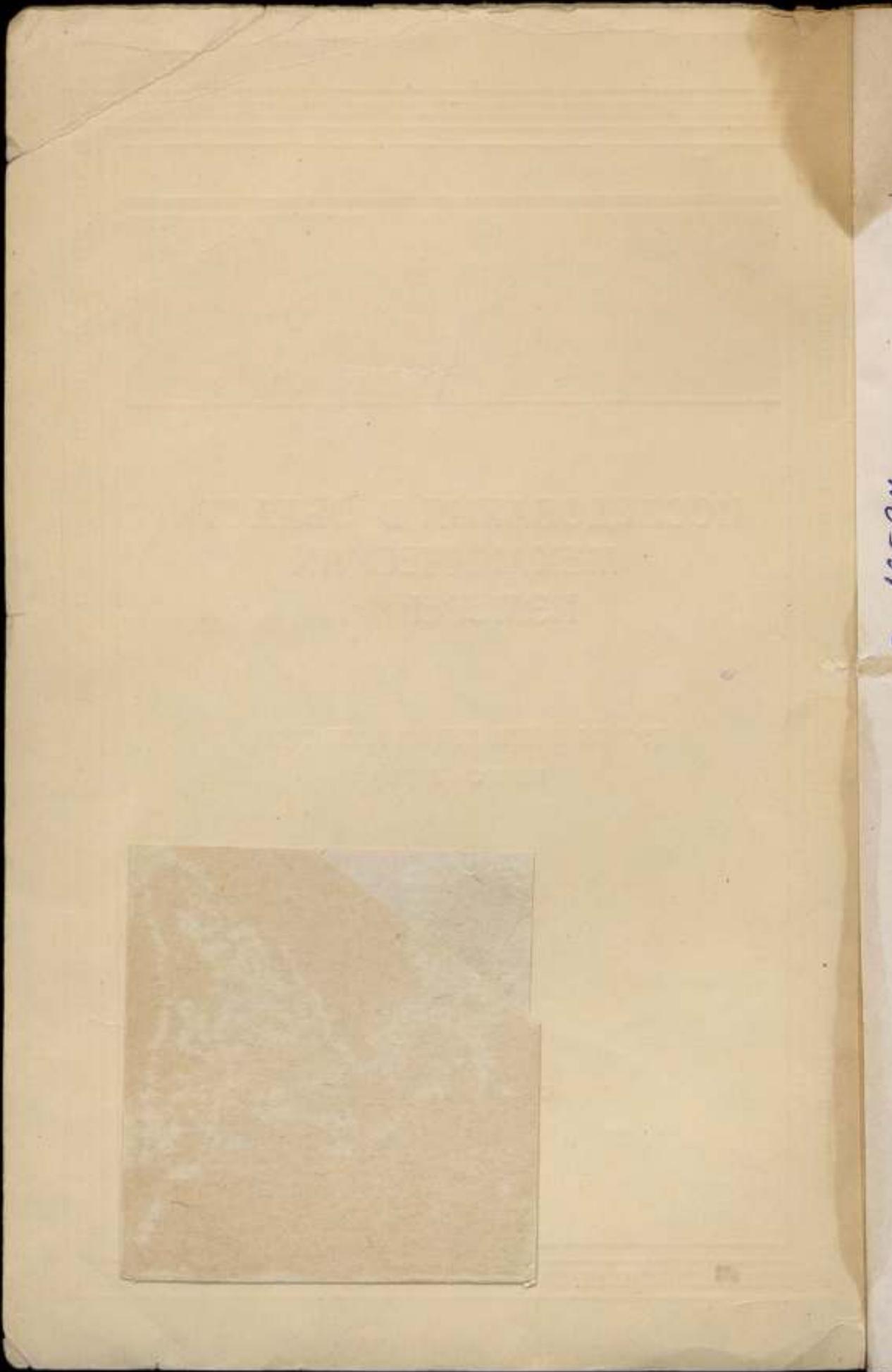


КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
МЕХАНИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА
ВЫПУСК 50 (110)

СТАНДАРТГИЗ
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД
1961



КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
при СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
МЕХАНИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА
ВЫПУСК 50 (110)

Под редакцией
канд. техн. наук *Е. Ф. ДОЛИНСКОГО*

БИБЛИОТЕКА
Всесоюзного научно-иссле-
дательского института метрологии
имени Д. И. Менделеева

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
СТАНДАРТГИЗ
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД
1961

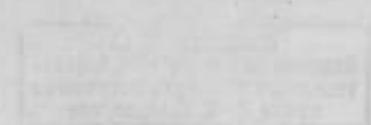
№ 12537-2

ВНИИМ
Институт химической физики
Академии наук СССР

ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕХАНИЗМА
РЕАКЦИИ

ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК СССР
СЕРИЯ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 1961 г.



ИЗДАНИЕ
1961 г.

