственного кварца.

Проведенные испытания природного и искусственного кварца на разрушение при деформации сжатия вдоль оси X позволяют считать допустимой на кварц нагрузку 10² Мн/м^2 и заменять в пьезоэлектрических измерителях механических величин природный кварц искусственным при условии необходимой стабильности электромеханических свойств искусственного кварца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданов Г. С., Физика твердого тела, Изд. МГУ, 1962.
2. Физический энциклопедический справочник, т. 4, «Советская энциклопедия», 1965, стр. 256–258.
3. Шубников А. В., Кварц и его применение, АГ СССР, 1940.
4. Белов И. В. и Классен-Неклюдова М. В., О характере разрушения кристаллов, ЖТФ, т. XVIII, вып. 3, 1948, стр. 265.

Поступила в редакцию
23/IV 1965 г.

ЗАВИСИМОСТЬ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА
КВАРЦА ОТ МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Изложена методика эксперимента и описана аппаратура, а также рассмотрены источники погрешностей при определении зависимости пьезоэлектрического коэффициента от механического напряжения

В настоящее время не существует единого мнения относительно зависимости пьезоэлектрического коэффициента кварца d_{11} от механического напряжения. По некоторым опубликованным данным в области малых нагрузок порядка $1-10 \text{ Мн/м}^2$ коэффициент d_{11} уменьшается с увеличением нагрузки [1], по другим — остается неизменным [2]. В области больших нагрузок [3] коэффициент d_{11} не изменяется в пределах точности измерений 0,1% вплоть до нагрузок 350 Мн/м^2 . Известно также, что при обратном пьезоэлектрическом эффекте коэффициент d_{11} уменьшается по экспоненциальному закону с увеличением напряжения [4]. Между результатами, полученными при прямом и обратном пьезоэффектах, наблюдаются расхождения, достигающие 40% [5].

Современные теории объясняют пьезоэлектрическую поляризацию нарушением состояния электрического и механического равновесия в анизотропных диэлектрических средах определенной симметрии. Связь между поляризацией и механическим напряжением (деформацией) характеризуется пьезоэлектрическим тензором d_{ikt} . В частности, для кварца при однородной его деформации вдоль оси X, вызванной напряжением F_x , поляризация Q равна

$$Q = Q_x = d_{11}F_x, \quad (1)$$

отсюда пьезоэлектрический коэффициент

$$d_{11} = \frac{Q_x}{F_x}. \quad (2)$$

Для исследования зависимости коэффициента d_{11} кварца от механического напряжения использован прямой пьезоэлектрический эффект, вызываемый механическим напряжением вдоль электрической оси X образца. Пьезокварцевый элемент 10 помещен в герметизированной камере (рис. 1) между электродами для снятия пьезозарядов. Крышка 2 камеры, как и фишка 12 для выводов от электродов уплотнены с помощью резинового кольца 7. Герметизация камеры, а также и другие приведенные ниже меры уменьшают утечки пьезозарядов и стабилизируют условия измерений.

Толщина кварцевых элементов и электродов согласована с высотой камеры таким образом, что при нагружении крышка перемещается только на величину сжатия элементов, несущих нагрузку. Благодаря этому мембрана ничтожно мало деформируется и не вносит заметных погрешностей при измерении пьезоэффекта.

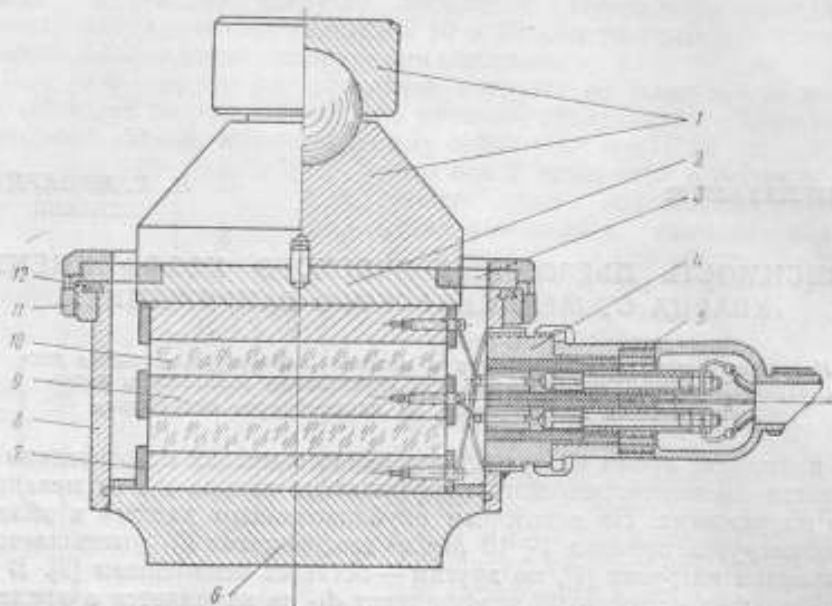


Рис. 1. Разрез пьезоэлектрической камеры:

1—подушки*, 2—крышка, 3—мембрана, 4—стекло, 5—плата, 6—цинк, 7—резистивное кольцо, 8—корпус, 9—электрод, 10—кварцевый элемент, 11—сайка, 12—фланец.

В экспериментальной камере (рис. 1) предусмотрена равномерная передача усилия на кварцевый элемент через стальные «подушки» 1 и электроды 9. Поэтому электроды изготовлены в виде плоскопараллельных пластин с оптически доведенными поверхностями.

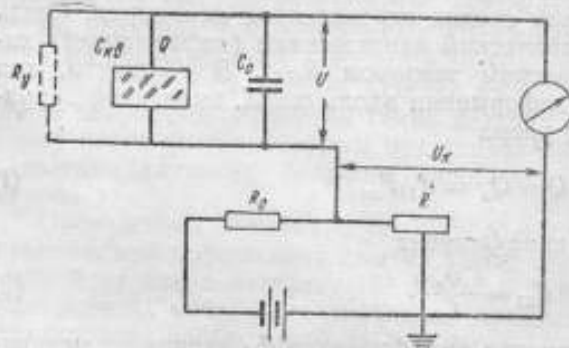


Рис. 2. Принципиальная электрическая компенсационная схема с ламповым электрометром.

напряжение U и емкость C схемы, можно вычислить коэффициент d_{11} из формулы

$$d_{11} = \frac{Q}{F} = \frac{UC}{F}, \quad (2')$$

где F — приложенная сила,

Погрешность пьезоэлектрического коэффициента d_{11} , определяемая по формуле (2), зависит от естественной нестабильности коэффициента $\delta d_{11}/d_{11}$ и погрешностей измерения U , F и C

$$\frac{\Delta d_{11}}{d_{11}} = \sqrt{\left(\frac{\delta d_{11}}{d_{11}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2}. \quad (3)$$

Нестабильность пьезоэлектрического коэффициента $\delta d_{11}/d_{11}$, определяемая при некоторых специальных условиях [6], не превышает 0,005%.

Погрешность измерения компенсационного напряжения $\Delta U/U$ определяется погрешностью компенсационной цепи $\Delta U_k/U_k$, чувствительностью нулевого указателя $\Delta U_n/U$ и утечками во входной цепи электрометра $\Delta U_y/U$

$$\frac{\Delta U}{U} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_k}{U_k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_n}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_y}{U}\right)^2}. \quad (4)$$

При компенсационном методе измерения напряжения (рис. 2) имеем

$$U_k = U \frac{R}{R+R_0}, \quad (5)$$

где R и R_0 — сопротивления компенсационной цепи.

Выражая в формуле (4) U_k через значения напряжений нормальных элементов компенсационной цепи, получим

$$\frac{\Delta U}{U} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{ns}}{U_{ns}}\right)^2 + \left(\frac{R}{R+R_0}\right)^2 \left[\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_0}{R_0}\right)^2\right] + \left(\frac{\Delta U_n}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_y}{U}\right)^2}. \quad (4')$$

Так как $\frac{R}{R+R_0} < 1$, а погрешность за счет делителей компенсационной цепи зависит от выбора элементов схемы и они могут быть взяты такими, что $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta R_0}{R_0}$, то погрешность компенсационного напряжения $\Delta U/U$ будет

$$\frac{\Delta U}{U} \ll \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{ns}}{U_{ns}}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_n}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_y}{U}\right)^2}. \quad (4'')$$

Для высокой точности измерения коэффициента d_{11} в измерительной схеме предусмотрено использование следующих высокостабильных элементов и средств. Так, в компенсационной цепи использованы нормальные элементы III класса с годовой вариацией э.д.с. $3-4 \cdot 10^{-3} \%$ и относительным температурным коэффициентом не более $1,0 \cdot 10^{-2} \%/град$ в интервале температур $10-40^\circ\text{C}$.

Сопротивления компенсационной цепи R и R_0 собраны из манганиновых микропроволочных сопротивлений типа МВСГ температурного класса А (температурный коэффициент $\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$ на $1 град$) с отклонением от номинала не более 0,03%. Погрешность, вносимая сопротивлениями в результате их нестабильности, за все время измерений не превышала 0,03%.

Нулевой электрометрический усилитель имел чувствительность $\eta = 100 \text{ дел}/12 \text{ мв}$. При компенсирующем напряжении $U_k \geq 2 \text{ в}$ погрешность $\Delta U_n/U$ не превышала 0,03%.

Погрешность $\Delta U_y/U$ определяется как относительное изменение напряжения U из-за утечек пьезозарядов Q , которое зависит от постоянной времени $\tau = R_y C$. За небольшой период Δt , равный времени одного измерения, погрешность

$$\frac{\Delta U_y}{U} = \frac{\Delta Q}{Q} = -\frac{\Delta t}{\tau} = -\frac{\Delta t}{R_y C}. \quad (6)$$

Сопротивление утечки по кварцу в зависимости от его размеров (при прочих равных условиях) составляет $10^{14} \div 10^{15}$ ом·см. Поэтому, чтобы при $\Delta t = 30 \div 40$ сек, $\frac{\Delta U_y}{U} \leq 0,03\%$, должны быть постоянная времени $\tau \geq 10^5$ сек, а $C \geq 10^{-9}$ ф.

Уменьшению утечек в измерительных цепях способствовало также создание беспотенциальных участков схемы за счет введения отрицательной обратной связи и компенсационного метода измерения напряжения.

Подключаемые параллельно кварцевому элементу емкости C_0 были подобраны из точных пленочных конденсаторов после годичного испытания их стабильности и снятия температурных характеристик.

Годовая нестабильность конденсаторов не превышала $1,5 \cdot 10^{-3}\%$ и температурный коэффициент $1,5 \cdot 10^{-2} \%/град$.

Изменение емкости самого кварцевого элемента, вызываемое его деформацией

$$\left(\frac{\Delta C}{C}\right)_x = \frac{C_{кв} X_x}{C_0 + C_{кв}}$$

где $X_x = 10^{-4}$ — относительная деформация кварца.

При максимальном значении $X_x = 10^{-4}$, соответствующем разрушению кварцевого элемента, изменение емкости кварца еще так мало, что не может привести к заметному влиянию на общую емкость схемы. При $C_0 = 10^{-9}$ ф и $C_{кв} = 2 \cdot 10^{-10}$ ф изменение емкости $(\Delta C/C)_x < 2 \cdot 10^{-5}$.

При относительных измерениях зависимости коэффициента d_{11} от непосредственной нагрузки погрешность $\Delta C/C$ определяется только указанной временной и температурной нестабильностью емкости C , а при абсолютных измерениях — также и погрешностью измерения ее абсолютного значения. В проведенных опытах емкость была определена с погрешностью 0,02%.

Усилие на пьезокварцевом образце создавалось непосредственной нагрузкой или образцовыми силовыми измерительными машинами 2-го разряда. В последнем случае произвели серию измерений, позволившую получить среднее значение этой нагрузки с погрешностью не более 0,03%.

Возможным источником погрешности метода определения зависимости d_{11} от силы F является также влияние обратного пьезоэлектрического эффекта, величина которого зависит от действующей силы F и общей емкости схемы C . Напряжение U , вызываемое силой F , создает на кварце электрическую напряженность $K_x = U/X$, где X — толщина кварцевого элемента. Под действием этой напряженности в кварце возникает деформация $X_x = \Delta X/X = d_{11} K_x$ и механическое напряжение

$$F_x = c_{11} X_x S,$$

где c_{11} — модуль упругости кварца, а S — сечение образца.

При $F = 10^4$ н и минимальной емкости $C = 2,4 \cdot 10^{-9}$ ф для кварцевого образца толщиной $X = 1$ см и площадью 50 см² механическое напряжение $F_x = 0,1$ н, а $\frac{F_x}{F} = 0,001\%$.

Таким образом, суммарная погрешность абсолютного значения коэффициента d_{11} и, следовательно, метода определения зависимости его от нагрузки по формулам (3) и (4'') составляет не более 0,065% при воспроизведении силы прямой нагрузкой или при многократном воспроизведении ее образцовыми силовыми измерительными машинами 2-го разряда.

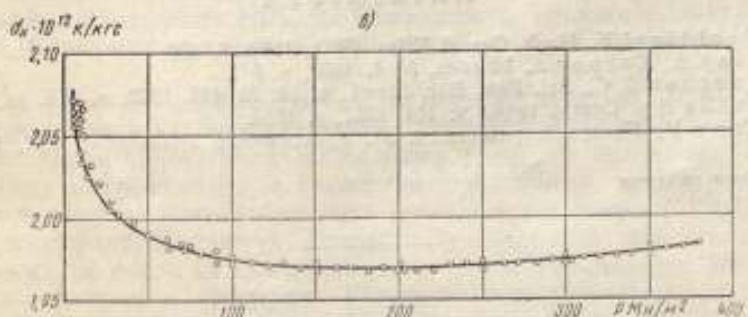
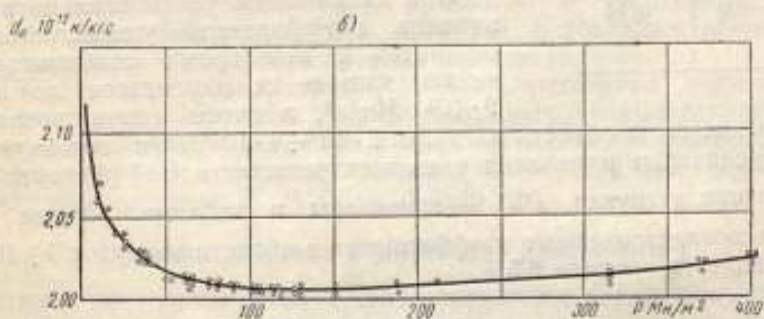
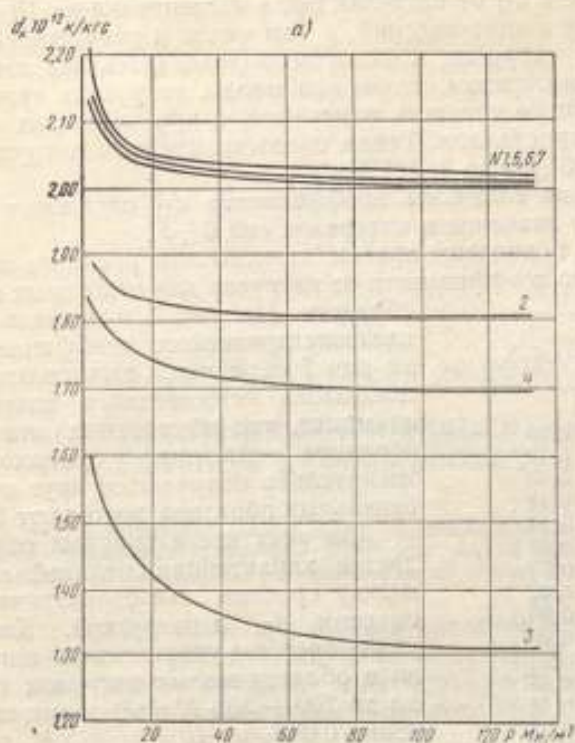


Рис. 3. Зависимость пьезоэлектрического коэффициента d_{11} от нагрузки для образцов кварца:
 а — естественного из одного моноблока; б — естественного с рабочей поверхностью $1,0 \text{ см}^2$;
 в — искусственного с рабочей поверхностью $1,0 \text{ см}^2$.

Зависимость d_{11} от нагрузки была исследована на 10 образцах кварца различных месторождений, в том числе и искусственного.

Диапазон нагрузок, в котором определялась эта зависимость, выбирали таким образом, чтобы при малых нагрузках можно было получить достаточную точность измерения, а при больших — не вызвать разрушения кристаллов. Таким образом, пределы нагрузки изменялись примерно от $5 \div 10$ до $4 \cdot 10^2$ Мн/м^2 .

Измеряемые величины коэффициента d_{11} отражают некоторое усредненное его значение в интервале сил $0 \div F$.

На рис. 3 приведены кривые зависимости среднего значения пьезоэлектрического коэффициента от нагрузки для некоторых исследованных образцов. На рис. 3 а показана зависимость пьезоэлектрического коэффициента от нагрузки для 7 образцов, изготовленных из одного моноблока естественного кварца. Обращает внимание, что абсолютные значения d_{11} этих образцов, найденные в одинаковых условиях, значительно отличаются друг от друга и для отдельных образцов достигают 30%.

Для всех исследованных образцов наблюдается характерная нелинейная зависимость между средним пьезоэлектрическим коэффициентом d_{11} и нагрузкой. Коэффициент d_{11} уменьшается с увеличением нагрузки, особенно в области малых нагрузок (приблизительно до $200 \div 300$ Мн/м^2) и имеет среднее значение 0,05% на 10 н.

При дальнейшем увеличении нагрузки изменение коэффициента уменьшается и он стремится к некоторому стабильному значению, которое не изменяется до нагрузки $2 \cdot 10^2$ Мн/м^2 , а затем снова возрастает и изменение его в области нагрузок $2 \cdot 10^2 \div 4 \cdot 10^2$ Мн/м^2 составляет 0,5%.

Усредненные изменения пьезоэлектрического коэффициента d_{11} при изменении нагрузки $P = \frac{F}{S}$ приведены в таблице. Общее изменение пьезоэлектрического коэффициента в области нагрузок $5 \div 10^2$ Мн/м^2 составляет в среднем 6,5%.

Нагрузка, P Мн/м^2	$\Delta d_{11}/d_{11}$, %
5—10	0,76
10—20	0,72
20—30	0,48
30—40	0,48
40—50	0,14
50—60	0,07
60—70	0,07
70—80	0,01
80—90	0,01
90—100	0,01
100—150	0,01
150—200	0,01
200—250	0,01
250—300	0,14
300—350	0,14
350—400	0,14

ЛИТЕРАТУРА

1. Nachtigal F., Nach. Ges. d. Wiss. Gött., 1899, S. 109.
2. Clay J., Karper J., Physica, № 4, 1937, p. 311.
3. Karcher J. C., Sci. Pap. Bur. Stand., v. 18, № 445, 1922, p. 257.
4. Tsi-Ze Ny, Compt. rend., v. 184, 1927, p. 1645.
5. Кэди У., Пьезоэлектричество и его практическое применение, ИЛ, 1949.

Поступила в редакцию
23/IV 1965 г.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ УДАРНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Описан простой и достаточно точный метод измерения усилий при ударном нагружении. Приведены результаты измерения усилий при испытании образцов на ударное растяжение, изгиб и твердость.

Для определения механических свойств металлов при динамическом нагружении пользуются различными способами. Наиболее полную характеристику испытуемого металла можно получить при помощи различного рода датчиков с применением осциллографов и фотоэлементов, но такой способ слишком трудоемок, а полученные результаты не всегда имеют необходимую точность [1, 2]. Поэтому он до сих пор не нашел широкого применения в заводской практике. В последнее время предложено довольно много более простых методов [3, 4, 5].

В Свердловском филиале ВНИИМ для определения механических характеристик металлов при динамических нагрузках изготовлен упругий динамометр. Он вмонтирован в приспособление, укрепляемое в маятниковом копре. При создании такого динамометра были приняты во внимание рекомендации Н. Н. Давиденкова [6].

Принцип действия и устройство динамометра

Динамометр состоит из двух контактирующих торцовыми поверхностями цилиндров, изготовленных из Ст (—) ШХ-15, закаленной и отпущенной на твердость HRC-60. Поверхность первого цилиндра сферическая, а второго — плоская, обе поверхности шлифованы и полированы.

Сила ударного сопротивления определяется по величине диаметра упругого отпечатка, возникающего на контактирующих поверхностях под действием сжимающей силы. След упругого отпечатка отчетливо виден под микроскопом, а также невооруженным глазом, если перед сжатием одну из контактирующих поверхностей покрыть очень тонким слоем парафина. Покрытая поверхность пригодна для многократных измерений, но после каждого измерения отпечаток стирают. Метод основан на применении формулы Герца, устанавливающей связь между диаметром отпечатка и величиной силы, сжимающей два тела, контактирующих между собой сферическими или плоской и сферической поверхностями.

Если оба цилиндра изготовлены из одного и того же материала, то сила P как при статическом, так и при динамическом сжатии (константы

упругости статические и динамические практически между собой не отличаются) выражается через диаметр d упругого отпечатка формулой

$$P = \kappa d^3, \quad (1)$$

где κ — коэффициент пропорциональности, равный

$$\kappa = \frac{E}{12(1 - \mu^2)R}. \quad (2)$$

Здесь E — модуль нормальной упругости в $H/м^2$;
 μ — постоянная Пуассона;
 R — радиус сферической поверхности в $м$.

Коэффициент κ можно определять статическими испытаниями.

Образцы на ударное растяжение, изгиб и твердость удобнее испытывать на обычном маятниковом копре, например, МК-30, так как при испытании на растяжение и изгиб определяется одновременно работа деформации и сила сопротивления образца.

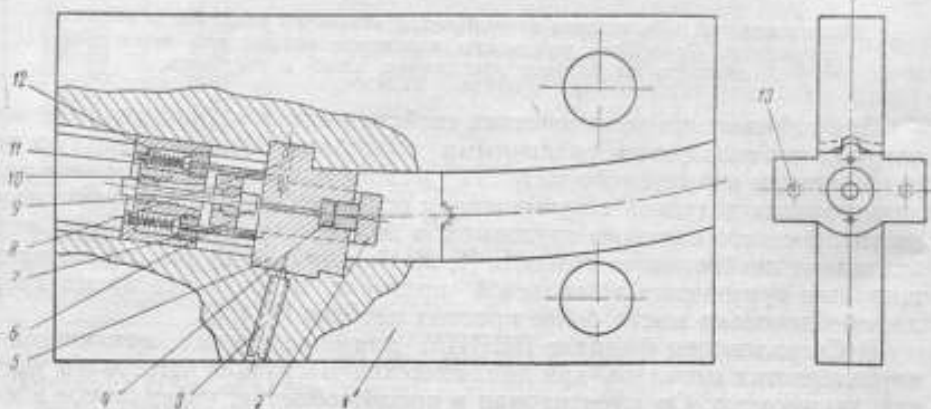


Рис. 1. Диск маятникового копра с приспособлением для испытания образцов на ударное растяжение.

Для испытаний металлических образцов на растяжение, в диске маятника устанавливают приспособление, служащее для крепления испытуемого образца и, последовательно с образцом, упругого элемента.

На рис. 1 изображен диск маятника 1, в прорези которого вмонтированы подвижная бабка 10 и неподвижная 5. Образец 6 с помощью сухаря 9 одним концом укреплен в хомуте 2, который, схватывая бабку 5, упирается в упругий элемент 4. Положения этой бабки и хомута фиксируются стопорным винтом 3 и пружинной защелкой 8 соответственно. Устройство, состоящее из упорной шпильки 11, пружины 12 и гайки 7, служит для перемещения подвижной бабки 10 в крайнее положение после установки образца. Резиновые пробки 13 предназначены для смягчения удара, в качестве последних можно устанавливать обычные ученические резинки для карандаша.

Испытание образцов на ударное растяжение без применения резиновых амортизаторов не рекомендуется, так как приводит к преувеличенным значениям измеряемого ударного сопротивления.

При изучении влияния жесткости опор на показания динамометра были изготовлены специальные опоры, с помощью которых можно изменять жесткость, а следовательно, и продолжительность удара (рис. 2).

В корпусе опоры 1 имеется сквозное отверстие. На участке в части отверстия большего диаметра помещены тарельчатые пружины 2; при ударе подвижной бабки по бойку 3 гайка 4 сжимает пружины, которые давят на упругий элемент 6, упирающийся в задвижку 7, выполненную в виде ласточкиного хвоста.

Упругий элемент, состоящий из двух контактирующих цилиндров, помещен на участке части отверстия малого диаметра и предназначен для измерения силы удара бабки об опоры. Для ограничения отскока бойка после удара служит крышка 5, закрепляемая винтами.

Требуемая жесткость может быть получена при определенном количестве тарельчатых пружин, помещенных в отверстие.

На рис. 3 показана зависимость диаметра упругого отпечатка от величины жесткости для Ст. 3 и У10. Кривая показывает, что до определенного значения жесткости ($\sim 3 \text{ Мн/м}$) диаметр отпечатка не изменяется; при более высоких значениях он возрастает и при вполне жестком ударе (об обычные опоры) для Ст. 3 достигает 5,6 мм. Сила сопротивления образца, найденная по этому диаметру, в 1,6 раза больше, чем действительная, т. е. найденная при жесткости опор меньшей $\sim 3 \text{ Мн/м}$.

Для определения сопротивления при испытании металлических образцов на ударный изгиб в диск маятника вместо обычного ножа устанавливают оправу 4 (рис. 4), в которой помещены сферический сегмент 3 и нож 1. Положение ножа фиксируется с помощью направляющих шпилек 2. Торцовая поверхность его контактирует с сферической сегмента, и при ударе на контактирующих поверхностях возникает упругий отпечаток, след которого сохраняется после покрытия одной из контактирующих поверхностей тонким слоем парафина. Силу сопротивления при испытании на ударный изгиб определяют по величине диаметра отпечатка. Коэффициент пропорциональности K между силой ударного сопротивления и диаметром отпечатка, как и для растяжения, находят по результатам статических испытаний.

При испытании образца на ударную твердость обычные опоры маятникового копра заменяют жесткой балкой, на которую устанавливают испытуемый образец, а в диск маятника вместо ножа устанавливают оправу 3 (рис. 5). В цилиндрическое отверстие оправы помещают упругий элемент 1, состоящий из цилиндра 4 и сферического сегмента 5. Шарик диаметром 10 мм удерживается нахлестной гайкой 2. При ударе маятника по образцу ша-

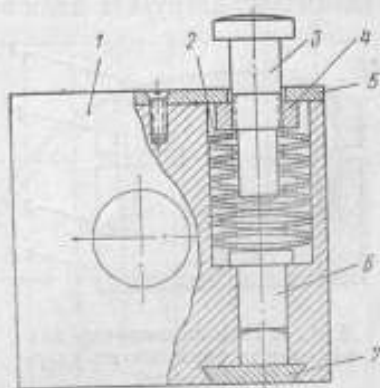


Рис. 2. Одна из опор маятникового копра, в отверстие которой вмонтированы тарельчатые пружины.

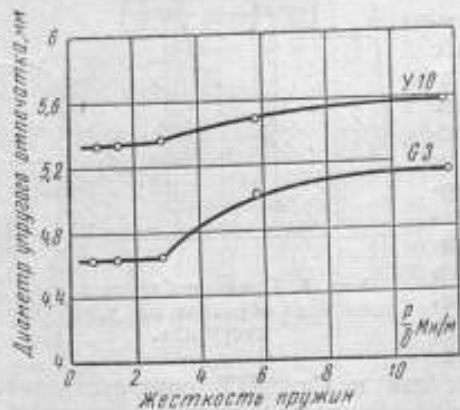


Рис. 3. Зависимость диаметра упругого отпечатка от жесткости пружин.

рик оставляет на нем пластический отпечаток, а на контактирующих поверхностях динамометра остаются следы упругих отпечатков, по которым определяют ударную нагрузку на шарик.

Ударная твердость определяется как отношение ударной нагрузки к площади поверхности отпечатка или к площади проекции его на образце.

Результаты многократных статических испытаний динамометра при различных нагрузках дали значение коэффициента пропорциональности в формуле (1), равное 109,5. Колебание диаметра отпечатка от среднего его значения не превышает $\pm 0,6\%$, что соответствует колебаниям нагрузки $\pm 1,8\%$.

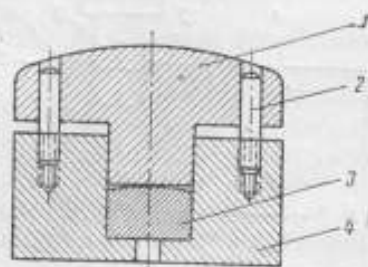


Рис. 4. Нож-динамометр для испытания образцов на ударный изгиб.

Определение сопротивления деформированию металлов при различных видах ударного нагружения

Описанный выше динамометр был применен для измерения сопротивления деформированию некоторых материалов при ударном испытании на растяжение, изгиб и твердость.

Чтобы судить о воспроизводимости результатов измерения сопротивления деформированию при ударном нагружении, были испытаны два образца круглого сечения диаметром $d = 5$ мм и рабочей длиной $l = 55$ мм из армо-железа и Ст. Я1Т. Каждый из них поочередно подвергался то ударному, то статическому растяжению на 1—2%. После каждого ударного нагружения под микроскопом измеряли диаметр упругого отпечатка, след которого был отчетливо виден на контактирующих поверхностях динамометра.

Отпечаток измеряли в двух взаимно перпендикулярных направлениях с погрешностью до 0,01 мм. По среднему значению отпечатка определяли максимальную силу ударного сопротивления образца, а затем вычисляли условное напряжение как для ударного, так и для статического нагружения и далее строили условные диаграммы растяжения, полученные на одном и том же образце при статическом и динамическом нагружении. На рис. 6 и 7 приведены диаграммы растяжения, полученные для армо-железа и Ст. Я1Т соответственно. Расположение точек вдоль кривой, полученной при ударном нагружении, почти не отличается от расположения их на кривой при статическом нагружении. Это свидетельствует о хорошей воспроизводимости результатов измерений при ударной нагрузке.

Следует указать, что кривые ударного нагружения располагаются несколько ниже того положения, которое они должны были бы занимать при однократном ударе. Это объясняется тем, что эффект упрочнения, зависящий от степени деформации в данном случае частично снимается в процессе остановок между динамическим и статическим нагружением.

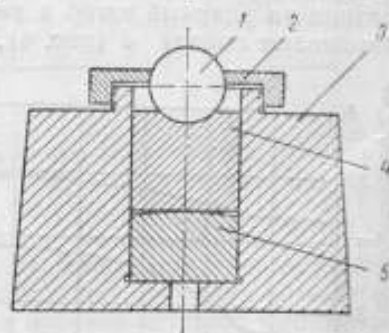


Рис. 5. Приспособление для испытания образцов на ударную твердость.

В таблице приведены результаты определения механических характеристик некоторых металлов, полученных при различных видах ударного испытания на маятниковом копре с применением предлагаемого динамометра.

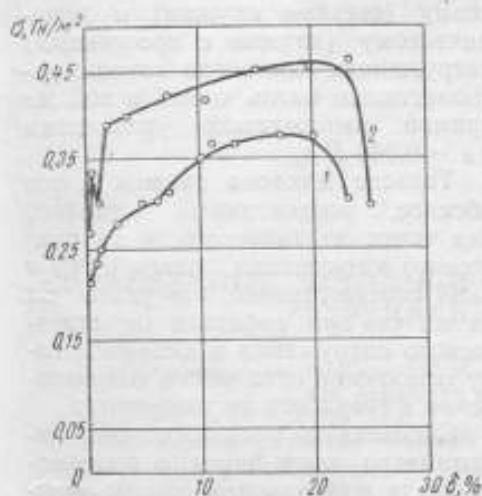


Рис. 6. Диаграммы: 1—статического и 2—динамического растяжения арко-железа.

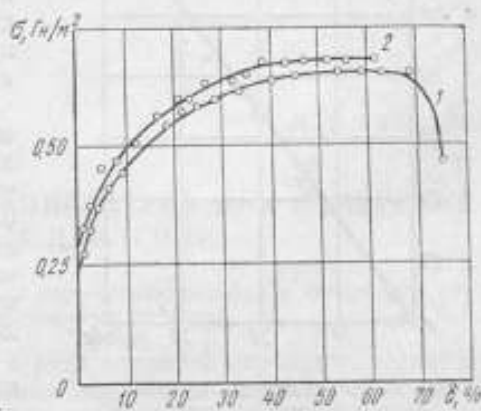


Рис. 7. Диаграммы: 1—статического и 2—динамического растяжения стали 41Т.

Материал	Динамические характеристики			Статические характеристики			Отношение динамических характеристик к статическим		
	Предельное сопротивление $\sigma_{\text{в}}^{\text{д}}$, МПа	Твердость по Мейеру $H_M^{\text{д}}$, МПа	Максимальное усилие при испытании на разрыв, обр. на ударную вязкость, Р, КД	Предельное сопротивление $\sigma_{\text{в}}^{\text{ст}}$, МПа	Твердость по Мейеру $H_M^{\text{ст}}$, МПа	Максимальное усилие при испытании на разрыв, обр. на ударную вязкость, Р, КД	$\frac{\sigma_{\text{в}}^{\text{д}}}{\sigma_{\text{в}}^{\text{ст}}}$	$\frac{H_M^{\text{д}}}{H_M^{\text{ст}}}$	$\frac{P^{\text{д}}}{P^{\text{ст}}}$
Ст. У10	542	1510	16,38	417	1148	12,90	1,30	1,31	1,27
Ст. 40Х	593	1890	16,97	577	1630	15,12	1,18	1,16	1,13
Ст. 30ХГСА	768	2272	22,30	661	2040	18,22	1,16	1,12	1,22
Арко-железо	952	3020	22,30	852	2630	20,10	1,11	1,15	1,08
Дюралюминий	469	1430	—	358	1138	—	1,31	1,26	—
Состаренный	512	1252	—	500	1255	—	1,03	1,00	—
Алюминий	108	333	—	77	250	—	1,4	1,45	—

Из этой таблицы видно, что значения динамического коэффициента $\left(\frac{\sigma_{\text{в}}^{\text{д}}}{\sigma_{\text{в}}^{\text{ст}}}, \frac{H_M^{\text{д}}}{H_M^{\text{ст}}} \right)$, полученные из данных испытания на растяжение и твердость, для каждого из семи металлов отличаются между собой не более, чем на 4%, что не выходит за пределы естественного разброса, обусловленного неоднородностью свойств материала и неизбежными погрешностями при измерении.

Динамический коэффициент $P_d/P_{ст}$ надрезанных образцов при изгибе для Ст. 40X оказался на 8% больше динамического коэффициента для твердости; на это увеличение, вероятно, оказал влияние надрез.

На рис. 8 приведена зависимость временного сопротивления σ_b от твердости по Мейеру H_M . Точки на кривой соответствуют статическому (светлые кружки) и динамическому (кружки с крестиками) нагружению, одинаково хорошо располагаются вдоль одной и той же прямой, выражаемой уравнением

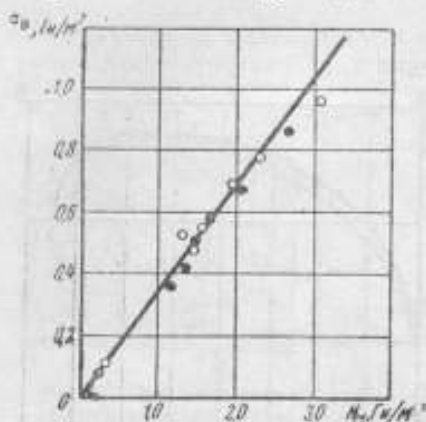


Рис. 8. Зависимость временного сопротивления от твердости по Мейеру \circ —для статики и \bullet —для динамики.

$\sigma_b = 0,346 H_M$.

Тангенс наклона прямой к оси абсцисс, подсчитанный отдельно для точек статического и динамического нагружения, равен 0,345 и 0,347 соответственно, это указывает на то, что при переходе от статического нагружения к динамическому отношение временного сопротивления к твердости не изменяется.

С помощью предложенного динамометра имеющиеся в промышленности маятниковые копры можно использовать для определения ударных нагрузок, а следовательно, и напряжений при различных ви-

дах испытаний материалов. Для этого в диск маятника устанавливают описанное выше приспособление с упругим динамометром.

ВЫВОДЫ

С помощью упругого динамометра, основанного на сжатии двух тел, можно достаточно точно измерять сопротивление деформированию при различных его видах, используя для этой цели обычный маятниковый копер.

Для получения правильных результатов при испытании на ударное растяжение необходимо, чтобы жесткость опор не превосходила 3 Мн/м .

Отношение временного сопротивления к твердости при переходе от статического к динамическому нагружению не изменяется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ужик Г. В. и Волошенко-Климовицкий Ю. Я., Сопротивление начальной пластической деформации при ударном растяжении в условиях низкой температуры. Некоторые проблемы прочности твердого тела. Сборник статей, посвященный восьмидесятилетию академика УССР Н. Н. Давиденкова, Изд. АН СССР, 1959, стр. 238.
2. Волошенко-Климовицкий Ю. Я., О протекании процесса упруго-пластического растяжения при ударе, Известие Академии Наук СССР ОТН № 4, 1956, стр. 147.
3. Погодин-Алексеев Г. И., Свойства металлов при ударном нагружении, Металлургиздат, 1953.
4. Погодин-Алексеев Г. И. и Артамонов В. А., Методика построения диаграмм деформации при ударном растяжении стали, «Заводская лаборатория», № 2, 1962, стр. 215.
5. Шпет В., Замечания к вопросу об испытании ударом, «Металл», июль, 1957.
6. Давиденков Н. Н., Опыт измерения динамической прочности стали, ЖПФ, вып. 1, 1924, стр. 75.

Поступила в редакцию
9/VII 1964 г.

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ПЕРЕМЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ**

*Даны классификация и краткий обзор современных методов и аппаратуры
для измерения переменных давлений.*

Современное развитие техники в ряде отраслей народного хозяйства СССР вызвало необходимость применения большого числа средств измерения давления.

Особенно важной становится задача изучения быстропотекающих процессов, сопровождающихся изменением давления в жидких и газообразных средах.

Переменные давления, с которыми приходится сталкиваться в ряде отраслей промышленности (авиационной, автомобильной, тракторной, химической и дизелестроении и др.), а также во многих исследованиях охватывают большой диапазон как средних значений давления, так и частотных характеристик. Поэтому и существует большое количество приборов, отличающихся назначением, устройством и точностью.

В зависимости от рода измеряемой величины все приборы, измеряющие переменные давления, могут быть разделены на четыре основные группы: а) приборы максимального давления; б) среднего давления по времени; в) измеряющие скорость изменения давления и г) измеряющие мгновенные давления в течение полного цикла изменения, т. е. записывающие диаграмму давлений.

В первую группу входят: «безынерционные» жидкостные манометры и максиметры, во вторую — пружинно-поршневые пиметры с инерционными массами и капиллярные пиметры с пружинными манометрами.

Максимальные и средние значения давлений часто недостаточны для полной характеристики быстропеременного процесса, связанного с изменением давления. Поэтому перечисленные выше приборы находят ограниченное применение.

Скорость изменения давления измеряют индикатор давления с индукционным преобразователем и прибор анероидного типа с рычажным контактным устройством, но эти приборы встречаются в измерительной практике редко.

В четвертую группу входят приборы, позволяющие определять давление в любой момент рабочего цикла. К числу этих приборов относятся: манометры с мембранной коробкой, снабженной рычажным или оптическим устройствами, пружинно-поршневые индикаторы мощности с винтовыми или балочными пружинами и приборы, основанные на преобразовании давления в электрическую величину.

Существуют еще так называемые стробоскопические приборы, многократно в течение сотен циклов записывающие диаграмму изменения давления. Обработка этих записей позволяет получить средние значения мгновенных давлений в любой момент цикла. Эту группу составляют пневмоэлектрические индикаторы давления, различающиеся по конструктивному оформлению воспринимающих элементов и регистрирующих устройств (системы ЦИАМ, МАИ и др.).

Из указанных выше приборов, измеряющих переменные давления, следует выделить как наиболее совершенные, универсальные и точные так называемые электрические индикаторы давления, основанные на преобразовании давления в электрическую величину.

Эти индикаторы наиболее полно соответствуют основным требованиям, предъявляемым к приборам для измерений переменных давлений, имея малую инерционность, высокую частоту собственных колебаний, высокую чувствительность, небольшие размеры воспринимающих элементов, возможность дистанционных и автоматических измерений и др. Поэтому область применения приборов с электрическими преобразователями необычайно широка, несмотря на их относительную сложность.

В Советском Союзе проводятся ряд работ по дальнейшему совершенствованию электрических индикаторов давления, способствующих решению многих теоретических проблем и практических задач. Проводят работы в этой области и многие зарубежные фирмы (Цейсс—Икон, Сименс, Гламан и Грениерт, Фарнборо, Салфорд, Дейв Инструментс, Сименс—Роджерс и др.).

Комплекс вопросов, связанных с точностью измерения переменных давлений при помощи электрических преобразователей, чрезвычайно обширен. Свидетельством этого являются многочисленные работы, нашедшие свое отражение в научно-технической литературе.

В данной статье обобщены исследования основных метрологических характеристик современных электрических методов и аппаратуры, применяемых для измерения переменных давлений.

Верхний предел современных измерений переменных давлений достигает $12 \cdot 10^8$ н/м² ($12\,000$ кгс/см²) при диапазоне частот от 0 до 15 кГц.

Основные требования, которым должны удовлетворять приборы для измерения переменных давлений, основанные на преобразовании давления в электрическую величину, следующие:

- 1) линейность функции преобразования, т. е. линейная зависимость между давлением и выходным сигналом;
- 2) высокая точность ($\delta \leq 1\%$) и надежность измерений;
- 3) нечувствительность к внешним воздействиям, которыми могут быть электромагнитные и электрические поля, колебания температуры, ускорения, ионизирующие излучения и др.;
- 4) простота устройства, облегчающая изготовление, эксплуатацию и ремонт приборов;
- 5) минимальные габариты, создающие удобство транспортировки и эксплуатации.

Характеристики отдельных видов приборов лишь в той или иной степени соответствуют этим требованиям. Поэтому правильный выбор измерительного прибора требует сравнительной оценки достоинств и недостатков применительно к конкретной задаче.

Существующие в настоящее время многочисленные методы и приборы для измерения переменных давлений, основанные на преобразовании давления в электрическую величину, можно по принципу их действия разделить на несколько основных групп.

**Методы и приборы, основанные на зависимости
между давлением и напряжением от пьезоэффекта**

Количество электричества q , возникающее на гранях пьезоэлектрика под влиянием механических напряжений или деформаций от давления P (прямой пьезоэффект) заряжает эти грани до напряжения U , определяемого как

$$\left. \begin{aligned} U &= -\frac{q}{C} \\ q &= f(P) \end{aligned} \right\} U = \varphi(P),$$

где C — емкость системы.

По принципу для измерения быстропеременных давлений созданы многочисленные пьезоэлектрические приборы, состоящие из трех основных элементов: преобразователя (датчика), усилителя и осциллографа.

Исследуемое давление передается на пьезоэлемент через воспринимающую мембрану [1], металлические стержни [2, 3] или непосредственно [4, 5]. Пьезоэлементами могут служить титанат бария, турмалин, сегнетова соль и кристаллический кварц.

Относительно узкий температурный диапазон, а также нестабильность свойств керамики титаната бария, зависящая от состава, технологии изготовления, напряжения поляризации и «старения», затрудняют в ряде случаев точные измерения преобразователями данного типа [6, 7].

Неустойчивые физико-механические характеристики сегнетовой соли и турмалина ограничивают применение этих пьезоматериалов [8].

Наилучшим пьезоэлементом служит кварц. Его преимуществами являются: высокая механическая прочность, ничтожная гигроскопичность, повышенная стабильность пьезоэлектрической постоянной, мало зависящей от температуры в широких пределах и большая частота собственных колебаний. Основные физико-механические характеристики пьезоматериалов приведены в табл. 1 [9—11].

Таблица 1

Пьезоэлемент	Химическая формула	Плотность, г/см ³ · 10 ³	Пьезоэлектрическая постоянная, к/н	Диэлектрическая проницаемость	Точка Кюри, °С
Кристаллический кварц	SiO ₂	2,65	2,1 · 10 ⁻¹²	4,5	573
Титанат бария	BaTiO ₃	5,3	1,15 · 10 ⁻¹⁰	1400 ± 10%	120
Дигидрофосфат аммония	NH ₄ H ₂ PO ₄	1,803	2,46 · 10 ⁻¹¹	15,7	152
Цирконат титаната свинца	P _{0,95} Sr _{0,05} (Zr _{0,13} Ti _{0,87}) O ₃ + 1% Ta ₂ O ₅	7,3	2,7 · 10 ⁻¹²	1500	330
Турмалин		3,1	2,16 · 10 ⁻¹²	6,05	—
Сегнетова соль	NaKC ₄ H ₄ O ₆ · 4H ₂ O	1,775	2,66 · 10 ⁻¹⁰	150	24

Наибольшее распространение получили пьезокварцевые преобразователи мембранного типа на различные диапазоны давлений от 0,5 · 10⁵ до 10⁹ н/м² (~0,5 ÷ 10 000 кгс/см²) с частотой собственных колебаний преобразователя в пределах 8000—30 000 гц и выше [2, 4, 12]. Эти преобразователи имеют линейную зависимость между давлением и выходным сигналом. Постоянство чувствительности при переменной жесткости элементов преобразователя (резьбы, шаровые опоры, шероховатые поверхности и др.) осуществляется предварительным сжатием пьезоэлемента.

зоэлектрических пластин от 10^7 до $2 \cdot 10^7$ $\kappa/\text{м}^2$ ($\sim 100 \div 200$ $\text{кгс}/\text{см}^2$) с помощью нажимных пробок или цилиндрических пружин малой жесткости [13].

Чувствительность преобразователей зависит от числа кварцевых пластин и размеров воспринимающей мембраны, увеличивают ее, применяя многослойчатые пьезоэлементы. Но повышение активной площади воспринимающей мембраны ухудшает другие качества преобразователя.

Упомянутая высокая стабильность пьезоэлектрической постоянной может быть дополнительно повышена термостатированием. Основные характеристики пьезоэлектрических индикаторов давления приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип индикатора	Пределы измеряемых давлений		Частотный диапазон измерения, гц	Чувствительность	Источник
	$\text{Мн}/\text{м}^2$	$\text{кгс}/\text{см}^2$			
ЦНИИДИ (СССР)	0—0,3—10— —50—150— —200	~0—5— —100—500— —1500—2000	2 000—10 000 и выше	$(0,41 \div 35,7) \cdot 10^{-10}$ $\kappa \cdot \text{м}^2/\text{Мн}$	[14]
ЛДК АН (СССР)	10	~100	11 000	—	[12]
ОРИОН (ВНР)	0—0,5— —10—40	~0—5— —100—400	10 000	$(0,46 \div 10,2) \cdot 10^{-10}$ $\kappa \cdot \text{м}^2/\text{Мн}$	—
ZWÖNJTZ (ГДР)	0—1,0—15— —100	~0—10— —150—1000	2 000—10 000	1,0—16,8 $\text{в} \cdot \text{м}^2/\text{Мн}$	[16]
JSA (США)	0—35—70— —100	~0—350— —700—1000	10 000 и выше	$(0,15 \div 0,36) \cdot 10^{-10}$ $\kappa \cdot \text{м}^2/\text{Мн}$	[17]

Для измерения пьезоэлектрических зарядов почти исключительно применяют электронные усилители постоянного тока на электрометрических лампах в сочетании со шлейфным или катодным осциллографами [8, 14].