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

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник содержит статьи, отражающие исследования в области совершенствования методов и аппаратуры по механическим измерениям, выполненные во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева.

Первая группа статей посвящена проблеме повышения точности измерений твердости по методу Роквелла.

Общая формулировка задачи оценки погрешностей этих измерений, методика оценки систематических и случайных погрешностей, а также условия юстировки приборов приведены в статье Б. И. Пилипчука. Методика определения параметров алмазных наконечников рассмотрена в статье Б. И. Пилипчука и С. С. Степанова. Результаты статистической обработки данных по проверке мер твердости, рассмотренные в статье Е. А. Волковой и А. В. Смирнова, привели к ряду рекомендаций по изготовлению этих мер. Созданный во ВНИИМ образцовый прибор для измерения твердости со средней квадратичной погрешностью $\sim 0,08$ единицы Роквелла описан в статье С. А. Смолича.

Статья М. И. Коточиговой дает описание, анализ погрешностей и методику применения созданного во ВНИИМ образцового динамометра 1-го разряда до 10 000 кгс.

Ряд статей посвящен образцовой аппаратуре в области измерения вакуума. В статье М. А. Гуляева, А. В. Ерюхина и В. А. Рыжова произведен анализ погрешностей и приведены результаты опытного исследования двух наборов образцовых компрессионных манометров, являющихся верхним звеном поверочной схемы по измерению вакуума. Оригинальная технология изготовления капилляров, примененная при создании упомянутых наборов, описана в статье М. А. Гуляева и В. А. Рыжова. Описание и теория оригинального термо-молекулярного манометра для пределов измерений $10^{-4} + 10^{-7}$ мм рт. ст., предложенного М. И. Дригой, даны в его статье. Взаимозаменяемость измерительных блоков ионизационных манометров, как показано в статье А. В. Ерюхина, может быть достигнута только раздельной проверкой этих блоков. В статье приведено также описание необходимой для проверки блоков образцовой установки.

Рассмотрение первичного эталона давлений, методика эталонных измерений и обработка их результатов, необходимые для хранения единицы давления и для проверки вторичного эталона, составляют содержание статьи Е. Ф. Долинского и П. В. Индрика.

Первый, оригинальный микроманометр грузопоршневого типа с пределами измерений $400 + 4000$ кгс/м², аттестованный в качестве образцо-

вого прибора 1-го разряда, рассмотрен в статье А. С. Дмитриева и А. А. Часовникова.

Проблеме измерения пульсирующих расходов посвящена статья П. П. Кремлевского, в которой дана обобщенная им теория фильтров.

Анализ причин затруднений по созданию образцового газосчетчика дан в статье Н. Ф. Гонека.

В статье В. Л. Лассана приводится описание созданной им оригинальной образцовой тахометрической установки до 60 000 об/мин.

Образцовые виброустановки с пределами частот $50 \div 10\,000$ гц и $10 \div 50$ гц описаны в статьях В. С. Шкаликова.

Три статьи посвящены физико-химическим константам. И. А. Стульгинская приводит результаты определения предельной температуры, ниже которой некоторые нефтепродукты теряют свойства ньютоновых жидкостей. М. Д. Иппиц дает описание методики измерения, позволившей найти значение плотности ртути при 20°C — константы, имеющей большое значение для метрологических работ. П. А. Налимов излагает методику измерений, примененную им для составления плотностей водноспиртовых растворов для температур от 25 до 40°C .

Статья М. В. Лаврова, дающая анализ погрешностей при измерении натуре зерна, имеет и более широкое значение для тех случаев, когда центр распределения случайной величины является функцией времени.

Редактор

Б. И. ПИЛИПЧУК
ВНИИМ

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО РОКВЕЛЛУ

После краткого описания сущности метода измерения твердости по Роквеллу в статье дана классификация возможных погрешностей. Для систематических погрешностей, связанных с отклонением параметров прибора от номинальных значений, выведены формулы, позволяющие оценить их величину. Рассмотрен процесс юстировки прибора по образцовым мерам твердости и влияние юстировки на показания прибора. Составлены уравнения, выражающие связь дисперсий случайных погрешностей приборов и мер. Решены частные задачи сравнения приборов и мер, сформулирована общая задача рациональной оценки погрешностей при измерении твердости.

Сущность метода Роквелла [1]

Метод измерения твердости по шкале С (Роквелла) в настоящее время получил широкое распространение в промышленности для контроля качества металлических изделий.