Использование ламповых усилителей позволяет значительно повысить как чувствительность пьезоэлектрического прибора, так и точность измерения.

Усилители выполняют одно- или многоканальными. С помощью последних возможны одновременные измерения несколькими преобразователями.

Правильный выбор как сопротивления изоляции зарядонесущей части относительно земли, так и емкости между ними приводит к уменьшению погрешности от изменения потенциала за счет утечки заряда с пьезоэлемента. Пьезоэлектрические преобразователи обладают весьма большим сопротивлением, достигающим $10^8 \div 10^{10}$ ом , поэтому входное сопротивление первого каскада усиления должно быть еще выше, т. е. порядка $10^{10} \div 10^{13}$ ом . Это достигается применением электрометрических ламп типа ЭМ-2, ЭМ-3, 1Э1П, а также бесцокольных миниатюрных пентодов типа 6Ж1Ж, работающих в электрометрическом режиме.

Погрешность от изменения входной емкости снижают включением параллельно преобразователю и соединительному кабелю конденсатора большой постоянной емкости.

Колебания напряжения питающей сети приводят к погрешности измерения, пропорциональной относительному изменению этого напряжения. С помощью стабилизирующих устройств в анодных, сеточных и накальных цепях можно снизить эту погрешность до $0,05 \div 0,3\%$ на $\pm 10\%$ изменения напряжения питающей сети.

При измерении и регистрации переменных давлений пашли применение электронных и магнитоэлектрические осциллографы.

Возможность частотной внутренней синхронизации электронного усилителя с исследуемым процессом позволяет получать диаграммы в координатах давление — время. Часто практический интерес имеет диаграмма в координатах давление — объем, где необходима развертка процесса по ходу поршня исследуемого двигателя. Такую диаграмму получают, применяя потенциометрические, емкостные или фотоэлектрические развертывающие устройства [1, 15].

Для исследования только одного процесса предназначены однолучевые электронные трубки осциллографов. При осциллографировании нескольких процессов применяют многолучевые трубки или специальные коммутаторы (типа ЭК-1 и др.). Последние попеременно подают на пластины вертикального отклонения однолучевой трубки несколько испытываемых напряжений.

Наиболее часто для точных измерений быстропеременных давлений применяют магнитоэлектрические осциллографы. При правильном выборе типа и характеристик измерительного вибратора этим прибором можно записать переменные давления в весьма широком диапазоне частот.

Методы и приборы для измерения переменных давлений, основанные на зависимости между давлением и емкостью

Рассматриваемые методы основаны обычно на принципе преобразования давления в изменение емкости плоского конденсатора C , где емкость определяют из соотношения

$$C = \frac{1}{9 \cdot 10^9} \cdot \frac{\epsilon F}{4\pi d} \text{ мкф},$$

где ϵ — диэлектрическая постоянная;

F — площадь одной пластины конденсатора, см^2 ;

d — расстояние между пластинами, см .

В большинстве случаев изменение емкости C является следствием изменения расстояния d между пластинами

$$\left. \begin{array}{l} C = f(d) \\ d = F(P) \end{array} \right\} C = \varphi(P).$$

Емкостные индикаторы давления обычно состоят из емкостного преобразователя, усилителя и осциллографа. Основные характеристики емкостных индикаторов давления приведены в табл. 3.

Наиболее распространены мембранные преобразователи, состоящие из неподвижной изолированной пластины и упругой мембраны, изменяющей под действием приложенного давления воздушный зазор между ними [1, 14].

Емкостные преобразователи применяют для малых, средних и высоких давлений от 10^4 до $8 \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$ ($\sim 0,1 \div 800 \text{ кгс/см}^2$). Собственная частота колебаний преобразователей может достигать $2500 \div 15\,000 \text{ гц}$ и выше.

Таблица 3

Тип преобразователя	Пределы измеряемых давлений		Частотный диапазон измерения, гц	Чувствительность (эф. м ²) Мн	Источники
	Мн/м ²	кгс/см ²			
ДК (СССР)	0—0,05—0,1— —0,5—1,5—3,0— —7,0	0—0,5—1,0—5— —15—30—70	600—2000	1,2—20,4	—
DJSA (Дания)	0—0,2—1,75—4— —15—80	0—2—17,5—40— —150—800	100—10 000 и выше	—	[21]
JSA (США)	0—1,0—2,5—10— —30—60—80	0—10—25—100— —300—600—800	200—6000 и выше	—	[17]

Гиперболический характер зависимости емкости C воздушного конденсатора от расстояния d между пластинами затрудняет создание высокочувствительного преобразователя с линейной характеристикой, так как уменьшение начального зазора между пластинами d_0 ограничено опасностью пробоя воздушного промежутка.

Для улучшения характеристик емкостного преобразователя применяют слюду, заполняющую часть зазора. Подбором соответствующего отношения толщины слюды к воздушному промежутку практически можно получить линейную характеристику преобразователя и повысить более, чем в два раза его чувствительность благодаря высокой диэлектрической постоянной слюды.

Динамические характеристики упругих мембран оказывают существенное влияние на точность измерения. Собственная частота упругой системы должна быть возможно выше, что требует применения жестких мембран. Однако это приводит к уменьшению чувствительности преобразователя.

Для правильного выбора собственной частоты, площади и толщины мембраны при требуемой чувствительности Б. Картер [18] дает серию экспериментальных характеристик.

Значительная погрешность при измерении может возникнуть вследствие колебания окружающей температуры, поскольку детали преобразователя имеют различные температурные коэффициенты расширения.

Температурную погрешность снижают правильным выбором геометрических размеров деталей преобразователя, применением разделительных мембран, искусственным охлаждением элементов преобразователя и применением различных устройств температурной компенсации [8, 14, 15, 19].

Погрешности из-за влияния внешних электрических полей устраняют тщательным экранированием чувствительного элемента преобразователя.

С целью увеличения мощности и уменьшения сопротивления преобразователей обычно применяют высокочастотные схемы усилителей с измерительными цепями, работающими по принципу несущей частоты (0,1—3 мГц).

При воздействии давления на преобразователь последний изменяет сигнал генератора несущей частоты по амплитуде (амплитудная модуляция) или по частоте (частотная модуляция) [2, 20].

Хорошую стабильность и высокую чувствительность имеют емкостные индикаторы давления с мостовыми схемами амплитудной модуляции.

Из-за существенных влияний емкости соединительных кабелей на работу прибора схемы частотной модуляции пока находят ограниченное применение.

Следует отметить, что погрешность от шунтирующих емкостей представляет основной недостаток емкостного метода измерений давления. Однако в ряде случаев удается значительно снизить ее путем правильной экранировки и заземления соединительных проводов и всей измерительной цепи.

Применение стабилизации цепей анодного и сеточных напряжений, а также цепей накала в электрических схемах емкостных приборов давления позволяет уменьшить до 0,1 — 0,2% погрешность измерения от изменения величины напряжения питающей сети при колебаниях его до $\pm 10\%$.

Исследуемые процессы регистрируют с помощью катодных или магнитоэлектрических осциллографов.

Методы и приборы, основанные на зависимости между давлением и индуктивностью

При малом воздушном зазоре и высокой магнитной проницаемости железа индуктивность катушки L_k переменного тока с сердечником

$$L_k = 1,25w^2 \frac{S_0}{\delta} \cdot 10^{-8} \text{ гн},$$

где δ — воздушный зазор, см;

S_0 — сечение воздушного зазора, см²;

w — число витков.

Изменение длины воздушного зазора под действием измеряемого давления P приводит к изменению индуктивности L_k . Поэтому

$$\left. \begin{aligned} L_k &= f(\delta) \\ \delta &= F(P) \end{aligned} \right\} L_k = \varphi(P).$$

Активное сопротивление катушки $r_k \ll \omega L_k$, поэтому полное сопротивление $Z_k \approx 2\omega L_k$ (где ω — угловая частота), и следовательно, $Z_k = K(P)$.

Эта зависимость является основной при построении индуктивных приборов, где функцию преобразования давления в электрическую величину осуществляют индуктивные преобразователи с чувствительными элементами, обычно, в виде металлических мембран.

Преобразователи данного типа применяют на различные диапазоны давлений от 0 до $5,5 \cdot 10^7$ н/м² ($\sim 0-550$ кгс/см²) и выше. Собственная частота преобразователей может достигать 4000—12 000 гц и выше.

Линейность характеристики однарного преобразователя вследствие гиперболической зависимости $Z_k = f(\delta)$ имеет место лишь при малых прогибах приемных мембран (0,1—0,15 от начального зазора δ_0).

Применение дифференциальных преобразователей [22] позволяет увеличить рабочий прогиб мембран до 0,3—0,4 от δ_0 , расширяя линейный участок рабочей характеристики.

Незначительная погрешность от внешних влияний (колебания рабочей температуры, изменение режима работы источников питания) и повышенная чувствительность являются существенными преимуществами преобразователей данного типа. Подробное исследование погрешностей индуктивных преобразователей проведено П. В. Новицким [8].

Измерительными цепями преобразователей с переменной индуктивностью, как правило, являются мостовые схемы, обеспечивающие наиболее высокую точность измерения.

Для получения большой мощности преобразователя (до 1–5 ва) большинство современных измерительных схем имеет низкое полное сопротивление, обуславливающее достаточно большой выходной ток для регистрирующих приборов без предварительного усиления.

Лишь при малогабаритных преобразователях появляется необходимость применения усилителя между измерительной цепью и вибратором осциллографа. Усилители необходимы и при измерении быстропеременных давлений. При этом с целью снижения погрешности от частотных искажений измерительные схемы приходится питать от высокочастотных стабилизированных генераторов с частотой обычно на порядок выше частоты изучаемого процесса (до 50–100 кгц). Выбор оптимальной частоты источников питания тесно связан с обеспечением достаточной чувствительности индуктивных индикаторов давления. Для работы как с емкостными, так и с индуктивными преобразователями в звуковом диапазоне частот нередко применяют универсальные измерительные цепи.

В качестве регистрирующих приборов используют магнитоэлектрические и катодные осциллографы.

Относительно высокая стабильность индуктивных приборов давления, обусловленная особенностями конструкции преобразователя высоким энергетическим уровнем измерительных цепей и пр., в ряде случаев выгодно отличает их от ряда приборов других систем.

В табл. 4 приведены основные характеристики индуктивных индикаторов давления.

Таблица 4

Тип индикатора	Пределы измеренных давлений		Частотный диапазон измерений, гц	Чувствительность	Источник
	Мн/к ²	ксс/см ²			
ДД-10 (СССР)	0–0,5–1,0–1,5– –2,0–3,0–4,0– –6,0–8,0–10– –15–20–30	–0–5–10–15– –20–30–40– –60–80–100– –150–200–300	500–2000	$\frac{\Delta L}{L} \cdot 100 = 7,15\%$	—
JSA (США)	0–1,0–5,0–14	–0–10–60–140	460–4600	—	[17]

Методы и приборы, основанные на зависимости между давлением и омическим сопротивлением

Методы основаны на изменении электрического сопротивления R тонкой металлической проволоки или стержня из угольных шайб при их деформациях от измеряемого давления P , т. е. на зависимости

$$R = f(P).$$

Проволочные чувствительные элементы, воспринимающие и преобразующие давление в электрическую величину, обычно представляют собой упругую мембрану с наклеенной или свободно натянутой решеткой из проволоки (0,02 ÷ 0,05 мм) с высоким удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом (константан, манганин, нихром) или из фольги [23—26].

В угольных преобразователях [14, 27] измеряемое давление действует на приемную мембрану, сжимающую столбик из 6—15 угольных шайб, вызывая изменение их контактного, а следовательно, и общего сопротивления всего столбика. Шайбы, изготавливаемые толщиной 0,5 ÷ 1 мм и диаметром обычно 5 ÷ 10 мм, имеют высокую механическую прочность.

Преобразователи этих типов применяют для измерения различных давлений в диапазоне 0 до 10^6 н/м² (~0 ÷ 1000 кгс/см²) и выше. Собственная частота преобразователей может достигать 2000—10 000 гц и более.

Практически проволочные преобразователи имеют линейную зависимость между давлением и относительным изменением сопротивления чувствительного элемента.

Для уменьшения нелинейности характеристики шайбы чувствительного элемента в угольных преобразователях подвергаются начальному сжатию до $2 \cdot 10^5$ ÷ $2,5 \cdot 10^6$ н/м² (~20 ÷ 25 кгс/см²).

Значительное изменение сопротивления (до 15 ÷ 20%) в рабочем диапазоне угольного преобразователя обеспечивает достаточно высокую его чувствительность без применения усилителей.

Угольным преобразователям свойственен механический гистерезис, погрешность вследствие которого достигает при статической нагрузке 3—7%. Эту погрешность при динамических измерениях учесть трудно.

Для угольных преобразователей обычно применяют неравновесные мостовые схемы постоянного тока без усилительной аппаратуры, так как выходной сигнал этих преобразователей достаточен для приведения в действие регистрирующего устройства.

Относительная чувствительность проволочных преобразователей зависит от свойств материала проволоки, соотношения длины базы и радиуса закругления петля, а также от характера поля деформации.

Измерительными цепями проволочных преобразователей обычно служат неравновесные мосты постоянного или переменного тока звуковой частоты. Последние необходимы при усилении напряжения измерительной диагонали моста электронными усилителями.

Повышенную чувствительность и практически линейную характеристику на всем диапазоне давлений имеют преобразователи дифференциального типа. Последние позволяют также значительно снижать температурные погрешности, свойственные омическим преобразователям. Для этой же цели применяют искусственное охлаждение или компенсационное сопротивление.

Существенным недостатком омических преобразователей является нестабильность сопротивления чувствительных элементов во времени. Лишь сравнительно частая их градуировка позволяет получать надежные результаты.

Для снижения погрешностей из-за колебания напряжения питающей сети измерительные цепи омических индикаторов давления снабжены устройствами для стабилизации режимов работы усилителей и генераторов несущей частоты. Основные характеристики омических индикаторов давления приведены в табл. 5.

Таблица 5

Тип индикатора	Пределы измеряемых давлений		Частотный диапазон измерений, гц	Чувствительность	Источник
	Мн/м ²	кгс/см ²			
ДЛТ (СССР)	0—0,1—0,25—0,4— —0,6—1,0—1,5— —2,5—4,0—6,0— —10—16—25—40	~0—1—2,5—4— —6—10—16—25— —40—60—100— —160—250—400	50—6000	$\frac{\Delta R}{R} \cdot 100 = 5—10\%$	—
JSA (США)	0—0,1—1,0—3,5— —10—35	~0—1,0—10—35— —100—350	100—8000	0,03—6,1 (мв·м ²)/Мн	[17]

Визуальное наблюдение и регистрация переменных давлений осуществляется магнитоэлектрическими или катодными осциллографами.

Методы и приборы, основанные на зависимости между давлением и магнитной проницаемостью ферромагнитных тел

Принцип действия индикаторов давления этого вида основан на так называемом магнитоупругом эффекте, т. е. на изменении магнитной проницаемости μ ферромагнитных тел при воздействии на них измеряемого давления P .

Это изменение магнитных свойств приводит к изменению полного электрического сопротивления Z катушки, надетой на сердечник;

$$\left. \begin{aligned} \mu &= f(P) \\ Z &= F(\mu) \end{aligned} \right\} Z = \varphi(P).$$

Магнитоупругие преобразователи обычно работают на переменном токе. Их магнитные цепи (сплошные или разъемные) выполняют из материалов с большим значением проницаемости и малой индукцией насыщения (пермаллой, мягкая сталь и др.) [28, 29]. Усилие от измеряемого давления передается на сердечник непосредственно через мембрану или поршень.

Магнитоупругие преобразователи нашли применение при измерении средних и высоких давлений от $5 \cdot 10$ до 10^8 н/м² ($\sim 50 \div 1000$ кгс/м²). Собственная частота их колебаний лежит в пределах $10 \div 30$ кГц.

Зависимость $Z = \varphi(P)$ для этих преобразователей практически линейна.

На их чувствительность влияют материал, термическая обработка и температура сердечника, а также величина намагничивающего тока.

Погрешности магнитоупругих преобразователей подробно исследованы И. И. Ивановой [30—31].

Значительная температурная погрешность обусловлена изменением начальной магнитной проницаемости, магнитоупругого эффекта и омического сопротивления катушки. Правильный выбор рабочего значения напряженности поля и материала сердечника позволяет в известной степени снизить погрешность из-за колебания температуры (до 1—1,5% на 10°C).

Погрешность вследствие магнитоупругого гистерезиса (магнитный и механический гистерезис) удается уменьшить до 1,0—1,5% «тренировкой» преобразователя многократной нагрузкой и разгрузкой, выбором оптимального режима его работы ($H_{\mu \text{ руб}} > H_{\mu \text{ макс}}$) и применением

материалов сердечника с незначительными потерями на гистерезис. Продолжительное «старение» преобразователя после его изготовления также снижает магнитоупругий гистерезис, одновременно повышая стабильность магнитных характеристик ферромагнитных материалов во времени.

Погрешность преобразователя, обусловленную колебаниями намагничивающего тока до 0,3—0,4%, на 1% колебания напряжения источника питания снижают правильным выбором рабочей напряженности магнитного поля.

Погрешность от влияния внешних магнитных полей устраняют тщательным экранированием магнитной цепи. Измерительными цепями обычно служат мостовые схемы, питаемые от ламповых генераторов высокой частоты (10 кГц и выше). Для усиления выходного сигнала в измерительную диагональ моста нередко включают электронные усилители.

Магнитоупругие преобразователи, обладающие высокой чувствительностью, применяют без усилителей в общей схеме приборов. При измерении и регистрации переменных давлений применяют также магнитоэлектрические и катодные осциллографы.

Методы и приборы, основанные на зависимости между давлением и индуктированной э. д. с.

Согласно закону электромагнитной индукции э. д. с. E , индуктированная в катушке, определяется скоростью изменения магнитного потока Φ :

$$E = \kappa \frac{d\Phi}{dt},$$

где κ — коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров катушки.

Изменение от давления P магнитного потока Φ , пронизывающего катушку, осуществляется изменением воздушного зазора δ магнитной цепи. При этом

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= f(\delta) \\ \delta &= F(P) \end{aligned} \right\} \Phi = \varphi(P).$$

Тогда э. д. с., индуктированная в катушке, будет пропорциональна скорости нарастания давления

$$E = \kappa_1 \frac{dP}{dt},$$

где κ_1 — коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров катушки и магнитной цепи.

Для получения на выходе индукционных приборов напряжения изменяющегося от давления, т. е. зависимости $U_{\text{вых}} = f(P)$, применяют интегрирующие цепи типа RC .

Для измерения переменных давлений обычно применяют индукционные преобразователи мембранного типа [1]. Малые перемещения упругой стальной мембраны под давлением вызывают изменения воздушного зазора, а следовательно, и интенсивности магнитного поля.

Индукционные преобразователи применяют в широком диапазоне давлений от 0 до $6 \cdot 10^7$ н/м² (~ 0 –600 кгс/см²). Собственная частота колебаний их может достигать 8000—12000 гц и более.

Линейную зависимость между давлением и выходным напряжением практически находят при перемещениях мембраны, которые должны быть малы по сравнению с величиной воздушного зазора.

Чувствительность индукционных преобразователей зависит главным образом от параметров катушки и магнитной цепи, а также от размеров воспринимающих мембран.

Колебание температуры преобразователя может вызвать значительную погрешность из-за изменений сопротивления рабочей катушки и индукции постоянных магнитов. Ее удается снизить до 0,1—0,5% на 10°C колебания температуры, применяя для магнитов никель-алюминиевые и другие сплавы и устройством температурных компенсаторов (терромагнитные шунты).

Возможность создания индукционных преобразователей с высокой частотой собственных колебаний позволяет с успехом пользоваться ими при измерении быстропеременных давлений. Однако из-за отсутствия необходимых средств для градуировки приборы индукционного типа пока нашли ограниченное применение.

Для усиления сигнала преобразователя обычно служат электронные усилители, между каскадами которых включают интегрирующие цепи.

В качестве регистрирующих устройств предусмотрены магнитоэлектрические или катодные осциллографы.

Методы и приборы, основанные на зависимости между давлением и фототоком

Методы основаны на зависимости фототока фотоэлемента I_{ϕ} от интенсивности E падающих на фотокатод лучей, изменяющейся от измеряемого давления P :

$$\left. \begin{array}{l} I_{\phi} = f(E) \\ E = F(P) \end{array} \right\} I_{\phi} = \varphi(P).$$

Источник света посылает световой поток на полированную металлическую мембрану, установленную в стенке закрытого измерительного объекта. Отражаясь от нее, световой поток попадает на фотоэлемент. Под действием давления мембрана деформируется, изменяя отражательную способность своей поверхности. При этом уменьшение освещенности изменяет фототок фотоэлемента, являющийся функцией измеряемого давления [18, 32, 33].

Фотоэлектрические преобразователи применяют для измерения давлений до $2 \cdot 10^7$ н/м² (200 кгс/см²) и выше. Собственная частота колебаний этих преобразователей достигает 4000—15 000 гц и более. Они имеют практически линейную зависимость между давлением и выходным сигналом.

Возможность свободного выбора размеров мембран позволяет достигать необходимых чувствительностей и высоких частот собственных колебаний преобразователей.

В фотоэлектрических преобразователях применяют главным образом вакуумные фотоэлементы с внешним фотоэффектом (типа СЦВ и др.), у которых рабочие характеристики мало изменяются со временем и от воздействия температуры и колебания напряжения источников питания фотоэлементов.

Так как мощность, получаемая от фотоэлементов с внешним фотоэффектом ($10^{-8} \div 10^{-9}$ вт), мала и недостаточна для работы измерительных и регистрирующих устройств (магнитоэлектрические или катодные осциллографы), обычно применяют лампы усилители постоянного или переменного тока. Последние менее чувствительны к помехам и непостоянству напряжения источников питания.

С целью снижения погрешности в результате колебания напряжения питания источников света предусматривается их стабилизация.

Методы и приборы, основанные на зависимости между давлением и потенциалом течения

Для измерения переменной составляющей давления можно воспользоваться электрокинетическими явлениями в полярных жидкостях, т. е. возникновением электрического поля при относительном движении двух фаз (например, твердой фазы и раствора) [34—36].

При продавливании полярной жидкости через пористую перегородку на ее стенках возникает разность потенциалов (потенциал течения), пропорциональная приложенному давлению

$$E = \frac{M_T}{\gamma \eta} P,$$

где P — давление полярной жидкости;

M — электрический момент, определяемый парой перегородка — жидкость;

γ — коэффициент пористости перегородки;

η — вязкость жидкости;

y — удельная проводимость перегородки.

В электрокинетических преобразователях пористая перегородка (обычно фарфоровая) запаивана или запрессована в трубку из стекла или пластмассы (винипласт, текстолит и др.), торцы которой герметически закрыты металлическими мембранами. Внутренние полости заливают полярными жидкостями (дистиллированная вода, метиловый спирт, дихлорэтан и пр.)

В качестве электродов применяют или посеребренную металлическую сетку, которая прижимается к пористой перегородке с помощью пружин, или стенки пористого материала покрывают серебром или платиной путем металлизации.

Электрокинетическими преобразователями измеряют давления в диапазоне от 10^2 до 10^7 н/м² ($\sim 0,01$ — 100 кгс/см²) и выше.

Собственная частота колебаний этих преобразователей доходит до 10 кГц и выше, зависимость между давлением и э. д. с. у них практически линейна.

Наибольшее значение потенциала течения получается при продавливании через фарфоровую перегородку ацетонитрила (чувствительность свыше $0,7$ в·м²/Мн). Пара ацетонитрил—фарфор дает и малую температурную погрешность.

Электрокинетические преобразователи имеют значительную температурную погрешность до 4% на 10°C изменения температуры. Компенсировать эту погрешность можно включением во внешнюю цепь сопротивления с отрицательным температурным коэффициентом (при низкой нагрузке). Применение мелкопористых перегородок также снижает зависимость потенциала течения от температуры.

Электрокинетическим преобразователям свойственна погрешность из-за нестабильности их работы. Наблюдается изменение во времени чувствительности из-за изменения свойств полярных жидкостей при растворении соприкасающихся с ними материалов. Для повышения стабильности работы выбирают материалы малорастворимые и не коррозийные в полярных жидкостях.

Для согласования сопротивлений преобразователя и шлейфа магнитоэлектрического осциллографа и получения подаваемого на шлейф тока достаточной величины, часто применяют электронные усилители с широкой полосой пропускаемых частот и тщательной стабилизацией источников питания постоянного и переменного тока.

При значительных потенциалах течения или при возможности визуальной фиксации давления электрокинетические преобразователи можно включать непосредственно на вход осциллографа.

Методы и приборы, основанные на зависимости между давлением и поглощением радиоактивного излучения

Действие радиоактивных индикаторов давления основано на зависимости поглощения радиоактивного излучения от плотности газа (давления).

Ток между электродами зависит от ионизации газового слоя между ними, которая падает по мере увеличения давления газа по следующему закону

$$I = I_0 e^{-\sigma P},$$

где σ — коэффициент поглощения;
 I_0 — ионизационный ток от излучения;
 P — измеряемое давление.

Чем выше давление, тем большая часть энергии γ -лучей поглощается газом и тем меньше ионизационный ток.

В радиоактивных преобразователях [14] одним из электродов является металлический корпус камеры, присоединяемый к установке давления. Внешняя металлическая оболочка, изолированная от корпуса, выполняет роль второго электрода. Напряжение подается на заземленный корпус и эту оболочку.

Ионизационный ток усиливают при помощи электронных усилителей, после чего он может быть измерен и зарегистрирован с помощью магнитоэлектрического или катодного осциллографов.

В литературе пока нет данных о чувствительности, пределах измерения и погрешностях радиоактивных приборов давления.

Выводы

Приведенный краткий обзор методов и аппаратуры для измерения переменных давлений позволяет сделать следующие выводы.

1. Механические системы, достаточно удобные для давления на низких частотах, непригодны для быстропеременных давлений вследствие значительных трудностей создания приборов с относительно малыми движущимися массами и относительно большими «жесткостями».

Поэтому все они отличаются низкой частотой собственных колебаний. Верхний частотный предел измерения изучаемого процесса для этих приборов обычно не превышает 10—20 гц.

2. Хорошие частотные характеристики присущи методам и приборам, в которых чувствительным элементом являются жесткие системы типов жестких мембран, пьезоэлементов и пр. Эти устройства допускают измерения переменных во времени величин на частотах до 10 000 гц, а в некоторых случаях и выше.

3. Надежные и точные результаты измерений приборами обеих упомянутых групп возможны только после установления их динамических характеристик.

Теоретический расчет последних возможен только в крайне ограниченном числе случаев. Поэтому необходима образцовая аппаратура, допускающая абсолютные методы измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волчек Л. Я., Методы измерений в двигателях внутреннего сгорания, Машгиз, 1955.
2. Gohlke W., Z. angew. Physik, 1949, p. 1.
3. Edwards P., Rev. Sci. Instr., No. 35, 1958, p. 9.
4. Paul E. Klein, ATM, No. 11, 1956.
5. Балашов М. Е., Пьезоэлектрический датчик для измерения быстропеременных давлений, Авт. свид. № 160883, 1963, бюллетень изобретений № 5, 1964, стр. 62.
6. Шальников Г. И., Электрические измерения переменных давлений посредством пьезоэлектрических датчиков с элементами из титаната бария, Труды Лен. фил. ВНИИстройдормаш, 1957.
7. Желудев И. С., Огневич И. В., Пьезоэлектрический прибор для измерения давлений и усилий в периодически действующих механизмах, Труды Ин-та кристаллографии АН СССР, 1956.
8. Туричин А. М., Электрические измерения неэлектрических величин, Госэнергоиздат, 1959.
9. Бергман Л., Ультразвук, ИЛ, 1957.
10. Анянзева А. А., Керамические приемники звука, АН СССР, 1963.
11. Ильин Г. С., Керамические пьезоэлементы, ЛДНТ, 1964.
12. Стечкин В. С., Генкин К. И. и др., Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя, АН СССР, 1960.
13. Раевский Н. П., Методы экспериментального исследования механических параметров машин, АН СССР, 1952.
14. Сомов В. А., Кузьменков О. П., Солдатов В. К., Электрические индикаторы и их применение при испытаниях судовых ДВС, изд. «Морской транспорт», 1958.
15. Сороко-Новицкий В. И., Испытания автотракторных двигателей, Машгиз, 1955.
16. Piezoelektrische Geber VEB Messgerätewerk ZWONITZ, Feinwerktechnik, No. 9, 1962, p. 2.
17. Transducer Compendium, No. 4, 1963.
18. Измерение механических величин электрическими методами, под ред. Н. И. Пироговского, Машгиз, 1952.
19. Пфлигер П. М., Электрические измерения механических величин, Машгиз, 1948.
20. Вигдерман В. Ш., Емкостный измеритель давления с частотной модуляцией, ИТЭИ АН СССР, 1956.
21. Kapazitiv Messwertgeber DISA, Elektronik A/S, 561/T, 1960.
22. Фетисов М. М., Использование индуктивных преобразователей для измерения нестационарных давлений, Труды ЛПИ им. Калинина, 1955.
23. Стопский С. Б., Высокочувствительные датчики давления из органического стекла, «Измерительная техника», стр. 10, 1960.
24. Smit, Liljedal, Trans. ASAE, No. 1, 1958, p. 1.
25. Komaschinski B., Maisel P., Feinwerktechnik, No. 63, 1959, p. 7.
26. Hier M., Feinwerktechnik, No. 4, 1955, p. 3.
27. Горбунов В. М., Гуляев Г. А., Дифференциальный угольный датчик давления, «Механизация и электрификация с/х», № 2, 1957.
28. Майоров Ф. В., Магнитострикционный метод и приборы для измерения давлений, Труды ЦАГИ, 1939.
29. Janowsky W., ATM, V132—6/8, 1933.
30. Иванова И. И., О влиянии температуры на магнитный поток в измерительных приборах и методы уменьшения этого влияния, Труды ЛПИ им. Калинина, 1956.
31. Иванова И. И., О погрешностях магнитоупругих преобразователей, Труды ЛПИ им. Калинина, 1956.
32. Robertson A., Rev. Sci. Instr., No. 12, 1941.
33. Querron M., Rev. Sci. Instr., No. 26, 1955, p. 6.
34. Williams M., Rev. Sci. Instr., No. 19, 1948, p. 10.
35. Wildhack W., Rev. Sci. Instr., No. 28, p. 28.
36. Hardway F., Instruments, No. 26, 1953, p. 8.

Поступила в редакцию
7/ХII 1964 г.

ПРИВЕДЕННАЯ ПЛОЩАДЬ ПОРШНЯ
С ПЕРЕМЕННЫМ СЕЧЕНИЕМ

Дан вывод приближенной формулы приведенной площади поршня с переменным сечением и оценка точности этой формулы для недеформированного поршня.

Формула, определяющая приведенную площадь поршня грузопоршневого манометра при условии постоянства диаметров как поршня, так и цилиндра, имеет вид

$$F = \pi a^2 + \pi ah = \pi ab, \quad (1)$$

где a — радиус поршня,
 b — радиус цилиндра,
 h — зазор между поршнем и цилиндром.

Между тем, реальные поршни и цилиндры, как бы они ни были изготовлены, будут иметь переменные по высоте диаметры. Это обстоятельство необходимо принимать во внимание при наиболее точных измерениях, особенно при эталонных работах, относящихся к абсолютным измерениям.

Формула (1) теряет смысл, если поршень имеет переменное сечение, так как a , b и h оказываются переменными величинами. Таким образом, возникает задача о выводе обобщенной формулы, позволяющей вычислить приведенную площадь поршня переменного сечения. Частный случай этой задачи для цилиндра, состоящего из двух узких колец, рассмотрен в работе [1].

Точный вывод такой формулы возможен при условии решения гидродинамической задачи об обтекании поршня переменного сечения, помещенного в цилиндр также с переменным диаметром. Приближенное решение легко получить, если опираться на следующее допущение.

Равнодействующая сил трения T на элементарном цилиндрическом участке поршня равна

$$dT = \pi a h dP. \quad (2)$$

Если принять это допущение, то условие равновесия поршня, нагруженного силой Q , примет вид

$$Q = [\pi a_0^2 P_0 + \pi a_0 h_0 (P_0 - P_1)] + [(\pi a_1^2 - \pi a_2^2) P_1 + \pi a_1 h_1 (P_2 - P_1)] + \\ + \dots + [P_{n-1} (\pi a_{n-1}^2 - \pi a_{n-2}^2) + \pi a_{n-1} h_{n-1} (P_{n-1} - P_n)]. \quad (3)$$

Если учесть, что избыточное давление в верхнем сечении поршня $P_n=0$, и прибавить к правой части уравнения (3) член $-P_n \pi a_n^2 = 0$, то получим

$$Q = \sum_{i=0}^{i=n-1} (P_i - P_{i+1})(\pi a_i^2 + \pi a_i h_i);$$

но величина $\pi a_i^2 + \pi a_i h_i = \pi a_i b_i$ представляет приведенную площадь i -го сечения, поэтому

$$Q = \sum_{i=0}^{i=n-1} (P_i - P_{i+1}) \pi a_i b_i,$$

или после перехода к интегральной форме

$$Q = \int_0^L \pi a b dP, \quad (4)$$

где L — длина поршня (цилиндра).

Формула (4) справедлива в общем случае независимо от того, что a и b будут случайными переменными вследствие несовершенства изготовления или закономерно меняющимися вследствие деформаций, обусловленных высокими давлениями, или то и другое вместе.

Таким образом, в общем случае

$$a = f(l, P); \quad b = f(l, P),$$

где l — длина поршня в сечении l .

Соответственно формулу (4) можно переписать в виде

$$Q = \int_0^L \pi a(1 + A + \kappa_1 P) b(1 + \kappa_2 P) dP, \quad (5)$$

где $a(1 + A + \kappa_1 P) = a(l, P)$; $b(1 + \kappa_2 P) = b(l, P)$ и A — постоянная.

Если обозначить $\kappa_1 + \kappa_2 = \kappa$ и отбросить в выражении (5) член $A\kappa_2$, а также члены, содержащие κ_2 , то получим

$$F_{np} = \frac{Q}{P_0} \approx \frac{1}{P_0} \int_0^L \pi a b dP + \frac{1}{P_0} \int_0^L \pi a b (A + \kappa P) dP. \quad (5')$$

Первый член правой части выражения (5') представляет приведенную площадь недеформированного поршня, а второй — поправку на деформацию.

Приведенная площадь недеформированного поршня

Приведенную площадь недеформированного поршня можно представить в виде

$$F_{np} = \frac{1}{P_0} \int_0^L \pi a b \frac{dP}{dl} dl, \quad (6)$$

Значение dP/dl можно найти из условия равенства расходов рабочей жидкости во всех сечениях зазора между поршнем и цилиндром.

Если допустить, что формула расхода q через зазор при постоянных диаметрах поршня и цилиндра [2] сохраняет силу и при переменных a и b , то

$$q = \frac{\pi a h^3 dP}{6\mu dl}, \quad (7)$$

где μ — вязкость жидкости.

Подставив значения dP/dl из формулы (7) в (6), получим

$$F_{\text{пр}} = \frac{6\pi q}{P_0} \int_0^L \frac{ab}{ah^3} dl \quad (8)$$

Здесь P_0 — избыточное давление.

Формула (7) позволяет также найти зависимость между расходом q и избыточным давлением P_0 в сечении нижнего торца поршня

$$P_0 = \int_0^L dP = \frac{6\pi q}{\pi} \int_0^L \frac{dl}{ah^3} \quad (9)$$

Объединив формулы (8) и (9), получим приведенную площадь поршня

$$F_{\text{пр}} = \frac{Q}{P_0} = \pi \frac{\int_0^L ab \frac{dl}{ah^3}}{\int_0^L \frac{dl}{ah^3}} \quad (10)$$

Для частного случая при $a = \text{const} = a_0$ и $b = \text{const} = b_0$ получается обычная формула

$$F_{\text{пр}} = \pi a_0 b_0.$$

В случае применения реальной поршневой пары функции $a = a(l)$ и $b = b(l)$ можно найти только в форме таблицы по результатам многократных измерений диаметров поршня и цилиндра; поэтому интегралы, входящие в формулу (10), необходимо вычислить одним из приближенных методов.

Если положить $ab = \bar{a}\bar{b} + \varepsilon$, тогда

$$F_{\text{пр}} = \pi \bar{a}\bar{b} + \frac{\int_0^L \varepsilon \frac{dl}{ah^3}}{\int_0^L \frac{dl}{ah^3}} \quad (11)$$

или

$$F_{\text{пр}} \approx \pi \bar{a}\bar{b} + \frac{\sum_{i=1}^{i=n-1} \varepsilon_i x_i}{\sum_{i=1}^{i=n-1} x_i} \quad (12)$$

где $x = (ah^3)^{-1}$.

Для оценки второго члена правой части формулы (12) можно принять ε_i случайной величиной, математическое ожидание которой равно нулю. Тогда, если отбросить рассматриваемый член и принять

$$F_{\text{пр}} \approx \pi \bar{a}\bar{b}, \quad (13)$$

дисперсия $D(F_{\text{пр}})$ будет

$$D(F_{\text{пр}}) = \frac{D(\varepsilon) \sum_{i=1}^{i=n-1} x_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{i=n-1} x_i \right)^2} \approx \frac{\sigma^2}{n} \quad (14)$$

Таким образом, при достаточно большом значении n приведенная площадь недеформированного поршня определяется формулой (13).

Поправка на деформацию

Рассматриваемая поправка, как следует из формулы (5'), имеет вид

$$\Delta F = \frac{1}{P_0} \int_0^L \pi ab(A + \kappa P) dP.$$

Если преобразовать эту формулу в известной мере аналогично формулам (5) и (5') и пренебречь, как в выражении (11), интегралом, содержащим ϵ , то получим

$$\Delta F \approx \pi \bar{a} \bar{b} \frac{1}{P_0} \int_0^{P_0} (A + \kappa P) dP$$

или

$$\Delta F = \pi \bar{a} \bar{b} (A + \frac{\kappa}{2} P_0), \quad (15)$$

где

$$A = \frac{P_0}{E_1} \mu_1; \quad \kappa = \kappa_1 + \kappa_2; \quad \kappa_1 = -\frac{1}{E_1} (1 - \mu_1); \quad \kappa_2 = \frac{1}{E} \left(\frac{\kappa^2 + b^2}{\kappa^2 - b^2} + \mu \right).$$

Здесь μ и μ_1 — коэффициенты Пуассона цилиндра и поршня;
 E и E_1 — модули Юнга;
 R — наружный радиус цилиндра.

Подставив значения κ_1 и κ_2 в формулу (15), получим поправку

$$\Delta F = \pi \bar{a} \bar{b} P_0 \left[\frac{3\mu - 1}{2E_1} + \left(\frac{\kappa^2 + b^2}{\kappa^2 - b^2} + \mu \right) \frac{1}{2E} \right], \quad (16)$$

приведенную в работе [2, стр. 160].

Рассмотрим случай, когда зазор хотя бы в одном сечении (практически в узком кольце) во много раз меньше зазора во всех остальных сечениях и может быть принят равным нулю, тогда формула (15) примет вид

$$\Delta F = \frac{\pi \bar{a}^2}{P_0} \int_0^{P_0} (A_1 + \kappa_3 P) dP,$$

где $\kappa_3 = 2\kappa_1$ и $A_1 = 2A$,

или

$$\Delta F = \pi \bar{a}^2 \frac{3\mu - 1}{E} P_0. \quad (17)$$

Этот результат получен в работе [3], где рассмотрен случай цилиндра с противодействием в узком кольце, в котором достигается зазор, практически равный нулю.

Выводы

1. Приведенная площадь недеформированного поршня может быть найдена по формуле (13), оценку точности которой дает формула (14).
2. Соответствующие линейные измерения и расчет приведенной площади поршня по формуле (13) необходимы только для приборов, представляющих первичный групповой эталон.

3. Поправки на деформацию реальных поршней следует вычислять в общем случае по формуле (16), а в частном случае кольцевого зазора, практически близкого к нулю и при одинаковом материале поршня и цилиндра, — по формуле (17).

ЛИТЕРАТУРА

1. Граменицкий В. Н., Точные приборы для измерения давления жидкостей и газов, основанные на применении неуплотненного поршня в приборах для измерения давления. Диссертация, ВНИИМ, 1958.
2. Жоховский М. К., Теория и расчет приборов с неуплотненным поршнем, Машгиз, 1959.
3. Johnson D. P., Cross J. L., Hill J. D. and Bowman H. A., *Industrial and Engineering Chemistry*, V. 49, 1957, p. 2046.

Поступила в редакцию
15/VII 1965 г.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ВАКУУММЕТРОВ

Приведена методика оценки погрешностей вакуумметров для измерения малых абсолютных давлений. Показано, что общая погрешность складывается из погрешности, обусловленной преобразователем, и погрешности электрического блока. Последняя, в свою очередь, определяется погрешностью режима питания преобразователя, задаваемого блоком, и погрешностью измерения сигнала преобразователя. Предложен способ суммирования всех этих погрешностей. Дан пример расчета.

Вакуумметры для измерения малых абсолютных давлений газа находят все более широкое применение в научных исследованиях [1] и различных отраслях производства. Однако в научных статьях, технической документации и рекламных публикациях сведения о погрешностях измерения малых давлений часто оказываются противоречивыми и недостаточно обоснованными. Это происходит потому, что разные исследователи по-разному подходят к оценке погрешностей вакуумметров, не учитывают всех возможных источников погрешностей и применяют разные, не сопоставимые между собой критерии оценки погрешностей.

Ниже рассмотрена методика оценки погрешностей вакуумметров, применение которой к различным вакуумметрам позволило бы получить их объективные метрологические характеристики, а также исследовать влияние отдельных частных погрешностей на общую погрешность прибора. Предлагаемая методика представляет собой попытку применить к оценке погрешностей вакуумметров давно разработанные в машиностроении методы расчета допусков размерных и кинематических цепей [2].

Рассматриваемые вакуумметры представляют собой измерительные комплекты, состоящие из манометрических преобразователей (ламп) и измерительных блоков. Первые преобразуют измеряемую неэлектрическую величину — давление — в электрический сигнал, вторые обеспечивают измерение этого сигнала и задают необходимый режим питания преобразователей. Таким образом, в процессе измерения давлений участвуют два различных прибора, каждый из которых вносит свои погрешности в результат измерения.

Сигнал x связан с давлением p зависимостью, справедливой для данного газа и заданных параметров электрического и теплового режима преобразователя

$$p = f(x). \quad (1)$$

Эта зависимость представляет собой градуировочную кривую преобразователя, которая может быть выражена как аналитически, так и в виде графика.

При серийном или массовом производстве преобразователей их обычно не градуируют индивидуально, а снабжают только типовой градуировочной кривой. Тогда погрешность γp_n , вносимая в результат измерения давления только преобразователем, определяется отклонениями формы, размеров, взаимного расположения и материалов электродов преобразователя от тех заранее выбранных значений, для которых справедливо уравнение (1). Погрешность γp_n для разных экземпляров преобразователей может быть как положительной, так и отрицательной, и ее значение, складываясь алгебраически со значением $f(x)$, приводит к отклонению измеренного значения давления от типовой градуировочной кривой (1).

В свою очередь, измерительный блок вносит некоторую погрешность γx в измеряемое значение электрического сигнала x , в результате чего оно представляет собой алгебраическую сумму $(x + \gamma x)$.

Учет погрешностей γp_n и γx в уравнении (1) приводит к тому, что измеряемое значение давления также представляет собой алгебраическую сумму, состоящую из истинного значения давления p , соответствующего уравнению (1), и некоторой общей погрешности γp , вносимой в результат измерения давления манометрическим преобразователем и измерительным блоком:

$$p + \gamma p = f(x + \gamma x) + \gamma p_n \quad (2)$$

Таким образом, задача оценки погрешностей вакуумметров сводится к оценке возможных значений:

- 1) погрешности γp_n для разных экземпляров манометрических преобразователей;
- 2) погрешности γx , вносимой измерительными блоками в измеряемое значение электрического сигнала;
- 3) общей погрешности измеряемого давления γp , обусловленной двумя указанными выше погрешностями.

Первую из перечисленных задач обычно решают путем градуировки большого числа манометрических преобразователей данного типа по образцовым манометрам и получения для этих приборов соответствующего семейства индивидуальных градуировочных кривых. Применяемые при этом измерительные блоки или установки должны быть отрегулированы так, чтобы вносимые ими погрешности электрических сигналов γx играли пренебрежимо малую роль в уравнении (2) по сравнению с погрешностями γp_n манометрических преобразователей. Среднюю из полученных градуировочных кривых обычно принимают за типовую, и по наблюдаемому разбросу других кривых относительно этой кривой устанавливают допустимые пределы (допуски) $\pm \Delta p_n$ для погрешностей γp_n отдельных манометрических преобразователей. Эти пределы удобно выражать в процентах к измеряемому значению давления

$$\delta p_n = \frac{\Delta p_n}{p} 100\% \quad (3)$$

Решение второй задачи — оценки погрешностей, вносимых измерительными блоками, требует подробного изучения следующих двух групп независимых погрешностей, вносимых блоком:

- 1) как источником питания преобразователя;
- 2) как измерителем сигнала преобразователя.

Первая группа погрешностей обусловлена отклонением электрического режима преобразователя от тех заранее выбранных значений, для которых построена градуировочная кривая, т. е. справедливо уравнение (1).

В результате сигнал x применительно к данной кривой оказывается отягощенным некоторой погрешностью.

Для учета влияния погрешностей этой группы на сигнал x необходимо знать уравнения или кривые зависимости его от всех параметров, определяющих электрический режим преобразователя при постоянном давлении (уравнение режима питания). Например, для ионизационного вакуумметра сигнал представляет собой ионный ток на коллекторе ($x=i_n$) и зависит от тока эмиссии электронов и напряжений на аноде и коллекторе. Сигнал термопарного вакуумметра — это э. д. с. термопары ($x=e$) и зависит он только от тока подогревателя. Для магнитного вакуумметра сигнал представляет собой разрядный ток ($x=i_p$), который зависит от напряжения на выходе источника питания и балластного сопротивления и т. п. В общем случае уравнение режима питания имеет вид

$$x = F(i, R, u, \dots), \quad (4)$$

$\mu = \text{const}$

где i, R, u, \dots — выходные параметры источника питания преобразователя.

Погрешность каждого параметра должна быть известна. Если режим (ток или напряжение) контролируют стрелочным прибором, то соответствующую погрешность определяют, исходя из класса прибора, шунтов и добавочных сопротивлений к нему в заданной режимом точке шкалы прибора. Погрешность сопротивлений и неконтролируемых параметров режима определяют их технологическими допусками, принятыми при производстве.