Твердость по Роквеллу — это условная числовая характеристика пластической деформации, осуществляемой при стандартизованных условиях опыта на плоской поверхности испытуемого тела. Число твердости вычисляют по результатам измерений разности глубин вдавливания стандартного наконечника под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок — предварительной и основной. При измерениях по шкале С наконечником служит алмазный конус с углом раскрытия $\alpha = 120^\circ$, вершина которого имеет сферическое закругление радиуса $r = 200$ мк. Твердость HRC в условных единицах твердости шкалы С (е. т.) определяется формулой

$$\text{HRC} = \left(100 - \frac{h - h_0}{c} \right) \text{ е. т.}, \quad (1)$$

где h_0 мм — глубина вдавливания наконечника под действием предварительной нагрузки $P_0 = 10$ кгс, измеряемая при ее наличии;

h мм — глубина вдавливания наконечника под действием общей нагрузки $P = P_0 + 140 = 150$ кгс, измеряемая при наличии только нагрузки P_0 ;

c мм/е. т. — постоянная прибора, которая у правильно налаженного прибора должна иметь номинальное значение $c = 0,002$ мм/е. т.

Результат измерения твердости является функцией многочисленных переменных — параметров, описывающих условия проведения опыта вдавливания, и констант, характеризующих упругие и пластические свойства вещества, из которого состоит испытуемое тело. Аналитический вид функции в настоящее время еще не установлен окончательно и отыскание его составляет важную задачу будущих исследований. При большом числе аргументов источники возможных погрешностей многочисленны и поэтому представляется необходимым сделать краткий обзор всего, что в настоящее время можно считать уже надежно установленным и пригодным для практического применения.

Классификация погрешностей

Источниками погрешностей при измерении твердости могут быть: объект измерения, прибор, внешние условия измерений, наблюдатель.

Полезно рассмотреть виды возможных погрешностей для каждого источника в отдельности.

1. Результат измерения твердости объекта зависит от его толщины, кривизны и качества испытуемой поверхности, а также от присущей объекту неоднородности твердости по поверхности и глубине.

Новый стандарт на измерение твердости по Роквеллу [1], введенный с 1960 г., устанавливает:

«13. Минимальная толщина испытуемого образца должна быть не меньше восьмикратной глубины внедрения наконечника после снятия основной нагрузки P_1 .» ($P_1 = P - P_0 = 140 \text{ кгс}$).

«12. . . При измерении твердости на образцах с криволинейной поверхностью радиус кривизны последней должен быть не менее 15 мм». Систематическая погрешность из-за кривизны испытуемой поверхности может быть довольно значительной, как это можно видеть, например, по графику поправок (рис. 1) к числам

Рис. 1. График поправок к числам твердости на цилиндрических поверхностях [2].

Выше оси абсцисс — кривые для наружной цилиндрической поверхности, ниже оси — для внутренней цилиндрической поверхности.

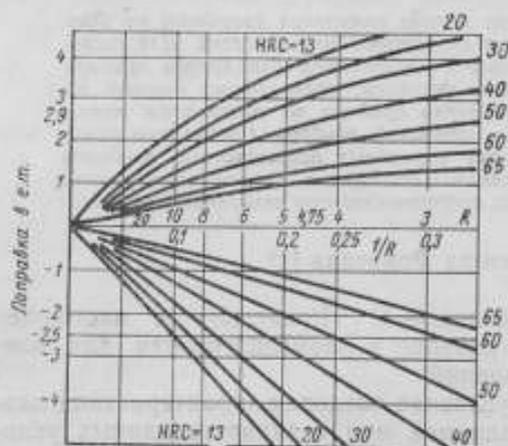
твердости на цилиндрических поверхностях, составленному Чирфом [2].

По имеющимся опытным данным микрогеометрия не оказывает существенного влияния на число твердости при чистоте поверхности, соответствующей 9—10 классу по ГОСТ 2789 — 51.

Неизбежная неоднородность твердости объекта является источником случайных погрешностей, что приводит к большим затруднениям при построении поверочной схемы.

2. Погрешности прибора особенно многочисленны и важны. Для удобства рассмотрения их следует разбить на две группы.

Погрешности первой группы связаны с деформациями и смещениями деталей прибора при измерении (смещение подъемного винта, изгиб ста-



нины, зазоры узлов кинематической схемы и т. п.). Эти погрешности не могут быть отдельно определены, но те из них, которые являются постоянными систематическими погрешностями, исключаются при градуировке прибора по образцовым мерам твердости.

Ко второй группе относятся все погрешности, связанные с отступлениями параметров прибора от их номинальных значений. К числу наиболее важных параметров, доступных измерению, относятся: величины нагрузок, отношение плеч рычажка, передающего смещение наконечника штифту индикатора, угол раскрытия алмазного конуса, радиус закругления его вершины.

Целый ряд свойств прибора, бесспорно влияющих на его показания, не может быть вообще выражен каким-либо числом. Для примера можно указать качество поверхности алмазного наконечника, а также правильность сопряжения конуса со сферой на вершине алмаза.

3. К внешним условиям измерения, оказывающим влияние на результаты, относятся: неустойчивая установка объекта, неперпендикулярность поверхности объекта оси наконечника, несовпадение продольного осевого сечения цилиндрического предмета с осью наконечника, недостаточно большое расстояние между соседними отпечатками, сотрясения прибора, температура в помещении, отличающаяся от нормальной, недостаточная длительность выдержки основной нагрузки и т. п.

Все отмеченные причины погрешностей в той или иной мере можно устранить, применив указания стандарта. Особо важное значение имеет режим нагружения, однако в настоящее время нет еще исчерпывающих исследований по этому вопросу, и мы вынуждены оставить его в стороне. В пп. 16 и 17 ГОСТ 9013—59 приведены основные указания для практического проведения опыта [1].

4. Погрешности наблюдателя, в широком смысле слова, влияют на результаты всех операций при измерении твердости: установку объекта, юстировку прибора, установку нуля индикатора (у приборов без автоматической установки нуля), вдавливание, отсчет.

В узком смысле слова к погрешностям наблюдателя следует отнести только погрешности установки нуля и отсчета. У опытного наблюдателя они невелики и носят случайный характер.

Анализируя перечисленные погрешности, приходим к выводу, что наиболее серьезным источником систематических погрешностей являются отступления параметров прибора от номинальных значений, а принципиально наиболее важным источником случайных погрешностей является неоднородность распределения твердости на объекте измерения, хотя количественно случайные погрешности прибора имеют одинаковый с ними порядок.

Систематические погрешности

Исходные положения приближенной теории

Незнание аналитической формы зависимости твердости по шкале S от констант материала не может служить серьезным препятствием для анализа систематических погрешностей, так как достаточную для практики точность можно получить на основе элементарной теории в линейном приближении. Выделяя в качестве явных аргументов P_0 и P — предварительную и общую нагрузки, m — отношение плеч рычажка передачи

смещения наконечника штифту индикатора и α , r — геометрические параметры наконечника, можно написать разложение в ряд Тэйлора*

$$H = f(\dots, P_0, P, \alpha, r, m) \approx H_s + A \Delta P_0 + B \Delta P + C \Delta \alpha + D \Delta r + E \Delta m, \quad (2)$$

где $H_s = f(\dots, 10 \text{ кгс}, 150 \text{ кгс}, 120^\circ, 200 \text{ мк}, 5)$ — число твердости объекта измерения, совпадающее с показанием прибора с идеальным наконечником ($\alpha = 120^\circ$, $r = 200 \text{ мк}$), с правильными значениями нагрузок ($P_0 = 10 \text{ кгс}$, $P = 150 \text{ кгс}$) и с правильным отношением плеч передаточного рычажка ($m = 5$).

Далее

$$\Delta P_0 = P_0 - 10, \quad \Delta P = P - 150, \\ \Delta \alpha = \alpha - 120, \quad \Delta r = r - 200, \quad \Delta m = m - 5.$$

Коэффициенты A , B , C , D , E являются частными производными твердости по рассматриваемым параметрам, а именно

$$A = \frac{\partial H}{\partial P_0}, \quad B = \frac{\partial H}{\partial P}, \\ C = \frac{\partial H}{\partial \alpha}, \quad D = \frac{\partial H}{\partial r}, \quad E = \frac{\partial H}{\partial m}.$$

Все они — функции измеряемой твердости.

Значение коэффициента E легко найти, дифференцируя основную формулу (1) метода Роквелла, записанную с учетом отношения m , как

$$H = 100 - \frac{h - h_0}{e/m},$$

где $e \approx 0,01 \text{ мм}$ — цена наименьшего деления индикатора. Отсюда

$$E = \frac{H - 100}{5}. \quad (3)$$

Таблица 1

HRC, е. т.	A, е. т./кгс	B, е. т./кгс	C, е. т./град	D, е. т./мк	E, е. т./л
20	1,40	-0,36	1,35	0,018	-16
25	1,28	-0,34	1,30	0,019	-15
30	1,12	-0,32	1,23	0,021	-14
40	0,80	-0,28	1,07	0,025	-12
45	0,68	-0,26	0,97	0,028	-11
50	0,57	-0,23	0,86	0,031	-10
60	0,40	-0,19	0,59	0,039	-8
65	0,32	-0,17	0,45	0,043	-7

Получение значений коэффициентов A , B , C и D было в СССР предметом серьезных теоретических работ Г. П. Зайцева [3], основанных на обобщении для конуса закона Мейера для вдавливания шарика [4].

* Для упрощения здесь и далее твердость по шкале С (Роквелла) будет обозначаться одной буквой H , вместо трех букв HRC, установленных по стандарту.

Экспериментальные работы для получения коэффициентов A и B были выполнены Г. П. Зайцевым и Н. П. Славинной [5], для коэффициентов C и D — С. С. Степановым во ВНИИМ [6], для всех коэффициентов — В. А. Столяровым по ВНИИ Веспром [7] и Хильдом (ФРГ) [8]. Сопоставление имеющихся результатов позволяет заключить, что в настоящее время все четыре коэффициента известны с точностью, достаточной для практики. Числовые значения A и B по данным Г. П. Зайцева [3, 5] и C и D — по данным С. С. Степанова [6], а также E , вычисленные по формуле (3), приведены в табл. 1.