Вторая группа погрешностей возникает непосредственно при измерении уже отягощенного погрешностью значения сигнала преобразователя. Эти погрешности определяются неточностью входных сопротивлений электрометрического усилителя (если сигналом является весьма малый ток) и нелинейностью его характеристики, классом выходного стрелочного прибора, точностью подгонки шунтов, добавочных сопротивлений и т. п.

Для учета влияния погрешностей этой группы на сигнал x необходимо знать уравнение метода измерения или кривые зависимости сигнала x от всех параметров, определяющих этот метод. Некоторые примеры схем измерения сигнала приведены в табл. 1.

В случае применения более сложных методов (дифференциальные усилители, усилители с обратной связью) также должны быть выведены аналогичные уравнения вида

$$x = \varphi(\mu, r, E, c, \dots, \alpha), \quad (5)$$

где μ, r, E, c, α — параметры, указанные в табл. 1.

Погрешность каждого параметра должна быть известна.

Предельная погрешность коэффициента усиления определяется нелинейностью характеристик лампы и равна разности между средним и максимальным (минимальным) его значением. Погрешность отсчета α определяется классом точности κ прибора, задается в виде предельного допуска и представляет собой постоянную величину, равную

$$\Delta \alpha = \frac{\kappa}{100} \alpha_{\text{max}} \quad (6)$$

Таблица 1

Позиция	Сигнал x	Схема измерения сигнала	Уравнение метода измерения
1	i		$i = cx$
2	i		$i = \frac{r_3 + r_3 + r_{м}}{r_{м}} cx$
3	u		$u = cx$
4	u		$u = \frac{r_2 + r_в}{r_в} cx$
5	e		$e = (r_3 + r_4 + r_5) cx$
6	i u		$i = \frac{c[r_1 + r_3 + (\mu + 1)r_4]x - E_3}{\mu r_{вх}}$ $u = i r_{вх}$

Примечание. В табл. 1. приняты следующие условные обозначения: c — цена деления прибора; α — отсчет по прибору; $r_в$ — внутреннее сопротивление источника в. д. с.; $r_г$ — то же триода; μ — коэффициент усиления триода.

Относительная предельная погрешность отсчета

$$\delta\alpha = \kappa_T \frac{\alpha_{\max}}{\alpha} \% \quad (7)$$

В формулах (6) и (7) через α_{\max} обозначено число делений шкалы прибора.

В некоторых случаях вид функций (4) и (5) неизвестен, но, частные зависимости вида

$$x = \psi_1(\alpha) \dots; \quad x = \psi_2(r) \dots; \quad x = \psi_3(i) \dots \quad (8)$$

оказываются заданными.

Эти зависимости не обязательно должны быть выражены в виде формул; они могут быть найдены также экспериментально и представлены в виде графиков. Если такие зависимости изменяют свой вид с изменением давления, то должно быть получено семейство зависимостей, соответствующих разным значениям давления.

В первом приближении (пренебрегая производными 2-го и более высоких порядков) связь между погрешностями отдельных параметров и

вызываемыми ими частными погрешностями измеряемого сигнала может быть представлена уравнениями

$$\gamma x_i = \frac{\partial F}{\partial i} \gamma i; \quad \gamma x_\mu = \frac{\partial F}{\partial \mu} \gamma \mu \quad \text{или} \quad \gamma x_\alpha = \frac{d\psi_1}{d\alpha} \gamma \alpha. \quad (9)$$

Здесь γi , $\gamma \mu$, $\gamma \alpha$ — общее выражение погрешности параметров i , μ , α соответственно;

γx_i , γx_μ , γx_α — соответствующие им частные погрешности измеряемого электрического сигнала x .

Аналогичные выражения могут быть написаны и для зависимостей частных погрешностей x от погрешностей других параметров.

Погрешности γi , $\gamma \mu$, $\gamma \alpha$ представляют собой случайные величины, которые характеризуются теми или иными кривыми распределения и соответствующими численными параметрами: средними квадратичными отклонениями (погрешностями) σi , $\sigma \mu$, $\sigma \alpha$, предельными отклонениями от центра группирования (допусками) Δi , $\Delta \mu$, $\Delta \alpha$ и т. д.

Для определения результирующей погрешности сигнала допустимо сложение только дисперсий, т. е. квадратов средних квадратичных значений σ^2 частных погрешностей. Применительно к уравнениям (4) и (5) имеем

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma^2 x_i + \sigma^2 x_R + \dots + \sigma^2 x_\mu + \sigma^2 x_r + \dots + \sigma^2 x_\alpha}. \quad (10)$$

Уравнения типа (9) позволяют вычислить входящие в выражение (10) средние квадратичные частные погрешности измеряемого сигнала, если известны соответствующие характеристики погрешностей параметров $\sigma i, \dots, \sigma \mu, \dots, \sigma \alpha$:

$$\sigma x_i = \frac{\partial F}{\partial i} \sigma i; \quad \sigma x_\mu = \frac{\partial F}{\partial \mu} \sigma \mu \quad \text{или} \quad \sigma x_\alpha = \frac{d\psi_1}{d\alpha} \sigma \alpha. \quad (11)$$

Уравнение (10) является окончательным для оценки результирующей средней квадратичной погрешности сигнала x . Однако вычисление σ_x по нему затруднено тем, что вместо средних квадратичных погрешностей параметров σi , $\sigma \mu$, $\sigma \alpha$ обычно бывают заданы в процентах только относительные допуски $\pm \delta i$, $\pm \delta \mu$, $\pm \delta \alpha$ на значения параметров, например, для тока подогревателя термопары

$$\delta i_0 = \frac{\Delta i}{i} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где i и Δi — номинальное значение тока и допуск на него.

Связь между предельными отклонениями (допусками) Δ и средними квадратичными погрешностями σ может быть установлена, если известно математическое выражение закона плотности распределения. В общем случае

$$\Delta = k\sigma, \quad (13)$$

где k — коэффициент формы распределения.

Для распределения по закону равной вероятности $k = \sqrt{3}$. Для нормального закона практически обычно принимают $k = 3$. Для распределений, промежуточных между равновероятным и нормальным, k будет иметь значение, лежащее между $\sqrt{3}$ и 3.

Погрешности случайные γi , $\gamma \mu$, $\gamma \alpha$ и частные γx_i , γx_μ , γx_α , определяемые уравнениями (9), могут быть распределены по самым разнообразным законам. Если эти законы неизвестны, то можно принять равномерное распределение с коэффициентом формы, равным $\sqrt{3}$. При этом недооценки σ по предельному отклонению не будет.

Закон распределения результирующей средней квадратичной погрешности сигнала может быть также самым различным. Однако при достаточно большом числе случайных погрешностей, их независимости друг от друга, одинаковом порядке их по значениям, можно считать, что эта погрешность подчиняется нормальному закону распределения. Тогда $\kappa_x = 3$.

$$\kappa_i = \kappa_R = \kappa_\alpha = \kappa_{x_1} = \kappa_{x_2} = \kappa_{x_3} = \sqrt{3} \cdot \kappa_x = 3 \quad (14)$$

Решая совместно уравнения (10) и (11) при учете выражений типа (12) — (14), и придавая коэффициентам κ те же индексы, что у связываемых ими σ и Δ , получим

$$\delta x_0 = \sqrt{3} \cdot \sqrt{N}, \quad (15)$$

$$\text{где } N = \left(\frac{\partial F}{\partial i} \cdot \frac{i}{F} \delta i\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial R} \cdot \frac{R}{F} \delta R\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \cdot \frac{\alpha}{\varphi} \delta \alpha\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \cdot \frac{r}{\varphi} \delta r\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot \frac{x}{\varphi} \delta x\right)^2.$$

Формула (15) может быть применена при трех и более соизмеримых (одного порядка) погрешностях, распределенных по закону, близкому к нормальному.

При двух соизмеримых погрешностях можно частные погрешности суммировать непосредственно, не применяя формулу (15), т. е.

$$\delta x = \frac{\partial F}{\partial i} \cdot \frac{i}{F} \delta i + \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \cdot \frac{\alpha}{\varphi} \delta \alpha. \quad (16)$$

Формула (15) представляет собой предельную относительную погрешность измерительного блока, соответствующую доверительной вероятности 99,7%.

Если в последний член формулы (15) подставить $\alpha = \alpha_{\max}$, то получится приведенная погрешность измерительного блока — величина, которая должна быть указана в технических условиях на измерительный блок.

Аналогичное выражение может быть составлено и для тех случаев, когда сигнал описывается уравнениями типа (8).

Значения производных $d\psi_1/d\alpha$, $d\psi_2/dr$, $d\psi_3/di$ могут быть получены графически по соответствующим экспериментально установленным зависимостям (8).

Общая погрешность измерения давления вакуумметром может быть получена по уравнению (2), где первый член правой части можно приближенно представить в виде

$$f(x + \gamma x) \approx f(x) + \frac{df}{dx} \gamma x. \quad (17)$$

Подставляя (17) в уравнение (2) и вычитая из него уравнение (1), получаем

$$\gamma p = \frac{df}{dx} \gamma x + \gamma p_n \approx \gamma p_x + \gamma p_n, \quad (18)$$

где γp_x — погрешность, вносимая в результат измерительным блоком; γp_n — погрешность, вносимая манометрическим преобразователем.

Если далее положить γx равным максимальному возможному отклонению Δx (допуску), то получим

$$\gamma p_x = \Delta p_x = \frac{df}{dx} \Delta x, \quad (19)$$

или, принимая во внимание, что

$$\gamma x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%, \quad (20)$$

$$\delta p_x = \frac{df}{dx} \cdot \frac{x}{p} \delta x, \quad (21)$$

где относительная погрешность

$$\delta p_x = \frac{\Delta p_x}{p} \cdot 100\%. \quad (22)$$

Погрешность γp_n , как указывалось выше, обычно задают в виде допуска на предельные отклонения от типовой градуировочной кривой в процентах к измеряемому значению давления δp_n . Общая погрешность измерения давления вакуумметром δp будет суммой значений δp_x и δp_n :

$$\delta p = \delta p_x + \delta p_n. \quad (23)$$

Здесь δp_x может быть вычислено по известной общей относительной погрешности сигнала δ_x с помощью уравнения (21), а δp_n задается техническими условиями на манометрические преобразователи.

Оценить общую погрешность вакуумметра Δp по известным погрешностям Δx и Δp_n можно также графически, по типовой градуировочной кривой (формула (1) и рис. 1) манометрического преобразователя. Для этого на градуировочной кривой выбирают несколько точек (например, точку A) и откладывают относительно них по ординатам отрезки $\pm \Delta p_n$, соответствующие заданным заводом-изготовителем допускам. Если допуски заданы в процентах δp_n , то абсолютные значения их находят из формулы (3).

Соединив двумя плавными линиями все точки, соответствующие значениям $+\Delta p_n$ и $-\Delta p_n$, получают некоторую зону, где каждому определенному значению сигнала соответствует одно из возможных значений давления, лежащих в пределах допуска $\pm \Delta p_n$ на ординате меж-

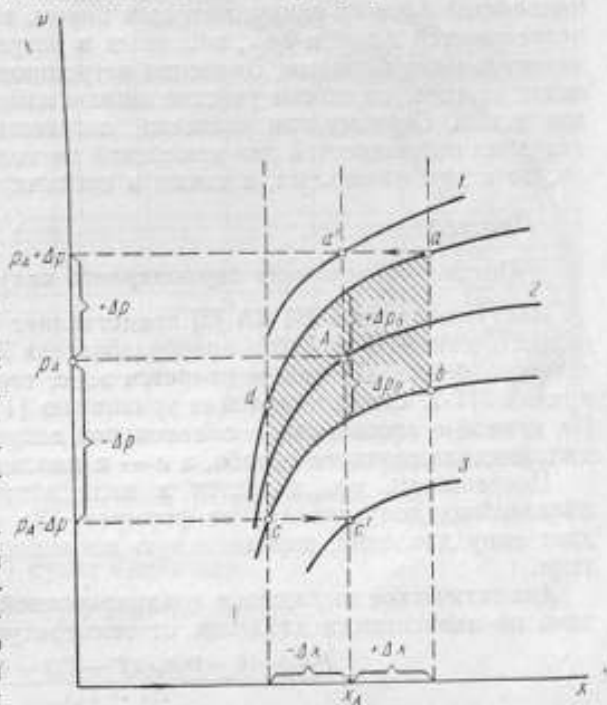


Рис. 1. Графическое сложение погрешностей преобразователя и измерительного блока:

$$1) p + \Delta p = f(x, \Delta x, \Delta p_n); \quad 2) p = f(x);$$

$$3) p - \Delta p = f(x, \Delta x, \delta p_n).$$

ду двумя построенными кривыми. Для учета погрешности Δx , вносимой измерительным блоком в результат измерения сигнала, необходимо относительно каждой из выбранных точек отложить на абсциссе отрезки, соответствующие значениям $\pm \Delta x$, полученные по формулам (15) и (20). Ординаты, проведенные из этих точек до пересечения границы упомянутой зоны, образуют некоторый криволинейный четырехугольник $abcd$, верхняя и нижняя вершины которого a и c определяют собой пределы возможных значений давления, соответствующих данному измеренному значению сигнала. Точки a и c могут быть спроектированы на ординату, проходящую через выбранную первоначально точку A на градуировочной кривой (a' и c') и по ним могут быть построены еще две плавные кривые, определяющие верхнюю и нижнюю границы давления для любого заданного значения сигнала x .

Полученные значения Δp могут быть выражены в относительных единицах δp и представлены в виде графика в зависимости от значения сигнала x или давления p .

Изложенная методика может быть применена как для оценки погрешностей Δp и δp вакуумметров в целом, так и для отдельной оценки погрешностей Δp_x и δp_x , вносимых в результат измерения только измерительными блоками. Значения погрешностей в большой степени зависят от того, на каком участке шкалы измерительного прибора ведут измерения. Поэтому при расчетах погрешностей следует вычислять значения погрешностей для измерений не только в конце шкалы прибора, но и для начальных, а также и средних участков ее.

Пример

Оценка погрешности термоманного вакуумметра типа ВТ-2А

Вакуумметр типа ВТ-2А [3] представляет собой комплект из термоманного манометрического преобразователя ЛТ-2 или ЛТ-4М и измерительного блока. Сигналом является э.д.с. термопары. Градуировочная кривая ЛТ-2, соответствующая уравнению (1) при $x=e$, дана на рис. 2. На кривой в соответствии с заводской документацией p выражено в миллиметрах ртутного столба, а e — в милливольтгах.

Погрешность γp_n задается в виде допуска $\delta p_n = \pm 10\%$. Расчет абсолютных допусков Δp_n по формуле (3) и нанесение их на рис. 2 дает зону давлений, определяемую погрешностью только преобразователя.

Аналитическое выражение градуировочной кривой может быть найдено по зависимости давления от температуры [4], которая имеет вид

$$p = \frac{I^2 R_0 - (b - I^2 R_0 \alpha)(T - T_0) - \delta(T^4 - T_0^4)}{\alpha(T - T_0)}, \quad (*)$$

где T и T_0 — температуры горячих и холодных концов термопары; R_0 и I — сопротивление нагревателя при температуре T_0 и ток через него, являющиеся величинами, постоянными для данного преобразователя;

b , c , α и σ — постоянные для данной конструкции коэффициенты пропорциональности.

Решая последнее уравнение совместно с уравнением зависимости т.э.д.с. от температуры

$$e = k(T - T_0),$$

где k — коэффициент, постоянный для данной конструкции, получим

$$p = \frac{A}{e} - B - Ce - De^2 - Ee^3,$$

Определение объединенных коэффициентов A , B , C , D и E по градуировочной кривой показывает, что коэффициенты D и E , характеризующие влияние излучения энергии на результат измерения, пренебрежимо малы. Коэффициенты A , B и C имеют значения: $A=0,289$ мм рт. ст.; $B=0,0247$ мм рт. ст.; $C=0,000412$ мм рт. ст./мм.

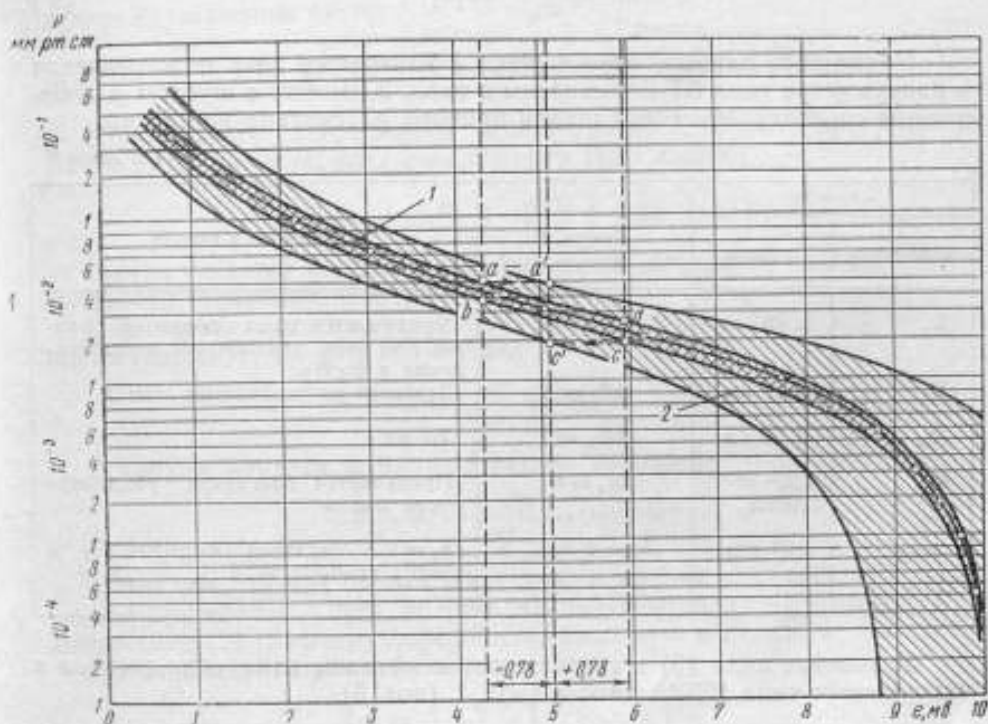


Рис. 2. Пример определения суммарной погрешности вакуумметра типа ВТ-2.

Зоны измеренных значений давлений, определяемых: 1 — погрешностью только преобразователя, 2 — суммарной погрешностью вакуумметра.
Центральная кривая — градуировочная кривая преобразователя типа ЛТ-2.

Тогда уравнение типа (1) будет иметь вид

$$p = \frac{0,289}{e} - 0,0247 - 0,000412e \quad (1')$$

или в системе СИ

$$p = \frac{0,0386}{e} - 3,30 - 55,0e.$$

Зависимость вида (4) приближенно может быть найдена, если в уравнении (*) пренебречь изменением сопротивления нагревателя от температуры и потерями на излучение, т. е. положить $\alpha' = \sigma = 0$.

Тогда при постоянном давлении $p = \text{const}$ уравнение вида (4) будет

$$e = ki^2, \quad p = \text{const}$$

где i — рабочий ток подогревателя термомпары, который в среднем для разных преобразователей можно принять равным 0,115 а.

Числовое значение коэффициента пропорциональности k для каждого давления можно определить по градуировочной кривой рис. 2. По-

грешность k следует отнести к погрешности самого преобразователя. Поэтому погрешность $\sigma x = \sigma e$ определяется только погрешностью тока.

Подставляя значение i , взятое в соответствии со схемой вакуумметра ВТ-2А из табл. 1 (поз. 2), получаем

$$e = k \left(\frac{R_a + R_x + R_{ш}}{R_{ин}} c_1 z_1 \right)^2. \quad (4')$$

Примерные данные, относящиеся к измерению тока подогревателя в вакуумметре типа ВТ-2А, сведены в табл. 2. Вместе с шунтом и добавочным сопротивлением вся шкала прибора рассчитана на 150 мА.

Таблица 2

Параметр		Допуск, %	Примечание к допуску
обозначение	значение		
R_a	40 Ом	$\delta R_a = 0$	Принимается из-за подгонки шкалы i за счет добавочного сопротивления и шунта. Задается по технологии завода
R_x	1500 Ом	$\delta R_x = 1$	
$R_{ш}$	2,06 Ом	$\delta R_{ш} = 1$	То же
c_1	$1,33 \cdot 10^{-6}$ а/дел	$\delta c_1 = 0$	Принимается благодаря равномерности шкалы
σ_{max}	150 дел	$\delta \alpha = 2,5 \sigma_{max} / \alpha$	$k_2 = 2,5$ согласно формуле (7) и классу прибора М-24

Уравнение вида (5) в соответствии с методом измерения сигнала в вакуумметре типа ВТ-2А дано в табл. 1 (поз. 5)

$$e = (r_a + r_x + r_e) c_2 z_2. \quad (5')$$

Примерные данные, относящиеся к измерению сигнала в вакуумметре типа ВТ-2А, сведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметр		Допуск, %	Примечание к допуску
обозначение	значение		
r_a	40 Ом	$\delta r_a = 0$	Принимается из-за подгонки шкалы e за счет добавочного сопротивления
r_x	3 Ом	$\delta r_x = 1$	
r_e	7 Ом	$\delta r_e = 14$	Задается заводом как ± 1 Ом
c_2	$2 \cdot 10^{-6}$ а/дел	$\delta c_2 = 0$	Принимается из-за равномерности шкалы
σ_{2max}	100 дел	$\delta \alpha = 2,5 \sigma_{2max} / \alpha$	$k_2 = 2,5$ согласно формуле (7) и классу прибора М-24.

С учетом добавочного и внутреннего сопротивления термомпары вся шкала прибора рассчитана на 10 мВ.

Предельную относительную погрешность сигнала x (она же предельная относительная погрешность измерительного блока) находят по формуле (15) при $x=e$, причем функции F соответствует уравнение (4'), а функции φ — уравнение (5').

Подстановка данных из табл. 2 и 3 в уравнение (15) приводит к следующему значению δe :

$$\delta e = 1,73 \sqrt{1,94^2 + 2^2 + 6,5^2 + 0,06^2 + 1,96^2 + \left(\frac{250}{\alpha_2}\right)^2}. \quad (15')$$

Приведенная погрешность измерительного блока вакуумметра ВТ-2А будет найдена, если в выражении (15') положить $\alpha_2=100$:

$$\delta e_{\text{прив}} = 1,73 \sqrt{53,6 + 6,25} = 13\%.$$

Теперь остается перейти от погрешности измерения сигнала к погрешности измерения давления.

Для оценки погрешности аналитическим путем следует применить выражение (21), которое примет вид

$$\delta p_e = \frac{df}{de} \cdot \frac{e}{p} \delta e. \quad (21')$$

В данном примере функция f задана выражением (1'), поэтому

$$\frac{df}{de} = -\frac{0,289}{e^2} = -0,000412.$$

Очевидно, что для оценки погрешности вторым членом правой части можно пренебречь. Тогда, подставляя полученную производную (15') в выражение (21'), имеем погрешность, вносимую в результат измерения давления измерительным блоком

$$\delta p_e = \pm \frac{0,5}{ep} \sqrt{53,6 + \left(\frac{250}{\alpha_2}\right)^2}.$$

Таблица 4

p мм рт. ст.	0,3	0,1	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01	0,008	0,005	0,003	0,002	0,001	0,0005
e мв	0,89	2,18	3,02	4,35	5,10	6,13	7,64	8,17	8,76	9,19	9,44	9,74	9,91
α дел	8,9	21,8	30,2	43,5	51,0	61,3	76,4	81,7	87,6	91,9	94,4	97,4	99,1
δp_e %	54	31	26	27	29	34	53	60	90	140	210	400	780
δp %	64	41	36	37	39	44	63	70	100	150	220	410	790

В табл. 4 приведены значения δp_e % для некоторых значений p , подсчитанные по последней формуле, и значения общей погрешности измерения давления δp , подсчитанной по формуле (24) при $x=e$.

Чтобы не загромождать график рис. 2, графическое сложение погрешностей, вызываемых преобразователем и измерительным блоком, подробно пояснено только для одной точки давления $p=3 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., $e=5,1$ мв.

Погрешность Δe , вносимая в измеряемое значение сигнала блоком в рассматриваемой точке, в соответствии с формулой (15') будет

$$\Delta e = 0,78 \text{ мв.}$$

Откладываем на графике эти значения вправо и влево от $e=5,1$ мм. Ординаты, проведенные из полученных точек до пересечения с зоной давлений, определяемой погрешностью преобразователя, дают упомянутый ранее криволинейный четырехугольник $abcd$. Проектирование точек a и c на ординату $e=5,1$ мм (точки a' и c') дает верхнюю и нижнюю границы погрешности измерения давления $p=0,03$ мм рт. ст.

Полученные из графика значения для точки a' : $\Delta p=+0,020$ мм рт. ст., или $\delta p=67\%$,

для точки c' будет $\Delta p=-0,012$ мм рт. ст., или $\delta p=39\%$.

Расхождение с расчетным значением $\delta p=\pm 39\%$ в левой части кривой объясняется значительным возрастанием ее кривизны в этой части (что при полулогарифмическом масштабе не бросается в глаза).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев М. А., Ерюхин А. В. Точные измерения вакуума в научных исследованиях. «Измерительная техника», 1964, № 6.
2. Бородачев Н. А. Анализ контроля и точности производства. М.-Л., Машгиз, 1946.
3. Вакуумметр термоманометрического типа ВТ-2А, «Государственный реестр мер и измерительных приборов, допущенных к применению в СССР», № 1582.
4. Хавкин Л. П. Об измерении давлений различных газов термоманометром. ЖТФ, 1955, № 4.

Поступила в редакцию
8/V 1964 г.

ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА АККОМОДАЦИИ
(ОБЗОР)

Дан обзор методов измерений коэффициента аккомодации, рассмотрены и систематизированы результаты измерений его при различных условиях взаимодействия разреженного газа со стенкой. Показаны зависимости его от ряда физических параметров и дано краткое описание теорий, объясняющих эти зависимости.

Точный расчет показаний термомолекулярного манометра Кнудсена невозможен, как известно, ввиду неопределенности значения коэффициента аккомодации (к.а.), входящего в уравнение измерения этого прибора. В более совершенном термомолекулярном манометре, разработанном во ВНИИМ*, влияние неопределенности к.а. во много раз меньше, чем в приборе Кнудсена, однако полностью устранить влияние неопределенности значения к.а. показания этого манометра также не удалось. Отсюда следует, что повышение точности измерения к.а. весьма существенно с точки зрения перспективы работ по усовершенствованию термомолекулярного манометра.

Анализ опытных и расчетных данных широкодиапазонного теплоэлектрического мановакуумметра, рассмотренных в работах [1, 2], также показывает необходимость надежных данных о величине к.а. Они необходимы и для строгой теории термоэлектрического и термомолекулярного манометров.

Известен ряд обзорных работ по измерению к. а. [3—5]. В них собраны результаты этих измерений на различных поверхностях и при различных условиях, однако для большинства приведенных данных не указана такая решающая характеристика, как степень чистоты поверхности от адсорбированного газа и его состава. Насколько это важно для практического применения результатов измерений к.а. показывает следующий пример: Робертс [6], выполнивший измерения весьма тщательно в отношении техники эксперимента, получил для неона на неочищенной от пленки адсорбированного газа вольфрамовой нити значение коэффициента аккомодации $a=0,6$; на той же нити после очистки ее прокаливанием найдено значение $a=0,07$, т. е. почти в 10 раз меньшее. Аналогичные результаты получены и другими исследователями.

С увеличением степени шероховатости поверхности, обусловленной либо качеством механической обработки, либо наличием слоя окисла, к. а. возрастает и в случае предельно шероховатой поверхности (напри-

* Дрига М. И. Авторское свидетельство № 104220, 1955.

мер, при покрытии металлической гладкой поверхности тонким слоем платиновой черни) достигает значения, близкого к единице.

При высокой разреженности газа, граничащего с гладкой, тщательно очищенной от адсорбированного газа стенкой, обнаруживается зависимость α от ее материала и атомного веса газа.

Методы измерения коэффициента аккомодации

Известны три метода измерения к.а.: метод Кнудсена, метод скачка температуры (Кеннарда) и метод молекулярных пучков. Первые два метода применяются для случая неподвижного газа и подробно описаны в работе [3]. Третий из указанных методов позволяет исследовать теплообмен в режиме свободно-молекулярного течения. Этот метод основан на получении одним из известных способов параллельно летящих, не взаимодействующих друг с другом молекул газа. О теплообмене при этом можно судить по изменению скоростей молекул.

По методу Кнудсена непосредственно определяется энергия, отдаваемая стенкой (поверхностью нагреваемой электрическим током нити, натянутой по центральной оси измерительной трубки) окружающему газу при заданных температуре газа и давлении. Все условия эксперимента можно варьировать в широких пределах, поэтому большинство измерений выполнено по этому методу. Следует лишь добавить, что при измерении к.а. методом Кнудсена большую трудность представляет определение оптимального давления. В трубке поддерживают достаточно низкое давление газа с тем, чтобы средняя длина свободного пробега молекул была значительно больше, чем диаметр нити. Это необходимо для достижения условий свободно-молекулярного состояния газа. Пренебрегая краевым эффектом, можно принять, что энергия с центральной нити передается трубке посредством свободно-молекулярной теплопроводности и радиации.

Если размер нити мал по сравнению с внутренним диаметром трубки, молекулы, отлетающие от нити, будут иметь много столкновений с поверхностью трубки прежде чем возвратятся на нить. Поэтому можно считать, что группа молекул, ударяющихся о нить, имеет температуру измерительной трубки.

Суммируя сказанное, отметим, что надежные измерения к.а. с использованием тонкой нагреваемой нити в трубке должны удовлетворять следующим требованиям [4]:

1) давление внутри трубки должно быть достаточно высоким, чтобы радиационная доля энергии ϵ_r не превышала доли энергии свободно-молекулярного переноса ϵ_c , а именно должно быть $\frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} < 1$;

2) давление внутри трубки должно быть достаточно низким, чтобы средняя длина свободного пробега молекул λ по крайней мере в три раза превышала радиус трубки R , иначе не будут достигнуты условия свободно-молекулярного состояния газа;

3) радиус центральной нити r должен быть мал по сравнению с радиусом трубки R , чтобы молекулы, падающие на центральную нить, находились в температурном равновесии с трубкой, т. е. чтобы $\frac{r}{R} < \frac{1}{10}$.

Зависимость коэффициента аккомодации от молекулярного (атомного) веса газа, материала стенки и температур их

При отсутствии адсорбированного газа на поверхности стенки значение к.а. на ней зависит от молекулярного веса газа M_2 и материала

стенки M_c . Джинс получил для этой зависимости приближенную формулу [7]

$$a \approx \frac{4M_c M_r}{(M_c M_r)^2} \quad (1)$$

Эта формула показывает, что в первом приближении, при условии $M_c \gg M_r$, величина a пропорциональна отношению M_r/M_c . При выводе формулы (1) был принят ряд упрощающих допущений. Предполагали, что молекулы и газа и стенки представляют собой упругие шарики; при ударе молекулы газа о стенку рассматривали взаимодействие ее только с одной молекулой материала стенки; влияние адсорбированного газа не учитывали и т. д. Тем не менее в некоторых работах [8] получено экспериментальное подтверждение соотношения (1). Более строгое рассмотрение в работе Л. Д. Ландау [9] обмена энергией при столкновении молекул газа со стенкой также приводит к соотношению (1). В этой работе на основе классической механики показано также, что a пропорционален величине $T^{1/2}$, где T — температура газа. Эта зависимость справедлива при условиях

$$M_r \ll M_c \text{ и } \frac{M_r \theta}{1500} \gg T, \quad (2)$$

где θ — характеристическая температура стенки.

Исключение составляют водород и гелий при очень низких температурах. Для этих газов Ландау, пользуясь квантовой механикой, получил соотношение

$$a \approx 50 \frac{M_r}{M_c} \left(\frac{T}{\theta} \right)^3 \quad (3)$$

при условии $T \leq \frac{50}{M_r}$.

В работе С. П. Захарьина и Г. В. Сливака [10] получено экспериментальное подтверждение следующей зависимости, к которой сводятся соотношения [2] и [3], выведенные Ландау:

$$a = AT^n, \quad (4)$$

где A — постоянная.

Результаты измерений коэффициента аккомодации различными исследователями

Многие исследователи измеряли значение к.а. и в настоящее время имеются данные о его значении для многих газов на поверхности платины, вольфрама и других материалов. Сравнительно плохая сходимость результатов, полученных различными авторами, объясняется большой зависимостью значения к.а. от степени загрязнения исследуемой стенки адсорбированным газом и от его состава, от степени шероховатости стенки, ее температуры и давления газа, граничащего с этой стенкой, и т. д.

В табл. 1 приведены полученные различными авторами значения к.а. на поверхности вольфрама и платины: для поверхности, тщательно очищенной от адсорбированного газа, и для поверхности, на которой заведомо имеется слой адсорбированного газа.

В табл. 2 приведены значения к.а. для гелия и неона на тщательно очищенных поверхностях различных металлов, полученные в работе [3].

Таблица 1

Газ	Молекулярный вес	Коэффициент аккумуляции								
		стенка очищена				стенка не очищена				
		[11]	[8]	[6]	[10]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]
H ₂	2	0,11				0,312	0,24	0,22	0,28	0,34
He	4	0,03	0,05	0,057	0,054	0,403	0,38	0,238	0,37	0,50
Ne	20,2			0,07	0,06	0,70	0,75	0,57	0,65	
CO	28									0,78
O ₂	32	0,42				0,782	0,62	0,74	0,82	
Ar	40	0,55	0,1		0,11	0,847	0,80	0,89	0,86	0,88
CO ₂	44						0,52	0,76	0,83	0,82
Kr	83,8					0,844				
Xe	131,3					0,858				
Hg	200,6	1,0	0,58			0,772				
Материал стенки		Pt	W	W	W	Pt	Pt	Pt	Pt	Pt

В табл. 3 приведены результаты измерений к. а. для He, Ne и Ar на поверхности вольфрамовой нити, покрытой пленкой адсорбированного газа (H₂, O₂, N₂, CO₂), а также для сравнения на той же нити, тщательно очищенной от адсорбированного газа. Прежде всего измеряли к. а. инертных газов (Ne, He, Ar) на хорошо очищенной поверхности вольфрама, причем газ имел комнатную температуру; а температура нити была на 30° выше; затем измерительную трубку откачивали до высокого вакуума и вводили в нее адсорбируемый газ на время, достаточное для образования его пленки (несколько минут), вновь откачивали (не прогревая) до высокого вакуума, заполняли трубку инертным газом и измеряли к. а. Методика этих исследований подробно описана в работе [10].

Таблица 2

Стенка		Коэффициент аккумуляции	
материал	молекулярный вес	гелий	неон
Be	9	0,145	0,315
Na	23	0,09	0,198
Al	27	0,073	0,159
K	39	0,083	0,199
Fe	56	—	0,056
W	184	0,017	0,042
Pt	195	0,038	—

Как показывают табл. 1, 2 и 3: 1) к. а. на очищенной от адсорбированных газов стенки меньше, чем на неочищенных, 2) на очищенной поверхности отчетливо проявляется закономерное увеличение к. а. с возрастанием молекулярного веса газа и уменьшение его с возрастанием молекулярного веса материала стенки; при наличии пленки адсорбированного газа эта закономерность проявляется слабее; 3) результаты измерений различных исследователей

Таблица 3

Газ	Коэффициент аккумуляции									
	[8]	[6]	[10]	[8]	[6]	[10]	[8]	[10]	[6]	[10]
He	—	0,057	0,054	—	—	0,36	—	0,35	—	0,13
Ne	0,05	0,08	0,08	0,33	0,36	—	0,15	0,39	0,17	—
Ar	0,10	—	0,11	0,63	—	0,63	0,24	0,71	—	0,27
Материал стенки (и адсорбированный на ней газ)	W		W+O ₂			W+CO ₂	W+N ₂	W+H ₂		

различаются, в лучшем случае, на 10—20%, но во многих случаях это различие достигает 100% и более. Это можно объяснить зависимостью к. а. от очень многих величин: степени шероховатости поверхности, количества и рода адсорбированных газов, температуры газа и стенки и др.

В работе Робертса [6] был исследован эффект введения в качестве примеси в исследуемый газ таких быстро образующих слой адсорбированных молекул компонентов, как кислород и водород. На рис. 1, за-

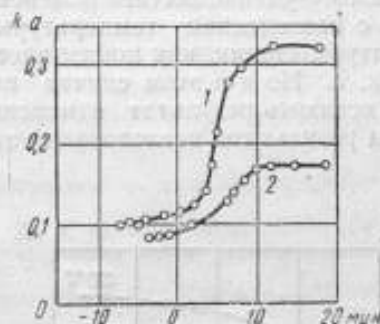


Рис. 1. Изменение коэффициента аккумуляции неона после введения в него около 0,1% примеси водорода при температуре 79°K (кривая 1) и 295°K (кривая 2).

имствованной из этой работы, показано быстрое увеличение к.а. по неону после введения в него около одной тысячной части водорода. Медленное увеличение к.а. до момента введения примеси водорода объясняется постепенным загрязнением неона газом, выделяющимся из стенок измерительной трубки и составляющим очень малую долю процента. Учитывая это, Робертс получил значение к.а. для чистого неона на вольфраме путем экстраполяции по кривой рис. 1 к началному моменту времени впуска неона в измерительную трубку. Зависимость к.а. от плотности слоя адсорбированного газа и молекулярного (атомного) веса его настолько велика, что ею можно пользоваться как индикатором (критерием) загрязнения поверхности металла адсорбированными газами [6, 11].

Таблица 4

Материал стенки	Коэффициент аккумуляции				
	H ₂		He	O ₂	CO ₂
	[17]	[16]	[19]	[17]	[18]
Платина:					
блестящая	0,32	0,358	0,41	0,81; 0,835	0,868
обыкновенная	0,36	0,36	—	—	—
слегка черная	0,556	0,556	—	—	0,927
сильно черная	0,712	0,74	0,91	0,93; 0,956	0,975

В табл. 4 и 5 приведены значения к. а. для различных газов (H₂, He, O₂, CO₂ и воздух) на поверхностях различной степени шероховатости. Из этих таблиц

Таблица 5

Материал стенки	Коэффициент аккумуляции воздуха [30]
Лак черный, гладкий на бронзе	0,881—0,894
Бронза:	
полированная	0,91—0,94
обработанная	0,89—0,93
травленая	0,93—0,95
Чугун:	
полированный	0,87—0,93
обработанный	0,87—0,88
травленный	0,89—0,96
Алюминий:	
полированный	0,87—0,95
обработанный	0,95—0,97
травленный	0,89—0,97

видно, что в случае предельно шероховатой поверхности (сильно черенная платина и т. п.) к. а. близок к единице, практически не зависит от рода газа и материала поверхности.

Экспериментальное исследование влияния температуры стенки и граничащего с ней газа на коэффициент аккомодации

При повышении температуры стенки равновесие сорбции и десорбции газа на ней нарушается и плотность покрытия адсорбированным газом уменьшается. Вследствие этого к. а. должен уменьшаться с повышением температуры стенки. Само по себе повышение температуры стенки, как показывает теория, должно привести к увеличению к. а. Но и в этом случае ничтожные загрязнения газа могут сильно исказить результат измерений. В статье Томаса и Ольмера [14] собраны результаты исследований зависимости к. а. для различных га-

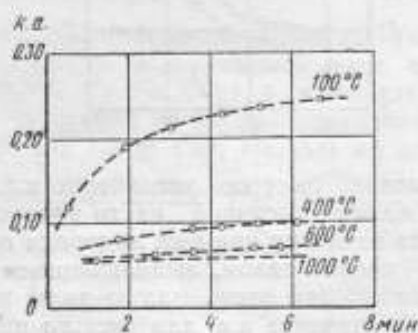


Рис. 2. Изменение коэффициента аккомодации со временем при температурах: 100°C (1), 400°C (2), 600°C (3) и 1000°C (4).

зов от температуры стенки из вольфрама и платины. Как правило, в результате измерений получается уменьшение его с повышением температуры, что происходит, несомненно, вследствие уменьшения плотности покрытия стенки адсорбированным газом с повышением ее температуры. В результате измерений Робертса [21] получено для гелия незначительное увеличение, а для азота неизменное значение к. а. с повышением температуры стенки из чистого вольфрама в пределах от 100 до 300°C.

Мани [11] измерял к. а. гелия на чистой платине при условии повышения со временем температуры платиновой нити (от 100 до 1200°C). В результате этих измерений получено семейство кривых (рис. 2), которые показывают, что с повышением температуры нити к. а. уменьшается. Эту зависимость можно объяснить влиянием уменьшения количества адсорбированного газа с повышением температуры нити.

Измерения к. а. при низких температурах были произведены В. Рейнс [22] и результаты приведены в табл. 6.

Как видно из этой таблицы, при низких температурах на очищенной от адсорбированного газа поверхности вольфрама получены значения к. а. почти на порядок меньше, чем на неочищенной, причем с повышением температуры на очищенной поверхности он увеличивается, а на неочищенной — уменьшается.

Таблица 6

Температура стенки, °К	Коэффициент аккомодации	
	стенка очищена	стенка не очищена
80	0,048	0,413
195	0,060	0,423
273	0,071	0,360
369	0,077	0,343

Выводы

1. Ввиду ненадежности результатов измерений коэффициента аккомодации до настоящего времени нет таблицы точных значений к. а. для различных условий, и практически в каждом случае необходимо измерять его при конкретных условиях.
2. Термомолекулярный манометр имеет значительную погрешность показаний, обусловленную неопределенностью значения к. а., однако влияние последнего можно существенно уменьшить за счет конструкции измерительного устройства.
3. Необходимы дальнейшие работы по усовершенствованию методики измерений к. а. и по исследованию условий, при которых этот коэффициент сохраняет постоянство.
4. Наиболее надежным и точным способом измерения к. а. является метод Кнудсена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прасолов Р. С., Тепло- и массоперенос в топочных устройствах, изд. «Энергия», 1964.
2. Прасолов Р. С., Терехов А. Д., К расчету теплоэлектрических и вязкостных манометров и термоманометров, «Известия вузов. Приборостроение», № 6, 1965.
3. Ваксман Х., Теплового коэффициент аккомодации (обзор), «Ракетная техника», № 1, 1962 (перевод с английского).
4. Hartnett J. P., A Survey of Thermal Accommodation Coefficients. Rarefied Gas Dynamics, New-York and London, Academic Press.
5. Хавкин Л. П., Об измерении давлений различных газов термомолекулярным манометром, ЖТФ, т. XXV, вып. 4, 1955.
6. Roberts J. K., The Exchange of Energy between Gas Atoms and Solid Surface, Proc. Roy. Soc., London, v. A129, September, 1930.
7. Jeans J. H., An Introduction to the Kinetic Theory of Gases, New-York, 1940.
8. Сливак Г. В., Зайцев А. А., Об обмене энергией между газовыми атомами, ЖЭТФ, т. 5, вып. 1, 1935.
9. Landau L., Theory of Accommodation Coefficients, Phys. Zeit. der Sowjetunion, v. 8, September, 1935.
10. Сливак Г. В., Захарьин Г. П., Обмен энергией между атомами гелия, неона и аргона и поверхностью металла, ЖЭТФ, т. 6, вып. 10, 1936.
11. Mann W. B., The Exchange of Energy between a Platinum Surface and Gas Molecules, Proc. Roy. Soc., London, A146, 1934.
12. Amdur I., J. Chem. Phys., v. 12, 1944, p. 159; v. 14, 1946, p. 339.
13. Soddy F., Berry A. J., Conduction of Heat through Rarefied Gases — II, Proc. Roy. Soc., London, A83, 1909; A84, 1910.
14. Thomas L. B., Olmer F. C., The Accommodation Coefficient of He, Ne, A, H₂, D₂, O₂, CO₂ and Hg on Platinum at a Function of Temperature, J. Amer. Chem. Soc., v. 65, June, 1943.
15. Кнудсен М., Ann. d Phys., v. 34, 1911.
16. Dickins B. G., Proc. Roy. Soc., A143, 1934, p. 517.
17. Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М., Теория тепло- и массообмена, ГЭИ, 1961.
18. Дешман С., Научные основы вакуумной техники, ИЛ, 1960.
19. Кеезом В., Гелий, ИЛ, 1949.
20. Wiedmann M. L., Trunpler P. R., Thermal Accommodation Coefficients, Trans. Am. Soc. of Mech. Eng., v. 68, 1946.
21. Roberts J. K., The Exchange of Energy between Gas Atoms and Solid Surface II. The Temperature Variation of the Accommodation Coefficient of Helium, Proc. Roy. Soc., London, February, v. A135, 1932.
22. Raines B., Phys. Rev., v. 56, 1939, p. 691.

НОВЫЕ МЕТОДЫ ГРАДУИРОВКИ МАНОМЕТРОВ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОГО ВАКУУМА (ОБЗОР)

Рассмотрены новые методы градуировки манометров, основанные на течении газа через капилляры, трубы или отверстия, пропускные способности которых вычислены по их размерам на основании уравнений кинетической теории. Применение современных способов откачки с большой производительностью позволяет понижать давление в образцовых установках в 10^6 и более раз.

Широко распространенный метод градуировки ионизационных манометров по образцовому ртутному компрессионному манометру не обеспечивает требуемых пределов измерения (обычно он ограничен давлениями не ниже 10^{-3} н/м² или $\sim 10^{-5}$ мм рт. ст.), отличается большой трудоемкостью и имеет меньшую точность у нижнего предела измерения. В последние годы установлен еще один недостаток этого метода, связанный с откачивающим действием паров ртути, движущихся от компрессионного манометра к охлаждаемой ловушке [1—4]. Поэтому стремятся изыскать более удобные методы, которые могли бы обеспечить градуировку и поверку различных электроразрядных манометров в широких пределах измерения, охватывающих область как высокого, так и сверхвысокого вакуума.

Известен ряд работ, в которых для воспроизведения единицы давления предложено применять течение газа через капилляры, трубы или отверстия, пропускные способности которых вычислены по их размерам на основании уравнений кинетической теории.

Уравнения процесса откачки основаны на постоянстве массового расхода газа $Q_m = dm/dt$ (массы газа m , проходящей через поперечное сечение в единицу времени) в вакуумной системе. В вакуумной технике вместо «расхода» обычно применяют «поток газа», который представляет собой производную по времени t от произведения давления P и объема V газа

$$Q = d(PV)/dt.$$

Соотношение между потоком и массовым расходом газа может быть получено из уравнения состояния

$$PV = \frac{m}{M} RT,$$

где M — молекулярная масса газа;
 R — универсальная газовая постоянная;
 T — абсолютная температура газа.

Из приведенного уравнения следует:

$$Q = \frac{d(PV)}{dt} = \frac{RT}{M} \cdot \frac{dm}{dt} = \frac{RT}{M} Q_m.$$

Таким образом, при постоянных температуре и молекулярном составе газа различие между значениями потока и расхода газа сводится к постоянному множителю, на который надо умножить одно из них, чтобы получить другое. Тот же результат можно получить, если выразить массу газа через его объем V и плотность ρ , приведенную к стандартным условиям, при которых $\rho = \rho_0$, $P = P_0$.

$$m = \rho V = \rho_0 \frac{P}{P_0} V.$$

Тогда

$$Q_m = \frac{dm}{dt} = \frac{\rho_0}{P_0} \frac{d(PV)}{dt} = \frac{\rho_0}{P_0} Q.$$

Уравнения процесса откачки позволяют найти несколько решений поставленной задачи:

1) закон изменения давления P со временем t в известном объеме, откачиваемом через капилляр с известной пропускной способностью U [5, 6]

$$P = f(t, U);$$

2) уравнение для значения давления, которое устанавливается в системе при постоянном значении расхода газа Q через нее и заданных пропускных способностях входа и выхода [7—10]:

$$P = f(Q, U_1, U_2, \dots);$$

3) уравнение для соотношения между низким и высоким давлениями (P_1 и P соответственно), устанавливающимися в вакуумной системе при постоянных расходах натекания и откачке через трубы или отверстия с известными пропускными способностями [11, 12]:

$$\frac{P_1}{P} = f(U_1, U_2, \dots).$$

Метод определения временной зависимости давления

Первое из перечисленных решений сводит градуировку к исследованию временной зависимости показаний манометра. При таком исследовании очень трудно учесть дополнительные ошибки, связанные с нестационарностью различных процессов (изменение адсорбции газа стенками, газовыделения, откачивающего действия манометрических ламп и т. п.). Кроме этого, желание охватить возможно более широкие пределы изменения давления приводит к необходимости отсчитывать показания манометров как через очень малые, так и через очень большие отрезки времени (от миллисекунд до нескольких суток), что также довольно затруднительно. Поэтому в последнее время предпочитают иметь дело со стационарными процессами откачки, постоянными потоками газа и установившимися значениями давления.

Метод определения зависимости давления от расхода натекания и пропускных способностей труб или отверстий

Второе решение предлагает для воспроизведения заданного давления измерять расходы газа (обычно при входном атмосферном давлении) и вычислять пропускные способности труб или отверстий по уравнениям кинетической теории.

В работе [9] предложен универсальный метод для измерения трех основных величин вакуумной техники: быстроты откачки, давления и расхода газа. Автор метода считает, что он применим, в частности, в пределах $7 \cdot 10^{-2} \div 7 \cdot 10^{-4}$ н/м² ($5 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.) для градуировки манометрических ламп ионизационных манометров, имеющих линейную зависимость тока ионного коллектора от давления.

Экспериментальная установка схематически изображена на рис. 1. К входному отверстию 8 диффузионного насоса присоединена труба 5.

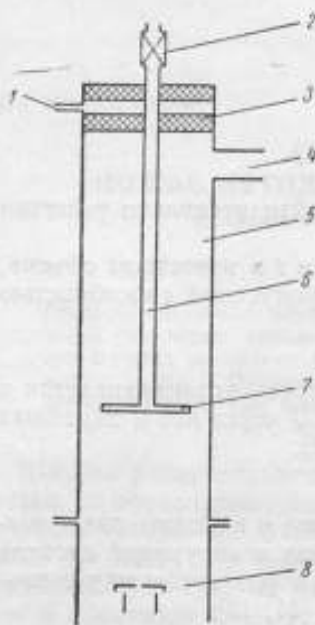


Рис. 1. Схема установки, предложенной Флореску.

Через верхний конец трубы, снабженный скользящим уплотнением 3, пропущена труба 6, способная скользить вдоль оси трубы 5. На нижний конец трубы 6 насажено полое кольцо 7 с большим числом малых отверстий, на верхний — натекаТЕЛЬ 2. Газ, пропускаемый через натекаТЕЛЬ, проходит по трубе 6 и равномерно распределяется по сечению трубы 5 на уровне расположения кольца 7. Скользящее уплотнение, состоящее из двух тефлоновых дисков, откачивается форвакуумным насосом через трубу 1. Градуируемая манометрическая лампа присоединена к трубе 4. Установив с помощью натекателя некоторое постоянное значение потока газа Q , делают два отсчета равновесных значений тока ионного коллектора манометрической лампы: при положениях кольца 7 в нижней и верхней частях трубы 5 ($I_{н1}$ и $I_{н2}$ соответственно).

Если расход натекания Q поддерживать постоянным, то между ним, равновесными давлениями P_1 и P_2 , устанавливающимися в двух указанных случаях над кольцом 7 и пропускной способностью U_{12} участка трубы 5, расположенного между двумя соот-

ветствующими уровнями кольца, будет иметься зависимость

$$Q = U_{12}(P_2 - P_1). \quad (1)$$

Эту зависимость можно представить в двух следующих формах:

$$P_1 = \frac{Q}{U_{12}} \cdot \frac{P_1}{P_2 - P_1} \quad (2)$$

и

$$P_2 = \frac{Q}{U_{12}} \cdot \frac{P_2}{P_2 - P_1}. \quad (3)$$

При линейной зависимости тока ионного коллектора манометрической лампы от давления

$$P_1 = CI_{н1}; \quad P_2 = CI_{н2}, \quad (4)$$

где C — постоянная манометрической лампы ионизационного манометра.

Подстановка выражений (4) в правые части уравнений (2) и (3) дает

$$P_1 = \frac{Q}{U_{12}} \cdot \frac{I_{н1}}{I_{н2} - I_{н1}}, \quad (5)$$

$$P_2 = \frac{Q}{U_{12}} \cdot \frac{I_{н2}}{I_{н2} - I_{н1}}. \quad (6)$$

Для молекулярного течения газа, соответствующего той области давлений, в которой обычно работают ионизационные манометры, значение U_{12} не зависит от давления и может быть вычислено, если известны молекулярный вес и температура газа, диаметр и длина участка трубы. Таким образом, для градуировки манометрической лампы, присоединенной к трубе 4, необходимо измерять поток натекания Q при атмосферном давлении, линейные перемещения трубы 6 (для вычисления пропускной способности U_{12}) и токи ионного коллектора манометрической лампы. Суммарную относительную погрешность измерения чувствительности манометрической лампы описанным методом автор статьи [9] оценивает как $\pm 3\%$ при давлении не ниже $7 \cdot 10^{-3}$ н/м².

Уравнения (5) и (6) получены при следующих предположениях:

- 1) отсутствует перепад давлений в вакуумной системе от кольца 7 до манометрической лампы, присоединенной к трубе 4;
- 2) пренебрежимо малы: течи, давления выделяющихся паров и десорбция газов с внутренних деталей и стенок.

Очевидно, что перечисленные условия тем труднее выполнить, чем ниже измеряемое давление. Как видно из работы [9], предельное давление в экспериментальной установке оказалось порядка $3 \cdot 10^{-4}$ н/м², а градуировка манометрических ламп проведена при давлениях порядка 10^{-2} н/м². По-видимому, течи в вакуумной системе не позволили получить более низкие предельные давления и, следовательно, вести градуировку при более низких рабочих давлениях.

Недавно предложен несколько иной вариант [10] описанного метода, отличающийся отсутствием перемещающихся деталей в высоковакуумной части установки и, вследствие этого, более надежной герметичностью вакуумной системы. Схема установки показана на рис. 2. К входу масляного диффузионного насоса 9 (диаметр входного отверстия 25,4 см) присоединена вакуумная камера 6 с конусообразным маслоотражателем 8. Верхняя часть камеры 6 соединена с рабочей камерой 2. Между камерами 6 и 2 расположена пластина 5 с круглым отверстием, диаметр которого заранее измерен (4,92 см). Устройство 3, состоящее из игольчатого натекателя и масляного манометра, позволяет регулировать и измерять поток натекания газа в камеру 2 в пределах $10^{-6} - 1$ н·м/сек. К этой камере могут быть присоединены четыре исследуемые манометрические лампы 1 закрытого типа и одна лампа открытого типа (через фланцевое соединение 4).

При постоянном расходе Q равновесное давление P , установившееся в камере 2, равно

$$P = P' + \frac{Q}{S}. \quad (7)$$

Здесь P' — предельное значение давления в камере 2 (устанавливающееся при $Q=0$);

S — быстрота откачки камеры 2.

Таким образом, для вычисления искомого значения P нужно, кроме потока Q , знать предельное давление P' и быстроту откачки S . Для вы-

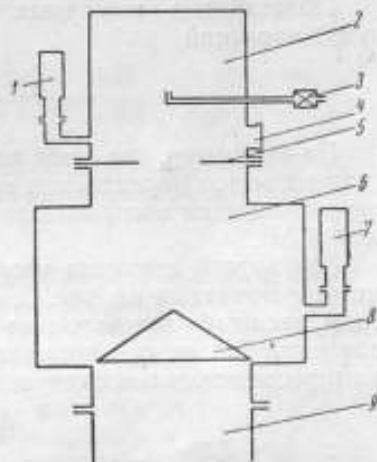


Рис. 2. Схема установки, предложенной Норманом.

числения S автор работы [10] применяет следующие известные соотношения

$$Q = (P - P_1)U = PS, \quad (8)$$

где P и P_1 — давления газа в камерах 2 и 6 соответственно;
 U — пропускная способность отверстия в пластине 5.
 Из соотношения (8) получено

$$S = \left(1 - \frac{P_1}{P}\right)U. \quad (9)$$

Отсюда видно, что для вычисления S необходимо знать пропускную способность отверстия U и отношение давлений P_1/P . Значение U было вычислено по известным уравнениям кинетической теории с поправочным множителем, учитывающим размеры трубы, в которой расположена пластина с отверстием. Для измерения P_1/P две манометрические лампы 1 и 7 с одинаковыми чувствительностями были присоединены к камерам 2 и 6. Многократные измерения с разными лампами при разных давлениях позволили вычислить значение P_1/P с погрешностью порядка 1%. Таким образом была определена быстрота откачки, которая для воздуха при комнатной температуре оказалась равной

$$S = 0,189 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Подстановка известных значений Q и S в уравнение [7] дает разность давлений

$$\Delta P = P - P' = \frac{Q}{S}. \quad (10)$$

По-видимому, не имея возможности предложить какой-либо абсолютный метод определения предельного давления P' , автор работы [10] ограничивается воспроизведением на установке только разностей давлений ΔP .

Результаты сличения установки Норманда с компрессионным манометром показаны на рис. 3. По оси абсцисс отложены в логарифмическом масштабе вычисленные по правой части уравнения (10) разности давлений ΔP , по оси ординат — соответствующие разности показаний компрессионного манометра

$$\Delta P_{\kappa} = P_{\kappa} - P'_{\kappa}. \quad (11)$$

Автор работы [10] не указывает, каким образом и с какой точностью удавалось измерять компрессионным манометром давления P'_{κ} со значениями порядка $2 \cdot 10^{-5}$ н/м². Возможно, для этой цели были применены градуированные позизационные манометры. Впрочем, точное измерение предельных давлений P' имеет существенное значение только при давлениях P ниже 10^{-3} н/м², так как при более высоких давлениях указанные значения пренебрежимо малы по сравнению с P .

Из рис. 3 видно почти полное совпадение показаний сличаемых приборов в пределах $10^{-3} \div 10^{-1}$ н/м². В области давлений выше 10^{-1} н/м² наблюдается возрастающее расхождение вычисленных значений ΔP с показаниями ΔP_{κ} компрессионного манометра, причем последние оказываются меньше вычисленных. Это вполне понятно, так как при давлениях порядка 10^{-1} н/м² длина свободного пробега молекул газа становится сравнимой с диаметром отверстия, происходит переход от молекулярного течения газа к молекулярно-вязкостному, и пропускная способность отверстия возрастает по сравнению с вычисленной для молекулярного течения. В результате значения ΔP , вычисленные по уравнению (10),

оказываются преувеличенными по сравнению с фактическими значениями ΔP_k , измеряемыми компрессионным манометром. Расхождение показаний сличаемых приборов при давлениях ниже 10^{-3} н/м² автор статьи объясняет неточностью показаний компрессионного манометра в этой области давлений.

Между компрессионным манометром и вакуумной системой установки была, как указывается в статье [10] помещена ловушка, охлаждаемая жидким азотом. Откачивающее действие паров ртути, устремляющихся из компрессионного манометра к ловушке, должно было приводить к некоторому понижению (на 10–20%) показаний компрессионного манометра ΔP_k по сравнению с вычисленными значениями ΔP [1–4]. Тем не менее, это из рис. 3 совсем не видно. Остается неясным, как удалось исключить указанную ошибку.

Невозможность точного измерения значения P' привела к тому, что при выполненных на установке поверках различных ионизационных манометров объектом изучения служит так называемый «коэффициент градуировки манометра» f :

$$f = \frac{\Delta P}{\Delta P_k} \quad (12)$$

Здесь ΔP определяется правой частью уравнения (10), а ΔP_k представляет собой разность показаний поверяемого манометра

$$\Delta P_k = g - g' \quad (13)$$

Приведенные в работе многочисленные кривые показывают отклонения коэффициента f от единицы для разных манометрических ламп в разных условиях эксплуатации, в течение срока службы и т. п.

Оба рассмотренные варианта [9 и 10] не учитывают существования других источников натекания и средств откачки, кроме натекателя, дающего точно отрегулированный и измеряемый поток Q , и насоса, обеспечивающего строго определенную быстроту откачки S камеры, к которой присоединены градуируемые или поверяемые манометрические лампы. Адсорбция и десорбция газа стенками, откачивающее действие и газовыделение ионизационных манометрических ламп предполагаются пренебрежимо малыми по сравнению с соответствующими характеристиками указанных источника натекания и метода откачки. В результате рассмотренные варианты установок оказываются пригодными для практического применения приблизительно в тех же пределах, что и компрессионные манометры (10^{-1} – 10^{-3} н/м²).

Метод определения отношения давлений

Дальнейшее развитие метода понижения давлений позволило отказаться от измерения расхода газа, заменив его измерением сравнительно высокого давления, которое устанавливается в той части вакуумной

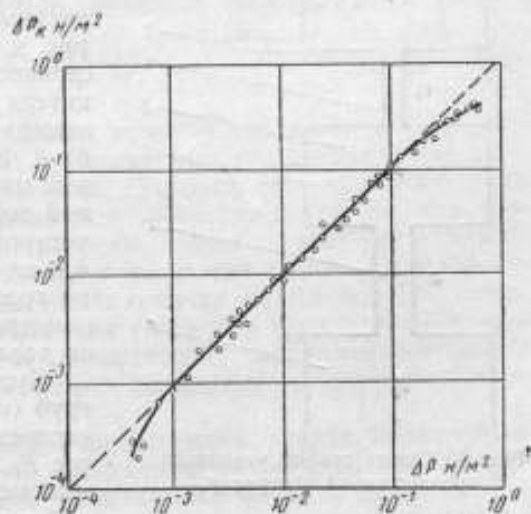


Рис. 3. Результаты сличения установки Норманда с компрессионным манометром.

системы, куда поступает поток из натекателя. В этом случае задача сводится к отысканию соотношения между указанным и более низким давлением, устанавливаемым в части вакуумной системы, сообщаемой с насосом [11]. Указанный вариант можно рассматривать как метод понижения в заданное число раз

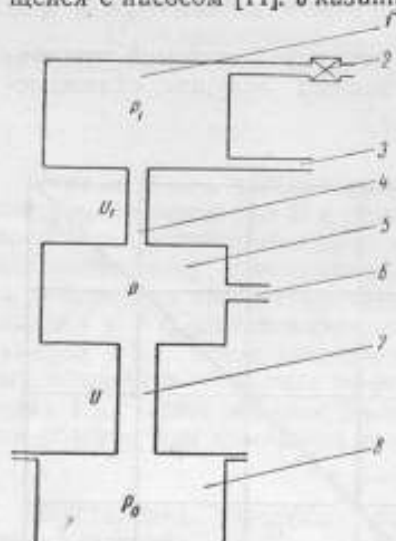


Рис. 4. Схема второй установки, предложенной Флореску.

давления, измеряемого одним из принятых способов.

Предлагаемая в работе [11] схема вакуумной установки показана на рис. 4. В камере 1 поддерживают постоянное давление при помощи натекателя 2 и насоса 8, откачивающего камеру через трубу 7, камеру 5 и трубу 4. К трубе 3 присоединен образцовый манометр, измеряющий с требуемой точностью высокое давление P_1 , установившееся в камере 1. В камере 5, к которой через трубу 6 присоединена градуируемая или поверяемая манометрическая лампа, устанавливается давление P .

Пусть пропускные способности труб (отверстий) 4 и 7 равны U_1 и U соответственно, давление у входа в насос P_0 , а быстрота откачки камеры 5 манометрической лампой, присоединенной к трубе 6, равна S' (при газовой

делении лампы S' приобретает отрицательное значение). Тогда расход газа через вакуумную систему будет

$$Q = U_1(P_1 - P) = U(P - P_0) - S'P. \quad (14)$$

Отсюда

$$\frac{P_1}{P} = \frac{U + U_1 - S'}{U_1} - \frac{U}{U_1} \cdot \frac{P_0}{P}. \quad (15)$$

При выполнении условий

$$U_1 \ll U, \quad (16)$$

$$|S'| \ll U, \quad (17)$$

$$P_0 \ll P \quad (18)$$

уравнение (15) принимает вид

$$\frac{P_1}{P} \approx \frac{U}{U_1}. \quad (19)$$

Таким образом, отношение давлений в камерах 1 и 5 пропорционально отношению пропускных способностей труб 7 и 4.

В уравнения кинетической теории для пропускных способностей входят, кроме размеров труб, молекулярный вес и абсолютная температура газа, которые в данном случае сокращаются. Поэтому отношение давлений не зависит ни от молекулярного веса, ни от температуры газа и определяется только размерами труб 4 и 7. Следовательно, если через систему проходит смесь газов, то парциальные давления каждого газа понижаются в одинаковых отношениях; состав смеси не изменится, а полное давление понизится в соответствии с соотношением (19).

Пусть чувствительность градулируемой манометрической лампы определяется уравнением

$$\frac{I_n}{I_k} = \kappa P, \quad (20)$$

где I_n — ток ионного коллектора, соответствующий давлению P ;
 I_k — ток в цепи катода лампы (поддерживается постоянным).
 Подстановка соотношения (19) в уравнение (20) дает

$$\kappa = \frac{I_n}{I_k} \cdot \frac{1}{P_1} \cdot \frac{U}{U_1}. \quad (21)$$

Условия (16) — (18) накладывают ограничения на отдельные элементы конструкции установки, на градулируемые манометрические лампы и на пределы измерения установки. Условие (16) показывает, что труба 4 должна быть гораздо меньшего диаметра и длиннее, чем труба 7; условие (17) — что манометрические лампы следует эксплуатировать при возможно меньшем значении тока катода I_k , а это, как известно, обеспечивает снижение их быстроты откачки S' ; условие (18) показывает, что нижний предел измерения установки лежит значительно выше предельного давления P_0 , и, следовательно, главным способом понижения нижнего предела может быть понижение предельного давления P_0 .

Однако это понижение связано с применением других, более производительных методов откачки, что довольно затруднительно. Поэтому в работе [11] предложен следующий специальный метод градуировки ионизационных манометров с линейными характеристиками, обеспечивающий исключение давления P_0 из уравнения измерения. Трубу 7 в установке заменяют вентилям, обладающим большой пропускной способностью U' в открытом положении и малой, точно измеренной, U — в закрытом положении:

$$U < U'. \quad (22)$$

Конструктивно такой вентиль был выполнен в виде управляемой магнитом конической стеклянной пробки с никелевым сердечником, шлифованной к соответствующему стеклянному конусу с пропускной способностью для азота $U' = 0,035 \text{ м}^3/\text{сек}$. Пробка имела по оси отверстие с $U = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек}$ (также для азота). Натекание шлифа характеризовалось пропускной способностью $10^{-6} \text{ м}^3/\text{сек}$, т. е. было пренебрежимо мало по сравнению с потоком через осевое отверстие.

Так как величина расхода Q одна и та же как при закрытом, так и при открытом положении вентиля, то

$$Q = U(P - P_0) = U'(P' - P_0). \quad (23)$$

Здесь P и P' — давления в камере 5, соответствующие закрытому и открытому положениям вентиля соответственно.

Из уравнения (23) имеем

$$C_0 = \frac{U'P' - UP}{U' - U}. \quad (24)$$

Подстановка уравнения (24) в уравнение (14), при учете условия (16), дает

$$P - P' = \frac{U' - U}{U'U} (U_1 P_1 + S'P). \quad (25)$$

Пусть чувствительность K градуируемой манометрической лампы определяется уравнением (20) для давления P , соответствующего закрытому положению вентиля, и следующим уравнением

$$\frac{I'_n}{I_n} = \kappa P' \quad (26)$$

для давления P' (при открытом положении вентиля). Подстановка уравнений (20) и (26) в (25) дает следующее выражение для чувствительности манометра.

$$\kappa = \frac{I_n - I'_n}{I_n} \cdot \frac{1}{P_1} \cdot \frac{U}{U_1} \cdot \frac{U'}{U' - U} - \frac{I_n}{I'_n} \cdot \frac{1}{P_1} \cdot \frac{S'}{U_1} \quad (27)$$

Выполнение условий (16), (17) и (22) позволяет упростить выражение (27) до следующего вида:

$$\kappa = \frac{I_n - I'_n}{I_n} \cdot \frac{1}{P_1} \cdot \frac{U}{U_1} \quad (28)$$

Сравнение выражений (28) с (21) показывает, что учет давления P_0 сводится к учету тока I'_n , соответствующего открытому положению вентиля.

Для измерения давлений P_1 в установке был применен ртутный компрессионный манометр с пределами измерения $70 \div 1,3 \cdot 10^{-1}$ н/м² и относительными погрешностями измерения давления не более 1%. Манометр был присоединен к камере 1 (рис. 4) через трубу 3 и ловушку, охлаждаемую жидким азотом.

Труба 4 представляла собой стеклянный капилляр с внутренним диаметром 0,38 мм и длиной около 100 мм. Пропускная способность ее U_1 для азота оказалась равной $6,75 \cdot 10^{-8}$ м³/сек. Зная пропускную способность также для азота трубы 7, можно вычислить отношение давлений P_1/P по уравнению (19). Описываемая установка понижала давление в 8 200 раз.

Верхний предел воспроизводимых на установке давлений P_1 ограничен значением P_1 , при котором поток газа через трубу 4 еще сохраняет молекулярный характер. Для указанных размеров трубы — это давления порядка 10 н/м² и, следовательно, верхний предел воспроизводимых давлений P был порядка 10^{-5} н/м². Нижний предел значений P является нижним пределом компрессионного манометра, при котором он еще обеспечивает требуемую точность измерения, т. е. давления порядка 10^{-1} н/м². Соответственно нижний предел воспроизводимых значений P составлял давления порядка 10^{-5} н/м². Предельное давление P_0 было порядка 10^{-6} н/м², т. е. на порядок ниже.

Точность воспроизведения единицы давления в указанных пределах измерения его определяется, как это видно из уравнений (15) и (25), точностью измерения давления P_1 , вычисления значений пропускных способностей U и U_1 , а также степенью выполнения условий (16) — (17) и (18) или (22). При градуировке ионизационных манометров точность вычисления чувствительности зависит также, как это видно из уравнений (21) и (28), от точности измерения токов I_n , I'_n и I которая, в свою очередь, связана не только с точностью применяемых измерительных приборов, но и с точностью соблюдения электрического режима манометрической лампы.

Наиболее плохо поддается проверке выполнение условия (17), так как быстрота откачки S' манометрической лампы зависит от состава

газа, непостоянна во времени и, следовательно, не может быть измерена с требуемой точностью. Поэтому в установке для градуировки манометров следует добиваться увеличения пропускной способности U и соответствующего увеличения расхода газа Q через систему до таких значений, при которых удовлетворительное выполнение неравенства (17) обеспечивалось бы независимо от возможных колебаний значения S' . Кроме того, пропускание через систему больших потоков газа гарантировало бы от не поддающихся точному учету возможных систематических ошибок, связанных с адсорбцией и десорбцией газа на стенках камер.

Именно такой путь предложен в работе [12], где описана установка, состоящая из нескольких соединенных последовательно и дифференциально откачиваемых камер. Схема установки показана на рис. 5. Газ из

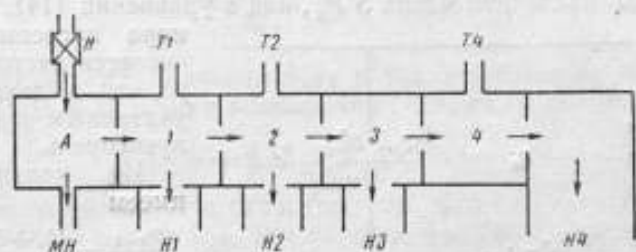


Рис. 5. Схема установки, предложенной Рёритом и Симонсом.

патекателя H поступает в камеру A , откачиваемую механическим насосом MH ; здесь происходит понижение впускного давления до нужного значения. Далее через отверстие в перегородке газ поступает в камеру 1 , к которой через трубу $T1$ присоединен образцовый компрессионный манометр. Газ из камеры откачивается через два точно измеренных отверстия: отверстие, за которым находится диффузионный паромаслянный насос $H1$ с быстротой откачки $0,340 \text{ м}^3/\text{сек}$, и отверстие в перегородке между первой и второй камерами. Камеры 2 и 3 устроены точно так же, как и первая, и откачиваются насосами $H2$ и $H3$. К камере 2 через трубу $T2$ присоединен для контроля второй компрессионный манометр. Два манометра, присоединенные к камерам 1 и 2 , позволяют измерить пропускную способность отверстия между камерами экспериментально и тем самым проверить правильность теоретических расчетов. Камера 4 , в отличие от предыдущих, откачивается более мощным диффузионным паромаслянным насосом $H4$ с быстротой действия $1,55 \text{ м}^3/\text{сек}$. Через трубу $T4$ к камере 4 присоединена градуируемая манометрическая лампа. Все камеры представляют собой отрезки трубы диаметром 254 мм . Камеры 3 и 4 можно прогревать до 250°C с помощью специальных печей. Отверстия в перегородках между соседними камерами и между камерами и насосами расположены эксцентрично относительно оси трубы. С помощью специальных пришлифованных поворотных дисков, управляемых снаружи магнитом, можно устанавливать отверстия трех разных диаметров: $4,0$; $8,7$ и $31,8 \text{ мм}$, соответствующих трем значениям пропускной способности: $(0,6, 4,2 \text{ и } 77,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек}$.

В описываемой установке понижение давления между образцовым градуируемым манометрами происходит тремя ступенями: между камерами 1 и 2 , 2 и 3 , 3 и 4 . В общем случае понижение давления в одной

ступени, т. е. между камерами $n-1$ и n может быть вычислено из уравнения потока газа, подобного уравнению (14):

$$Q = U_n(P_{n-1} - P_n) = U_{n+1}(P_n - P_{n+1}) + U_{on}(P_n - P_{on}). \quad (29)$$

Здесь P_{n-1} , P_n , P_{n+1} , P_{on} — давления в соответствующих камерах и на входе насоса, откачивающего камеру n ;

U_n , U_{n+1} , U_{on} — пропускные способности отверстий в перегородках между соседними камерами и между камерой n и откачивающим ее насосом (рис. 6).

Для камеры 4 вместо первого члена правой части уравнения (29) следовало бы учесть откачивающее действие градуируемой манометрической лампы введением члена $S'P_n$, как в уравнении (14). Однако камера насосом Н4 откачивается настолько быстро, что в данном случае указанным членом можно пренебречь.

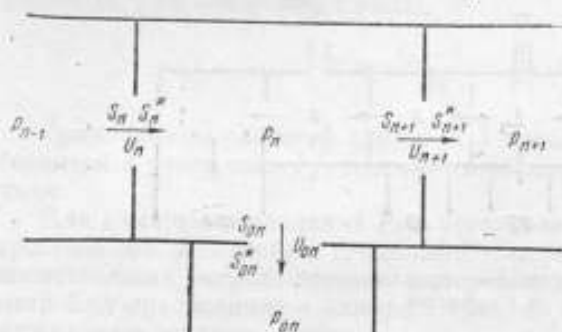


Рис. 6. Деталь схемы рис. 5.

Из уравнения (29) имеем

$$\frac{P_{n-1}}{P_n} = \frac{U_n + U_{n+1} + U_{on}}{U_n} - \frac{U_{n+1}}{U_n} \cdot \frac{P_{n+1}}{P_n} - \frac{U_{on}P_{on}}{U_nP_n}. \quad (30)$$

Отсюда видно, что если бы второй и третий члены правой части уравнения (30) были пренебрежимо малы, то отношение давлений было бы равно отношению пропускных способностей и, следовательно, не зависело бы ни от температуры и состава газа, ни от давлений в следующей камере P_{n+1} и на входе насоса P_{on} .

Постоянство расходов газа, проходящих через отверстия в перегородках, дает следующие соотношения между пропускными способностями, быстротой откачки и давлениями в соответствующих камерах:

$$S_{n+1}P_n = U_{n+1}(P_n - P_{n+1}) = S_{n+1}^*P_{n+1}; \quad (31)$$

$$S_{on}P_n = U_{on}(P_n - P_{on}) = S_{on}^*P_{on}. \quad (32)$$

Здесь S_{n+1} и S_{on} — быстроты откачки камеры n через отверстия с пропускными способностями U_{n+1} и U_{on} соответственно;

S_{n+1}^* — суммарная быстрота откачки камеры $n+1$;

S_{on}^* — быстрота действия насоса, присоединенного к камере n .

Камеру $n+1$, так же как и камеру n , откачивают через два отверстия; поэтому очевидно, что

$$S_{n+1}^* = S_{o(n+1)} + S_{n+2}. \quad (33)$$

Здесь $S_{o(n+1)}$ и S_{n+2} — скорость откачки камеры через отверстия с пропускными способностями $U_{o(n+1)}$ и U_{n+2} соответственно.

Левые части равенств (31) и (32) позволяют заменить в уравнении (29) пропускные способности U_{n+1} и U_{on} соответствующими скоростями откачки S_{n+1} и S_{on} ; тогда уравнение (30) принимает вид:

$$\frac{P_{n+1}}{P_n} = \frac{U_n + S_{n+1} + S_{on}}{U_n} \quad (34)$$

Из сравнения уравнений (34) и (30) видно, что подстановка значений быстроты откачки привела к уничтожению второго и третьего членов в уравнении (30). Значения S_{n+1} и S_{on} , входящие в уравнение (34), могут быть выражены через значения соответствующих пропускных способностей и быстроты откачки с помощью уравнений (31) и (32) следующим образом:

$$S_{n+1} = \frac{U_{n+1}}{1 + \frac{U_{n+1}}{S_{n+1}^*}}; \quad S_{on} = \frac{U_{on}}{1 + \frac{U_{on}}{S_{on}^*}} \quad (35)$$

Отсюда видно, что значения S_{n+1} и S_{on} в уравнении (34) близки к значениям U_{n+1} и U_{on} при выполнении следующих условий:

$$U_{n+1} \ll S_{n+1}^*; \quad U_{on} \ll S_{on}^* \quad (36)$$

При этом очевидно, что относительное влияние значений S_{n+1}^* и S_{on}^* на значения S_{n+1} и S_{on} тем меньше, чем более полно удовлетворяются неравенства (36). Например, из уравнения (35) видно, что при соотношении

$$U_{on} \approx 0,1 S_{on}^*$$

изменение S_{on}^* на 10% приведет к изменению S_{on} только на 1%. Следовательно, выполнение соотношений (36) обеспечивает сравнительно слабое влияние колебаний быстроты действия насосов на величины, входящие в уравнение (34).

Подбор разных значений пропускных способностей отверстий при учете необходимости выполнения требований (36) позволяет получать разные соотношения давления между камерами 1 и 4. В частности, можно подсчитать, что установление во всех камерах отверстий с пропускными способностями $U_n = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек}$ и $U_{on} = 77,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек}$ приведет к полному понижению давления в системе более чем в 10^6 раз. В другом крайнем случае, при $U_n = 77,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек}$ и $U_{on} = 0$, давление в системе будет понижаться только в 3 раза. Пределы измерения установки авторы работы [12] определяют как $10^{-4} \div 10^{-9} \text{ мм рт. ст.}$ ($\sim 10^{-2} \div 10^{-7} \text{ н/м}^2$) и считают возможным их дальнейшее расширение в сторону более низких давлений.

Систематические погрешности установки оценены как равные $\pm 10\%$, случайные — как $\pm 10\%$ и до 20% у нижнего предела измерения. Отдельная оценка погрешностей образцового компрессионного манометра и системы камер с отверстиями в работе [12] не приводится. Откачивающее действие паров ртути, связанное с движением последних от компрессионного манометра к охлаждаемой ловушке, не принято во внимание.

Установка была применена для проверки манометрических ламп ионизационных манометров, причем объектом изучения явилось отношение показаний манометра, полученных на основании ранее выполненной градуировки (по-видимому, обычным способом, по компрессионному манометру), к показаниям, полученным путем деления результатов измерения давления с помощью образцового компрессионного манометра

на соответствующее отношение давлений, следующее из уравнения (30) или (34). Удалось обнаружить ток фотоэлектронов, вызванный рентгеновским излучением анода, и расхождение более чем в 2 раза чувствительностей отдельных манометрических ламп, имеющих одинаковую градуировку.

Заключение

Ни один из описанных в литературе и рассмотренных выше методов пока еще нельзя считать окончательно исследованным, разработанным и пригодным для практического применения в широких пределах измерения. Однако тот факт, что разные исследователи в разных странах стали одновременно и независимо друг от друга заниматься такими методами, представляется весьма примечательным. С одной стороны, это говорит о том, что возникла потребность в такой градуировке и поверке манометров, которая удовлетворяла бы современным требованиям к пределам и точности измерений в этой области; с другой — что только современные средства откачки, с их большими производительностями и низким предельным давлением, могут обеспечить практическое осуществление указанных методов.

Существенным преимуществом рассмотренных методов является независимость погрешностей измерения от нижнего предела воспроизводимого давления. Этот последний ограничивается только предельно достигнутыми в установке давлениями. Применение современных способов откачки и, в частности, криогенной откачки, могло бы существенно понизить эти давления и довести нижний предел до $10^{-10} \div 10^{-11}$ н/м² ($\sim 10^{-12} \div 10^{-13}$ мм рт. ст.)

ЛИТЕРАТУРА

1. Ishii H., Nakayama K., 1961, Vacuum Symposium Transactions, v. 1, p. 519—524.
2. Meinke C., Reich G., Vakuum-Technik, 1962, v. 11, No. 3, S. 86—88.
3. Meinke C., Reich G., Vakuum-Technik, 1963, v. 12, No. 3, S. 79—82.
4. Ерюхин А. В., Учет откачивающего действия паров ртути при градуировке электроразрядных манометров по ртутному компрессионному манометру, «Измерительная техника», № 12, 1963.
5. Dushman S., Found C. G., Physical Review, 1920, v. 15, No. 2, p. 133—134.
6. Alpert D., Buritz R. S., Journal of Applied Physics, 1954, v. 25, No. 2, p. 202—210.
7. Henry R. P., Le Vide, 1956, v. 11, No. 62, p. 54—63.
8. Florescu N. A., Applied Scientific Research, 1958, B7, No. 1, p. 63—72.
9. Florescu N. A., Vacuum Symposium Transactions (V. S. T.), 1959, p. 75—81.
10. Normand C. E., Vacuum Symposium Transactions (V. S. T.), 1961, V. 1, p. 534—543.
11. Florescu N. A., Vacuum Symposium Transactions (V. S. T.), 1961, V. 1, p. 504—510.
12. Roehrig J. R., Simons J. C., Vacuum Symposium Transactions (V. S. T.), 1961, V. 1, p. 511—518.

Поступила в редакцию
22/IV 1963 г.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ РТУТНЫХ КОМПРЕССИОННЫХ МАНОМЕТРОВ У НИЖНЕГО ПРЕДЕЛА ИЗМЕРЕНИЯ

Приведен вывод уравнения измерения компрессионного манометра с учетом поправок на депрессию и на отличие формы запаянного конца измерительного капилляра от формы мениска ртути в нем. Дан анализ погрешностей ртутного компрессионного манометра, показывающий необходимость многократных отсчетов у нижнего предела измерения манометра.

В пределах измерения $10^{-1} \div 10^{-3}$ н/м² ($\sim 10^{-3} \div 10^{-5}$ мм рт. ст.) существующие ртутные компрессионные манометры дают наименее точные показания. Причины этого явления и пути их преодоления следует искать в уравнении измерения компрессионного манометра, которое, как известно, является следствием закона Бойля—Мариотта

$$PV = P_1V_1, \quad (1)$$

где P и V — измеряемое давление и начальный объем сжатия;

P_1 и V_1 — давление в измерительном капилляре после сжатия газа и конечный объем сжатия соответственно.

Давление P_1 может быть выражено через уровни и депрессии ртути в сравнительном и измерительном капиллярах (h_c , δ_c , h_n , δ_n соответственно) следующим образом:

$$P_1 = \rho g (h_c + \delta_c - h_n - \delta_n + \frac{P}{\rho g}). \quad (2)$$

Здесь ρ и g — значения плотности ртути и ускорения силы тяжести в условиях измерения;

$\rho = 13\,546,2$ кг/м³ (при температуре 20°C).

При $P \leq 1 \div 0,1$ н/м² последним членом в уравнении (2) можно пренебречь по сравнению с погрешностями отсчета уровней h_c и h_n . Если кроме этого, обозначить поправку на депрессию

$$\Delta_1 = \delta_n - \delta_c, \quad (3)$$

то уравнение (2) принимает вид:

$$P_1 = \rho g (h_c - h_n - \Delta_1). \quad (4)$$

Объем V_1 , занимаемый газом в измерительном капилляре, зависит от разности между уровнем h_0 , соответствующим вершине запаянного кон-

ца канала капилляра, и уровнем ртути h_n в этом капилляре, от площади поперечного сечения канала капилляра f и дополнительных объемов V_0 и V_n [1].

$$V_1 = (h_0 - h_n)f - V_0 + V_n. \quad (5)$$

Здесь V_0 — объем, заключенный между поверхностью запаянного конца канала капилляра и воображаемым цилиндром, основание которого проходит через верхнюю точку запаянной поверхности, а боковая поверхность является продолжением стенок канала капилляра;

V_n — объем, ограниченный плоскостью, проведенной через вершину мениска, стенками канала капилляра и поверхностью мениска ртути.

Если обозначить поправку, обусловленную разницей объемов V_0 и V_n ,

$$\Delta_2 = \frac{V_0 - V_n}{f}, \quad (6)$$

то уравнение (5) принимает вид:

$$V_1 = (h_0 - h_n - \Delta_2)f. \quad (7)$$

Подстановка уравнений (4) и (7) в уравнение (1) дает уравнение измерения компрессионного манометра для давлений $P \ll 1-0,1 \text{ н/м}^2$

$$P = K(h_c - h_n - \Delta_1)(h_0 - h_n - \Delta_2). \quad (8)$$

Здесь $K = \rho g \frac{f}{V}$ — постоянная манометра.

Поправка Δ_1 , как видно из уравнения (3), определяется значениями депрессий ртути в измерительном и сравнительном капиллярах. Исследования депрессий ртути в тонких стеклянных капиллярах, проведенные во ВНИИМ [2], показали следующее:

1) депрессии имеют случайный разброс, характеризуемый средними квадратичными отклонениями порядка $0,2-0,4 \text{ мм}$;

2) средние значения депрессии могут претерпевать небольшие (в пределах $1-2 \text{ мм}$) систематические изменения по длине капилляра, повторяющиеся при многократных измерениях;

3) разность средних значений депрессий в сравнительном и измерительном капиллярах компрессионного манометра может достигать значений порядка 1 мм .

Следовательно, поправка Δ_1 имеет как случайную, так и систематическую составляющие.

Депрессии ртути в капиллярах манометра, необходимые для вычисления поправки Δ_1 , могут быть измерены путем многократных сравнений уровней ртути в капиллярах (рис. 1) с уровнем ртути в параллельной капиллярам трубке.

Если уровень ртути и депрессия в широкой трубке равны H и δ соответственно, то уровень и депрессия в сообщающемся с ней сравнительном капилляре будет

$$h_c + \delta_c = H + \delta, \quad (9)$$

откуда

$$\delta_c = H - h_c + \delta. \quad (10)$$

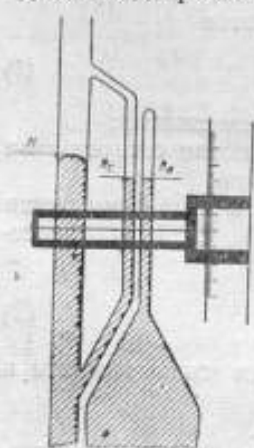


Рис. 1. Измерение депрессии ртути в капиллярах компрессионного манометра.

Депрессию в измерительном капилляре можно вычислить из уравнения (8), принимая во внимание условия (3) и (9).

$$z_n = H - h_n + \delta + \frac{P}{K(h_0 - h_n - \Delta_2)}. \quad (11)$$

Последний член в этом уравнении окажется не больше средней квадратичной погрешности отсчета уровня ртути при выполнении условий:

$$\left. \begin{aligned} P &\leq 10^{-5} \text{ н/м}^2; K \geq 20 \text{ н/м}^4; \\ (h_0 - h_n - \Delta_2) &\geq 10^{-2} \text{ м} \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Таким образом, для вычисления депрессии в измерительном капилляре манометр следует откачать до возможно более высокого вакуума. Выполнение условий (12) позволяет считать

$$z_n = H - h_n + \delta. \quad (13)$$

Депрессия ртути δ в широкой трубке при внутреннем диаметре последней порядка $10 \div 15$ мм имеет значение не более $0,3 \div 0,1$ мм. Кроме того, из уравнений (10) и (13) видно, что для вычисления Δ_1 по формуле (3) знания δ не требуется.

Предлагаемый метод определения поправки Δ_1 применим только в том случае, если имеется уверенность, что депрессия не зависит от давления в измерительном капилляре.

В связи с этим были поставлены специальные исследования [2], которые показали независимость депрессии от давления в широких пределах изменения давления ($10^{-4} \div 10^4$ н/м²).

Необходимость измерения депрессий исключает преимущества, которые дает применение в компрессионном манометре сравнительного капилляра. Действительно, при этом приходится отдельно измерять депрессию в сравнительном и измерительном капиллярах, после чего их разность учитывать в уравнении (8). Проще отказаться от применения сравнительного капилляра и измерять уровни ртути только в измерительном капилляре и широкой трубке. Соответствующее уравнение измерения получается из уравнения (8) подстановкой в него уравнения (9)

$$P = K(H - h - \Delta'_1)(h_0 - h - \Delta_2), \quad (14)$$

где

$$\Delta'_1 = z_n - \delta \quad (15)$$

и может быть вычислено из уравнения (13) при выполнении условий (12). (Здесь и в дальнейшем индекс «н» у h опущен).

Таким образом, для измерений у нижнего предела следует применять компрессионные манометры без сравнительного капилляра. Подобная конструкция, возвращающая манометр Мак-Леода к его первоначальному виду, была предложена в 1941 г. для измерения малых объемов газов [3] и в дальнейшем была несколько усовершенствована [4].

Определение поправки Δ'_1 путем многократных измерений при выполнении условий (12) позволяет оценить как систематическую, так и случайную ее составляющую. Для определения этой поправки был предложен также графический метод [3], позволяющий получать значения Δ'_1 при любых измеряемых давлениях в манометре. Сущность метода сводится к следующему. Из уравнения (14) следует, что

$$(H - h) = \frac{P}{K} \frac{1}{(h_0 - h - \Delta_2)} + \Delta'_1. \quad (16)$$

Отсюда видно, что при $P = \text{Const}$ зависимость

$$(H - h) = f\left(\frac{1}{h_0 - h - \Delta_2}\right) \quad (17)$$

должна представлять собой прямую линию с тангенсом угла наклона, равным P/K , отсекающую на оси ординат отрезок, равный Δ'_1 . Таким образом, путем многократных измерений уровней H и h при некотором выбранном давлении P (или нескольких значениях P) и построения соответствующих графиков, казалось бы, можно получить некоторое среднее значение Δ'_1 . Однако опыт измерений, выполненных во ВНИИМ, а также приведенных в работе [4], показывает, что Δ'_1 , как правило, претерпевает некоторые систематические изменения по длине капилляра. Поэтому подстановка в уравнение измерения (16) среднего значения Δ'_1 , не зависящего от уровня ртути h , приведет к систематическим ошибкам в вычисляемом значении P . Кроме того, этот метод обладает весьма низкой точностью и не позволяет оценить случайную составляющую поправки Δ'_1 . Поэтому поправку Δ'_1 следует определять указанным выше способом.

Для определения поправки Δ_2 также применяют графический способ [5, 6], подобный изложенному выше:

$$(h_0 - h) = \frac{P}{K} \frac{1}{(H - h - \Delta'_1)} + \Delta_2 \quad (18)$$

Отсюда видно, что зависимость

$$(h_0 - h) = f\left(\frac{1}{H - h - \Delta'_1}\right) \quad (19)$$

представляет собой прямую линию с тангенсом угла наклона P/K , отсекающую на оси ординат отрезок, равный Δ_2 . Однако этот метод, как и первый, при практическом применении оказывается неточным, так как разные возможные варианты проведения прямой через экспериментальные точки дают значения Δ_2 , отличающиеся одно от другого на $1 \div 2$ мм и, следовательно, не решающие поставленной задачи, так как сама поправка Δ_2 обычно не превышает 1 мм.

Определение поправки Δ_2 методом ступенчатого подъема ртути при некотором постоянном значении давления и обработка результатов измерений по способу наименьших квадратов подробно рассмотрены в работе [1], и поэтому здесь не приводятся.

Более подробно следует рассмотреть две независимые группы погрешностей компрессионного манометра:

1) неисключенные остатки систематических погрешностей σ_1 , сохраняющие постоянные значения при многократных измерениях данного давления одним компрессионным манометром, но изменяющиеся по законам изменения случайных величин для разных однотипных манометров;

2) случайные погрешности σ_2 , меняющие свои значения по законам изменения случайных величин при многократных измерениях данного давления одним манометром.

Первая группа связана с погрешностями вычисления постоянной манометра K и поправкой Δ_2 . Отсчеты уровней ртути h_c и h_n можно считать содержащими в себе только случайные погрешности, обусловленные неточностью отсчета, так как систематические погрешности отсчетной шкалы в данном случае пренебрежимо малы. Погрешности, обусловленные перекосом отсчетного устройства относительно капилляров манометра и наклоном капилляров относительно вертикали [7], легко могут быть устранены соответствующими мероприятиями, и поэ-

тому их можно не принимать во внимание при теоретическом рассмотрении.

Погрешности постоянной K требуют специального рассмотрения. Ее вычисляют при изготовлении манометра по результатам измерений площади поперечного сечения капилляра f и начального объема сжатия V . Среднее значение f для капилляров диаметром $0,5 \div 1,0$ мм и длиной $100 \div 150$ мм может быть измерено весовым методом со средними квадратичными погрешностями не более $0,05 \div 0,10\%$. Объем V также может быть измерен весовым методом с еще меньшими погрешностями. Таким образом, постоянную K можно вычислить с точностью, характеризующейся относительной средней квадратичной погрешностью $S_{K0} \approx 0,1\%$. Однако при измерениях по способу квадратичной шкалы длина участка $(h_0 - h_n)$, определяющая собой конечный объем сжатия (7), уменьшается с понижением измеряемого давления, доходя до $5 \div 10$ мм на нижнем пределе измерения. Среднее значение f для такого короткого участка капилляра может существенно отличаться от среднего f , измеренного весовым методом для всего капилляра. Следовательно, может иметь место систематическое изменение значения K с изменением измеряемого давления, особенно заметное у нижнего предела манометра. Изменение сечения f может быть значительно уменьшено путем применения шлифованных капилляров [8]. Оказалось возможным изготовить такие капилляры с диаметром канала порядка $0,5 \div 1,0$ мм, у которых среднее квадратичное отклонение диаметра по длине капилляра составляет 1 мкм; следовательно, даже в худшем случае окажется, что $S_{K0} \leq 0,2 - 0,4\%$.