Пользуясь табл. 1, можно по формуле (2) вычислять изменение показаний любого прибора при изменении его параметров без последующей юстировки по образцовым мерам. Если, например, наконечник с параметрами α_1, r_1 заменить наконечником с параметрами α_2, r_2 , то изменение показаний прибора будет

$$\Delta H = C(\alpha_2 - \alpha_1) + D(r_2 - r_1).$$

Аналогично можно найти результат изменения других параметров. Важно помнить, что в формуле (2) не учтено влияние юстировки прибора на последующие измерения твердости.

Юстировка прибора по мерам твердости

В поверочной практике [9, 10, 11] принято производить поверку и юстировку приборов Роквелла на шкале C по комплекту трех образцовых мер типа МТР с твердостями $25 \pm 5, 45 \pm 5$ и 65 ± 5 е. т. Обозначим значения твердости мер комплекта F_1, F_2 и F_3 . Для общности будем предполагать, что эти значения, указанные на мерах, содержат в себе систематические погрешности градуировки $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и ε_3 . Мы будем, следовательно, иметь равенства

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= H_{s1} + \varepsilon_1 \\ F_2 &= H_{s2} + \varepsilon_2 \\ F_3 &= H_{s3} + \varepsilon_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где H_{si} — истинное значение твердости i -й меры, которое совпадает с показанием идеального прибора на этой мере.

Показания H'_i данного прибора до юстировки отличаются от значений твердости F_i , приписанных мерам, и поэтому результаты измерений до юстировки можно записать в виде равенств

$$\left. \begin{aligned} H'_1 &= F_1 + \Delta_1 \\ H'_2 &= F_2 + \Delta_2 \\ H'_3 &= F_3 + \Delta_3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где Δ_i — погрешности показаний прибора до юстировки*.

Юстировка прибора производится изменением передаточного отношения; Г. П. Зайцев [3] считает возможным изменять для юстировки величину общей нагрузки. Рассмотрим оба варианта.

* Истинное значение погрешности прибора до юстировки Δ_{i0} , определяемое равенством $H'_i = H_{si} + \Delta_{i0}$, не может быть найдено, так как неизвестно значение ε_i .

Влияние изменения передаточного отношения на погрешности показаний прибора можно очень наглядно проследить при помощи простого графика (рис. 2)*. Погрешности Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 нанесем на ось ординат, на ось абсцисс будем наносить изменение передаточного отношения. (Для практических расчетов удобно отрезок в 100 мм принимать равным погрешности в 1 е. т. на оси ординат и изменению передаточного отношения на 0,1 на оси абсцисс.) При изменении передаточного отношения на Δm погрешность показаний прибора изменяется на $\left(\frac{\partial H}{\partial m}\right)_i \Delta m$. Значения производных находятся в столбце *E* табл. 1.

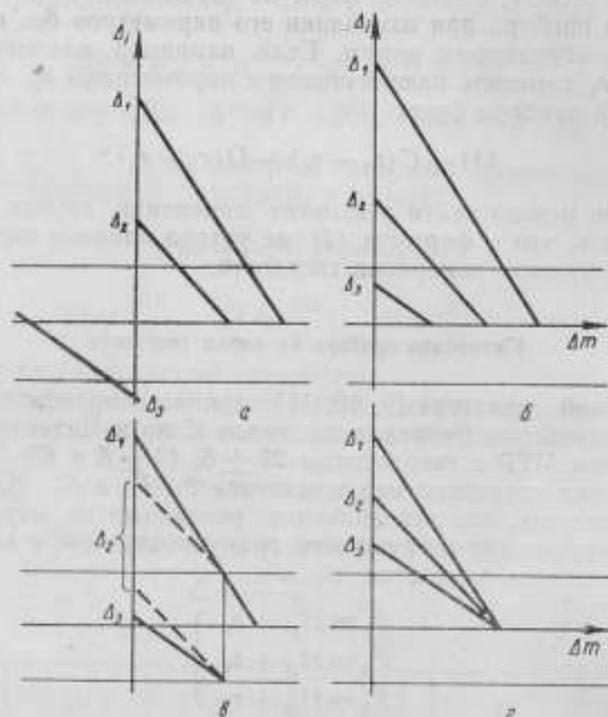


Рис. 2.

Для меры низкой твердости ($i=1$) „линия погрешностей“ будет иметь уравнение $y = \Delta_1 - 15x$,

для меры средней твердости $y = \Delta_2 - 11x$ ($i=2$),

для меры высокой твердости $y = \Delta_3 - 7x$ ($i=3$).

Проводя на графике соответствующие прямые, можно увидеть, при каком изменении передаточного отношения можно обратить в нуль погрешность на любой из мер. Очевидно, что в общем случае нельзя добиться сведения погрешностей к нулю на всех трех мерах одновременно, но можно искать только некоторое компромиссное решение, которое уменьшало бы погрешности до возможного минимума.

* На всех рисунках прямые, параллельные оси абсцисс, отмечают границы допуска.

При рассмотрении графического изображения видно, что юстировка малоуспешна или совсем невозможна, когда погрешности имеют разные знаки (рис. 2, а). Лучшие результаты получаются при одинаковых знаках, в особенности, если погрешности составляют ряд $|\Delta_3| < |\Delta_2| < |\Delta_1|$ (рис. 2, б). Погрешности не превысят допуска в 1 е. т., если до юстировки выполнялись два условия:

$$\frac{|\Delta_1 + \Delta_2|}{2} - 1 \ll |\Delta_3| \ll \frac{|\Delta_1 + \Delta_2|}{2} + 1 \text{ и } |\Delta_1 - 2\Delta_2| \ll 3 \text{ (рис. 2, в).}$$

Погрешности могут быть полностью уничтожены юстировкой, если они имели одинаковые знаки и по своей абсолютной величине были прямо пропорциональны производным $(\partial H / \partial m)_i$, т. е. если имела место пропорция $\Delta_1 : \Delta_2 : \Delta_3 = 15 : 11 : 7$ (рис. 2, з). Погрешность Δ_1 , кроме того, по абсолютной величине не должна превосходить 5 е. т. для того, чтобы требуемое изменение передаточного отношения не выходило за пределы конструктивных возможностей прибора.

Погрешности после юстировки δ_i связаны с погрешностями до юстировки Δ_i равенствами

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= \Delta_1 + \left(\frac{\partial H}{\partial m}\right)_1 (m - m_0) \\ \delta_2 &= \Delta_2 + \left(\frac{\partial H}{\partial m}\right)_2 (m - m_0) \\ \delta_3 &= \Delta_3 + \left(\frac{\partial H}{\partial m}\right)_3 (m - m_0) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где m_0 — передаточное отношение прибора до юстировки ($m_0 \approx 5$).

Для того чтобы найти изменение передаточного отношения, необходимое для оптимальной юстировки, воспользуемся способом наименьших квадратов в применении к системе условных уравнений (6). Будем, следовательно, требовать, чтобы сумма квадратов погрешностей после юстировки была минимальной:

$$S = \sum_{i=1}^3 \delta_i^2. \quad (7)$$

Условие минимума $\frac{\partial S}{\partial m} = 0$ приводит к следующему уравнению для определения разности $(m - m_0)$:

$$2 \sum \delta_i \frac{\partial \delta_i}{\partial m} = 2 \sum \left[\Delta_i + \left(\frac{\partial H}{\partial m}\right)_i (m - m_0) \right] \left(\frac{\partial H}{\partial m}\right)_i = 0, \quad (7a)$$

из которого находим

$$m - m_0 = - \frac{\sum \left(\frac{\partial H}{\partial m}\right)_i \Delta_i}{\sum \left(\frac{\partial H}{\partial m}\right)_i^2}. \quad (8)$$

Можно также найти передаточное отношение при оптимальной градуировке, если записать результаты измерения твердости мер после юстировки прибора в виде системы равенств

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= F_1 + \delta_1 \\ H_2 &= F_2 + \delta_2 \\ H_3 &= F_3 + \delta_3 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Способ наименьших квадратов в применении к этим условным уравнениям дает при дифференцировании суммы $S = \sum \delta_i^2$ по m уравнение для вычисления m

$$2 \sum (H_i - F_i) \left(\frac{\partial H}{\partial m} \right)_i = 0. \quad (76)$$

Выражая H_i по формуле (2) и учитывая равенства (4), получим передаточное отношение при оптимальной градуировке

$$m = 5 + \frac{\sum \varepsilon_i E_i - \Delta P_0 \sum A_i E_i - \Delta P \sum B_i E_i - \Delta \alpha \sum C_i E_i - \Delta r \sum D_i E_i}{\sum E_i^2}. \quad (10)$$

При правильных значениях параметров прибора P_0, P, α, r и отсутствии погрешностей градуировки образцовых мер по формуле (10) имеем $m = 5$, как это и должно быть*.

Изменение общей нагрузки

Для отыскания параметров прибора, соответствующих оптимальной юстировке, также можно применить способ наименьших квадратов. В данном случае переменным параметром является общая нагрузка, поэтому условием минимума суммы квадратов погрешностей после юстировки будет служить равенство нулю производной от этой суммы по P . Конечный результат может быть выписан по аналогии, путем замены в формуле (10) коэффициентов E_i коэффициентами B_i . Член с множителем ΔP должен отсутствовать, вместо него должен появиться член $-\Delta m \sum E_i B_i$.