Уравнение (14) позволяет вычислить среднюю квадратичную погрешность σ_1

$$\sigma_1 = \sqrt{(H - h - \Delta'_1)^2 (h_0 - h - \Delta_2)^2 S_K^2 + K^2 (H - h - \Delta'_1)^2 S_2^2}. \quad (20)$$

Здесь S_K и S_2 — средние квадратичные погрешности вычисления K и Δ_2 соответственно.

Из уравнения (8) следует уравнение, аналогичное (20). Если перейти к относительным погрешностям, то уравнение (20) переходит в

$$\sigma_{10} = \sqrt{\left(\frac{S_K}{K}\right)^2 + \left(\frac{S_2}{h_0 - h - \Delta_2}\right)^2}. \quad (21)$$

Значение средней квадратичной погрешности σ_2 определяется случайными погрешностями отсчета уровней H и h (в случае уравнения (8) — уровней h_c и h_n) и случайным разбросом значения поправки Δ'_1 (или Δ_1), обусловленным, в свою очередь, случайным разбросом депрессии в капиллярах. Средние квадратичные погрешности отсчета S_0 составляют $0,10 \div 0,05$ мм при применении нониусного отсчетного устройства и $0,01 \div 0,05$ мм при пользовании катетометром. Случайный разброс депрессии в тонких стеклянных капиллярах, как указывалось выше, характеризуется средним квадратичным отклонением $S_1 = 0,2 \div 0,4$ мм. При этом, как видно из уравнения (3), поправка Δ_1 имеет среднее квадратичное отклонение $S_1 = \sqrt{2} S_1$, а поправка Δ'_1 , согласно уравнению (15), имеет $S_1 = S_1$, так как в последнем случае разбросом депрессии в широкой трубке по сравнению с разбросом в капилляре можно пренебречь.

С помощью уравнения (14) можно вычислить среднюю квадратичную погрешность σ_2

$$\sigma_2 = K \sqrt{[(h_0 - h - \Delta_2)^2 + [(H - h - \Delta'_1) + (h_0 - h - \Delta_2)]^2] S_0^2 + (h_0 - h - \Delta_2)^2 S_1^2}. \quad (22)$$

Аналогичное выражение следует из уравнения (8) для манометра обычной конструкции. При переходе к относительным погрешностям уравнение (22) принимает вид

$$\sigma_{20} = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{H-h-\Delta'_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{H-h-\Delta'_1} + \frac{1}{h_0-h-\Delta_2} \right)^2 \right] S_0^2 + \left(\frac{1}{H-h-\Delta'_1} \right)^2 S_1^2} \quad (23)$$

Уравнения (21) и (23) позволяют оценить значения погрешностей σ_{10} и σ_{20} , наблюдающихся при измерениях давлений компрессионными манометрами.

Погрешности, характеризуемые величиной σ_{10} , будут иметь для нескольких однотипных манометров разные значения, подчиняющиеся законам измерения случайных величин. Следовательно, средние значения показаний однотипных манометров при измерении ими одного давления не должны отличаться одно от другого более, чем на несколько значений σ_{10} .

Погрешности, характеризуемые величиной σ_{20} , имеют разные значения при многократных измерениях давления одним манометром. Увеличение числа измерений, естественно, приводит к снижению влияния случайных погрешностей на результат измерения и, следовательно, к повышению точности.

Величины σ_{10} и σ_{20} определяют суммарную относительную среднюю квадратичную погрешность прибора σ_0 .

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{10}^2 + \frac{\sigma_{20}^2}{n}} \quad (24)$$

где n — число измерений.

Если

$$\sigma_{20} \leq \sigma_{10} \quad (25)$$

то для повышения точности измерений необходимо уменьшить погрешность σ_{10} , т. е. повысить точность измерения постоянной манометра, более полно исключить систематические погрешности и т. п. В этом случае увеличение числа измерений не может привести к существенному повышению точности, так как значение σ_{10} остается при этом неизменным.

Если

$$\sigma_{20} > \sigma_{10} \quad (26)$$

то простым способом повышения точности являются многократные измерения. Очевидно, разумным пределом для числа измерений является условие

$$\frac{\sigma_{20}^2}{n} \approx \sigma_{10}^2 \quad \text{или} \quad n \approx \left(\frac{\sigma_{20}}{\sigma_{10}} \right)^2 \quad (27)$$

При значениях измеряемого давления, лежащих между нижним и верхним пределами измерения манометра, можно делать отсчеты уровней ртути при разных соотношениях между значениями $(H-h-\Delta'_1)$ и $(h_0-h-\Delta_2)$. Очевидно, что при этом будут изменяться как систематические, так и случайные погрешности измерения. Если известны значения S_K , S_1 , S_2 и S_0 , то по уравнениям (21) и (23) можно вычислить значения средних квадратичных погрешностей σ_{10} и σ_{20} для разных значений $(H-h-\Delta'_1)$, $(h_0-h-\Delta_2)$ и P и проследить изменение этих погрешностей в пределах измерения манометра.

На рис. 2 представлена вычисленная по указанным уравнениям зависимость σ_{10} и σ_{20} от разности $(h_0 - h - \Delta_2)$ для манометра № 6/62 [1]. Кривая 7 дает значения средней квадратичной погрешности σ_{10} . В соответствии с указанным выше при вычислениях было принято, что S_{ko} изменяется по линейному закону. Таким образом, как видно из уравнения (21), погрешность σ_{10} зависит только от одной разности $(h_0 - h - \Delta_2)$ и, следовательно, при любых значениях измеряемого давления σ_{10} лежит на кривой 7 в точке, соответствующей значению этой разности.

Средняя квадратичная погрешность σ_{20} , как видно из уравнения (23), зависит не только от $(h_0 - h - \Delta_2)$, но и от $(H - h - \Delta'_1)$. А так как при постоянном давлении обе эти разности связаны между собой зависимостью (14), то каждому значению измеряемого давления будет соответствовать своя кривая зависимости $\sigma_{20} = f(h_0 - h - \Delta_2)$. На рис. 2 это кривые 1-6. В данном случае с уменьшением величины $(h_0 - h - \Delta_2)$ значение σ_{20} уменьшается, т. е. имеет место зависимость, обратная только что рассмотренной. Это вызвано тем, что в уравнении (23) $S_1 \gg S_0$, и поэтому главную роль играет член с величиной $(H - h - \Delta'_1)$, которая, как видно из зависимости (14), обратно пропорциональна $(h_0 - h - \Delta_2)$. Кривые показывают также, что с понижением измеряемого давления случайные погрешности резко возрастают. Аналогичные кривые были построены и для манометра № 6/35 [1]. Рассмотрение рис. 2 позволяет сделать определенные выводы о числе необходимых измерений при разных значениях измеряемого давления P .

1. У верхнего предела манометра ($P > 5 \cdot 10^{-2}$ н/м²) погрешности σ_{10} и σ_{20} невелики, и на рис. 2 можно выбрать такую область значений $(h_0 - h - \Delta_2)$, в которой выполняется условие (25). В этом случае вполне достаточны однократные измерения; суммарная средняя квадратичная погрешность таких измерений σ_0 , согласно условию (24) не будет превышать 1%.

2. При более низких давлениях ($P = 5 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$ н/м²) область, где выполняется условие (25), перемещается в сторону малых значений $(h_0 - h - \Delta_2)$, при этом значения σ_{10} и σ_{20} возрастают; соответственно увеличивается и σ_0 . Повышение точности может быть достигнуто путем многократных измерений в области больших значений $(h_0 - h - \Delta_2)$, где справедливо условие (26).

3. У нижнего предела манометра ($P < 5 \cdot 10^{-3}$ н/м²) условие (25) вообще не может быть выполнено; главную роль в значении σ_0 играют случайные погрешности, и для повышения точности необходимы многократные измерения.

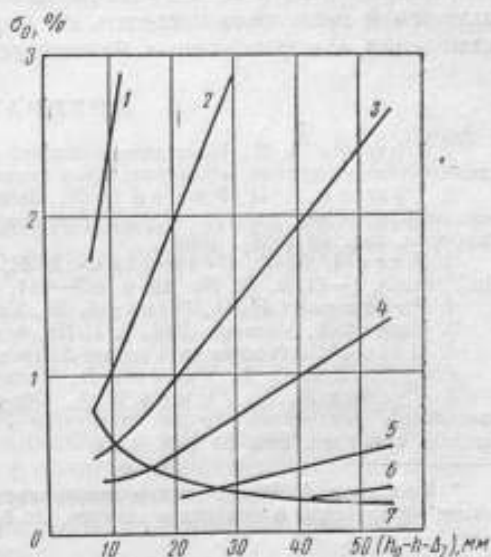


Рис. 2. Зависимость от разности $(h_0 - h - \Delta_2)$ средних квадратичных погрешностей σ_{10} и σ_{20} для манометра № 6/62.

Погрешность σ_{20} — для давлений P (н/м²)
 равных: $2 \cdot 10^{-3}$ (1); $5 \cdot 10^{-3}$ (2); $1 \cdot 10^{-2}$ (3);
 $2 \cdot 10^{-2}$ (4); $5 \cdot 10^{-2}$ (5); $1 \cdot 10^{-1}$ (6) и погрешность σ_{10} — для всех измеряемых давлений (7).

Таким образом, чем ниже измеряемое давление, тем более необходимы многократные измерения для повышения точности компрессионного манометра.

Метод многократных отсчетов при ступенчатом подъеме ртути в измерительном капилляре * был применен в образцовых однокапиллярных компрессионных манометрах ВНИИМ им. Д. И. Менделеева [1].

Применение его в сочетании с рассмотренными способами вычисления поправок Δ_1 и Δ_2 и предложенным методом обработки результатов измерений позволило повысить на порядок точность нижнего предела измерения компрессионных манометров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерюхин А. В., Измерение давлений ниже 10^{-3} мм рт. ст. ртутными компрессионными манометрами, «Измерительная техника», № 6, 1962.
2. Ерюхин А. В., Рыжов В. А., Депрессия ртути в капиллярах компрессионных манометров, Труды институтов Госкомитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 66 (126), 1962.
3. Keevil N. B., Errington R. F., Newman L. T., Review of Scientific Instruments, 1-41, v. 12, No. 12, p. 609-611.
4. Podgurski H. H., Davis F. N., Vacuum, 1960, v. 10, No. 5, p. 377-381.
5. Engel A., Vacuum, 1951, v. 1, No. 4, p. 257-265.
6. Goto M., Advances in Vacuum Science and Technology, 1959, v. 1, p. 266-270.
7. Jansen C. G. J., Venema A., Vacuum, 1959, v. 9, No. 3-4, p. 219-230.
8. Гудяев М. А., Рыжов В. А., Обработка капилляров для образцовых компрессионных манометров, Труды институтов Госкомитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 50 (10), 1961.

* Ерюхин А. В., Авторское свидетельство № 153588, опубликованное в «Бюллетене изобретений и товарных знаков», № 6, 1963.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВОГО
АБСОЛЮТНОГО МЕМБРАННО-ЕМКОСТНОГО МАНОМЕТРА**

Приведены результаты как экспериментального определения постоянной мембранно-емкостного манометра (МЕМ), так и сличения его с абсолютными манометрами других типов. Определены погрешности МЕМ.

В настоящее время ни один из существующих типов манометров не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к образцовой аппаратуре, воспроизводящей единицу давления в области низкого и среднего вакуума. Эта аппаратура должна отвечать следующим требованиям:

- 1) постоянная или шкала прибора должна допускать расчет по результатам измерений его параметров;
- 2) показания прибора не должны зависеть от рода измеряемого газа;
- 3) откачивающее действие прибора и газовыделение им должны быть исключены;
- 4) точность прибора должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечивать градуировку и поверку рабочих приборов.

Между тем, чтобы обеспечить единство измерения низких абсолютных давлений все рабочие приборы следует проградуировать по образцовой аппаратуре. Поэтому возникла необходимость создать прибор, удовлетворяющий всем указанным выше требованиям. В результате исследований во ВНИИМ разработана конструкция мембранно-емкостного манометра с электрической компенсацией (МЕМ).

Теоретически постоянная манометра МЕМ была определена расчетным путем* по уравнению измерения. Для проверки вывода о пригодности МЕМ для абсолютных измерений постоянная манометра может быть найдена экспериментально по результатам сравнительных измерений с абсолютными манометрами других типов.

Ниже приводятся результаты исследований МЕМ путем сличения его показаний с набором образцовых компрессионных манометров ВНИИМ и с образцовым микроманометром ММ 0,2/10-2 в диапазоне $26,6 \div 0,1$ н/м² ($0,2 \div 0,001$ мм рт. ст.), разделенном на три интервала. Результаты сличений выполнены отдельно для каждой серии измерений, так как только в этом случае абсолютные погрешности можно считать одинаковыми и, следовательно, измерения можно признать равноточными.

* Рыжов В. А. Образцовый мембранно-емкостный манометр, «Приборы и техника эксперимента», № 5, 1963.

Результаты сличений обработаны по способу наименьших квадратов. Зависимость между показаниями компрессионных манометров и манометра МЕМ можно представить в следующем виде

$$P_j = KU_j^2 + \alpha_j, \quad (1)$$

где P — показание компрессионного манометра;
 j — порядковый номер сличения;
 K — постоянная манометра МЕМ;
 U — напряжение компенсации;
 α — случайная погрешность измерения.

Тогда

$$K \approx \frac{\sum_1^n P_j U_j^2}{\sum_1^n U_j^4} \quad (2)$$

и дисперсия $D(K)$

$$D(K) = \frac{\sum_1^n (KU_j^2 - P_j)^2}{(n-1) \sum_1^n U_j^4}.$$

Здесь n — число измерений.

В табл. 1 приведены значения K , ее дисперсии $D(K)$, а также среднего квадратичного отклонения $\sigma(K)$, полученные по результатам трех серий измерений.

Таблица 1

Параметры	Значения параметров при P н/м ² (мм рт. ст.)		
	0,11 (14,6)	0,02 (2,66)	0,002 (0,266)
$K \cdot 10^6$	1,799	1,784	1,768
$D(K) \cdot 10^{10}$	0,066	0,120	1,500
$\sigma(K) \cdot 10^6$	2,5	3,5	12

Далее, если положить

$$\sigma_0^2 = m_j \sigma_j^2 = 1, \quad (3)$$

где m — весовой коэффициент, то среднее взвешенное значение K будет

$$K_0 = \frac{m_1 K_1 + m_2 K_2 + m_3 K_3}{m_1 + m_2 + m_3}. \quad (4)$$

и дисперсия K_0 равна

$$D(K_0) = \frac{m_1^2 \sigma_1^2 + m_2^2 \sigma_2^2 + m_3^2 \sigma_3^2}{(m_1 + m_2 + m_3)^2}. \quad (5)$$

Подставляя значения m из уравнения (3) и K из табл. 1 в уравнения (4) и (5) получим:

$$K_0 = 2,381 \cdot 10^{-1} \text{ н/м}^2 \sigma^2 (1,790 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст./}\sigma^2) \quad (6)$$

$$D(K_0) = 8,8 \text{ н}^2/\text{м}^4 \sigma^4 (5 \cdot 10^{-8} \text{ мм рт. ст./}\sigma^4). \quad (7)$$

Случайные погрешности α_j условных уравнений вида (1) складываются из двух составляющих: погрешности компрессионного манометра β_j и погрешности МЕМ γ_j , т. е.

$$\alpha_j = \beta_j + \gamma_j, \quad (8)$$

откуда

$$D(\alpha) = D(\beta) + D(\gamma). \quad (9)$$

Следовательно, оценка $D(\gamma)$ может быть получена, если известно $D(\beta)$. Исследование компрессионного манометра дало значение $D(\beta)$, являющееся функцией измеряемого давления. В табл. 2 приведены значения $D(\alpha)$, $D(\beta)$ и $D(\gamma)$ для различных давлений.

Таблица 2

Дисперсия	Значения D при P н/м ² (мм рт. ст.)		
	0,11 (14,5)	0,02 (2,66)	0,002 (0,266)
$D(\alpha)$	$22,2 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$39 \cdot 10^{-10}$
$D(\beta)$	$16 \cdot 10^{-6}$	$1,96 \cdot 10^{-8}$	$31 \cdot 10^{-10}$
$D(\gamma)$	$6,2 \cdot 10^{-8}$	$1,34 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-10}$
$\sqrt{D(\gamma)}$ %	0,2	0,6	1,5

Далее значение дисперсии измерения давления МЕМ, обусловленной случайными погрешностями измерения U_j , а также дисперсией найденного значения K_0 может быть определено по уравнению измерения (1)

$$D(P) = U^2 D(K_0) + K_0^2 D(U^2). \quad (10)$$

Если принять, что относительное среднее квадратичное отклонение δ прибора класса i , по которому измеряют компенсирующее напряжение, равно

$$\delta \leq \frac{i}{2} \cdot 10^{-2}, \quad (11)$$

то

$$\frac{D(P)}{P^2} = \frac{D(K_0)}{K_0^2} + 4 \left(\frac{i}{2} \right)^2 \cdot 10^{-4}. \quad (12)$$

Принимая во внимание значения K_0 и $D(K_0)$ для вольтметра класса 0,2, получим относительную среднюю квадратичную погрешность измерения давления

$$\frac{\sigma(P)}{P} \approx 0,2 \%.$$

Цель и методика измерений при сличениях МЕМ с образцовым микроманометром типа ММ 0,2/10-2 были те же, что и при сличениях МЕМ с компрессионными манометрами.

В табл. 3 приведены значения K и $D(K)$, K_0 и $D(K_0)$, найденные при сличении однотипных приборов в газомерной лаборатории ВНИИМ. Это позволило найти оценку дисперсии, обусловленной случайными погрешностями МЕМ.

Таблица 3

Параметры	Значения параметров при P н/м ² (мм рт. ст.)		
	0,036 (4,65)	0,07 (9,31)	0,1 (13,3)
$K \cdot 10^6$	1,786	1,788	1,792
$D(K) \cdot 10^{16}$	0,05	0,03	0,02
$K_0 \cdot 10^5$		1,789	
$D(K_0) \cdot 10^{15}$		0,01	

Относительная средняя квадратичная погрешность MEM $\sqrt{D \gamma}$ при давлениях 0,1 (13,3), 0,07 (9,31), 0,036 (4,65) н/м² (мм рт. ст.) равна 0,55%.

Значения K_0 , полученные расчетным путем и при сличениях с указанными выше абсолютными манометрами, оказались весьма близкими и расхождение их не превышает 0,1%. Это обстоятельство позволяет утверждать, что значение K_0 не содержит систематических погрешностей.

Выводы

1. Постоянную мембранно-емкостного манометра можно определять расчетным путем.
2. Манометр MEM не требует градуировки по другому абсолютному манометру.
3. Относительная средняя квадратичная погрешность измерения давления составляет 0,5%.

Поступила в редакцию
1/1 1965 г.

ЗАПИСЫВАЮЩИЙ ОДНОТОЧЕЧНЫЙ ВАКУУММЕТР НА ДАВЛЕНИЯ $2,6 \cdot 10^2 - 10^5 \text{ н/м}^2$ ($2 - 760 \text{ мм рт.ст.}$)

Описана схема одноточечного записывающего вакуумметра, позволяющего регистрировать давления в диапазоне $10^2 - 10^5 \text{ н/м}^2$. Приводятся первые результаты эксплуатационных испытаний прибора в диапазоне $2,6 \cdot 10^2 - 10^5 \text{ н/м}^2$.

В настоящее время решение многих научных и технических задач требует проведения автоматических непрерывных и дистанционных измерений давления в области $10^2 - 10^5 \text{ н/м}^2$ ($760 \div 1 \text{ мм рт. ст.}$).

Анализ характеристик моделей вакуумметров, основанных на различных принципах [1—6], приводит к выводу, что наиболее просто задача создания записывающего одноточечного вакуумметра на давления $2,6 \cdot 10^2 - 10^5 \text{ н/м}^2$ ($2 - 760 \text{ мм рт. ст.}$) может быть решена, если применить стандартные манометрические преобразователи типа ЛТ-2 с платиновой или вольфрамовой нитью накала, работающие в едином конвективно-кондуктивном режиме (в дальнейшем мы будем обозначать эти преобразователи ЛТ-2К).

Вакуумметры с преобразователями ЛТ-2К обеспечивают техническую точность измерений ($15 - 20\%$), их можно изготавливать из стандартных блоков и деталей, выпускаемых промышленностью, и в короткие сроки наладить производство их.

Созданный СЭПИ и исследованный во ВНИИМ одноточечный записывающий вакуумметр теплорезистивного типа на один диапазон давлений основан на использовании серийно выпускаемого промышленностью преобразователя ЛТ-2 и условно обозначен индексом ВТЗ-1-1. Его преобразователь работает в конвективно-кондуктивном режиме при средних температурах нити накала (до $600 - 700^\circ\text{C}$).

Регистрирующей частью вакуумметра являются стандартные самописцы типа ЭПП или ПС, к которым подключают хромель-копелевую термопару преобразователя ЛТ-2К. Прибор ВТЗ-1-1 предназначен для измерения давлений, меняющихся не очень быстро, поскольку постоянная времени составляет $1 - 10 \text{ сек.}$ Для быстро меняющихся давлений разработана модель типа ВТПТ-1, в которой преобразователь ЛТ-2К работает в режиме неизменной температуры нити накала при автоматическом изменении тока накала, допускающем его запись на стандартных записывающих устройствах.

Принципиальная схема вакуумметра ВТЗ-1-1 показана на рис. 1. Манометрический преобразователь I по цепи накала последовательно

соединен с амперметром 2 типа АСТ класса 0,5 с балластным сопротивлением 3. Рабочий ток накала для диапазона $2,6 \cdot 10^2 - 10^5$ н/м² ($2 - 760$ мм рт. ст.) в $0,7 - 0,8$ а устанавливают делителем напряжения 4. Питается цепь накала от сети переменного тока с частотой 50 гц, напряжением 127 или 220 в, через стандартный стабилизатор напряжения 5 типа СТ-600. От этой же сети питается самописец 6 типа ПСР 1-01 с встроенным нормально закрытым контактом, расположенным в цепи накала датчика. Применение элементов схемы обусловлено следующим.

Если при измерении давления рабочий ток I отклоняется от своего номинального значения (при котором проводилась градуировка прибора), то появляются значительные погрешности.

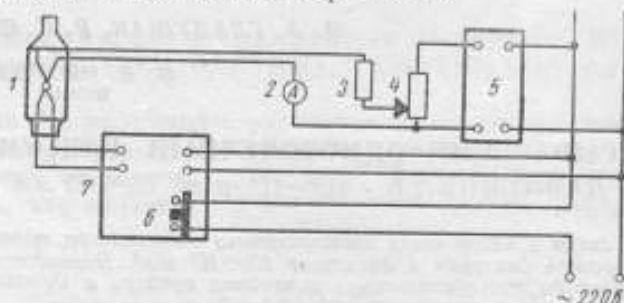


Рис. 1. Принципиальная схема вакуумметра типа ВТЗ-1-1

Систематические изменения рабочего тока I происходят при вакууммировании преобразователя 1, поскольку при этом повышается температура нити накала (т.э.д.с. термопары), а следовательно, и ее сопротивление. При неизменном напряжении питания это приводит к температурно-манометрическому дрейфу тока. Случайные же колебания значения I происходят из-за непостоянства напряжения в сети тока. Таким образом, для сведения к минимуму ошибок, обусловленных отклонением тока накала от его номинального значения, необходимо стабилизировать величину I .

Уменьшение влияния температурно-манометрического дрейфа тока обеспечивается балластным сопротивлением 3 ($R \approx 200$ ом), которое в диапазоне $2,6 \cdot 10^2 - 10^5$ н/м² ($2 - 760$ мм рт. ст.) намного больше сопротивления преобразователя 1 ($R \approx 1 - 2$ ом). В этих условиях колебания тока при вакууммировании не будут превышать 0,5%, что соответствует точности измерения его амперметром 2. Колебания сетевого напряжения устраняют питанием схемы через стабилизатор напряжения 6.

Для достижения наибольшей точности измерений необходимо максимально использовать шкалу самописца длиной 160 мм. Делителем напряжения (реостатом) 4 устанавливают такой ток накала индивидуально для каждого преобразователя ЛТ-2К, при котором индикатор самописца отклоняется вправо до конца шкалы, рассчитанной на т.э.д.с. $E = 45$ мв. При больших значениях E возможно перегорание нити накала датчика или резкое изменение его градуировочной кривой вследствие необратимого изменения свойств поверхности и материала нити из-за окисления и фазовых превращений. Для вольфрамовой нити максимально допустимой является температура $T \approx 800^\circ\text{C}$ [7], выше которой происходят окисление и фазовые превращения. Этой температуре и соответствует значение $E = 45$ мв для хромель-копелевой термопары, если учесть перепад температур между нитью накала и спаем термопары. Для платиновой нити накала $T \approx 1773^\circ\text{C}$ [8].

Очевидно, что рабочий ток накала будет различным в зависимости от того, какое минимальное давление будут измерять, каков диапазон этих давлений и каковы физические и конструктивные характеристики преобразователя ЛТ-2К. Это относится к случаям как индивидуальных, так и типовых градуировок.

Во избежание перегорания нити накала датчика или изменения его градуировки при превышении предельно допустимого вакуума, выбранного для данной схемы, когда индикатор самописца доходит до предельно допустимого значения т.э.д.с. (до конца шкалы), в цепь накала и питания самописца ставят нормально закрытый контакт 7. Если этот контакт установлен только в цепь накала, то, как показали опыты, преобразователь 1 все-таки перегорает. В этом случае электромеханическая система прибора работает в колебательном режиме на предельном вакууме и т.э.д.с., причем период колебаний превышает время тепловой инерции датчика, что выводит его из строя.

Вакуумметр ВТЗ-1-1 градуирован по образцовым манометрам (в данной работе были использованы преобразователь ЛТ-2К, предварительно отградуированный по компрессионному манометру ВНИИМ, а также U-образный открытый ртутный манометр).

На рис. 2 приведена рабочая индивидуальная градуировочная кривая прибора. Анализ опытных данных показал, что относительная случайная погрешность прибора для диапазона давлений $P=2,6 \cdot 10^2 \div 1,3 \cdot 10^3 \text{ н/м}^2$ (2 ÷ 10 мм рт. ст.) составляет 5% от измеряемой величины P ; при $P=1,3 \cdot 10^3 \div 10^5 \text{ н/м}^2$ (10 ÷ 760 мм рт. ст.) она достигает 10%.

Если использовать метод совмещения градуировочных кривых подобный тому, который применяется для ламп ЛТ-2 в приборах типа ВТ и ВИТ (например, если устанавливать ток накала по т. э. д. с. при атмосферном давлении), то погрешности возрастают примерно втрое.

Следует обратить особое внимание на то, что приведенная на рис. 2 градуировочная кривая не является универсальной для любых преобразователей ЛТ-2К. При одинаковом токе накала эти кривые могут значительно отличаться друг от друга из-за различий в конструктивных и физических параметрах датчиков. Результаты опытов и расчетов показывают, что наиболее близкими будут кривые ламп, у которых одинаковы расстояния от спая термопары до нити накала. Максимально точные измерения на преобразователях ЛТ-2К возможны лишь при использовании индивидуальных градуировочных кривых.

Основные задачи эксплуатационных испытаний вакуумметра ВТЗ-1-1 заключались в исследовании стабильности градуировочных кривых и в проверке работоспособности его схемы. Эти испытания продолжались 12 месяцев, что соответствовало примерно 300 ч непрерывной работы датчика. Датчик работал при средних температурах накала $P=2,6 \cdot 10^2 \text{ н/м}^2$ (2 мм рт. ст.) и $T=600 \div 700^\circ\text{C}$. Это значение температуры определено расчетом и двумя независимыми экспериментальными методами.

В наиболее распространенных конструкциях теплоэлектрических вакуумметров типа ВТ и ВИТ такой температурный режим не применяет-

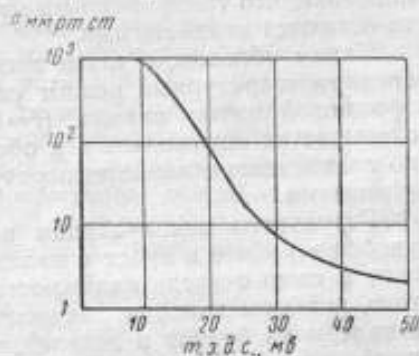


Рис. 2. Рабочая индивидуальная градуировочная кривая вакуумметра типа ВТЗ-1-1.

ся. Преобразователи ЛТ-2 этих приборов работают при низких температурах накала, не превышающих 200°C , что приводит к нестабильности показаний из-за газовой адсорбции на нити и ее загрязнения парами масла, влагой и пылью [1]. В приборе ВТЗ-1-1 нестабильность такого рода практически исключена, поскольку при средних температурах загрязняющие пленки образоваться не могут.

Однако измерения на повышенных температурах накала могут привести к нестабильности показаний по другим причинам. Например, М. Г. Дмитриевым [6] для азота и $P = 1,33 \cdot 10^4 - 10^5 \text{ н/м}^2$ ($100-760 \text{ мм рт. ст.}$), был предложен режим с токами накала $1,0-1,7 \text{ а}$. Как показали наши опыты, этот высокотемпературный режим соответствует температурам $1200-1500^{\circ}\text{C}$ нити накала и приводит к заметному изменению градуировочной кривой во времени. При высоких температурах в вольфраме происходят необратимые фазовые изменения (рекристаллизация), приводящие к изменению сопротивления нити накала [7], а из-за окисления меняются степень черноты и коэффициент аккомодации нити, что вызывает изменение условий теплообмена и всей градуировочной кривой [1]. Следует отметить, что на платиновой нити таких явлений не наблюдается.

Для стабильности показаний необходимо выбирать рабочие температуры вольфрамовой нити накала в воздухе, при которых влияние загрязнений сводится к минимуму, а окисление и фазовые превращения еще не наступают.

Повторные контрольные градуировки датчика в течение 12 месяцев показали, что градуировочные кривые в пределах точности эксперимента остаются неизменными.

Таким образом, с точки зрения стабильности показаний выбранный среднетемпературный режим работы преобразователей ЛТ-2К с вольфрамовой нитью накала ($I = 0,7-0,8 \text{ а}$, $10 < E < 45 \text{ мв}$, $300 < T < 700^{\circ}\text{C}$) оказывается оптимальным и обеспечивает большую точность измерений по сравнению с низкотемпературным [3-5] и высокотемпературным [6] режимами.

Результаты эксплуатации показали, что вакуумметр типа ВТЗ-1-1 удобен в работе и прост в наладке, а надежность его работы определяется в свою очередь надежностью самописца (ПСР или ЭПП). Кроме того, приборы такой модификации весьма перспективны, поскольку составлены из блоков и деталей, освоенных промышленностью и охватывают измерениями диапазон $1,33 \cdot 10^5 - 1,33 \cdot 10^{-1} \text{ н/м}^2$ ($10^3-10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$) при автоматической и дистанционной регистрации давлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прасолов Р. С., Массо- и теплоперенос в топочных устройствах, Изд. «Энергия», 1964.
2. Булыга А. В., Шашков А. Г., Полупроводниковый вакуумметр, «Инженерно-физический журнал», № 12, 1963, БССР.
3. Теплоэлектрический вакуумметр типа КВ 3294В фирмы «Эдвардс», «Новые измерительные приборы и методы их поверки», вып. 14, Стандартгиз, 1962.
4. McMillan, Buch., Wide-range thermal convection manometer, «Rev., Sci. Instr.», v. 28, No 11, 1957.
5. Яккель Р., Получение и измерение вакуума, ИЛ, 1952.
6. Дмитриев М. Г., О конвекционном манометре, «Приборы и техника эксперимента», № 3, 1959.
7. Смиттельс К. Д., Вольфрам, Металлургиядат, 1958.
8. Эспе В., Технология электровакуумных материалов, ГЭИ, 1962.

**ОБРАЗЦОВАЯ ГАЗОМЕРНАЯ УСТАНОВКА
НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ РАСХОДОВ
до 0,042 м³/сек (150 м³/ч)**

Приведены описание и результаты исследования образцовой газомерной установки непрерывного действия, предназначенной для расходов до 0,042 м³/сек (150 м³/ч)

Автоматизация работы колокольных газомерных установок позволяет существенно повысить верхние пределы измерения и интенсифицировать их работу [1]. За последние годы достигнуты определенные успехи в создании автоматических газомерных установок как кратковременного (с отсчетом показаний поверяемого газосчетчика «на ходу»), так и непрерывного действия. Установка кратковременного действия с мерником объемом 5 м³ построена на Ивано-Франковском приборостроительном заводе [2] и две установки непрерывного действия созданы во ВНИИМ (с мерниками объемом по 0,4 м³) и на заводе «Ленгаз» (с мерниками объемом по 5 м³). Все эти три автоматические газомерные установки успешно эксплуатируются.

Прежде чем приступить к созданию установок непрерывного действия во ВНИИМ был экспериментально проверен принцип автоматической работы двух мерников в непрерывном режиме. Для этой цели была построена экспериментальная установка с мерниками объемом по 0,4 м³, имевшими трубы диаметром 50 мм, на которой достигнут максимальный расход воздуха в 40 м³/ч. Описание и результаты исследования ее приведены в статьях [1, 3].

Для возможности достижения на новой установке с мерниками объемом по 0,4 м³ больших расходов диаметр труб как внутри, так и снаружи мерников был принят достаточно большим и равным 150 мм. При этом отношение площади F_t поперечного сечения труб к объему мерника V_m равно $4,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$, что почти в десять раз превышает это отношение при трубах диаметром 50 мм.

Заново была разработана конструкция быстродействующего клапана, так как применять на трубах большого диаметра пробковые краны было явно нецелесообразно. Разрабатывая конструкцию клапана, авторы стремились удовлетворить двум требованиям: достигнуть малой инерционности и небольшого гидравлического сопротивления клапана. Быстродействие (рис. 1) обеспечивается сравнительно малым ходом (~40 мм) клапана, состоящего из тарелки 2 и кулисного штока 3 и усилием около 2000 н (~200 кгс), прикладываемым к клапану и колен-

чатому валу 4 в момент освобождения защелки, удерживающей пружину 6 во взведенном положении. Освобожденная пружина за 0,08 сек закрывает клапан и одновременно поворачивает на 90° коленчатый вал 4, на шейке которого находится бронзовый камень 5, перемещающийся в кулисной прорези штока клапана. Когда тарелка клапана закрыта, то под действием пружины она прижата к резиновому седлу 1.

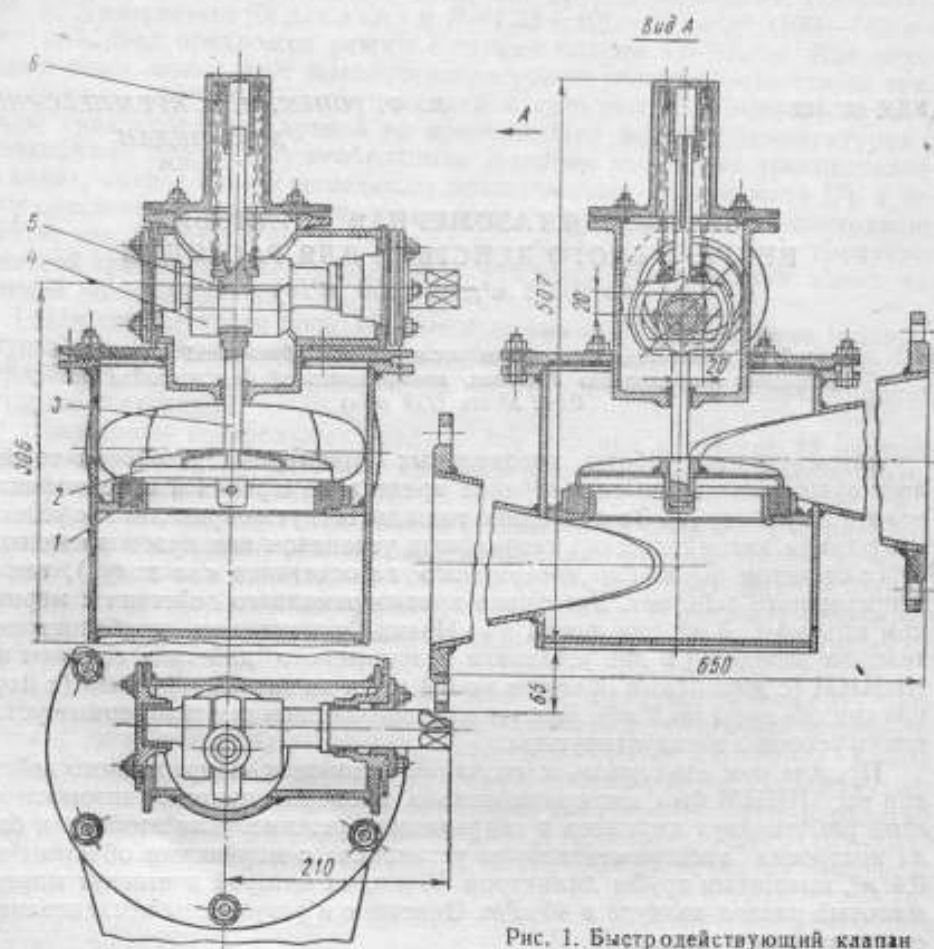


Рис. 1. Быстродействующий клапан

Для снижения потерь давления приняты меры к наименьшей деформации потока воздуха при проходе через клапан и приданию штуцерам входа и выхода удобообтекаемой формы с постепенным переходом входных отверстий из круглых в плоскоовальные с сохранением неизменной величины проходных сечений.

Схема управления клапаном была существенно видоизменена по сравнению с применявшейся в экспериментальной установке. Лишь для управления процессом закрытия клапана была сохранена хорошо зарекомендовавшая себя рычажная система, имеющаяся в серийно выпускаемых соленоидных электроприводах типа ПС-10М, предназначенных для масляных выключателей. Применять этот электропривод также для

«взвода» пружины и открытия клапана было нецелесообразно, так как для этого потребовался бы постоянный ток около 100 а. В то же время не имелось необходимости в быстром открытии клапана. Поэтому было решено осуществить взвод основной пружины электродвигателем с помощью соответствующего исполнительного механизма. Удобным для этой цели является разработанный авторами исполнительный механизм типа ИМИ-П, серийно изготавливаемый на Чебоксарском заводе ЭЭИМ.

Схема управления клапаном показана на рис. 2. Исполнительный механизм ИМИ-П вращается от электродвигателя 10. Выходной вал 9 механизма за 2 сек поворачивается на 180°. При этом палец 13 кривошипа 12, входящий в прорезь кулисного штока 15, приподнимает последний и вместе с ним ролик 20 и тягу 4. Это вызывает поворот на 90° рычага 3 и коленчатого вала 17, в результате чего клапан 1 открывается, а пружина 16 «взводится». При дальнейшем повороте вала 9 и опускании штока 15 клапан 1 остается открытым, а пружина 16 — во взведенном состоянии, так как ось 19 ролика 20 в самом начале движения вниз ложится на кромку собачки 18.

При этом усилии пружины 16 воспринимается собачкой 18 и, кроме того, через рычаги 5, 6 и 7 передается на упор 14.

Чтобы освободить пружину 16 и закрыть клапан 1, подают ток в соленоид 8. Якорь последнего поднимается и своим концом ударяет по рычагу 7, выводя из равновесия систему рычагов 5, 6 и 7. Ось 19 соскакивает с собачки 18 вправо, и кривошипный вал 2 под действием пружины 16 поворачивается на 90°, закрывая клапан 1. Этот процесс закрытия длится 0,08 сек.

Кривошипно-кулисная связь между механизмом закрытия, взятым из электропривода типа ПС-10М, и исполнительным механизмом типа ИМИ-П, разработанная во ВНИИМ, показана на рис. 3. Вся конструкция с помощью четырех шпилек 3 крепится к основанию 2 корпуса привода ПС-10М. Кулисный шток 1 проходит через отверстие в основании 2. Роль кулисного камня выполняет шарикоподшипник 7, внутри которого проходит палец 6 кривошипного вала 5. Последний с помощью радиально-осевой муфты 11 (рис. 2) соединяется с исполнительным механизмом ИМИ-П. Штурвал 4 служит для ручного взвода пружины и открытия клапана.

Схема контактно-измерительного устройства показана на рис. 4. Оно существенно отличается от аналогичного устройства, примененного на экспериментальной установке. Последнее четко работало, если горизонтальные отклонения колокола не превышали ± 1 мм. При больших от-

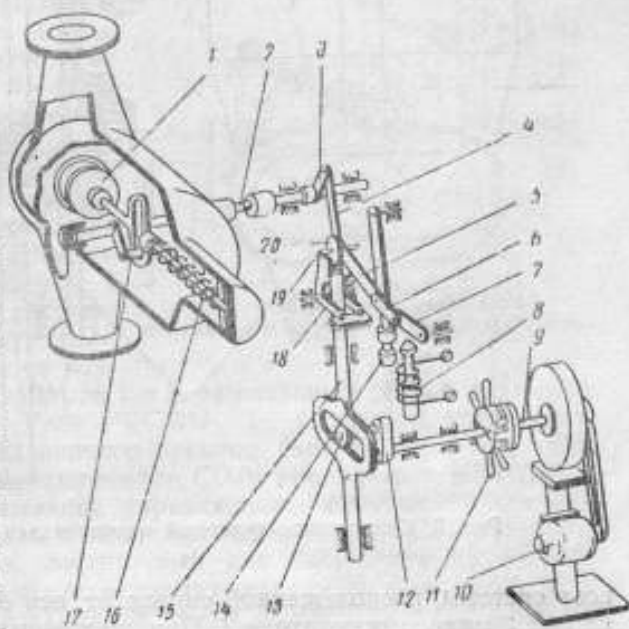


Рис. 2. Схема управления быстродействующим клапаном.

клонениях в одну сторону нажимной элемент, укрепленный на колоколе, проходил мимо контактного устройства и последнее не срабатывало, а при больших отклонениях в другую сторону возникала опасность поломки устройства вследствие недостаточности его проходной способности. В новом контактном устройстве (рис. 4) вместо одного двухплечего рычага имеются два рычага: вертикальный 5 и горизонтальный 9, связанных пружиной 6 и вращающихся вокруг общей оси 4. В свободном положении оба рычага под действием пружины прижимаются своими выступами друг к другу и одновременно, под действием равнодействующей

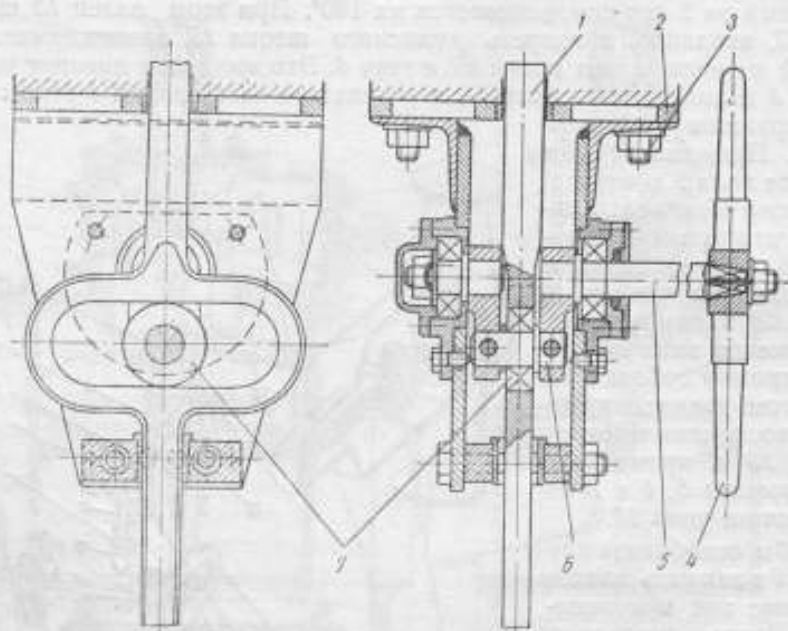


Рис. 3. Кривошипно-кулисный механизм для открытия клапана.

веса системы, расположенной справа от оси 4, слегка прижимаются к кнопке 2 микровыключателя 1. При движении колокола 8 вниз укрепленный на нем винт-толкатель 7 нажимает на конец рычага 9. Вначале оба рычага, связанных пружиной 6, будут двигаться как одно целое, пока после срабатывания микровыключателя вертикальный рычаг 5 не упрется в ограничитель 3 его хода. Горизонтальный же рычаг 9 будет продолжать наклоняться вниз, а правый конец пружины двигаться по дуге радиуса R . При этом плечо r_0 действия силы пружины уменьшается до r почти пропорционально ее растяжению. Благодаря этому, а также соответствующему подбору жесткости пружины момент, необходимый для поворота рычага 9, не возрастает, а сохраняется постоянным. Это важно так как позволяет избежать возникновения дополнительного изменения давления под колоколом.

Принципиальная электрическая схема газомерной установки показана на рис. 5. Слева изображены шесть микровыключателей типа ВК2-140Г, установленных на газовых мерниках ГМ-1 и ГМ-2. На каждом мернике имеются по три микровыключателя: одни — верхний В и два нижних H_n и H . Микровыключатель В дает команду для закрытия клапана, через который поступает в данный мерник воздух от вентилятора. Микровыключатель H_n , являющийся предварительным нижним,

дает команду для открытия клапана, подключающего соседний мерник к расходной линии. Микровыключатель *H* управляет закрытием выходного клапана у данного мерника. Все микровыключатели замыкают цепи обмоток промежуточных реле типа РКС-3, потребляющих мало тока и имеющих достаточно надежные электрические контакты. Отмеченные на схеме № 1, 2, 5 и 6 реле РКС-3 посылают ток непосредственно в соленоиды *СО* приводов ПС-10М, управляющие закрытием соответствующих клапанов. Для открытия тех же клапанов, т. е. для включения трехфазных электродвигателей соответственных исполнительных механизмов ИМИ-П, остальные четыре реле РКС-3, № 4, 3, 7 и 8 посылают ток в обмотки контакторов КМВ. После поворота выходного вала ИМИ-П на один оборот, т. е. после открытия клапана, электродвигатель останавливается — используется разрыв цепей обмоток реле РКС-3 сигнальными контактами соответствующих механизмов ИМИ-П (зажимы 1—2), замыкающимися во время движения механизма. Включенные параллельно им контакты 3—4 механизма ПС-10М, обеспечивающие возможность пуска механизма ИМИ-П, размыкаются в самом начале его движения. Чтобы открытие клапанов № 3 и 4, соединяющих мерники с вентилятором, произошло после закрытия клапанов № 1 и 2, через которые воздух поступает к поверяемому прибору, реле № 7 и 8 получают импульс от контактов 5—6 механизмов ПС-10М № 1 и 2, замыкающихся при закрытии соответствующих клапанов. Реле РКС-3 № 1—4 должны оставаться замкнутыми в течение определенного времени (достаточного для срабатывания управляемых ими соленоидов *СО* и контакторов КМВ), несмотря на возможное размыкание управляющих микровыключателей. Для этого реле заблокированы и получают через сопротивление $R_1—R_4$ от минуса цепи питания ток, достаточный для удержания их якорей притянутыми. Каждое реле отпускается автоматически, благодаря разрыву его цепи питания после срабатывания соответствующих элементов схемы.