Измерение твердости юстированным прибором

Для того чтобы определить показание юстированного прибора при измерении предмета с твердостью H_s , надо обратиться к формуле (2). Если прибор отъюстирован изменением передаточного отношения, то в эту формулу надо подставить значение m из (10). После несложных преобразований получим простое выражение

$$H = H_s + I \Delta P_0 + K \Delta P + L \Delta \alpha + M \Delta r + E \frac{\sum \varepsilon_i E_i}{\sum E_i^2}, \quad (11)$$

где

$$\left. \begin{aligned} I &= A - E \frac{\sum A_i E_i}{\sum E_i^2}, & K &= B - E \frac{\sum B_i E_i}{\sum E_i^2} \\ L &= C - E \frac{\sum C_i E_i}{\sum E_i^2}, & M &= D - E \frac{\sum D_i E_i}{\sum E_i^2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Числовые значения этих коэффициентов приведены в табл. 2.

* Формулы (7а) и (7б) тождественны, что можно показать, записав разность $(H_i - F_i)$ как $(H_i - H'_i + H'_i - F_i)$ и приняв во внимание, что $H_i - H'_i = \left(\frac{\partial H}{\partial m} \right)_i (m - m_0)$, а разность $(H'_i - F_i)$ есть погрешность Δ_i прибора до юстировки.

Таблица 2

HRC, е. т.	$I,$ е. т./кгс	$K,$ е. т./кгс	$L,$ е. т./град	$M,$ е. т./мм	$E/\pi E_i^2,$ 1/е. т.
20	0,23	0,01	0,00	-0,018	-0,041
25	0,18	0,01	0,03	-0,015	-0,038
30	0,10	0,00	0,05	-0,011	-0,035
40	-0,08	0,00	0,06	-0,002	-0,030
45	-0,12	0,00	0,04	0,003	-0,028
50	-0,16	0,00	-0,02	0,008	-0,025
60	-0,19	0,00	-0,08	0,021	-0,020
65	-0,19	-0,01	-0,14	0,027	-0,018

Если юстировку производить по предложению Г. П. Зайцева [3] изменением общей нагрузки, то получим показание юстированного прибора при измерении предмета с твердостью H_x в следующем виде:

$$H = H_x + N \Delta P_0 + Q \Delta x + R \Delta r + U \Delta m + B \frac{\sum \varepsilon_i B_i}{\sum B_i^2}, \quad (13)$$

где

$$\left. \begin{aligned} N &= A - B \frac{\sum A_i B_i}{\sum B_i^2}, & Q &= C - B \frac{\sum C_i B_i}{\sum B_i^2} \\ R &= D - B \frac{\sum D_i B_i}{\sum B_i^2}, & U &= E - B \frac{\sum E_i B_i}{\sum B_i^2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Численные значения этих коэффициентов приведены в табл. 3.

Таблица 3

HRC, е. т.	$N,$ е. т./кгс	$Q,$ е. т./град	$R,$ е. т./мм	$U,$ е. т./л	$B/\pi B_i^2,$ кгс/е. т.
20	0,27	0,04	-0,34	-0,38	-1,70
25	0,21	0,06	-0,32	-0,24	-1,60
30	0,12	0,07	-0,30	-0,11	-1,51
40	-0,08	0,05	-0,25	0,15	-1,32
45	-0,14	0,02	-0,23	0,28	-1,23
50	-0,15	-0,02	-0,20	-0,02	-1,08
60	-0,20	-0,10	-0,15	-0,25	-0,90
65	-0,21	-0,17	-0,13	0,38	-0,80

Изменение показаний юстированного прибора

Формулы (11) и (13) пригодны для вычисления изменений показаний прибора после изменения некоторых его параметров при условии, что до и после изменения параметров производилась юстировка прибора

по образцовым мерам твердости. Найдем, например, изменение показаний прибора Δ^*H при замене наконечника с параметрами α_1 и r_1 наконечником с параметрами α_2 и r_2 . Пусть с первым наконечником прибор юстировался по образцовым мерам твердости, аттестованным с погрешностями $\varepsilon_1', \varepsilon_2', \varepsilon_3'$, со вторым наконечником — с погрешностями $\varepsilon_1'', \varepsilon_2'', \varepsilon_3''$. Вычитая показания юстированного прибора с первым наконечником из показаний юстированного прибора со вторым наконечником, получим на основе формулы (11)

$$\Delta^*H = L(\alpha_2 - \alpha_1) + M(r_2 - r_1) + E \frac{\sum (\varepsilon_i'' - \varepsilon_i') E_i}{\sum E_i^2}.$$

Это выражение позволяет раскрыть смысл коэффициентов L и M . Если образцовые меры аттестованы без погрешностей, то справа останутся только два первых члена. В полученной линейной форме коэффициенты L и M выступают в роли частных производных показаний юстированного прибора, соответственно, по углу и по радиусу закругления:

$$L = \frac{\partial^*H}{\partial \alpha}, \quad M = \frac{\partial^*H}{\partial r}.$$

Аналогичное истолкование может быть дано коэффициентам I, K, N, Q, R, U . Обращаясь к сопоставлению табл. 1—3, приходим к следующим выводам.