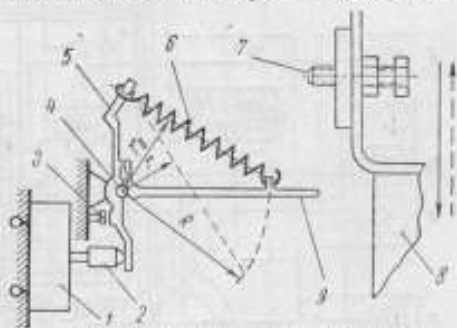


Рис. 4. Принципиальная схема контактно-измерительного устройства.

Реле, контакторы и выпрямитель, питающий схему, смонтированы в «щите контакторов» закрытого типа. Рубильники ПВЗ-25 для включения как электродвигателя вентилятора, так и автоматики смонтированы на «щите управления». На нем размещены также ключ пуска и остановки и два счетчика электрических импульсов СЭИ-1. Из них один регистрирует циклы работы установки нарастающим итогом, показания же другого могут быть сброшены на нуль после каждой поверки.

На рис. 6 показана принципиальная схема автоматической газомерной установки ВНИИМ. В положении на рисунке мерник 1 наполняется воздухом от вентилятора 9 и его колокол идет вверх, а колокол мерника 2 опускается, вытесняя воздух через открытый клапан 4 в расходную линию, на которой установлен поверяемый прибор 5. Когда наполнение мерника 1 закончится, сработает контакт *B*, управляющий механизмом ПС-10М, и клапан 8 закроется. Затем, когда колокол мерника 2 будет подходить к своему нижнему положению, замкнется его нижний предварительный контакт *H*, который включит в действие механизм ИМИ-П, открывающий клапан 7, и начнется период параллельной ра-

боты мерников, когда оба они будут подавать воздух в расходную линию к поверяемому прибору. Этот период закончится в момент достижения колоколом мерника 2 крайнего нижнего положения и срабатывания контакта *H*, управляющего механизмом ПС-10М, закрывающим клапан 4. Одновременно особый контакт, связанный с этим же механизмом, включает в действие другой механизм ИМИ-П, который открывает клапан 3. При этом воздух от вентилятора начинает поступать в мерник 2. Перемещая колокол его вверх до тех пор, пока не сработает верхний

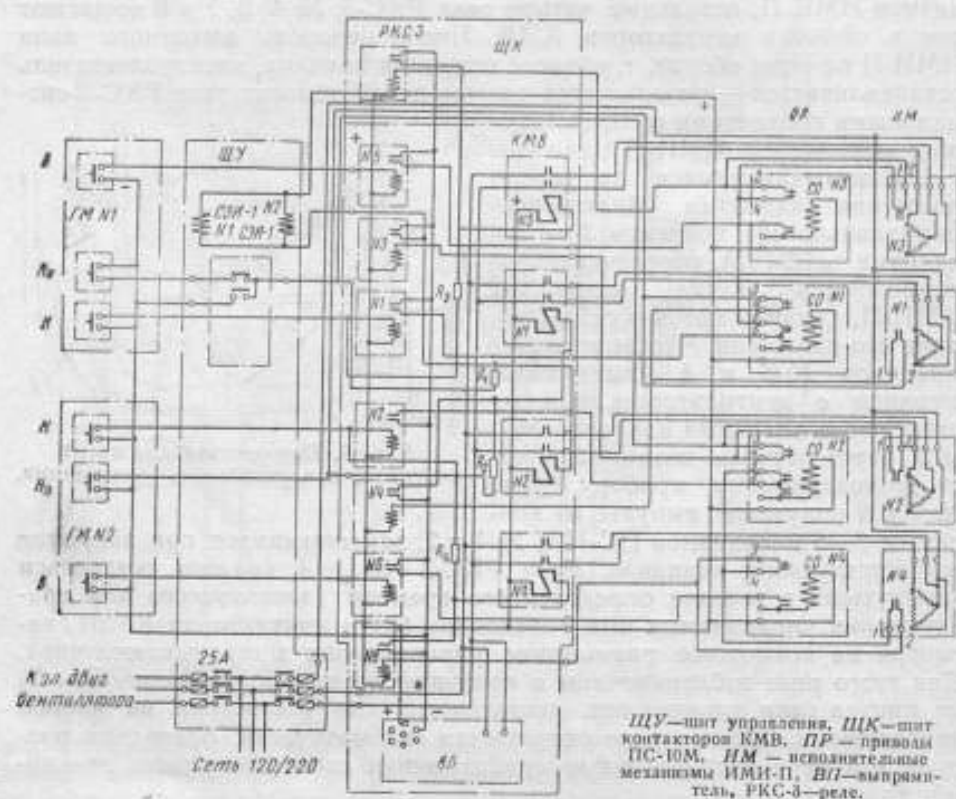


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема газомерной установки по ВНИИМ.

контакт *B* и клапан 3 не закроется. В течение этого времени колокол мерника 1 непрерывно движется вниз, вытесняя воздух через открытый клапан 7 в расходную линию к поверяемому прибору. При подходе колокола к своему нижнему положению срабатывает предварительный контакт *H_а* и открывается клапан 4, подключающий мерник 2 к расходной линии. Параллельная работа двух мерников заканчивается, когда колокол мерника 1 достигает нижнего положения и срабатывает контакт *H* и механизм ПС-10М, закрывающий клапан 7 и открывающий клапан 8. На этом заканчивается один цикл работы установки и последняя возвращается к первоначальному положению, изображенному на рис. 6. В дальнейшем установка работает аналогично.

Как показали испытания, в периоды переключения подачи воздуха в расходную линию от одного мерника на другой происходят кратковременные колебания давления, которые практически не отражаются на

поверке газосчетчиков. Однако эти колебания необходимо устранить, если применять установки для исследовательских работ, а также для проверки расходомеров газа. Для этой цели было разработано особое сглаживающее устройство, состоящее из профилированной заслонки *б* (рис. 6), автоматически перемещающейся вправо при срабатывании механизма ИМИ-П клапана 7 и — влево при срабатывании механизма ИМИ-П клапана 4. В своих крайних положениях заслонка почти полностью закрывает трубопровод, выходящий из одного мерника, в то время как трубопровод из другого мерника остается полностью открытым. Перемещаясь за $1,5 \div 2$ сек из одного крайнего положения в другое, заслонка постепенно перераспределяет воздушные потоки, которые

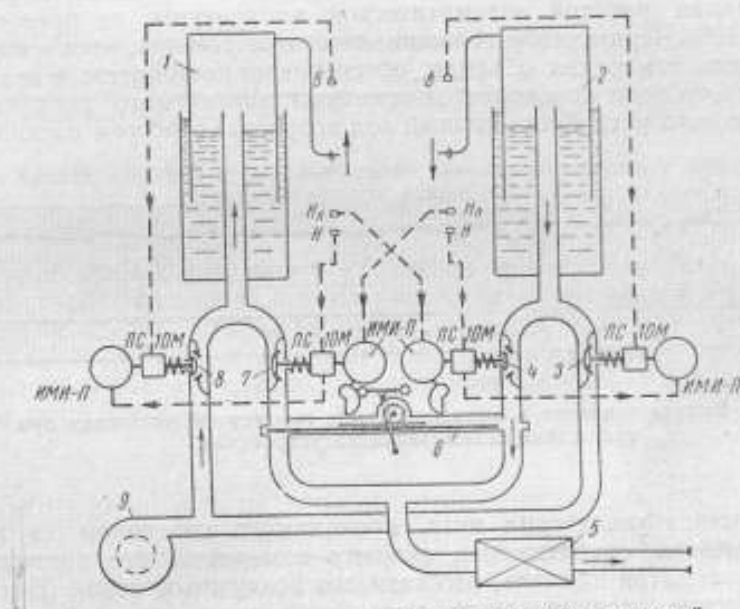


Рис. 6. Принципиальная схема автоматической газомерной установки.

идут в расходную линию от одного и другого мерника. Когда заслонка достигнет соответствующего крайнего положения, при котором поток воздуха через подлежащий закрытию клапан уже сведен до весьма малой величины (порядка $10 \div 15\%$ от расхода при полностью открытой заслонке), быстродействующие клапаны 4 и 7 закрываются.

Погрешность работы автоматизированной газомерной установки непрерывного действия складывается из погрешностей, присущих обычным колокольным мерникам (от неточности градуировки шкалы, влияния изменения температуры, от неточной компенсации изменения гидростатического давления и т. п.), и погрешности, обусловленной работой автоматической аппаратуры. Нам интересуют именно последняя погрешность. Она почти целиком определяется точностью автоматического отмеривания объемов каждым колоколом, которая зависит от быстродействия и стабильности работы автоматических устройств, обуславливающих постоянство отсечения потоков воздуха, поступающих и выходящих из мерников.

Многочисленные испытания на повторяемость остановки каждого колокола в верхнем и нижнем положении показали, что обусловленная

этим суммарная средняя квадратичная погрешность не превосходит $0,04 \div 0,07\%$ (в зависимости от конструкции и регулировки контактно-измерительного устройства) от полного хода колоколов, равного ~ 1200 мм.

Приведенные значения погрешности получены при испытании установки без сглаживающего устройства. Применение последнего заметно повышает точность установки колоколов в нижних положениях, так как срабатывание клапанов, отсекающих выход воздуха из мерников, происходит здесь в моменты весьма медленного движения колоколов. В результате суммарная средняя квадратичная погрешность снижается до $0,03 \div 0,06\%$. Эти данные позволяют сделать заключение, что предельная погрешность измерения объемов воздуха в колокольных мерниках, обусловленная работой автоматической аппаратуры, не превосходит $\pm 0,1 \div 0,12\%$. Применение сглаживающего устройства, кроме повышения точности измерения объемов, обеспечивает постоянство и независимость полного хода колоколов от величины поверяемого расхода. Без сглаживающего устройства полный ход возрастал с ростом расхода воз-

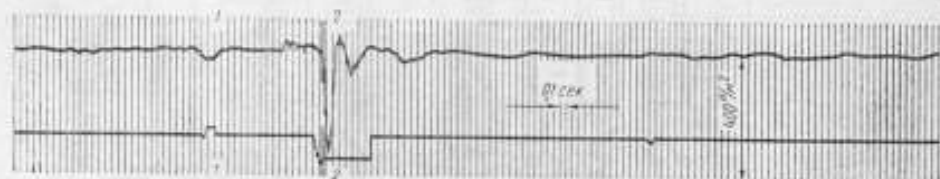


Рис. 7. Кривая давления в выходной трубе газомерной установки при отсутствии сглаживающего устройства.

духа вследствие увеличения пути, проходимого колоколом за время между моментом срабатывания нижнего измерительного контакта и моментом закрытия клапана, отсекающего воздушный поток. Вместе с тем применение сглаживающего устройства вызывает необходимость некоторого увеличения расстояния между предварительным и окончательным контактами с тем, чтобы полное перемещение заслонки сглаживающего устройства успело закончиться раньше срабатывания окончательного контакта. Это увеличивает время параллельной работы мерников, а значит и полное время опускания колоколов из верхнего положения в нижнее, следствием чего является снижение предельных расходов (приблизительно со 170 до 150 м³/ч).

Характер кривой давления в общей расходной трубе при отсутствии сглаживающего устройства показан на рис. 7. Измерение давления производилось разработанным во ВНИИМ мембранным микроманометром с индуктивным преобразователем, включенным в мостовую схему. Напряжение, возникающее в диагонали моста, выпрямляется, сглаживается в узкополосном фильтре, рассчитанном на 100 гц, и подается на шлейф осциллографа типа Н-700. Запись велась на ленте шириною 120 мм при скорости ее движения 40 мм/сек и масштабе записи давления 1 мм = $4,7$ н/м² ($0,48$ мм вод. ст.). Начало записи соответствует движению вниз колокола № 2 и состоянию покоя колокола № 1. При этом кривая показывает лишь незначительные колебания давления в пределах 10 — 15 н/м² ($\sim 1 \div 1,5$ мм вод. ст.), происходящие от изменения сил трения колокола. В момент $1-1$ срабатывает предварительный контакт колокола № 2 (что сопровождается временным падением

давления, обусловленным сопротивлением контакта) и начинает открываться выходной клапан мерника № 1. Вплоть до момента 2—2 оба мерника совместно подают воздух в расходную линию. При этом давление в последней несколько возрастает. В момент 2—2 выходной клапан мерника № 2 резко прекращает выход воздуха из него, и давление в расходной линии резко падает. Это сопровождается падением давления в мернике № 1, что вызывает ускоренное движения его колокола, сопровождающееся резким возрастанием давления в линии. Вследствие инерции колокола возникают затухающие колебания давления с частотой около 4 гц. Затем устанавливается постоянное давление.



Рис. 8. Кривая давления в выходной трубе газомерной установки при работе сглаживающего устройства.

Характер кривой давления в расходной трубе при работе сглаживающего устройства изображен на рис. 8. Здесь в периоды переключения потока с одного мерника на другой давление практически не изменяется. Еще более стабильной оказывается кривая динамического давления потока в выходной трубе, снятая с помощью напорной трубки и показанная на рис. 9.

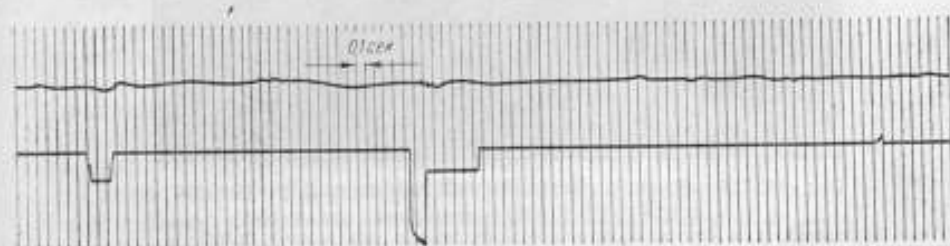


Рис. 9. Кривая динамического давления в выходной трубе газомерной установки.

Приведенные на рис. 7—9 кривые получены при расходе $100 \text{ м}^3/\text{ч}$. При больших расходах положительный эффект от сглаживающего устройства становится более значительным.

Построенная газомерная установка обеспечивает создание и измерение непрерывного расхода воздуха вплоть до $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ с погрешностью не более $\pm 0,3 \div 0,4\%$. При отсутствии сглаживающего устройства расход может быть повышен до $170 \div 180 \text{ м}^3/\text{ч}$. Напомним, что для мерника объемом $0,4 \text{ м}^3$ при обычном режиме работы предельный расход равен $8 \text{ м}^3/\text{ч}$. Новая установка введена в эксплуатацию и на ней уже выполнен ряд работ по градуировке, поверке и исследованию новых расходомеров и газосчетчиков.

Внешний вид автоматической газомерной установки показан на рис. 10.

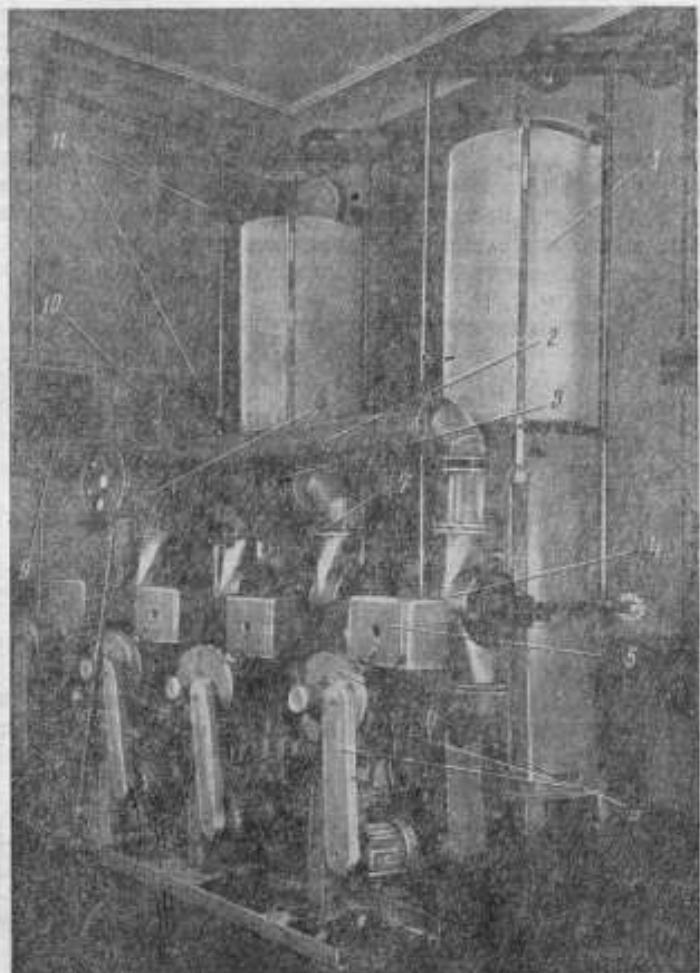


Рис. 10. Общий вид автоматической газомерной установки:

1—колокол в первом положении, 2—труба диаметром 150 мм (идет от вентилятора), 3—труба диаметром 150 мм (идет к поверяемому прибору), 4—быстродействующий клапан, 5—механизм ПС-10М, управляющий закрытием клапана, 6—неполный механизм ИМИ-П, управляющий открытием клапана и несущий крыштейн, на котором укреплен механизм ПС-10М, 7—заслонки сглаживающего устройства, 8—коллектор с соплами, испытываемый на установке, 9—шит управления, 10—шит контакторов, 11—контактно-измерительные устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонек Н. Ф., Кремлевский П. П., Педан М. С., Автоматические образцовые газомерные установки, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 66 (126), 1962.
2. Бродин И. С., Автоматизированная испытательная установка для поверки газосчетчиков с номинальным расходом до 1000 м³/ч, «Измерительная техника», № 5, 1962.
3. Кремлевский П. П., Гонек Н. Ф., Педан М. С., Автоматическая работа двух колокольных мерников в непрерывном режиме, «Измерительная техника», № 2, 1962.

Поступила в редакцию
17/III 1964 г.

Н. Ф. ГОНЕК, П. П. КРЕМЛЕВСКИЙ,
М. С. ПЕДАН
ВНИИМ

**ОБРАЗЦОВАЯ ГАЗОМЕРНАЯ УСТАНОВКА
НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ РАСХОДОВ
до 0,28÷0,42 м³/сек (1000÷1500 м³/ч)**

*Дано описание газомерной установки непрерывного действия для расходов
до 0,28÷0,42 м³/сек (1000÷1500 м³/ч).*

Успешные результаты, полученные во ВНИИМ при создании автоматизированной газомерной установки с мерниками объемом 0,4 м³ явились основанием для создания аналогичной газомерной установки с колокольными мерниками объемом 5 м³ на газоремонтном заводе «Ленгаз».

При этом трубы диаметром 150 мм, расположенные внутри мерников, пришлось оставить без изменения. Диаметр же наружных труб был увеличен до 250 мм и в соответствии с этим быстродействующие клапаны были изготовлены с условным проходом 250 мм. Ввиду ограниченных размеров помещения и необходимости обеспечения максимальной компактности устанавливаемой арматуры была принята sdвоенная конструкция быстродействующих клапанов.

Схема газомерной установки показана на рис. 1. Газовые мерники 2 и 4 с целью экономии площади размещены таким образом, что их выходные патрубки 3 направлены к центру помещения и образуют между собой прямой угол. К патрубкам подсоединены диффузоры 5 длиной около 500 мм, постепенно увеличивающие диаметр трубопроводов от 150 до 250 мм и переходящие далее в угольники 7. Последние соединены со sdвоенными быстродействующими клапанами 6, расположенными рядом перед мерниками. Фасонные патрубки клапанов связаны между собой фигурными тройниками 8 и 9. Тройник 9 служит для присоединения гибкого шланга или трубопровода к поверяемому прибору, а тройник 8 соединен с вентилятором 1, расположенным у стены за мерниками.

Конструкция быстродействующих клапанов показана на рис. 2. В цилиндрическом сварном корпусе 4, расположенном горизонтально, приварены два седла 7 клапанов, снабженных канавками для резиновых уплотнений 9. Снизу в середине корпуса 4 приварен штуцер 1, предназначенный для присоединения к трубе, которая идет от колокольного мерника. Сверху к цилиндру приварены два фасонных патрубка 3 и 8, обеспечивающих постепенный переход проходного сечения от круглого к овальному. К торцам цилиндрических корпусов герметично прикреплены крышки 10 с расположенными в них кривошипно-кулисными меха-

низмами 2 открытия клапанов и пружинами 12, обеспечивающими достаточную быстроту закрытия клапанов и необходимую силу прижима их к седлам. Конструкция самих клапанов и механизмов аналогична примененной в газомерной установке на расходы до $0,042 \text{ м}^3/\text{сек}$ ($150 \text{ м}^3/\text{ч}$) при диаметре труб 150 мм. Клапан тарелочного типа имеет

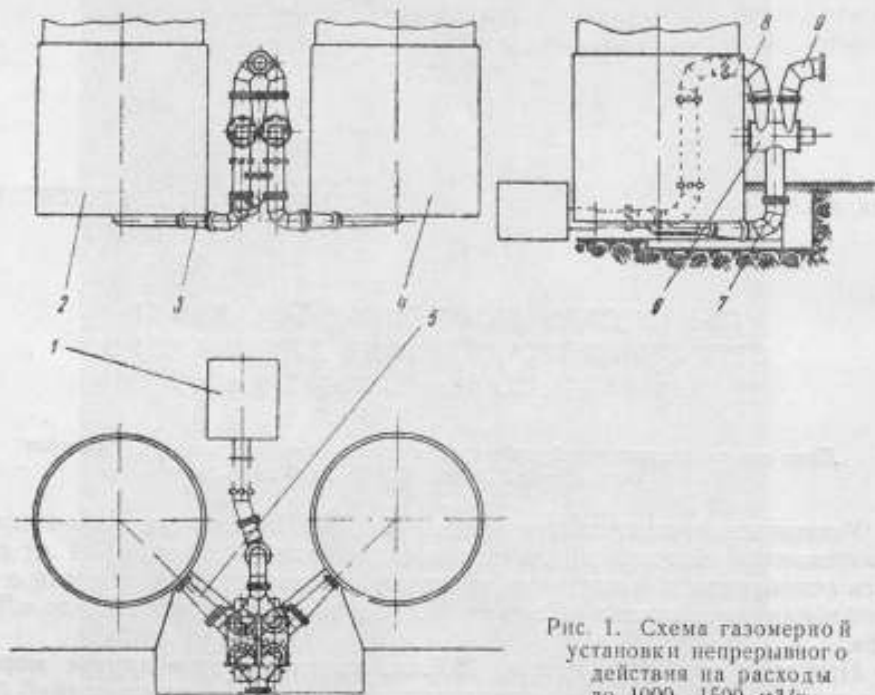


Рис. 1. Схема газомерной установки непрерывного действия на расходы до $1000-1500 \text{ м}^3/\text{ч}$.

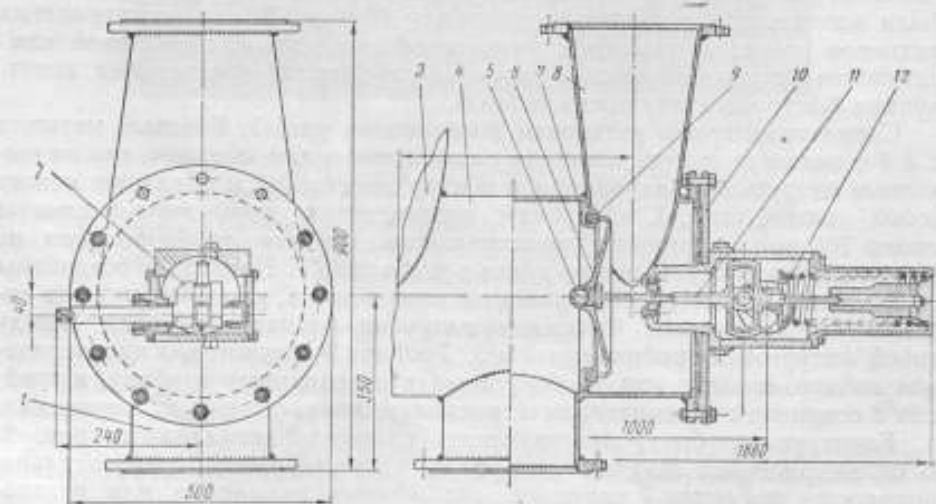


Рис. 2. Сдвоенный быстродействующий клапан.

диаметр отверстия 276 мм. Ход клапана 80 мм. Чтобы избежать неплотности клапана из-за возможного перекоса, его тарелка 6 и кулисный шток 11 соединены при помощи фрикционного шарового шарнира 5, диаметр сферы которого 32 мм. Клапан прижимается к седлу пружиной.

усилие которой можно регулировать в пределах $700 \div 1400$ н ($70 \div 140$ кгс), подкладывая шайбы. Соответственно во взведенном состоянии усилие меняется от 2000 до 2800 н ($200 \div 280$ кгс). Крутящий момент на кривошине при открытии не превышает 120 н·м (~ 12 кгс·м).

Управление быстродействующими клапанами с условным диаметром 250 мм осуществляется точно такой же аппаратурой, как в установке на расходы $0,042$ м³/сек (150 м³/ч) для управления клапанами диаметром 150 мм. Эта аппаратура состоит из исполнительных механизмов типа ИМИ-П, кривошипно-кулисных механизмов включения и рычажно-соленоидных механизмов отключения из приводов типа ПС-10М.

При достижении колоколами крайних верхних и нижних положений, соответствующих делениям 0 и 5000 линейки мерников, срабатывают контактно-измерительные устройства (рис. 3), установленные на поперечине 8 вверху над колоколом. Контактное-измерительное устройство состоит из микровыключателя 5 типа ВК2-140Г, управляемого рычажным механизмом, укрепленным на скобе 6. Рычажный механизм представляет собой «ломающийся» рычаг, составленный из двух шарнирно-соединенных половин 3 и 4. Под действием пружины 9, укрепленной на выступах полурычагов, последние, упираясь друг в друга, образуют как бы целый рычаг. Когда толкатель 2, установленный на цепи 1 противовеса, двигаясь вправо, нажмет на полурычаг 3, последний воздействует на кнопку, и микровыключатель срабатывает. После этого нижний полурычаг станет упираться в ограничитель 7 и тем самым будет предохранять микровыключатель от поломки. При дальнейшем нажатии на верхний полурычаг 3 преодолевается усилие пружины, рычаг «ломается», полурычаг 3 наклоняется вправо и пропускает толкатель. При обратном ходе толкателя ломающийся рычаг пропускает его, отклоняясь влево как одно целое. Изменения провеса цепи и связанные с этим вертикальные перемещения толкателей 2 практически не вызывают дополнительные погрешности срабатывания микровыключателей, так как рабочая кромка ведомого полурычага 3 вертикальна. Контактное-измерительное устройство укреплено на поперечине и цепи противовеса, соединенной с центром дна колокола. Это позволило избежать влияния перекосов колокола, особенно заметных вследствие неблагоприятного соотношения между его диаметром и высотой, продиктованного недостаточностью высоты помещения, в котором находится газомерная установка.

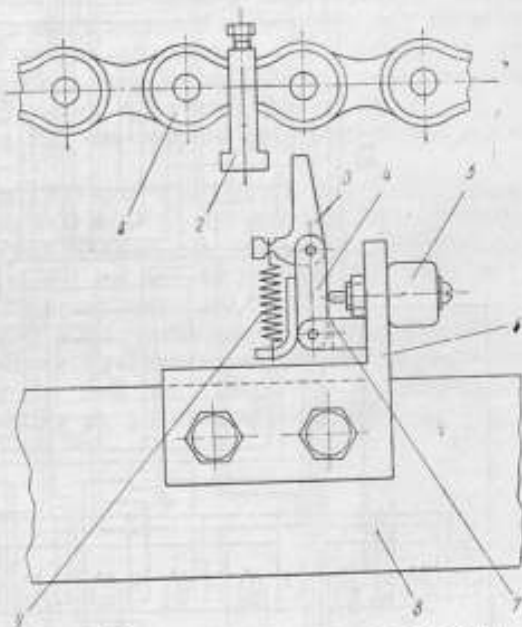


Рис. 3. Контактное-измерительное устройство.

Электрическая схема рассматриваемой установки (рис. 4) принципиально не отличается от электрической схемы установки на расходы

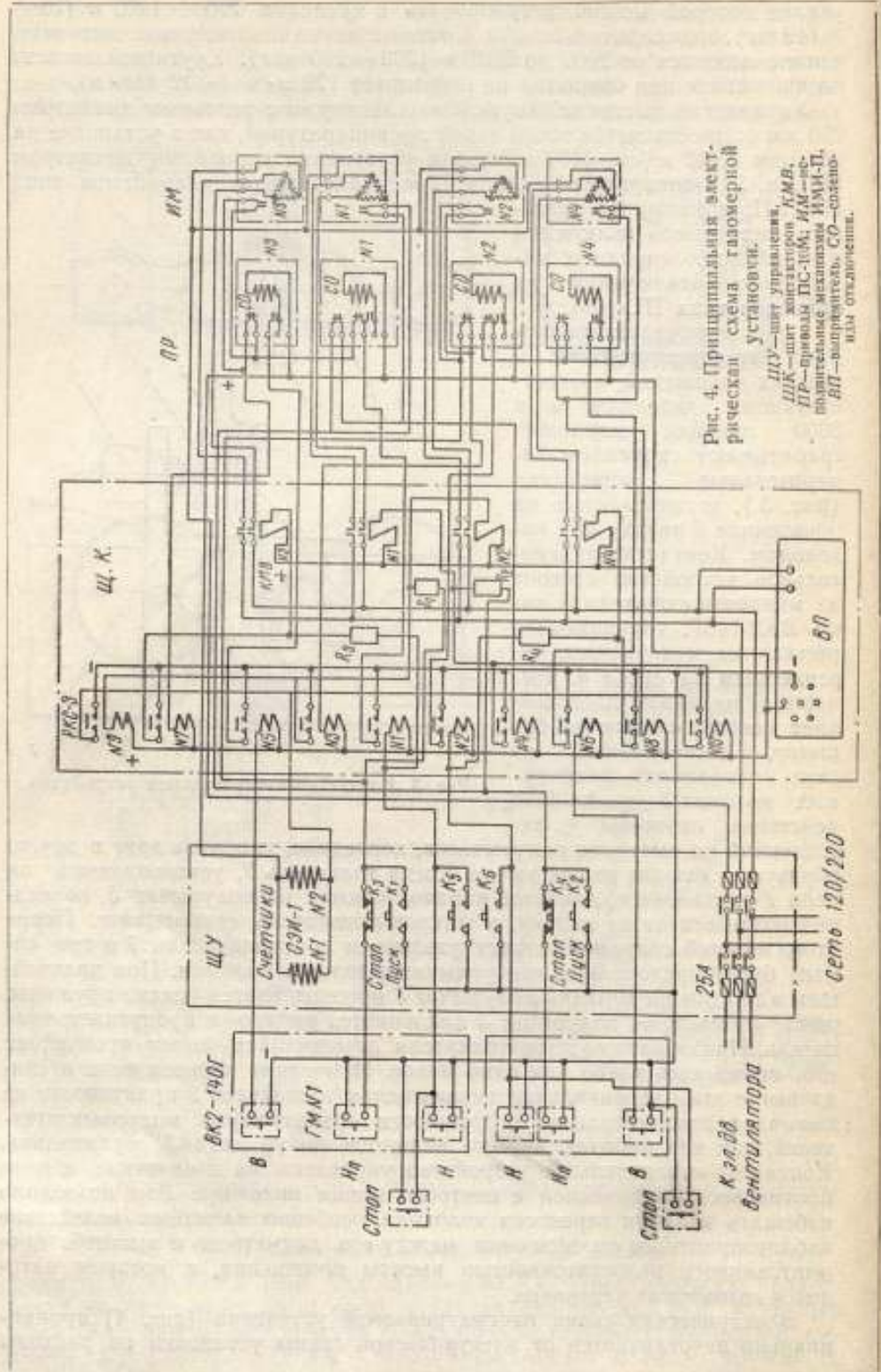


Рис. 4. Принципиальная элект-
рическая схема газовой
установки.

ЩУ — щит управления,
ЩК — щит контактный, КМВ,
КМБ — реле ПС-10М; КМ — ре-
ляющие элементы ИМ-П,
БП — выпрямитель, СО — соеди-
ния отключения.

воздуха $0,042 \text{ м}^3/\text{сек}$ ($150 \text{ м}^3/\text{ч}$), поскольку в обеих установках управление быстродействующими клапанами осуществляется одинаковой аппаратурой. Входящие в схему реле и другие вспомогательные элементы смонтированы также в двух щитах — щите контакторов и щите управления. Отличие схемы заключается только в том, что в щите управления вместо ключа имеются четыре кнопочных устройства $K_1 - K_4$, позволяющих осуществлять пуск и остановку, начиная с любого из колоколов. Кроме того, предусмотрены кнопки K_5 и K_6 , которые дают возможность поднимать каждый колокол из любого исходного положения. Наконец, на каждом из мерников вблизи линеек имеется кнопка «стоп», позволяющая останавливать колокол в любом положении. Необходимость такой остановки колокола вызвана тем, что на мерниках предусмотрена поверка малых счетчиков, требующих пропуска объема меньше 5 м^3 . Для этого на трубах диаметром 250 мм сделаны ответвления трубопроводов диаметром 100 мм .

При давлении под колоколом 1200 н/м^2 ($\sim 120 \text{ мм вод. ст.}$) и давлении перед поверяемым прибором 600 н/м^2 ($\sim 60 \text{ мм вод. ст.}$) газомерная установка обеспечивает расход $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$, а при давлении перед поверяемым прибором 300 н/м^2 ($\sim 30 \text{ мм вод. ст.}$) — расход $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$. Общая погрешность установки не превышает $\pm 0,4\%$.

Описанная установка успешно эксплуатируется на газоремонтном заводе «Ленгаз». Для возможности проведения исследовательских работ и испытания расходомеров на ней предусмотрено сглаживающее устройство, аналогичное устройству на установке ВНИИМ.

Поступила в редакцию
16/XII 1964 г.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОБРАЗЦОВЫХ
СКОРОСТНЫХ (ПИТО-СТАТИЧЕСКИХ) ТРУБОК ВНИИМ
НА РОТАТИВНОЙ МАШИНЕ**

Статья посвящена вопросу экспериментального определения коэффициентов скоростных (пито-статических) трубок на ротативной машине ВНИИМ, а также описанию этой машины.

Скоростные (пито-статические) трубки являются наиболее распространенными преобразователями, применяемыми для измерения газовых потоков. Мерой скоростного напора является разность между полным и статическим давлением, измеряемая микроманометром, присоединенным к трубке. Эта разность зависит, в основном, от расположения отверстий статического давления на носике трубки, формы носика и состояния его поверхности и может несколько отличаться от действительного значения скоростного напора. Соотношение между действительным и измеренным значением скоростного напора определяет коэффициент трубки, который является основной характеристикой ее и для большинства трубок его находят экспериментально. Лишь в тех случаях, когда размеры исследуемой трубки полностью соответствуют размерам трубок ранее изученного типа с достоверно известным коэффициентом и трубка не предназначена для измерений повышенной точности, возможно принимать ее коэффициент равным коэффициенту прототипа. Поэтому введение нормалей на скоростные трубки способствовало бы значительному сокращению экспериментальных определений их коэффициентов, которое может осуществляться двумя методами: относительным и абсолютным. Применение относительного метода возможно лишь при наличии образцовой трубки с достоверно известным коэффициентом. Коэффициент трубки в этом случае определяют сравнением показаний образцовой и испытуемой трубок, установленных в равномерном потоке [1].

Абсолютный метод применяют для определения исходного значения коэффициента образцовых трубок. При этом методе с помощью трубок измеряют скоростной напор и одновременно определяют скорость потока, измеряя путь и время движения частиц воздуха. Из полученных значений действительной скорости потока и измеренного скоростного напора находят коэффициент данной трубки.

Первые определения коэффициентов скоростных трубок абсолютным методом были проведены в 1910—1912 гг. Так, в 1910—1911 гг. Рябушинский [2] на ротативной машине определял коэффициенты трубок

типа Рекнагеля. Результаты этого определения не получили широкого распространения, поскольку коэффициент трубок Рекнагеля не остается постоянным при изменении скорости потока и по величине значительно отличается от единицы.

Бромвелл, Релф и Фейдж [3] в Национальной лаборатории Англии в 1912 г. на ротативной машине получили равные единице коэффициенты для стандартной английской трубки и трубки полного напора.

В дальнейшем работы по определению коэффициентов скоростных трубок на ротативных машинах проводили с целью расширения пределов измеряемых скоростей, исследования трубок новой формы, а также для подтверждения ранее полученных коэффициентов.

В 1921 г. Кумбрух определил на ротативной машине при скоростях воздушного потока от 4 до 16 м/сек значения коэффициентов пяти различных трубок.

В 1930 г. [5] в Национальной лаборатории Англии был повторно определен коэффициент стандартной английской трубки при скоростях воздушного потока от 6 до 21 м/сек. Это определение подтвердило результаты работы [3].

Оуэр и Джонсон [6] в 1931 г. при скоростях потока воздуха от 0,6 до 7 м/сек определили коэффициенты трех трубок: стандартной английской, трубки с полусферическим носиком и копии стандартной в масштабе 0,535 : 1,000. Было найдено, что при скоростях потока свыше 5 м/сек, или числах $Re > 1300$, коэффициенты трубок остаются постоянными.

Для расширения пределов в сторону увеличения скоростей потока был использован закон динамического подобия. С этой целью Фолькнер [6] изготовил и исследовал трубку, геометрически подобную стандартной, но по размерам в 25 раз больше нее. Опыты показали, что коэффициент увеличенной трубки остается постоянным до скорости 27 м/сек. В пересчете на размеры стандартной английской трубки это соответствует скорости потока $25 \times 27 = 675$ м/сек. В действительности, при скоростях, значительно меньших 675 м/сек, уже становится заметным влияние сжимаемости воздуха.

Помимо исследований трубок на воздухе, их всесторонне испытывали в воде [7,8].

Стремление получить точные значения коэффициентов образцовых трубок, а также появившиеся у некоторых исследователей сомнения относительно постоянства коэффициентов скоростных трубок на разных скоростях привели ВНИИМ к необходимости изучить этот вопрос. С этой целью коэффициенты скоростных трубок были определены на ротативной машине, а также в аэродинамической трубе разработанным абсолютным методом «ионного облачка».

Ротативная машина

Основной частью ротативной машины (рис. 1 и 2) является вертикальный вал 2 с жестко связанными с ним стрелой (фермой) 7 и противовесом 6. Вал укреплен в подшипниках, которые смонтированы на верхнем основании станины 4 и корпусе коробки скоростей 1. Помимо стрелы, на валу установлены подвижные части комбинированного затвора 5, контактное кольцо 3 и на нижнем конце — коническая шестерня 10, связывающая вал с коробкой скоростей. На конце стрелы, на расстоянии $\sim 2,5$ м от оси вращения, установлен штатив 8, в котором за-

крепляют исследуемые приборы. Вал приводит во вращение электродвигатель 9 постоянного тока мощностью 0,5 квт. Число оборотов электродвигателя регулируют изменением тока в цепи возбуждения с помощью реостатов. Между электродвигателем и вертикальным валом может быть включена одна коробка скоростей, как показано на рис. 1 и 2, или коробка скоростей и цепная передача. Для включения цепной передачи на валах коробки скоростей и электродвигателя имеются соответствующие зубчатые колеса. Коробка скоростей имеет два вала и двенадцать шестерен, из которых две конические, а остальные цилиндрические. Коробка скоростей при соответствующих включениях шестерен ручками на

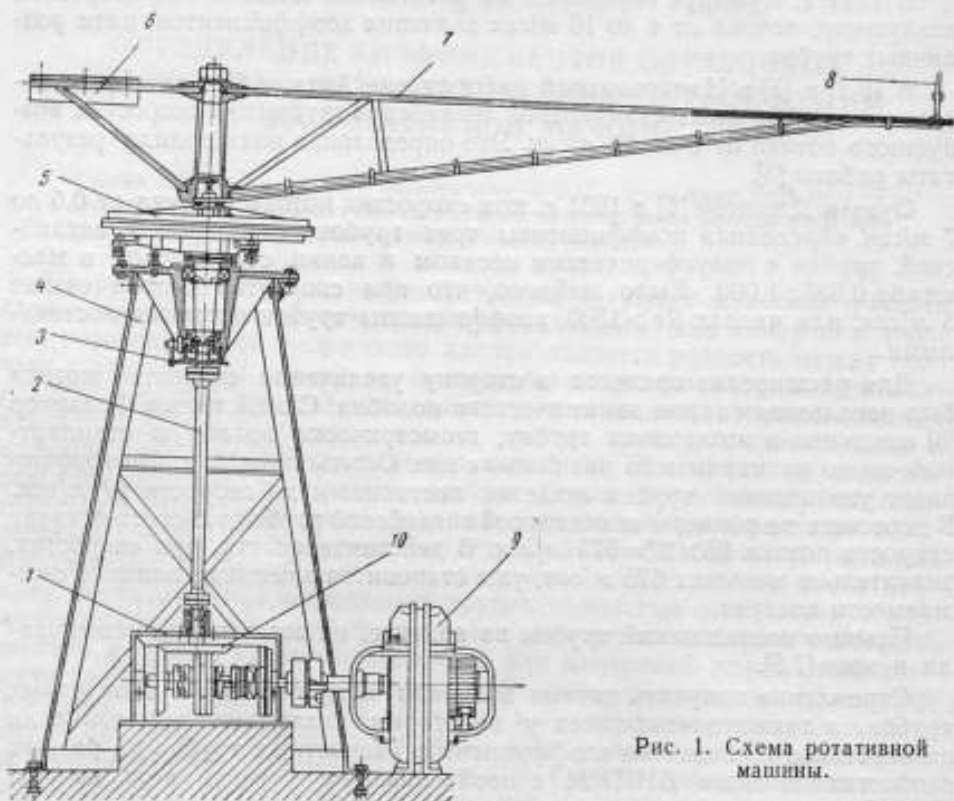


Рис. 1. Схема ротативной машины.

корпусе имеет передаточные числа 63, 8; 12, 1; 2, 3 и 0. Переключение коробки и регулировка тока с помощью реостатов обеспечивают плавное изменение окружной скорости прибора от 0,1 до 17 м/сек.

Исследуемый прибор (пито-статическая трубка, термоанемометр и т. п.) движется в замкнутом канале прямоугольного сечения размером 0,6×0,9 м. В нижнем основании канала имеется узкая щель, через которую штатив 8 вводится в канал. Наличие канала предотвращает влияние на прибор внешних возмущений воздуха.

Контактное кольцо 3 предназначено для измерения углов поворота вала 2. Оно выполнено из эбонита и разделено металлическими вставками на восемь равных частей, причем одна из них двойная. Кольцо 3,

включенное в цепь хронографа, за один оборот вала восемь раз замыкает и размыкает ток. Двойной контакт разделяет на ленте отдельные обороты.

Одновременная запись на ленте оборотов вала и импульсов времени обеспечивает измерение его угловой скорости.

Для соединения термоанемометров, укрепленных на стреле машины и движущихся вместе с ней, с неподвижными приборами и источниками питания, применяют ртутный контакт (рис. 3), который смонтирован на торце вертикального вала и состоит из двух эбонитовых колодок *б* и *б*. Нижняя колодка *б* — составная, она присоединена через пластинку *7* к гайке *8* на валу и вращается вместе с ним. В колодке *б* имеются пять кольцевых каналов. В основании четырех внутренних каналов запрессованы медные штифты *1*; к их нижним концам подведены провода от приборов, установленных на стреле машины. В центре колодки *б* высверлено отверстие, в которое запрессована латунная втулка. Форма верхней колодки *б* видна на рисунке. В ней вмонтированы стальная ось *2* и четыре медных штифта *3*, к которым крепят провода от неподвижных элементов схемы. Колодка *б* свободно вращается относительно верхней, для чего ось последней устанавливается во втулку колодки *б*, а штифты — во внутренние кольцевые каналы, заполненные ртутью. Для предохранения ртути от запыления имеется внешний кольцевой канал в колодке *б*, заполненной жидкостью, в которую погружена стенка колодки *б*. Сверху колодку *б* прикрывает крышка *4*.

Давления от движущейся трубки к неподвижному микроманометру могут передаваться с помощью комбинированного (5 на рис. 1) или масляного затвора. Работа на ротативной машине показала, что удобнее применять масляный затвор, который устанавливают на торце вертикального вала, сняв предварительно ртутный контакт. Масляный затвор (рис. 4) состоит из цилиндра *1*, крышки *2* и основания *4* и вращается вместе с вертикальным валом. Крышка *2* при этом остается неподвижной. В ней имеются два концентрических цилиндра *3*, которые при погружении в масло, заполняющее цилиндр *1*, образуют два изолированных объема. Через них давление передается от движущихся частей затвора к неподвижным. Давление от исследуемой трубки к затвору и от затвора к микроманометру передается по термозолированным латунным и резиновым трубкам.

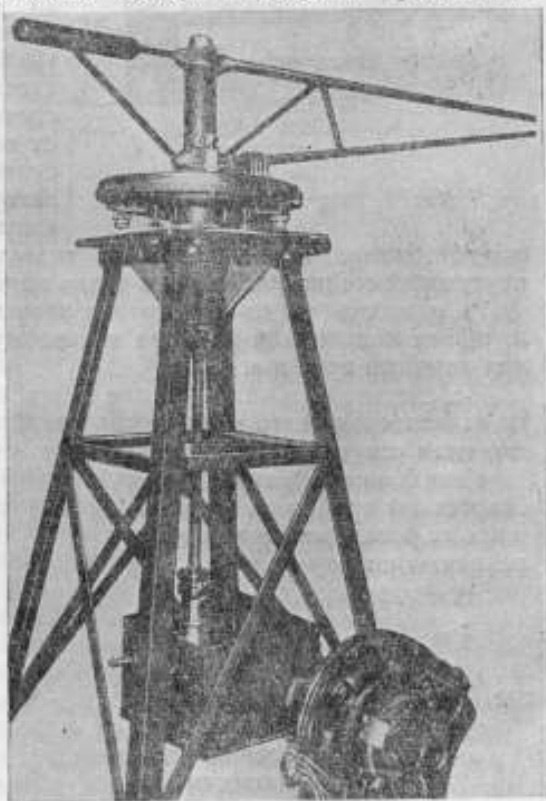


Рис. 2. Внешний вид ротативной машины.

Определение коэффициента образцовой скоростной трубки на ротативной машине

При вращении стрелы ротативной машины установленная на ней трубка движется в канале по окружности и увлекает окружающий ее воздух, образуя поток, который ряд авторов именуется «спутным».

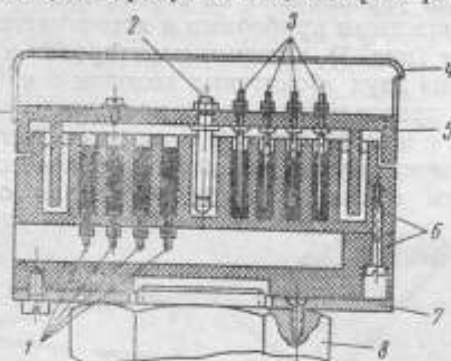


Рис. 3. Ртутный контакт.

Изучение его при движении исследуемого прибора, показало следующее:

1) скорость потока возрастает с увеличением скорости движения прибора;

2) распределение скорости потока по сечению канала ротативной машины имеет сложный характер. По вертикали на участке от нижней стенки до 80% его высоты она постоянна. По горизонтали на участке от внешней стенки (точнее на расстоянии 50 мм от стенки) и до траектории движения прибора скорость «спутного» потока также практически постоянна. На участке от траектории движения прибора и до внутренней стенки канала она резко падает;

3) скорость «спутного» потока зависит от формы и размеров движущейся модели или прибора и поэтому ее следует измерять отдельно для каждого прибора.

Вследствие наличия в канале машины потока воздуха скорость трубки относительно него меньше окружной скорости трубки на величину скорости «спутного» потока.

Кoeffициент ξ испытываемой скоростной трубки при измерениях на ротативной машине определяют по формуле

$$\xi = (R\omega - v) \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta p}}$$

где $R\omega$ — окружная скорость трубки, равная произведению угловой скорости ω вращения стрелы на радиус R крепления трубки, равный расстоянию между ее осью и осью ротативной машины;

v — скорость потока в канале;

Δp — разность между полным и статическим давлением по показаниям микроманометра, подсоединенного к скоростной трубке;

ρ — плотность воздуха.

На ротативной машине ВНИИМ был определен коэффициент образцовой трубки № 1 (рис. 5) с коническим носиком и тремя рядами отверстий (по 7 отверстий в ряд) при скоростях воздушного потока 5, 10

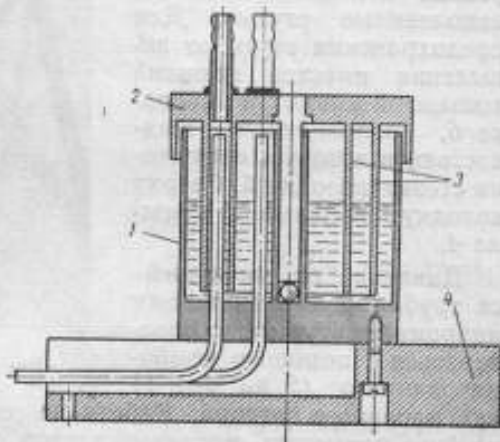


Рис. 4. Масляный затвор.

и 15 м/сек. Для этого угловую скорость вращения измеряли по записи оборотов вала ротативной машины и точных секундных сигналов, поступивших из лаборатории времени.

Записи обрабатывали на компараторе Прейлих-Барановского, при этом в зависимости от скорости потока измеряли время 10, 20 и 30 оборотов вала. Для определения радиуса R крепления скоростной трубки использовали имеющуюся на стреле метку, расстояние от которой до оси ротативной машины, измеренное двумя разными методами, составляет $2509,9 \pm 1,8$ мм.

Разность между полным и статическим давлениями при скоростях 5 и 10 м/сек измеряли образцовым весовым микроманометром с пределами измерений от 0 до 100 н/м² ($\sim 0 \div 10$ мм вод. ст), на скорости 15 м/сек — микроманометром с наклонной трубкой, предварительно отградуированном по образцовому микроманометру с концевыми мерами длины.

Скорость «спутного» потока, возникающего в канале машины при движении трубки, была измерена термоанемометром с горизонтальной нитью системы К. Н. Васильева [9], размещенным выше траектории движущейся трубки примерно на 5 мм. Предварительно термоанемометр был отградуирован на этой же ротативной машине, для чего его устанавливали на стреле машины, а масляный затвор заменяли ртутным контактом. Для измерения возникающего «спутного» потока при вращении испытуемого термоанемометра в канале неподвижно закрепляли термоанемометр с уже известной градуировкой. Радиус установки термоанемометра и угловую скорость вращения стрелы измеряли так же, как при исследовании трубки. Помимо этого поддерживали заданную силу тока накала и измеряли э. д. с. для градуируемого и неподвижного термоанемометров. В результате градуировки получали зависимость между э. д. с. термоанемометра и скоростью потока при данной силе тока накала. Для расширения диапазона измеряемых скоростей термоанемометр градуировали при двух значениях силы тока i : при 270 ма для скоростей от 0,4 до 1,0 м/сек и при 340 ма для 1,0—2,5 м/сек. Полученные кривые градуировки термоанемометра № 8 с горизонтальной нитью показаны на рис. 6.

Для вычисления действительного значения плотности воздуха во время опыта измеряли атмосферное давление, температуру и влажность воздуха.

Измерения для определения коэффициента трубки начинали лишь после 100—150 оборотов стрелы вместе с трубкой и при установившемся характере потока в канале. В ходе опыта производили 10—12 измерений подряд, затем переключали подачу давления к камерам масляного затвора и измерения повторяли. Давление переключали, чтобы исключить возможность появления погрешности в измеряемой разности давлений из-за центробежных сил, возникающих при вращении затвора. Как и следовало ожидать, были получены практически одинаковые значения коэффициентов, независимо от подключения давления, поскольку затвор по размерам мал и влияние центробежных сил незначительно. В результате трех серий измерений коэффициента образцовой трубки № 1 для скоростей 5, 10 и 15 м/сек найдено, что среднее значение коэффи-



Рис. 5. Образцовая трубка с коническим носиком.

циента по данным всех измерений равно $\xi = 1,000$, а средняя квадратичная погрешность одной серии измерений $0,0013 \div 0,0016$.

Коэффициент образцовой трубки при скорости 15 м/сек был измерен также и методом «ионного облачка», значение его получено равным $1,000$ при том же порядке погрешности.

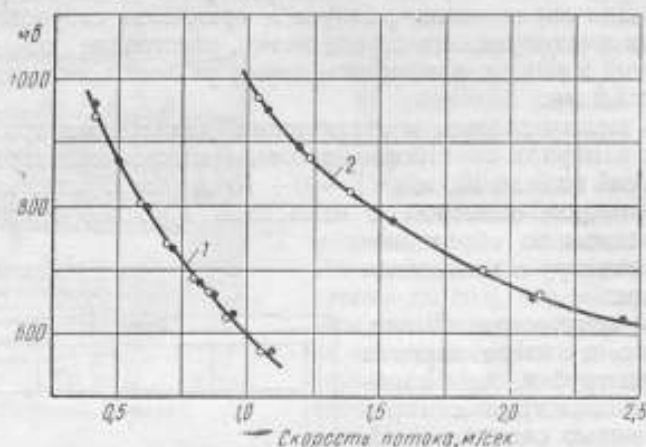


Рис. 6. Кривые градуировки термоанемометра с горизонтальной нитью:

1—при $i=270 \text{ ма}$; 2—при $i=340 \text{ ма}$.

○—I серия; ●—II серия.

Исследования коэффициентов скоростных трубок ВНИИМ методом «ионного облачка» и на ротативной машине показали, что их значения равны $1,000$ и постоянны для скоростей воздушного потока от 5 до 50 м/сек .

ЛИТЕРАТУРА

1. Часовников А. А., К вопросу по тарировке пито-статических трубок, Труды ВНИИМ, вып. 1 (61), 1948.
2. Riabochinsky D., Bulletin de l'Institut de Koutchino, Fac. IV, 1912.
3. Bramwell F. H., Relf E. F., Fage A. Technical Reports of the Advisory Committee for Aeronautics for 1912—13, No. 17, 1919.
4. Kumbusch H., Forschungsarbeiten, H. 240, 1921.
5. Ower E., The Measurement of Air Flow, 1949.
6. Ower E., Johanson F. C. Proceedings of the Royal Society of London, A 136, 1932.
7. Cole E., Transactions of the ASME, v. 57, No. 6, 1935.
8. Hubbard C. W., Transactions of the ASME, v. 61, No. 6, 1939.
9. Васильев К. Н., Исследование термоэлектрического анемометра, Труды ВНИИМ, вып. 20 (36), ОГИЗ, 1939.

Поступила в редакцию
11/1 1963 г.

ОБРАЗЦОВАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ УСКОРЕНИЙ В ПРЕДЕЛАХ от 10 до 250 g

Описывается созданная во ВНИИМ установка для проверки измерителей импульсных ускорений в диапазоне от 100 до 2500 м/сек², разобраны теоретические вопросы ее действия и приводятся данные о точности проверки.

Большинство датчиков акселерометров, измеряющих ускорения, возникающие при ударах, построено по схеме рис. 1. В корпусе 1 датчика находится инерционное тело 2, имеющее массу m и соединенное с корпусом при помощи упругого элемента 3.

Если сообщить корпусу датчика ускорение, направленное по стрелке A , то тело 2 начнет перемещаться относительно его стенок. Закон этого относительного перемещения будет зависеть от закона движения корпуса 1, от упругих свойств элемента 3 и от массы тел 2 и 3.

Принимая массу тел 2 и 3 пренебрежимо малой по сравнению с массой корпуса 1 и рассматривая процесс удара, можно следующим образом сформулировать в общем виде задачу проверки датчика: при ударе записана как функция от времени t одна из следующих величин: перемещение $s=f_1(t)$, скорость $s'=f_2(t)$ или ускорение $s''=f_3(t)$ тела 2 относительно корпуса 1. По одной из этих зависимостей надо определить абсолютное ускорение $s''_0=f_3(t)$, которое имел корпус. Как частный случай может быть поставлена задача — определить значение максимального абсолютного ускорения $s''_{0,max}$, которое действовало на корпус при ударе. Не вдаваясь в подробности решения этой задачи в общем виде, необходимо отметить, что основная сложность ее заключается в том, что зависимость $s''_0=f_3(t)$ заранее не известна и меняет свой вид для разных случаев и при повторных испытаниях. Надо еще учесть, что соударение значительных масс, связанных с датчиком, вызывает упругие колебания его деталей и тем самым вносит дополнительные неопределенные по величине погрешности. Задача устранения таких погрешностей может быть решена созданием такой установки, которая обеспечивает воздействие на корпус датчика постоянной, заранее заданной по величине и внезапно приложенной силы. Это означает, что должно быть соблюдено условие $s''_0=const$ на некотором промежутке

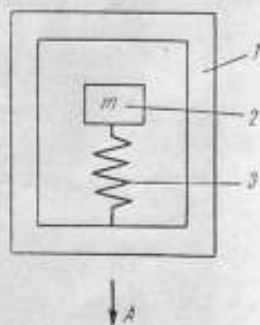


Рис. 1. Схема датчика акселерометра.

времени движения датчика. В таком направлении и решена во ВНИИМ задача создания образцовой установки.

Принципиальная схема установки*

Образцовая установка, общий вид которой приведен на рис. 2 и принципиальная схема — на рис. 3, имеет разрывное звено (проволоку) 4, прикрепленное к неподвижной опоре 5; подвешенную к нижнему концу звена 4 рамку 3 с укрепленным на ней датчиком 2 поверяемого акселерометра; упругий элемент (резиновую ленту) 1, подвешенный к

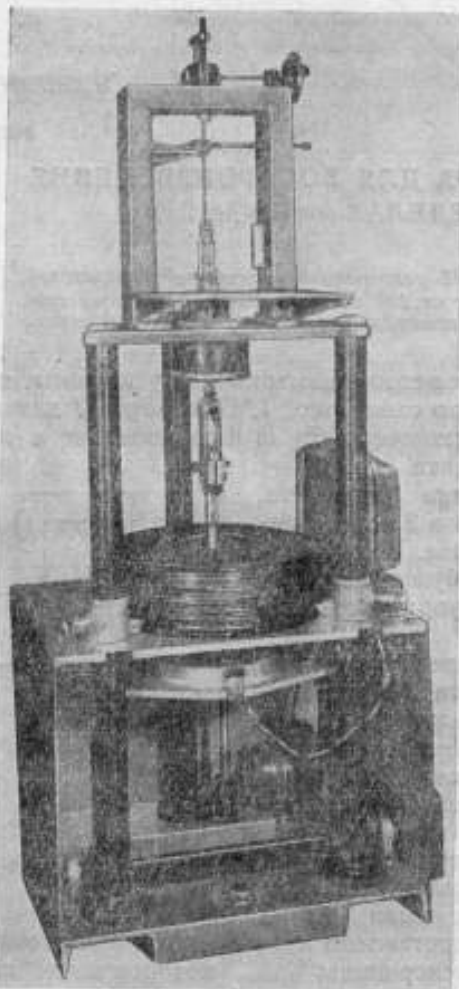


Рис. 2. Общий вид*образцовой установки для воспроизведения ускорения.

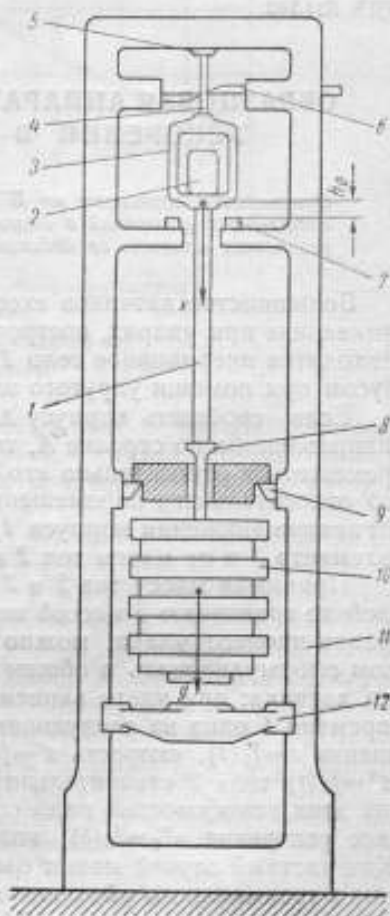


Рис. 3. Принципиальная схема установки.

рамке и нагруженный при помощи стержня 8 грузами 10; тормозное устройство 7 и ножницы 6.

Вес Q подвешенных деталей 1, 2, 3, 8 и 10 уравнивается реакцией проволоки 4. Если перерезать проволоку ножницами 6, то ее попе-

* Авторское свидетельство № 164495 (от 3 июня 1963 г.) — заявитель, ВНИИМ, автор изобретения А. И. Марциник, бюллетень изобретений № 15, август 1964, стр. 77.

речное сечение, имеющее площадь S и воспринимающее нагрузку Q , начнет уменьшаться и напряжение $\sigma = \frac{Q}{S}$ вследствие этого — увеличиваться, пока проволока не оборвется. При обрыве ускорение нижней ветви проволоки мгновенно достигает максимального значения. Усилие, с которым действуют на проволоку ножницы, направлено перпендикулярно к силе Q и поэтому не может оказать на нее влияние. Процесс перерубания проволоки продолжается менее 0,5 мсек.

Все изложенное выше имеет целью показать, что в выбранной схеме действительно заданное ускорение возникает мгновенно.

После обрыва проволоки детали 1, 2, 3, 8 и 10 начнут падать и будут представлять собой систему, не имеющую внешних связей. При этом массы 2 и 3, с одной стороны, и масса 10, с другой, начнут взаимно сближаться под действием упругого элемента, растянутого до этого силой, равной весу грузов 10. Следовательно, в системе падающих деталей, не имеющей внешних связей, начнет проявляться действие внутренней связи.

Пройдя путь «разбега» h_0 (рис. 3), рамка 3 с датчиком 2 акселерометра плавно остановится под действием тормоза 7.

Рассмотрим начальный момент движения рамки 3 с датчиком 2. После разрыва проволоки 4 на массу деталей 3 и 2 действует направленная вниз сила тяжести, равная их весу, и направленное вниз усилие, создаваемое упругим элементом и равное в начальный момент весу грузов 10, включая вес всех деталей, подвешенных к рамке 3.

В последующие моменты движения, по мере укорочения растянутого вначале упругого элемента, ускорение начнет уменьшаться. Это уменьшение ускорения будет незначительным на пути «разбега», составляющем в среднем 3 мм, если начальное удлинение упругого элемента (резины) под действием грузов 10 будет сравнительно велико (оно равно $L = 300$ мм). Вопрос этот более подробно рассмотрен дальше. Здесь следует только отметить, что, подбирая при заданных массах m_3 и m_4 деталей 3 и 4 соответствующие грузы 10, можно сообщать датчику 2 заранее рассчитанные, различные по величине ускорения.

Поверяют акселерометр на установке в следующей последовательности: к опоре 5 проволокой 4 прикрепляют рамку 3 с упругим элементом 1 и закрепленным на ней датчиком 2 поверяемого акселерометра; провода от датчика выводят в сторону от установки; к элементу 1 подвешивают стержень 8 с соответствующими грузами 10. Проволоку быстро перерезают ножницами 6 и датчик акселерометра получает ускорение, сохраняющее в начальный период движения (от 1 до 10 мсек) практически постоянное значение.

Далее показание акселерометра сличают с воспроизведенным значением ускорения для всех заданных точек шкалы акселерометра при разных грузах 10. На этом процесс поверки заканчивается.

Изложенное показывает, что установка позволяет воспроизводить отдельные, наперед заданные по величине ускорения, что делает ее пригодной для градуировки и поверки акселерометров, а также для оценки метрологических качеств этих приборов при испытании их типа.

Пределы измерений установки были приняты равными 10 ÷ 250 g. Чтобы обеспечить приемлемую точность в этих пределах измерений, была создана конструкция с рядом сменных частей.

Основной сложностью, с которой пришлось столкнуться при разработке установки, оказалось чрезвычайное разнообразие как по устройству, так по размеру и весу существующих типов акселерометров. Поэтому для возможности испытать на установке датчики акселерометров лю-

бого типа пришлось разработать универсальные устройства для их крепления и балансировки.

Набор грузов представлен 10 гириями, каждая из которых имеет вес, равный 150 г. Вес рамки — постоянный. Значение ускорения будет зависеть от веса датчика акселерометра. В некоторых случаях можно при заданном весе рамки и датчика подобрать такой груз, который способен обеспечить необходимое значение ускорения. В общем же случае придется добавлять к рамке грузики, взятые из разновеса. Подбор грузиков к рамке и балансировка ее усложняют поверку. Однако они неизбежны, пока не нормализован вес акселерометров.

Метрологические особенности установки

Установка имеет следующие особенности, характеризующие ее метрологические качества.

1. Заданное ускорение воспроизводят на установке путем соответствующей настройки, это исключает необходимость измерять ускорение, в действительности воздействующее на поверяемый акселерометр. Эта особенность выгодно отличает описываемую установку от других, особенно тех, в которых фотографируют кривую скорости $v=f(t)$ и далее дифференцированием определяют ускорение, так как получающиеся при этом погрешности довольно велики.

2. Ускорение рамки установки создается без соударения каких-либо масс в начальный момент движения, это исключает погрешности, которые появляются вследствие беспорядочных упругих колебаний деталей. Параметры же колебаний, возникающих при разрядке упругих деформаций частей установки вначале движения, могут быть заранее рассчитаны и их влияние устранено соответствующей конструкцией деталей.

3. Создаваемое ускорение является определенной, наперед заданной, практически постоянной величиной, действующей на пути $h_0=1-10$ мм или в течение $\Delta t=1-5$ мсек, что является существенным преимуществом выбранной схемы, отличающим ее от других установок. Отмеченная особенность схемы позволяет исследовать искажения, которые вносят датчики поверяемых акселерометров при измерении ускорений.

Образцовая установка ВНИИМ предназначена в основном для изучения перемещений инерционного тела относительно корпуса датчика при постоянном ускорении, действующем на корпус. Это дает возможность не только поверять акселерометры, но и проводить исчерпывающие исследования их, используя, в случае необходимости, для снятия частотных характеристик вибростенды.

Описание образцовой установки

Подъемный механизм для грузов 10 образцовой установки (рис. 2) состоит из траверсы 12, перемещающейся в вертикальном направлении по направляющим станины 11 при помощи приводного механизма, получающего движение от электродвигателя, не показанного на схеме.

В магазине 10 девять грузов имеют вес по 150 г каждый, а десятым грузом, весящим также 150 г, является стержень 8 с расположенной в нижней его части тарелкой для грузов. Тарелку ставят на траверсу 12. Стержень 8 нагружают следующим образом. Траверсу 12 с грузами 10 и стержнем 8 поднимают электродвигателем в крайнее верхнее положение. Затем траверсу опускают вниз и останавливают ее тогда, когда кромка крайнего нижнего из остающихся грузов расположилась против поворотных подхватов 9, расположенных на станине 11. Подхваты поворачи-

вают вручную, и они входят под кромку груза. Траверсе дают дальнейший ход вниз и она опускается с частью грузов, а остальные грузы остаются лежать на задвижках. Когда траверса опустится настолько, что грузы отделятся от нее и повиснут на тарелке стержня δ , ее останавливают. После этого перерубают ножницами b проволоку 4 , как уже указано выше.

Рамки 3 — сменные: одна — для датчиков весом до 10 н с пределами измерения ускорений от 10 до 50 g, другая — для датчиков весом до 1 н с пределами измерения от 50 до 250 g. Рамки имеют устройства для жесткой и центральной установки датчика. Тормоза 7 рассчитаны таким образом, чтобы при торможении рамки не возникали ускорения, превосходящие по абсолютной величине ускорение, действующее на рамку во время «разбега».

Высота установки 2 м, размеры основания 1×1 м, вес с набором грузов 3500 н.

Постоянство воспроизводимых на установке значений ускорения

Выше упоминалось, что воспроизводимое на установке ускорение не остается постоянным на пути h_0 (рис. 3). Определим изменение ускорения как функцию от пути x , где $0 < x \leq h_0$.

Массу всех деталей, жестко связанных с рамкой, обозначим m и подвешенных на рамке, включая массу резины l , обозначим M .

Рассматривая систему тел m, M (рис. 3), как имеющую две степени свободы движения, имеем для их масс

$$m\ddot{x} = mg + CL + C(y - x), \quad (1)$$

$$M\ddot{y} = Mg - CL - C(y - x), \quad (2)$$

где L — удлинение упругого элемента, пропорциональное в первом приближении усилию $Mg = CL$.

Отсюда

$$\ddot{x} + \frac{(M+m)C}{mM} \dot{x} = \frac{(M+m)gC}{mM}. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) дает

$$x = C_1 + C_2 t + C_3 \cos kt + C_4 \sin kt + \frac{g}{2} t^2, \quad (4)$$

$$\dot{x} = C_2 - kC_3 \sin kt + kC_4 \cos kt + gt, \quad (5)$$

$$\ddot{x} = -k^2 C_3 \cos kt - k^2 C_4 \sin kt + g, \quad (6)$$

$$\ddot{x} = k^2 C_3 \sin kt - k^2 C_4 \cos kt, \quad (7)$$

где t — время, k — круговая частота.

Постоянные интегрирования C_1 — C_4 определяются из условий:

$$1) \quad x = 0; \quad \dot{x} = 0; \quad \ddot{x} = \frac{M+m}{m} g \quad \text{при} \quad t = 0;$$

$$2) \quad \ddot{x} = 0 \quad \text{при} \quad t = 0.$$

Отсюда

$$x = \frac{g}{2} t^2 + \frac{Mg}{mk^2} (1 - \cos kt), \quad (8)$$

$$\ddot{x} = g + \frac{M}{m} g \cos kt, \quad (9)$$

где

$$k = \sqrt{\frac{g(M+m)}{mL}}. \quad (10)$$

Изменение ускорения \ddot{x} на пути «разбега» определяют по уравнению (9). Это ускорение при самых неблагоприятных условиях (путь «разбега» $h_0 \approx 3$ мм, $M/m = 10$ и при $L = 300$ мм) уменьшится к началу торможения всего на 1%.

Учитывая незначительность этой величины, можно принимать ускорение на пути «разбега» постоянным и равным 99,5% от $\frac{M+m}{m} g$, допуская при этом неточность, не превышающую 0,5%. В случае же необходимости всегда может быть сделан более точный расчет с учетом уравнения (9).

При уточненном расчете веса добавочных грузов надо учесть в уравнении (1) влияние массы упругого элемента I . Последнее, как известно, эквивалентно присоединению одной трети массы резины. Эта поправка практически не влияет на результат.

Результаты экспериментального исследования установки

Закон изменения ускорения, воспроизводимого на установке, определяется, как показано выше, теоретически с достаточной точностью. Поэтому установка не требует экспериментальной проверки для промежутка времени от начала движения и до момента соприкосновения рамки с тормозом. Однако влияние тормоза можно установить только опытом. Следует при этом заметить, что высокой точности здесь не требуется, так как этот «участок» движения не представляет интереса для целей самой поверки. Необходимо лишь установить порядок величины отрицательных ускорений с тем, чтобы проверить, правильно ли отрегулировано тормозящее устройство и не возникают ли при начале торможения удары, сопровождаемые ускорениями, превосходящими по величине действующие в период «разбега».

Необходимость такого исследования диктуется тем, что большие ускорения при начале торможения влекут за собой неверные показания поверяемых предельных акселерометров.

Исследование было выполнено при помощи катодного осциллографа. При этом были получены осциллограммы с записью скорости катушки индукционного датчика, равной скорости рамки.

В результате проведенных исследований установлено, что ускорения при торможении не превосходят 75% задаваемых ускорений.

Выводы

1. Созданная во ВНИИМ образцовая установка для поверки и градуировки акселерометров позволяет воспроизводить ускорение в диапазоне 10–250 g .

2. Погрешность воспроизводимых на установке ускорений не превышает 0,5%.

3. Установка пригодна для поверки датчиков акселерометров различных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левандовский А., Конструкция приборов для измерения ускорений, Теоретические основы измерения ускорений, «Pomiary Automata Kontrola», № 6, Польша, 1956, стр. 204.
2. Баргер И. Б., Создание и измерение больших ускорений, автореферат диссертации, ЛПИ, 1951.
3. Покровский В. В., Стенды для вибрационных и ударных испытаний, Труды ЛПИ, № 192, 1958.

Поступила в редакцию
4/XII 1966 г.

ВИБРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА СО СТРОБОИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУД ВИБРАЦИЙ

Описана разработанная во ВНИИМ интерференционная установка, применяемая при поверке образцовых пьезодатчиков, предназначенных для измерения виброускорений.

Воспроизведение вибраций на образцовых установках, основанных на абсолютных методах измерений, требует разработки прецизионных колебательных устройств и точных методов измерения параметров вибраций, главными из которых являются амплитуда и частота.

Амплитуды смещения, измеренные с помощью микроскопов, обеспечивают погрешность измерения ± 1 мкм. Повышение точности измерения амплитуд вибраций требует перехода на другие способы измерения, в частности, возможен интерференционный метод.

До настоящего времени разработаны и описаны в литературе следующие способы измерения амплитуд механических колебаний, в которых применяется интерференционный метод:

а) способ Остерберга [1] — сравнение амплитуд колебаний с длиной световой волны, счет максимума и исчезновения интерференционной картины;

б) способ Горелика [2—3] — применение модуляционного метода в оптической интерференции;

в) способ Таланского [4] — многолучевой метод.

Для поверки вибродатчиков в звуковом диапазоне частот Е. Смит, Э. Эдельман, Е. Джонс и В. Шмидт [5] изготовили интерференционное устройство с интерферометром типа Физо. В нем стробоскопический источник света с длиной волны 0,5876 мкм создается импульсной лампой «Сенто» и фильтром. Питается лампа от генератора типа 2120А «Электроимпульс». Поверхности кварцевых зеркал покрыты многослойным диэлектрическим слоем, с коэффициентом отражения, равным 90%.

При повторных измерениях равномерность напряжения пускового импульса смещает интерференционную картину и по существу повторное измерение производится на другом участке поверхности подвижного зеркала.

Наибольшая амплитуда смещения, измеренная интерферометром типа Физо и освещаемая стробоскопическим монохроматическим светом, не превышает 0,08 мкм при погрешности $\pm 6\%$.

Интерференционные устройства, предназначенные для измерения амплитуд смещения, можно разделить на две группы.

В первую группу входят устройства, служащие для измерения весьма малых амплитуд смещения и применяемые для изучения колебаний пьезокристаллов главным образом в ультразвуковом диапазоне частот. Во вторую — устройства для измерения амплитуд смещения на вибрационных установках с пределом измерений от долей световой волны до 3λ , т. е. в звуковом диапазоне частот. Эти две группы устройств пригодны для измерений, выполняемых на пьезоэлектрических виброплатформах, пределы амплитуд которых не превышают 1,5 мкм. Электродинамические установки охватывают более широкий диапазон амплитуд от 0,05 до 10 мкм. Для измерения этих амплитуд во ВНИИМ разработаны интерференционные устройства [6].

Мы опускаем обзор интерференционных устройств, которые в настоящее время имеют широкое применение, но по существу являются разновидностью перечисленных выше методов [7—9].

Вибрационная установка со стробинтерференционным устройством

На рис. 1 приведена схема этой установки. В нее входят: звуковой генератор 1, осциллограф 2, генератор 3, интерферометр 4, электродинамический вибратор с набором резонансных систем 5, вольтметр 7, источники питания 6 и 8.

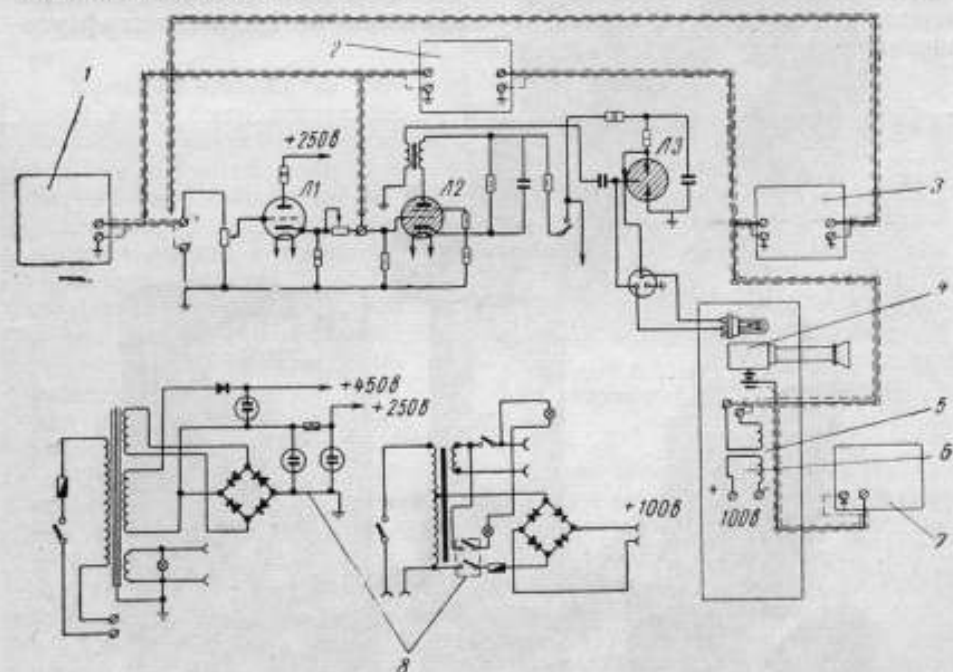


Рис. 1. Схема вибрационной установки со стробинтерференционным измерением амплитуд смещения:

1—генератор ГЗ-36; 2—осциллограф С1-1; 3—генератор ГЗ-18; 4—интерферометр; 5—вибростенд;
7—вольтметр ВЗ-7; 6 и 8—источники питания; А1—БНП; А2—ТГ1-0,1/1,3; А3—ИСШ15.

Катушка подмагничивания 6 виброплатформы питается постоянным током, а в подвижную катушку подается синусоидальный переменный ток от звукового генератора 1.

Амплитуды механических колебаний измеряют стробинтерференционным методом с помощью специального устройства. Частоту колебаний подвижной системы определяют сравнением частоты звукового генератора с частотой измерительной установки УЧ-2 и эталонной частотой ВНИИМ. Контрольный датчик колебательной системы позволяет производить сравнительные измерения ламповым вольтметром, предварительно проградуированным в соответствующих значениях напряжения датчика.

Вибрационная установка (10) работает на электродинамическом принципе взаимодействия двух электромагнитных полей — постоянного электромагнита и переменного подвижной катушки.

Для получения устойчивых амплитуд смещения платформы подвижная система изготовлена из одной заготовки. Упругим элементом служит трубчатый стержень, испытывающий знакопеременную нагрузку: растяжение — сжатие.

Магнитная цепь вибратора состоит из магнитопровода с керном. В основании магнитопровода крепят хвостовик колебательной системы.

Стробинтерференционное устройство

Стробоскопический эффект дает возможность визуально наблюдать процессы, быстро протекающие во времени и периодически повторяющиеся. В рассматриваемом случае перемещающимся объектом является черная ахроматическая полоса, возникающая вследствие интерференции двух лучей.



Рис. 2. Образцовая вибрационная установка В1000.

Интерференционное устройство выполнено по схеме двухлучевого интерферометра Майкельсона. В нем подвижное зеркало жестко связано с торцовой плоскостью датчика платформы; перемещение датчика относительно его начального положения вызывает смещение черной ахроматической полосы, по размаху которой амплитуда смещения измеряется с высокой точностью.

Изготовлено два устройства: одно для измерения амплитуд смещения на платформе, удаленной от поля рассеяния [9], другое — для измерения амплитуд непосредственно на подвижной поверхности вибратора.

На рис. 2 дан общий вид образцовой электродинамической вибрационной установки с интерференционным устройством измерения амплитуды механических колебаний.

Источником света служит ксеноновая импульсная лампа, частота зажигания которой близка к частоте колебаний вибростенда. Черная ахроматическая полоса, наблюдаемая в поле зрения микроскопа, колеблется с частотой, равной разности частот вынужденных колебаний подвижной системы и частоты вспышки стробоскопа.

Крайние положения полосы могут быть отсчитаны по шкале микроскопа и выражены в длинах волн монохроматического света, выделенного из спектра ксеноновой лампы, с помощью светового фильтра.

Для градуировки шкалы и измерений амплитуд методом Остерберга применяют лампу накаливания, для измерений амплитуд по размаху служит стробоскопическая лампа.

Интерференционная трубка в установке жестко укреплена на верхнем основании. Наклон и перемещение трубки обеспечиваются поворотом ее в упругих шарнирах. Вращением основного колеса приводятся в движение три малых колеса, оси которых вращаются в резьбовых втулках. На концах осей укреплены шарики, установленные на три полированные опоры, последние укреплены на массивном основании.

Для снижения уровня внешних помех при измерении амплитуд смещения, установку с интерференционным устройством монтируют на виброгасящем фундаменте [11], состоящем из надрессорной части, демпфера, пружин подрессорной части и упругого основания. Внешние помехи на фундаменте не превышают 0,05 мкм.

Вибрационная установка с многолучевым интерферометром

На рис. 3 дан общий вид установки, на рис. 4 показана оптическая схема многолучевого интерферометра.

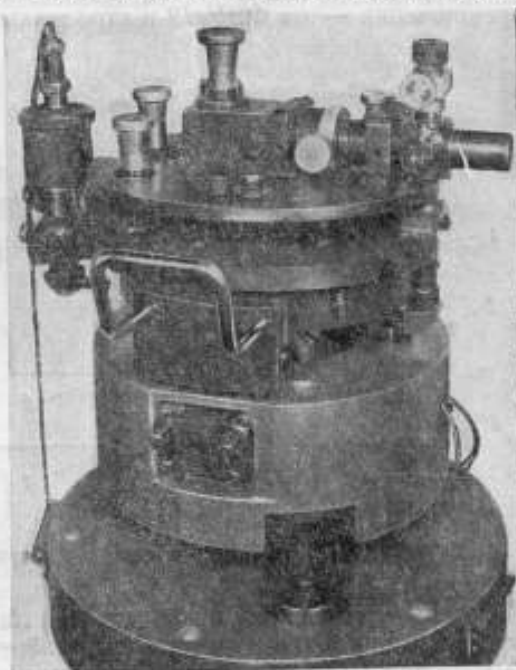


Рис. 3. Внешний вид вибрационной установки с многолучевым интерферометром.

Для получения высокой точности измерений в установке применен интерферометр Фабри—Перо. В качестве источника света выбрана мощная лампа накаливания, ширина линии которой значительно больше предела разрешения, что несколько снижает преимущества метода.

Пучок света от лампы 1 собирается конденсором 2 и направляется на светоделительный куб 3, отражается от него и попадает в объектив 5 через фильтр 4 или без него — на щель с перекрестием. Пройдя объектив, пучок света падает на куб 6, связывающий два эталона 7 и 9. Отражаясь от подвижного зеркала 8, пучок лучей проходит через куб 6, верхний эталон 9, объектив 10, зеркало 11, через щель, собирается объективом 12 и направляется на второй светоделительный куб 13, отражается от него и попадает в фокальную плоскость окуляра 17, или при переключении — на ФЭУ 19 и стрелочный прибор 20.

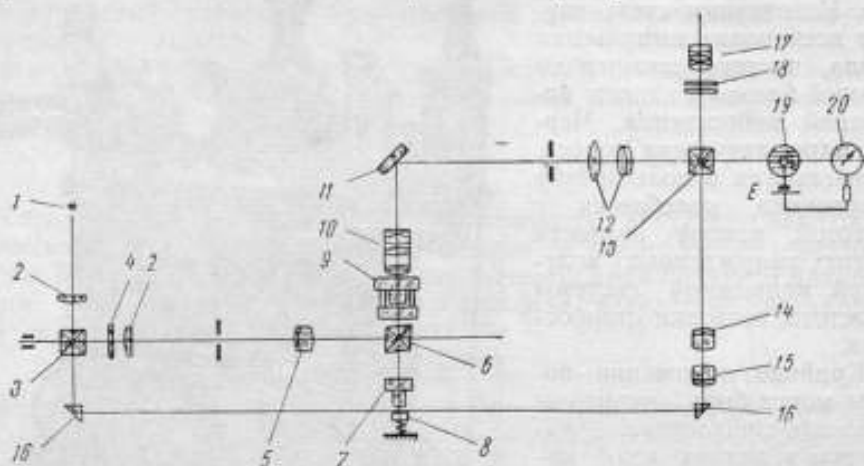


Рис. 4. Схема оптического многолучевого интерферометра.

С целью увеличения контрастности линии в оптической схеме интерферометра применены два эталона Фабри—Перо. В первом эталоне зазор воздушного промежутка δ_1 между подвижным зеркалом 8 и зеркалом 7 и во втором эталоне 9 зазор δ_2 совпадают по толщине. Величину зазора δ_1 определяют переключением светоделительного куба 3, при этом пучок света направляется на призму 16, через щель δ_1 , на другую призму 16, в объектив 14—15 через куб 13 и окуляр 17, где по шкале 18 устанавливают ширину зазора δ_1 в делениях шкалы.

Помехами для измерений двумя эталонами служит фон дополнительных отражений зеркал. Для статических измерений линейного смещения δ_1 можно частично уменьшить фон, наклонив один эталон по отношению к другому таким образом, чтобы пучки, появляющиеся вследствие дополнительных отражений, давали изображение вне поля наблюдения.

Для динамических измерений амплитуды смещения $\delta_1 + 2S$ этот прием уменьшения фона недопустим, так как к вибратору предъявляется требование однонаправленности колебаний зеркала с минимальными боковыми составляющими. С целью уменьшения фона дополнительных отражений в конструкции интерферометра применен скошенный куб 6, а эталоны 7 и 9 раздвинуты на расстояние 65 мм так, чтобы значительная часть расходящихся лучей дополнительно многократно отражающихся, не попадала на рабочие поверхности эталонов.

Измерение амплитуды смещения

Амплитуды колебаний платформы связаны с перемещением черной ахроматической полосы уравнением

$$2S = 0,5\lambda Cn, \quad (1)$$

где λ — длина волны;

C — цена деления шкалы интерферометра в $\mu\text{м}/\text{дел}$;

n — размах ахроматической полосы в делениях шкалы.

Величину C можно менять в пределах от 0,05 до 0,2 $\mu\text{м}$, поворачивая основное зеркало интерферометра.

Шкалу градуируют путем совмещения количества интерференционных полос k в соответствующем количестве m делений шкалы. Подставляя их отношение в формулу (1), получим

$$2S = 0,5\lambda \frac{k}{m} n, \quad (2)$$

где m — подсчет делений.

В формуле (2) погрешность S определяется погрешностью k/m . Поэтому дисперсия относительной погрешности $|\frac{\Delta S}{S}|$, если пренебречь относительно малой погрешностью отсчета $\Delta\lambda$ и подсчета делений m , будет

$$D\left(\frac{\Delta S}{S}\right) = D\left(\frac{\Delta k}{k}\right) + D\left[\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right], \quad (3)$$

Среднее относительное квадратичное отклонение измеряемой амплитуды равно

$$\frac{\sigma_S}{S} = \sqrt{\frac{\sigma_k^2}{k^2} + \frac{\sigma_\lambda^2}{\lambda^2}}, \quad (4)$$

а предельная погрешность при $P = 99,7\%$

$$\frac{\Delta S_{np}}{S} = 3 \sqrt{\frac{\sigma_k^2}{k^2} + \frac{\sigma_\lambda^2}{\lambda^2}}, \quad (5)$$

откуда значение $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 4,10 \cdot 10^{-3}$ $\mu\text{м}$, δ_k , как показали измерения, равна 0,1 полосы.

Подставив эти значения в формулу (5), получим

$$\frac{\Delta S}{S} = 3 \left[\left(\frac{0,1}{k}\right)^2 + 0,11 \cdot 10^{-6} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

При $k = 8$ будем иметь $\frac{\Delta S}{S} = 0,034$, т. е. 3,4%. Таким образом, при цене деления 0,05 $\mu\text{м}/\text{дел}$ и максимальной амплитуде $2S = 5 \mu\text{м}$, предельная погрешность измерения не превышает 3%.

В случае многолучевой интерференции наблюдают в окуляр визуальным или фотоэлектрическим методами периодические максимумы и минимумы интерференционной картины, соответствующие амплитудам колебаний. Интерференция многих близких по интенсивности лучей дает распределение освещенности, создающее резкое падение интенсивности от максимума к минимуму, и чем больше лучей интерферирует между собой, тем с большей резкостью выделяются максимумы n и $n+1$ порядков.

Интенсивность многолучевой интерференции, выражающая зависимость между амплитудой S и длиной волны λ источника света [5] будет

$$I_1 = K_1 \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0 \left(\frac{4\pi S l}{\lambda} \right) \cos \frac{2\pi h x}{b} \right],$$

где

$J_0 \left(\frac{4\pi S l}{\lambda} \right)$ — функция Бесселя;

x — линейная координата, перпендикулярная интерференционным полосам;

h — ширина полос;

A_n — амплитуды смещения высших порядков;

$K_1; K_2$ — постоянные.

При сопоставлении интенсивностей многолучевой интерференции с двухлучевой [1] обнаруживается преимущество последней

$$I_2 = K_2 \left[1 + J_0 \left(\frac{4\pi S l}{\lambda} \right) \cos \frac{2\pi h x}{b} \right].$$

Двухлучевая интерференция дает четкое чередование максимумов и минимумов освещенности. В случае многолучевой интерференции такой четкости при смещениях, превышающих 0,5 мкм, не наблюдается. Поэтому исследуемый метод пригоден только для очень малых амплитуд колебаний, которые наблюдаются на пьезоэлектрических вибраторах в ультразвуковом диапазоне частот.

Погрешность измерения амплитуд многолучевым интерферометром достигает 10% при амплитудах 0,5 мкм, в то время как двухлучевой интерферометр позволяет эту же амплитуду измерить с погрешностью 3%. Подробный анализ аналитических зависимостей I_1 и I_2 показывает, что нелинейные искажения при многолучевом методе искажают результаты больше, чем при двухлучевом. Таким образом многолучевой метод, не анализируя очень малые амплитуды, невыгодно отличается от двухлучевого.

Колебания платформы, амплитуда которых имеет минимальные нелинейные искажения, создаются маломощным синусоидальным источником на резонансах подвижной системы.

Основная частота стержня с заделанным и свободным концом с массой, сосредоточенной на нем, рассчитывается энергетическим методом. Если μ — масса на единицу длины стержня, а M — сосредоточенная масса, то приведенная кинетическая энергия будет

$$T = \frac{1}{2} \left[\int_0^l \mu v^2 dx + v^2(l)M \right],$$

где l — длина стержня;

v — амплитуда колебаний.

Тогда верхняя граница наименьшей собственной частоты определится по формуле

$$\omega_1^2 \leq \frac{\int_0^l EI v^{12} dx}{\int_0^l \mu v^2 dx + v^2(l)M}.$$

Если в первом приближении пренебречь массой стержня $\mu=0$, то число колебаний виброплатформы в секунду

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{Ml^3} - \frac{3g}{2l}}$$

где $\frac{3EI}{l} = c$ — жесткость стержня;

g — ускорение силы тяжести.

Для свободно опертого магнитопровода, скрепленного с подвижной системой, свободные колебания рассчитываются с учетом колебания двух масс M_1 и M_2 , соединенных между собой стержнем, жесткость которого c . Число колебаний в секунду

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c(M_1 + M_2)}{M_1 M_2}}$$

Частоты свободных колебаний систем различной жесткости, изготовленных из дюрала, оказались равными 725 и 1050 гц, что дает удовлетворительное совпадение с данными расчета (700 и 1000 гц).

Амплитудная характеристика датчика

Амплитудная характеристика датчика установки была снята на частотах вынужденных колебаний подвижной системы и на частотах 725 и 1050 гц.

От звукового генератора на подвижную катушку виброплатформы подается синусоидальное напряжение. К выходу звукового генератора подключают электронный осциллограф. На этот же осциллограф подключается другой звуковой генератор, питающий стробоскопическое устройство с частотой $f \pm \Delta f$, где $\Delta f < 1$ гц. Скорость смещения черной ахроматической полосы регулируется скоростью изменения фигуры Лиссажу на экране осциллографа. Сигнал датчика подается на ламповый вольтметр. Высокая чувствительность пьезокварцевого датчика обеспечивает необходимое напряжение при малых амплитудах смещения.

Линейная зависимость напряжения от амплитуды незначительно нарушается на участках 2—6 мк. Эти отклонения вызваны смещением опорного зеркала у первого интерферометра вследствие поворота спиц. Замена винтовых пружин на плоские во втором интерферометре повысила линейность амплитудной характеристики датчика.

Разработанная и созданная вибрационная установка воспроизводит в вынужденном режиме механические колебания от 300 до 10 000 гц и на отдельных резонансных «точках» — в диапазоне частот 700—1000 гц; установка развивает ускорения до 15g. Боковые составляющие ее по отношению к основному перемещению не превышают 0,5%. Коэффициент нелинейных искажений — 0,2%. Отсчетное устройство — трехшкального типа с ценой деления 0,05; 0,10 и 0,2 мкм/дел, при верхних пределах соответственно 5, 10 и 20 мкм и относительных погрешностях 3,4 и 1,4%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Osterberg H., Optical J. Soc. Am., v. 22, 1932.
2. Горелик Г. С., О применении модуляционного метода в оптической интерферометрии, ДАН, № 4, т. 83, 1952.
3. Берштейн И. Л., Опыт Саньяка на радиоволнах, ДАН, т. 75, 1950.
4. Tolansky A., Proc. Phys. Soc. 64, 1951.
5. Smith E., Edelman S., J. Am., v. 30, No. 9, 1958.

6. Шкадилов В. С., Точные методы измерения параметров вибраций, Труды институтов Госкомитета, 76 (136), 1965.

7. Давидов Б. С., Измерение малых амплитуд механических колебаний, ПТЭ, № 5, 1953.

8. Иорш Ю. И., Измерения вибраций, Машгиз, 1963.

9. Дунин-Барковский, Пьезопрофилометры и измерения шероховатости поверхности, Машгиз, 1961.

10. Шкадилов В. С., Интерференционные методы измерения амплитуд механических вибраций ГОСИНТИ, № 31-63-447/7, 1963.

Поступила в редакцию
19/XII 1964 г.

В

В

В

В

В

В

В

В

В

В

В

В

В

В

В

В

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКОВЫМ МЕТОДОМ

Даются описание и расчет параметров образцовой установки, предназначенной для проверки торсиометров в диапазоне частот 50–200 гц при амплитудах угловых колебаний до 0,01 рад, измеряемых с погрешностями не выше 1%.

Анализ различных методов воспроизведения и измерения параметров угловых колебаний [1–3] показал, что одним из наилучших может оказаться устройство, основанное на маятниковом методе.

Принципиальная схема установки, а также ее эквивалентная электрическая схема, состоящая из приведенной индуктивности L и активного сопротивления R , показана на рис. 1. Принцип действия ее тот же,

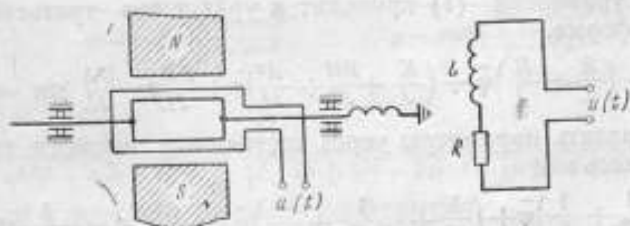


Рис. 1. Принципиальная и эквивалентная электрическая схема.

что и у вибрационного гальванометра. Рамка сечением S_p , состоящая из w витков, расположена в поле постоянного магнита с индукцией B в зазоре. Если через рамку проходит переменный ток I , то на нее будет действовать переменный вращающий момент $M = BS_p w I_0 \sin \omega t$, который вызовет вынужденные колебания подвижной части установки. Конструктивно она состоит из пустотелого цилиндра 1, который вращается вокруг оси AB (рис. 2а).

Обмотка на цилиндре выполнена в виде рамки 2. Магнитное поле создается постоянным магнитом 3. Подвижная система, имеющая момент инерции J , связана с корпусом установки при помощи упругих подвесок (рис. 2б), конструкция которых обеспечивает постоянную угловую жесткость при угловых смещениях φ подвижной системы от положения равновесия до 0,15 рад.

Амплитуды угловых колебаний измеряют при помощи оптического устройства. Поверяемый торсионметр крепят на свободном конце вала подвижной системы установки.

Теория маятникового метода

Если допустить, как это следует из опытных результатов, что угловая жесткость подвеса K постоянна, то дифференциальные уравнения движения маятника и равенства напряжений и для контура LR , состоящего из рамки и внешней цепи, будут

$$\left. \begin{aligned} J\ddot{\varphi} + H\dot{\varphi} + K\varphi &= AI, \\ Li + Ri + A\dot{\varphi} &= U, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $A = BS_p\omega$ — электромеханический коэффициент преобразования;
 H — коэффициент, учитывающий действие сил трения.

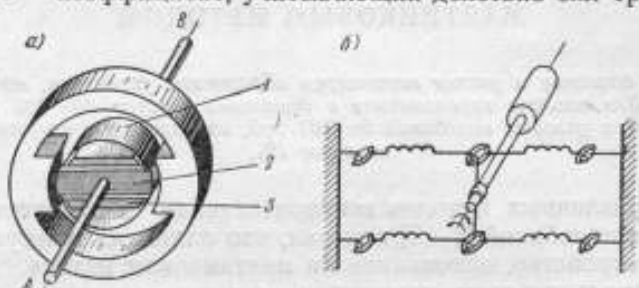


Рис. 2. Конструкция установки и схема конструкции упругих подвесок.

Система уравнений (1) приводит к уравнению третьего порядка в следующей форме.

$$\ddot{\varphi} + \left(\frac{R}{L} + \frac{H}{J}\right)\dot{\varphi} + \left(\frac{K}{J} + \frac{RH}{JL} + \frac{A^2}{JL}\right)\varphi + \frac{KR}{JL}\varphi = \frac{UA}{JL} \sin \omega t. \quad (2)$$

Если выразить параметры через постоянные времени, то уравнение (2) будет иметь вид

$$\ddot{\varphi} + \left(\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_m}\right)\dot{\varphi} + \left(\frac{1}{T_{ом}^2} + \frac{1}{T_s T_m} + \frac{1}{T_{эм}^2}\right)\varphi + \frac{1}{T_{эм}^2 T_n} \varphi = \frac{1}{T_n T_{эм}^2} \sin \omega t,$$

где T_s , T_m , $T_{эм}$, T_n — постоянные времени: электрическая, механическая, электромеханическая и электропривода;

$T_{эм}$ — период колебаний с собственной частотой $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{J}}$.

Параметры R , L и A не являются независимыми величинами, так как они представляют собой функции числа витков ω в уравнениях

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{\rho l_0 \omega}{S_{пр}}, \\ L &= \alpha \omega^2, \\ A &= BS_p \omega, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где ρ — удельное сопротивление провода рамки;

α — коэффициент пропорциональности при вычислении индуктивности;

l_0 — длина витка рамки;

$S_{пр}$ — площадь сечения провода.

Поэтому, если в уравнении (2) выразить параметры только через независимые величины, то оно примет вид

$$\ddot{\varphi} + \left(\frac{\rho l_0}{S_{np} \alpha \omega} + \frac{H}{J} \right) \dot{\varphi} + \left(\frac{K}{J} + \frac{\rho l_0 H}{S_{np} J \alpha \omega} + \frac{B^2 S_p^2}{J \alpha} \right) \varphi + \frac{\rho l_0 K}{S_{np} J \alpha \omega} \varphi = \frac{U B S_0}{J \alpha \omega} \sin \omega t. \quad (4)$$

Величины

$$\left. \begin{aligned} \frac{\rho l_0}{S_{np} \alpha \omega} + \frac{H}{J} = r; \quad \frac{K}{J} + \frac{\rho l_0 H}{S_{np} J \alpha \omega} + \frac{B^2 S_p^2}{J \alpha} = n; \\ \frac{\rho l_0 K}{S_{np} J \alpha \omega} = p \quad \text{и} \quad \frac{U B S}{J \alpha \omega} = q \end{aligned} \right\} \quad (4a)$$

являются обобщенными параметрами системы, поэтому уравнение (2) может быть записано так

$$\ddot{\varphi} + r \dot{\varphi} + n \varphi + p \varphi = q \sin \omega t. \quad (5)$$

Общее решение уравнения (5) имеет вид

$$\varphi_{\text{общ}} = e^{at} (C_1 \cos bt + C_2 \sin bt) + C_3 e^{i \omega t}, \quad (6)$$

где $\lambda_{1,2} = a \pm ib$;

C_1, C_2, C_3 — постоянные интегрирования.

Частное решение его будет

$$\varphi_r = N \cos \omega t + Q \sin \omega t. \quad (7)$$

Здесь

$$N = - \frac{q \frac{n\omega - \omega^2}{p - r\omega^2}}{p - r\omega^2 + \frac{(\omega^2 - n\omega)^2}{p - r\omega^2}}, \quad Q = \frac{q}{p - r\omega^2 + \frac{(\omega^2 - n\omega)^2}{p - r\omega^2}}$$

или

$$\varphi_r = \frac{q \sin(\omega t + \psi)}{\sqrt{(p - \omega^2 r)^2 + (\omega n - \omega^2)^2}} = \frac{q \sin(\omega t + \psi)}{\sqrt{\omega^4 + (r^2 - 2n)\omega^2 + (n^2 - 2rp)\omega^2 + p^2}}$$

Сдвиг фазы ψ можно определить по формуле

$$\psi = \arctg \frac{Q}{N}.$$

Амплитуда вынужденных колебаний выражается уравнением

$$\varphi_0 = \frac{q}{\sqrt{\omega^4 + (r^2 - 2n)\omega^2 + (n^2 - 2rp)\omega^2 + p^2}}, \quad (8)$$

или

$$\varphi_0 = \frac{U A}{\sqrt{[RK - \omega^2(RJ + LH)]^2 + [\omega(RH + LK + A^2) - LJ\omega^2]^2}}, \quad (9)$$

или

$$\varphi_0 = \frac{U B S_p \omega}{\sqrt{\left[\frac{\rho l_0 \omega K}{S_{np}} - \omega^2 \left(\frac{\rho l_0 \omega J}{S_{np}} + \alpha \omega^2 H \right) \right]^2 + \left[\omega \left(\frac{\rho l_0 \omega H}{S_{np}} + \alpha \omega^2 K + B^2 S_p^2 \omega^2 \right) - J \alpha \omega^2 \omega^2 \right]^2}}. \quad (10)$$

Таким образом, если величины $\rho, l_0, \omega, K, S_{np}, \alpha, H, U, B, S_0$ будут заданы или измерены, то тем самым будет определено значение амплитуды вынужденных угловых колебаний.

Амплитудно-частотная характеристика маятника.

Амплитудно-частотная характеристика маятника с электродинамическим приводом при значениях $n=64 \text{ сек}^{-2}$; $r=1 \text{ сек}^{-1}$; $q=320 \text{ сек}^{-3}$, $p=40 \text{ сек}^{-3}$ показана на рис. 3.

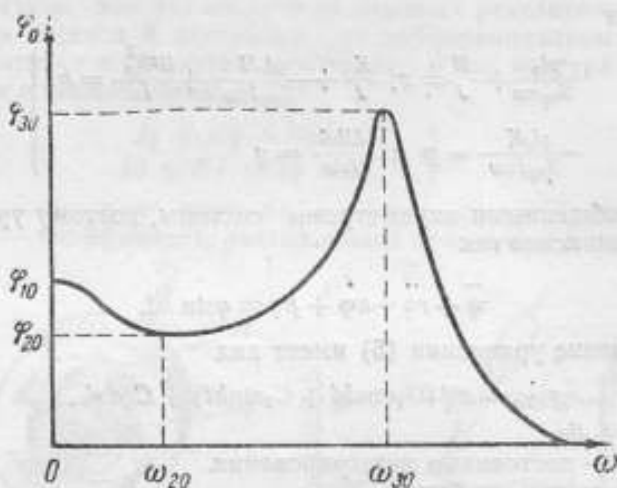


Рис. 3. График зависимости $\varphi_0 = f(\omega)$.

Условия устойчивости движения маятника (критерий Гурвица) дают неравенства

$$\Delta_2 = rn - p > 0; \Delta_3 = (rn - p)p > 0, \text{ т. е. } p > 0.$$

Так как $r > 0$, то и $n > 0$.

Минимум и максимум частотной характеристики, соответствующие частотам ω_{20} и ω_{30} определяются уравнением

$$\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = \omega^3 + \frac{2}{3}(r^2 - 2n)\omega^2 + \frac{1}{3}(n^2 - 2rp)\omega = 0, \quad (11)$$

откуда

$$\omega_{10} = 0;$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_{20} &= \sqrt{-\frac{1}{3}(r^2 - 2n) - \sqrt{\frac{1}{9}(r^2 - 2n)^2 - \frac{1}{3}(n^2 - 2rp)}}; \\ \omega_{30} &= \sqrt{-\frac{1}{3}(r^2 - 2n) + \sqrt{\frac{1}{9}(r^2 - 2n)^2 - \frac{1}{3}(n^2 - 2rp)}}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Корни уравнений (12) будут вещественны при условиях

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{\frac{1}{9}(r^2 - 2n)^2 - \frac{1}{3}(n^2 - 2rp)} &> 0, \\ -\frac{1}{3}(r^2 - 2n) - \sqrt{\frac{1}{9}(r^2 - 2n)^2 - \frac{1}{3}(n^2 - 2rp)} &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

В противном случае зависимость $\varphi_0 = f(\omega)$ будет близка к гиперболической.

Если соблюдены условия

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{3}(r^2 - 2n)^2 - n^2 + 2rp &= 0, \\ 2n - r^2 &> 0, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

то в точке кривой $\varphi_0 = f(\omega)$, соответствующей значению частоты $\omega = \sqrt{2n - r^2}$ будет наблюдаться перегиб, а максимума и минимума не будет.

Рассмотрим далее влияние параметров r, n, p на амплитудно-частотную характеристику.

Из уравнения (8) следует, что амплитуда колебаний зависит от соотношений между параметрами r, n, p, q и от частоты. В реальных условиях эти соотношения соответствуют областям

$$\left. \begin{aligned} 10^{-5} \leq \frac{n}{p} \leq 1, \\ 10^2 \leq \frac{n}{r} \leq 10^5. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

На низких частотах ($\omega \div 10$ гц) существенное влияние на амплитуду оказывает параметр p , в частности при $\omega = 0$

$$\varphi_{10} = \frac{q}{p}. \quad (16)$$

С ростом частоты влияние этого параметра резко падает. Параметр r существенно влияет на амплитуду лишь в зоне резонанса.

Таким образом, в большей части частотного диапазона доминирующее влияние на амплитуду оказывает параметр n .

Рассуждая аналогично, установим степень воздействия параметров r, n, p на положение экстремумов функции (8).

Анализ этого уравнения с учетом соотношения (15) приводит к заключению, что значения частот ω_{20} и ω_{30} зависят главным образом от параметра n , лежащего в области

$$10^3 \leq n \leq 10^6. \quad (17)$$

На аналоговой счетно-решающей электронной машине типа МН-7 были получены при различных значениях параметров r, n, p семейства характеристик $\varphi = f(\omega)$ (рис. 4, 5, 6).

Как видно из рис. 5, увеличение параметра r приводит к сглаживанию резонансного пика; здесь наблюдается примерно та же картина, что и в случае уравнения второго порядка, исключая вид начального участка кривой, где наблюдается ее относительный минимум.

Как следует из рис. 6, параметр p значительно меньше влияет на амплитуду колебаний, чем параметр r , при малых частотах увеличение параметра p приводит к уменьшению амплитуды, а в области до резонанса и особенно в зоне резонанса — к увеличению φ_0 .

Сравнивая семейства кривых (ω, φ_0, r) , (ω, φ_0, n) , (ω, φ_0, p) , следует прийти к заключению, что основное влияние на амплитуду оказывают параметры r, n, q , причем влияние r особенно сильно сказывается в зоне резонанса. На положение максимума и минимума амплитудно-частотной характеристики практически воздействует только параметр n .

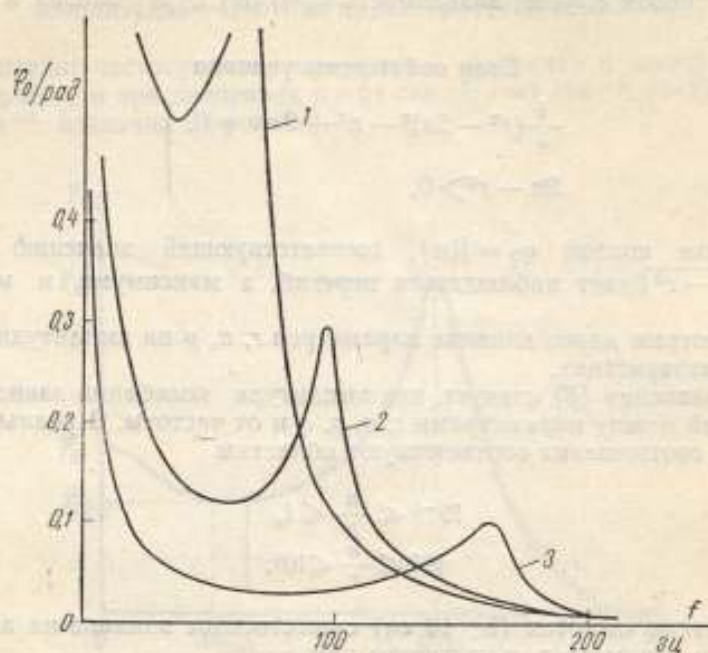


Рис. 4. Семейство характеристик (n, ω_0, ω) при $r=10^2 \text{сек}^{-1}$,
 $p=10^2 \text{сек}^{-3}$, $q=10^2 \text{сек}^{-3}$.
 1) $n=1.4 \cdot 10^2 \text{сек}^{-2}$; 2) $n=3.5 \cdot 10^2 \text{сек}^{-2}$; 3) $n=10^3 \text{сек}^{-2}$.

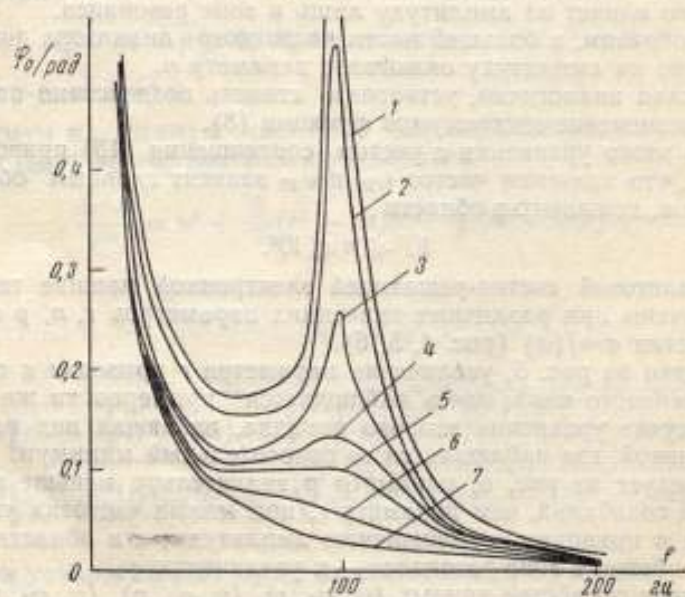


Рис. 5. Семейство характеристик (r, φ_0, ω) при
 $n=3.5 \cdot 10^2 \text{сек}^{-2}$, $p=10^2 \text{сек}^{-3}$, $q=10^2 \text{сек}^{-3}$.
 1) $r=10 \text{сек}^{-1}$; 2) $r=50 \text{сек}^{-1}$; 3) $r=10^2 \text{сек}^{-1}$; 4) $r=2 \cdot 10^2 \text{сек}^{-1}$;
 5) $r=2.45 \cdot 10^2 \text{сек}^{-1}$; 6) $r=5 \cdot 10^2 \text{сек}^{-1}$; 7) $r=10^3 \text{сек}^{-1}$.

Полученные результаты при некоторых допущениях позволяют установить зависимости: 1) между частотами ω_{20} , ω_{30} и 2) между амплитудами Φ_{20} , Φ_{30} .

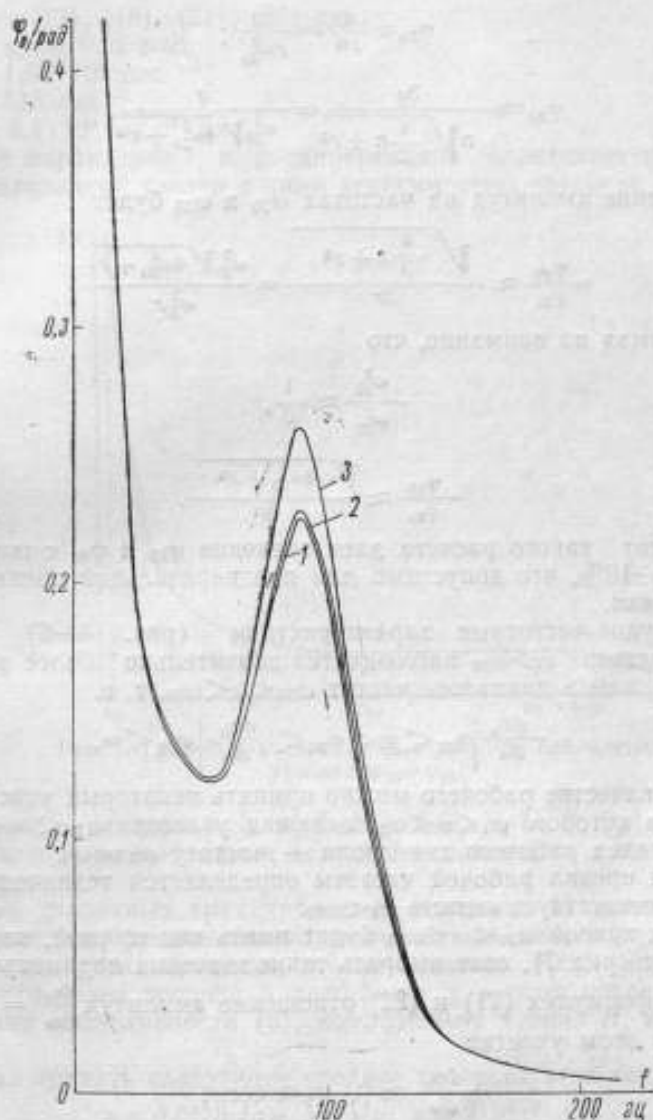


Рис. 6. Семейство характеристик (p , Φ_0 , ω) при $n=3,5 \cdot 10^2 \text{ сек}^{-2}$, $r=10^2 \text{ сек}^{-1}$, $q=10^7 \text{ сек}^{-3}$.

1) $p=0$; 2) $p=10^2 \text{ сек}^{-3}$; 3) $p=10^4 \text{ сек}^{-3}$

1. Если допустить, что $p=0$ и $r=0$, то из уравнения (12) получим

$$\omega_{20} \approx \sqrt{n}; \quad \omega_{30} \approx \sqrt{\frac{n}{3}}; \quad (18)$$

$$\frac{\omega_{30}}{\omega_{20}} \approx \sqrt{3}.$$

2. Если допустить, что $p=0$, то, принимая во внимание уравнение (18), амплитуды колебаний, соответствующие частотам ω_{30} и ω_{20} , следует выражать уравнениями:

$$\varphi_{30} \approx \frac{q}{rn} = \frac{q}{r\omega_{30}^2}; \quad (19)$$

$$\varphi_{20} \approx \frac{3q}{n\sqrt{\frac{4}{3}n + r^2}} = \frac{q}{\omega_{20}^2\sqrt{4\omega_{20}^2 + r^2}}. \quad (20)$$

Отношение амплитуд на частотах ω_{20} и ω_{30} будет

$$\frac{\varphi_{30}}{\varphi_{20}} \approx \frac{\sqrt{\frac{4}{3}n + r^2}}{3r} = \frac{\omega_{20}^2\sqrt{4\omega_{20}^2 + r^2}}{\omega_{30}^2 r} \quad (21)$$

или, принимая во внимание, что

$$\frac{\omega_{30}^2}{\omega_{20}^2} \approx \frac{1}{3},$$

$$\frac{\varphi_{30}}{\varphi_{20}} \approx \frac{\sqrt{4\omega_{20}^2 + r^2}}{3r}. \quad (22)$$

Результат такого расчета дает значение φ_{20} и φ_{30} с погрешностью порядка 5–10%, что допустимо для предварительной оценки параметров установки.

Амплитудно-частотные характеристики (рис. 4–6) указывают, что при частотах $\omega > \omega_{30}$ наблюдается значительно более резкий спад амплитуды, чем в диапазоне частот $\omega_{20} < \omega < \omega_{30}$, т. е.

$$\left. \frac{d\varphi_0}{d\omega} \right|_{\omega_{20} < \omega < \omega_{30}} < \left. \frac{d\varphi_0}{d\omega} \right|_{\omega_{30} < \omega}, \quad (23)$$

поэтому в качестве рабочего можно принять некоторый участок кривой $\varphi_0 = f(\omega)$, в котором $\omega_1 < \omega < \omega_2$, включая участок $\omega_{20} < \omega < \omega_{30}$, а за верхний предел рабочего диапазона — частоту $\omega_2 = \omega_{30}$.

Нижний предел рабочей частоты определяется техническими условиями и соответствует частоте $\omega_1 < \omega_{20}$.

Участок кривой $\omega_{20} < \omega < \omega_{30}$ будет иметь вид прямой, параллельной оси абсцисс (рис. 7), если выбрать такие значения параметров r и n , при которых в формулах (21) и (22) отношение амплитуд $\frac{\varphi_{30}}{\varphi_{20}} = 1$. Следовательно, на этом участке

$$\frac{d\varphi_0}{d\omega} \approx 0, \quad \varphi_0 \approx \text{const}$$

и соответственно

$$\varphi_{20} \approx \varphi_{30}.$$

Выбор оптимальных значений обобщенных и частных параметров установки

Из изложенного выше следует, что влияние на амплитудно-частотную характеристику параметра p невелико, поэтому достаточно ограничиться определением только основных параметров q , r и n ; амплитуда колебаний должна оставаться постоянной на участке $\omega_{20} < \omega < \omega_{30}$.

Тогда при условиях

$$\frac{\varphi_{20}}{\varphi_{30}} = 1; \varphi_{20} = \varphi_{30} = \varphi_{np} = 0,01 \text{ рад}; \omega_2 = \omega_{20} = 1256 \text{ рад/сек}$$

уравнения (12), (18), (21), (22) дадут

$$\varphi_{20} = \varphi_{30} = 0,01 \text{ рад},$$

$$n = 1,58 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-2},$$

$$r = 513 \text{ сек}^{-1},$$

$$q = 8,1 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1} \cdot \text{рад}.$$

Выбор параметров r , n , q одновременно определяет и параметр p , так как последний связан с ними зависимостью (8).

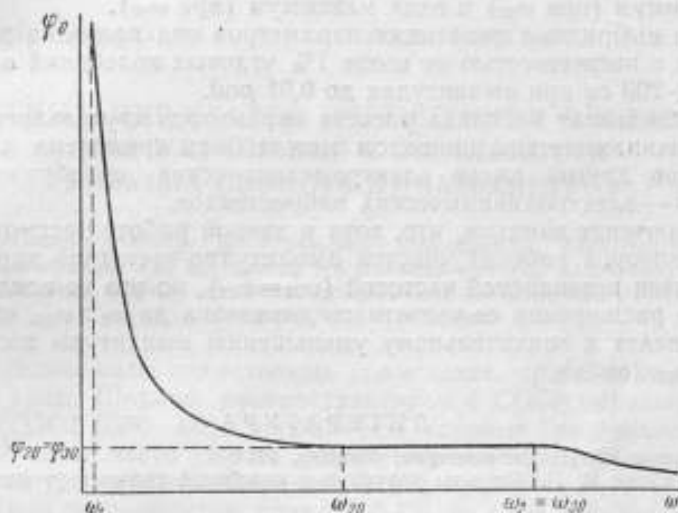


Рис. 7. График зависимости $\varphi_0 = f(\omega)$ при соблюдении условия $\varphi_{20} = \varphi_{30}$.

Частные параметры ρ , l_0 , ω , K , S_{np} , J , α , H , U , B , S_p можно определить, исходя из выбранных значений величин q , r , n согласно уравнению (4а).

Система указанных трех уравнений содержит 11 неизвестных частных параметров, следовательно, восемь из них, изменяющимися в сравнительно узких пределах, можно задаться. Как, например, удельное сопротивление провода ρ , коэффициент пропорциональности α при вычислении индуктивности (3), коэффициент трения H , индукция B в зазоре.

Можно принять следующие средние значения этих величин:

$$\rho = 0,0175 \text{ (ом} \cdot \text{мм}^2\text{)/м}; \alpha = 3 \cdot 10^{-7} \text{ гн};$$

$$H = 5 \cdot 10^{-3} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)/сек}; B = 1,5 \text{ т}.$$

Параметры: l_0 (длина витка обмотки), S_{np} (площадь сечения обмоточного провода), U (номинальное напряжение, подведенное к рамке) и S_p (площадь сечения рамки) определяются конструктивными соображениями и имеют следующие значения:

$$l_0 = 0,3 \text{ м}; U = 50 \text{ в}; S_{np} = 0,035 \text{ мм}^2; S_p = 0,006 \text{ м}^2.$$

Подставив их в формулу (4а), получим

$$J = 2 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; K = 43,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сек}^{-2} \cdot \text{рад}; \omega = 1000 \text{ витков}; R = 150 \text{ ом}; L = 0,3 \text{ гн}; A = 9 \text{ тл} \cdot \text{м}^2.$$

При этих значениях параметров установка пригодна для проверки торсиометров и может воспроизводить угловые колебания при частотах до 200 гц и амплитудах до 0,01 рад.

Амплитуда угловых колебаний измеряется абсолютными методами при помощи оптических устройств. Если применить в качестве измерителя амплитуды микроскоп типа МПВ-1, то погрешность измерения при амплитуде 0,002 рад будет не выше 1%.

Теоретическое исследование маятникового метода приводит к следующим выводам:

1. Маятниковый метод позволяет создать установку, амплитудно-частотная характеристика которой представляет кривую, имеющую один минимум (при ω_{20}) и один максимум (при ω_{30}).

2. При выбранных значениях параметров она пригодна для воспроизведения с погрешностью не выше 1% угловых колебаний в диапазоне частот 5 ÷ 200 гц при амплитудах до 0,01 рад.

3. Приведенная методика расчета параметров крутильного маятника с электродинамическим приводом может быть применена для расчета параметров других видов электромеханических преобразователей, в частности — электродинамических вибростендов.

В заключение заметим, что, хотя в данной работе рассмотрена установка, в которой рабочий участок амплитудно-частотной характеристики ограничен резонансной частотой ($\omega_{20} = \omega_{30}$), но это не исключает возможности расширения ее частотного диапазона до $\omega_2 > \omega_{30}$, что, разумеется, приведет к значительному уменьшению амплитуды колебаний на участке $\omega_{30} < \omega < \omega_2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иорш Ю. И. Виброметрия, Машгиз, 1963.
2. Терских В. П. Расчеты крутильных колебаний силовых установок, Машгиз, 1953.
3. Nestorides E. J. (compiled by), A hand book on torsional vibration, Cambridge, 1958.

Поступила в редакцию
10/XII-1964 г.

ИСПЫТАНИЕ СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ЧИСТОТЫ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ УПРУГИХ СВОЙСТВ ДИНАМОМЕТРОВ

Рассматривается вопрос об улучшении стабильности динамометров за счет применения для них сталей повышенной чистоты, полученной путем использования чистых исходных материалов с последующей неоднократной переплавкой в вакууме.

За последние годы существенно повысились требования к точности измерений силы. Широко распространенные в СССР образцовые динамометры (ГОСТ 9500—60), погрешность которых не превышает 0,5% измеряемой силы, часто уже не удовлетворяют предъявляемым к ним повышенным требованиям. Определилась потребность в динамометрах с относительной погрешностью порядка 0,1% во всем диапазоне их измерений.

Динамометры обычно состоят из двух основных узлов: 1) упругого элемента, величина деформаций которого является мерой приложенной к нему силы, и 2) измерительного устройства для прямого или косвенного измерения указанных деформаций. Общая погрешность динамометров составляется из погрешностей, зависящих от каждого из этих основных узлов. Погрешностями, зависящими от упругого элемента, являются нестабильность его деформаций как при повторных нагружениях одними и теми же силами, так и во времени, а также температурная нестабильность. Погрешности измерения деформаций зависят от чувствительности и стабильности измерительных устройств.

Погрешности упомянутых выше образцовых динамометров, зависящие от каждого из двух основных узлов, соизмеримы. По установленным нормам [1] нестабильность деформаций динамометра за время между двумя очередными поверками может достигать 0,5%. Погрешности измерений деформаций обычно составляют 0,1—0,2%, а на нижних пределах измерений — и более.

Даже если исходить из этой общей характеристики, очевидно, что поставленная проблема значительного повышения точности динамометров не может быть полностью решена только за счет повышения точности измерения деформаций. Одновременно необходимо существенно повысить стабильность измеряемых деформаций, без чего повышение точности их измерений становится в значительной мере фиктивным. Проблема тем более не может быть решена только за счет повышения чувствительности измерительных устройств. В этой связи предпринимае-

мое время от времени попытки стандартизации классов точности динамометров в зависимости от чувствительности их измерительных устройств [2] представляются совершенно неосновательными.

В части повышения точности измерения деформаций достигнуты большие успехи. У нас и за границей имеются динамометры, в которых для измерения деформаций их упругих элементов используются весьма чувствительные и достаточно стабильные устройства с микроскопами, интерферометрами, частотомерами, электрическими мостами и компенсаторами в сочетании с теми или иными трансмиссионными устройствами, передающими и соответственно преобразующими деформации, возникающие под действием измеряемых сил. Вопросу же повышения стабильности деформаций уделяется значительно меньше внимания.

Повысить стабильность упругих элементов, и в особенности временную, возможно, по-видимому, двумя путями: 1) выбрав форму и размеры упругих элементов, обеспечивающие практически оптимальные величины напряжения и распределение их под нагрузкой, или 2) выбрав материалы, упругие свойства которых стабильны во времени и не зависят от температуры. Однако температурная стабильность здесь имеет меньшее значение, так как большую часть соответствующей погрешности можно исключить введением поправок [3]. В данной работе был выбран второй путь, т. е. улучшение качества сталей для упругих элементов.

Стабильность во времени определяется медленно протекающими в стали процессами, вызываемыми перераспределением как неравновесных, способных к диффузии примесей, так и внутренних напряжений. Ход и направление этих перераспределений стимулируется рабочими напряжениями и деформациями, возникающими в упругом элементе при его нагружении.

55
В стали, кроме необходимых легирующих примесей, неизбежно присутствуют нежелательные примеси в виде неметаллических включений и, в частности, тех из них, которые образуются под воздействием растворенных газов и присутствуют в виде окислов, нитридов и гидридов, а также твердых растворов азота и водорода в железе. Вредное влияние этих примесей на стабильность может быть уменьшено резким сокращением их количества путем выплавки стали из чистых материалов в вакууме.

При вакуумной плавке раскислительная способность углерода значительно превышает эту способность обычных раскислителей стали (Al, Si и Mn). Это связано с тем, что газообразные продукты раскисления углеродом непрерывно откачиваются в процессе плавки, и в результате термодинамическое равновесие реакций сдвигается в благоприятную сторону. В этих условиях углерод не только взаимодействует с растворимым в расплавленной стали кислородом, но и восстанавливает примеси типа MnO , Cr_2O_3 (до 80%), SiO_2 (до 50%), Al_2O_3 — до 30% от их содержания в стали. Растворимость двухатомных газов прямо пропорциональна квадратному корню из их парциальных давлений и в той же степени уменьшается при разрежении. По данным работы [4] в легированной конструкционной стали 18ХНВА при плавке в вакуумной индукционной печи содержание кислорода уменьшается по сравнению с плавкой в открытой печи в 20 раз, а неметаллических включений — в 10 раз. При этом испаряются также примеси соединений цветных металлов Pb, Zn, Bi [5]. Наиболее высокая степень очистки наблюдается при выплавке стали дуплекс-процессом, т. е. при вакуумной индукционной выплавке расходоуемого электрода и последующем двойном переплаве электрода в вакуумной дуговой печи для получения слитка.

В данной работе на основе опыта ВНИИМ были приняты для упругих элементов два состава стали:

1) C=0,35; Si=1,10; Mn=0,81; Cr=1,30; P=0,016; S=0,011;

2) C=0,71; Si=0,42; Mn=0,45; Cr=1,10; Ni=2,06; P=0,20; S=0,008.

Их изготавливали дуплекс-процессом. В качестве шихтовых материалов было использовано карбонильное железо Р-4, электролитический рафинированный хром, электролитический никель Н-0, электролитический марганец Мр-0, кремний Кр-0 и спектрально чистые угли.

После вакуумной плавки в индукционной печи при остаточном давлении 10—50 н/м² (~0,1—0,5 мм рт. ст.) металл под защитой аргона отливали в 30-кг чугунную изложницу диаметром 80 мм. Полученные электроды после обдирки до 78 мм дважды переплавляли под вакуумом при остаточном давлении 1—5 н/м² (~0,01—0,05 мм рт. ст.) и 0,1—0,5 н/м² (~0,001—0,005 мм рт. ст.) в лабораторной дуговой печи с расходуемым электродом и медным кристаллизатором. Затем слитки охлаждали в течение 10 мин в вакууме, а затем — под защитой гелия.

Перед ковкой 25-кг слитки вновь обдирали «как чисто». Ковали на 500-кг молоте с осадкой по высоте на 50% по конфигурации упругого элемента и припусками на механическую обработку при температуре началаковки 1150° и конца — 850°С с последующим охлаждением на воздухе.

Из обоих слитков были изготовлены упругие элементы динамометров типа ВНИИМ [6] с верхними пределами измерений около 100 кн. После механической обработки слитки были соответственно закалены и отпущены: первый — до HRC=44—45 и второй — до HRC=53—55, а затем состарены выдержкой под нагрузкой, равной 150—200% предельной, и последующей длительной вываркой в масле при температуре около 170°С.

Для измерения деформаций были использованы оптические измерительные устройства [6] с точностью отсчета в рабочем диапазоне деформаций порядка $5 \cdot 10^3$ — $2 \cdot 10^4$.

Динамометры градуированы и исследованы на эталонной установке непосредственного нагружения. Как обычно, динамометры градуировали на 10 ступенях нагружения при $\frac{P_j}{P_n} = 0,1; 0,2; \dots; 0,9; 1$, где P_j — сила, приложенная на данной ступени j , и P_n — сила, соответствующая верхнему пределу измерений динамометра. Средние значения деформаций ϵ_j определяли по 10 рядам нагружений, обработанным по способу наименьших квадратов.

Стабильность деформаций при повторных нагружениях одними и теми же силами P_j оценивали по значениям средних квадратичных отклонений σ_j . Она характеризуется следующими числами:

$$\frac{\sigma_j}{\epsilon_j} \cdot 100\% = 0,014 \div 0,008\% \text{ в диапазоне } \frac{P_j}{P_n} = 0,3 \div 1.$$

Временную стабильность динамометров исследовали в течение двух лет путем сравнения первых градуировок их, законченных в феврале 1963 г. с последующими градуировками в 1964 и 1965 гг. Оба образца показали хорошую временную стабильность: систематические изменения деформаций оказались порядка 0,025% за первый год и порядка 0,03 ÷ 0,04% за два года.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности применения сталей повышенной чистоты для упругих элементов образцовых динамометров 1-го разряда. Само собой разумеется, что этот вывод нуждается в дальнейшем подтверждении опытом большего масштаба, чем описанный.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция 44—64 по поверке и градуировке образцовых переносных динамометров 3-го разряда. Издание официальное.
2. ISO, Technical Committee 17—Steel, 492E, Sept, 1961.
3. Максимов Л. М., Временная стабильность и температурные погрешности образцовых динамометров, «Измерительная техника», № 11, 1963.
4. Шульте Ю. А., Неметаллические включения в электростали, изд. «Металлургия», 1964.
5. Курочкин К. Т. и др. Изв. вузов, «Черная металлургия», № 10, 1963.
6. Максимов Л. М., Набор образцовых динамометров 1-го разряда, «Измерительная техника», № 11, 1964.

Поступила в редакцию
17/IX 1965 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Л. М. Максимов. Погрешности передачи значений силы при параллельном нагружении образцовых динамометров	5
Л. М. Максимов. Образцовый динамометр 1-го разряда с пределами измерения до 30 тс	11
Н. Х. Непаридзе. Определение разрушающего усилия пьезоэлектрических кристаллов кварца	16
Н. Х. Непаридзе. Зависимость пьезоэлектрического коэффициента кварца от механического напряжения	19
Ф. С. Савицкий. Методика определения сопротивления металлов при ударном деформировании	25
М. Е. Балашов. Современные методы и аппаратура для измерения переменных давлений	31
Е. Ф. Долинский, Г. И. Полухин. Приведенная площадь поршня с переменным сечением	46
М. А. Гуляев, А. В. Ерюхин. Оценка погрешностей вакуумметров	51
М. И. Дрига, Е. Н. Фролова. Измерения коэффициента аккомодации (Обзор)	63
А. В. Ерюхин. Новые методы градуировки манометров в области высокого вакуума (Обзор)	70
А. В. Ерюхин. Анализ погрешностей ртутных компрессионных манометров у нижнего предела измерения	83
В. А. Рыжов. Экспериментальное исследование образцового абсолютного мембранно-емкостного манометра	91
Н. А. Гладушак, Р. С. Прасолов, В. А. Рыжов. Записывающий одноточечный вакуумметр на давления $2,6 \cdot 10^2 - 10^5$ н/м ² (2-760 мм рт. ст.)	95
Н. Ф. Гонек, П. П. Кремлевский, М. С. Педан. Образцовая газомерная установка непрерывного действия для расходов до 0,042 м ³ /сек (150 м ³ /ч)	99
Н. Ф. Гонек, П. П. Кремлевский, М. С. Педан. Образцовая газомерная установка непрерывного действия для расходов до 0,28-0,42 м ³ /сек (1000-1500 м ³ /ч)	109
М. С. Педан, А. А. Часовников. Определение коэффициентов образцовых скоростных (пито-статических) трубок ВНИИМ на ротационной машине	114
А. И. Марциняк. Образцовая аппаратура для воспроизведения ускорений в пределах от 10 до 250 g	121
В. С. Шкальников. Вибрационная установка со стробинтерференционным методом измерения амплитуд вибраций	128
В. П. Шумилин. Измерение параметров угловых колебаний маятниковым методом	137
Л. М. Максимов, А. В. Смирнов. Испытание сталей повышенной чистоты для улучшения стабильности упругих свойств динамометров	147

Содержание

1. Исследования в области механических измерений 1

2. 2

3. 3

4. 4

5. 5

6. 6

7. 7

8. 8

9. 9

10. 10

11. 11

12. 12

13. 13

14. 14

15. 15

16. 16

17. 17

18. 18

19. 19

20. 20

21. 21

22. 22

23. 23

24. 24

25. 25

26. 26

27. 27

28. 28

29. 29

30. 30

31. 31

32. 32

33. 33

34. 34

35. 35

36. 36

37. 37

38. 38

39. 39

40. 40

41. 41

42. 42

43. 43

44. 44

45. 45

46. 46

47. 47

48. 48

49. 49

50. 50

51. 51

52. 52

53. 53

54. 54

55. 55

56. 56

57. 57

58. 58

59. 59

60. 60

61. 61

62. 62

63. 63

64. 64

65. 65

66. 66

67. 67

68. 68

69. 69

70. 70

71. 71

72. 72

73. 73

74. 74

75. 75

76. 76

77. 77

78. 78

79. 79

80. 80

81. 81

82. 82

83. 83

84. 84

85. 85

86. 86

87. 87

88. 88

89. 89

90. 90

91. 91

92. 92

93. 93

94. 94

95. 95

96. 96

97. 97

98. 98

99. 99

100. 100

Исследования в области механических измерений

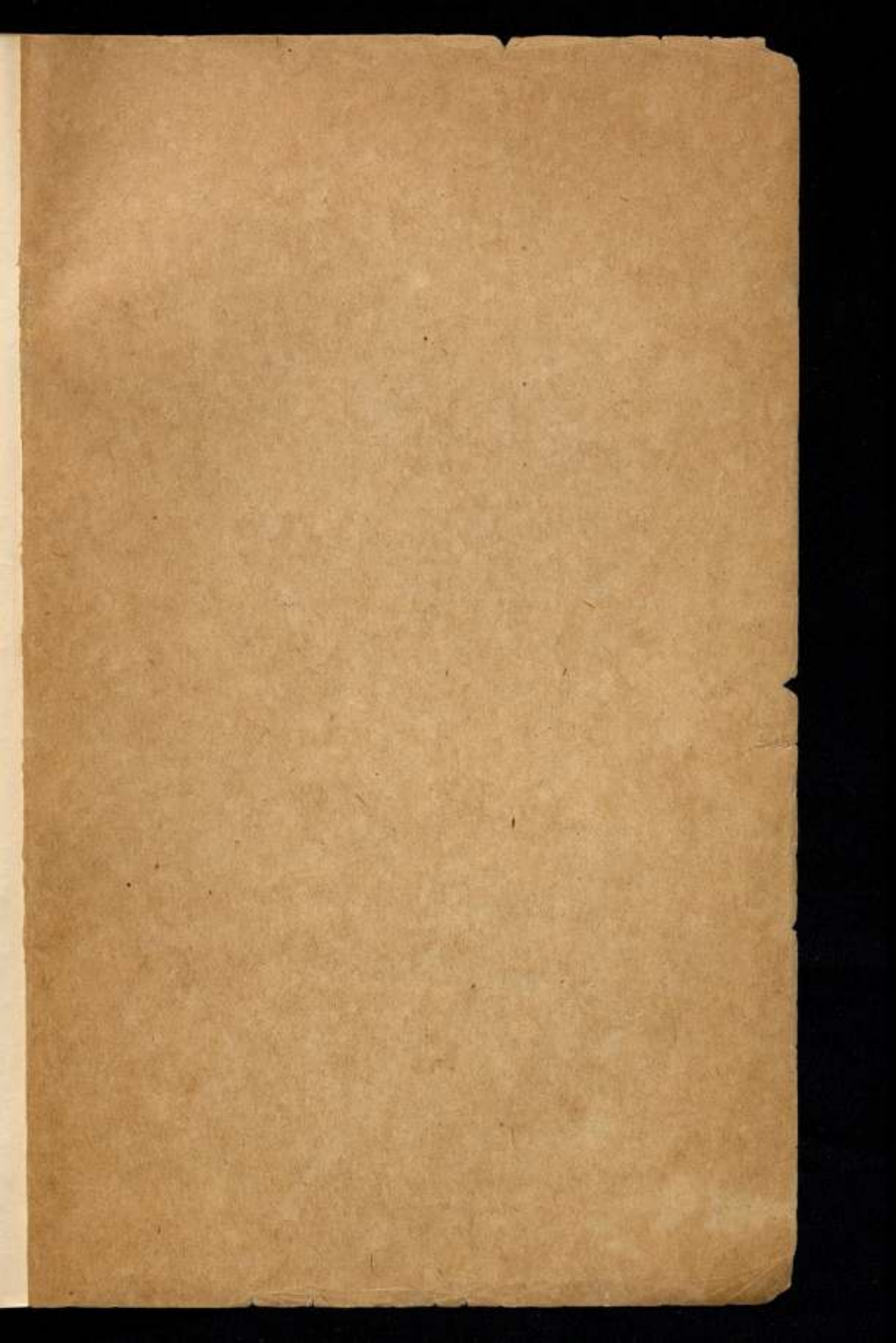
Редактор *Н. Н. Александрова*

Техн. редактор *К. М. Волчок*

Корректор *З. Г. Вагер*

Сдано в набор 14/IV 1965 г. Подписано к печати 8/IX 1965 г. Формат бумаги 70x108¹/₁₆. Печ. л. 9,5
Т-1272 З Уч.-изд. л. 10,75 Тираж 2000 экз. Цена 75 коп. Заказ 9

Калужская областная типография управления по печати
облсполкома, пл. Ленина, 5.



Цена 75 коп.