1. Юстировка в значительной мере сглаживает влияние изменений отдельных параметров на результат измерения, как это видно по абсолютным величинам соответственных коэффициентов ($A, I, N; B, K; C, L, Q; D, M, R; E, U$).

2. Несовпадение знаков соответственных коэффициентов служит объяснением встречающихся на практике случаев «парадоксального» поведения приборов (когда, например, число твердости уменьшается при увеличении радиуса закругления наконечника и т. д.).

3. Юстировка прибора изменением общего груза менее рациональна, чем юстировка изменением передаточного отношения, потому что абсолютные величины условных производных в первом случае больше соответствующих величин для второго случая. В частности обращает на себя внимание значительная величина производной по радиусу.

Числовые примеры

1. Рассмотрим погрешности показаний прибора Роквелла при применении разных наконечников. Кроме наконечников, лежащих на границе допуска по ГОСТ 9013 — 59, целесообразно исследовать наконечники, параметры которых позволяют получать правильные показания на одной из образцовых мер. В литературе встречаются утверждения, что отклонения угла и радиуса закругления должны быть противоположны по знаку для того, чтобы погрешность показаний прибора была наименьшей [7]. «Компенсация погрешностей наконечника на одной мере» является логическим завершением этой рекомендации.

Результаты вычислений приведены в табл. 4. Значения параметров указаны по примеру тригонометрических таблиц одновременно слева и справа. Столбцы с заголовком ΔH дают отклонения показаний прибора с данным наконечником от показаний того же прибора с идеаль-

ным наконечником, вычисленные по формуле (2). Столбцы с заголовками δH дают отклонения показаний прибора с данным наконечником, юстированного изменением передаточного отношения по идеальным образцовым мерам, от показаний прибора с идеальным наконечником и правильными параметрами, вычисленные по формулам (6) с учетом

Таблица 4

№ строк	α , град	r , мк	$\Delta_i H$			Δm	$\delta_i H$			$10^4 S$	α , град	r , мк
			$i=1$, 25 е. т.	$i=2$, 45 е. т.	$i=3$, 65 е. т.		$i=1$, 25 е. т.	$i=2$, 45 е. т.	$i=3$, 65 е. т.			
1		195	$\pm 0,74$	$\pm 0,62$	$\pm 0,44$	$\pm 0,053$	$\pm 0,06$	$\pm 0,04$	$\pm 0,07$	101		205
2		200	$\pm 0,65$	$\pm 0,48$	$\pm 0,22$	$\pm 0,043$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,08$	66		200
3	119,50	205	$\pm 0,55$	$\pm 0,34$	0	$\pm 0,030$	$\pm 0,10$	$\pm 0,01$	$\pm 0,21$	542	120,50	195
4		217	$\pm 0,33$	0	$\pm 0,51$	$\pm 0,003$	$\pm 0,29$	$\pm 0,03$	$\pm 0,53$	3659		183
5		234	0	$\pm 0,47$	$\pm 1,24$	$\pm 0,035$	$\pm 0,52$	$\pm 0,69$	$\pm 1,00$	12785		166
6	119,50		$\pm 0,74$	$\pm 0,62$	$\pm 0,44$	$\pm 0,053$	$\pm 0,06$	$\pm 0,04$	$\pm 0,07$	101	120,50	
7	120,00		$\pm 0,10$	$\pm 0,14$	$\pm 0,22$	$\pm 0,012$	$\pm 0,08$	$\pm 0,01$	$\pm 0,14$	261	120,00	
8	120,07		0	$\pm 0,07$	$\pm 0,19$	$\pm 0,005$	$\pm 0,08$	$\pm 0,01$	$\pm 0,15$	290	119,93	
9	120,14	195	$\pm 0,08$	0	$\pm 0,16$	$\pm 0,002$	$\pm 0,08$	0	$\pm 0,16$	320	119,86	205
10	120,48		$\pm 0,52$	$\pm 0,33$	0	$\pm 0,029$	$\pm 0,08$	$\pm 0,01$	$\pm 0,20$	465	119,52	
11	120,50		$\pm 0,55$	$\pm 0,34$	0	$\pm 0,030$	$\pm 0,10$	$\pm 0,01$	$\pm 0,21$	542	119,50	

формулы (8). Все отклонения имеют двойной знак: верхний надо брать для параметров, указанных слева, нижний — для параметров, указанных справа. Первые 5 строк наряду с предельными допустимыми и нормальными значениями радиуса закругления включают величины r , найденные из расчета компенсации влияния неправильного угла при низкой, средней и высокой твердостях (строки 3—5). Последние 6 строк включают значения углов, найденных путем расчета компенсации влияния неправильного радиуса (строки 8—10). Суммы S характеризуют качество юстировки: чем меньше сумма, тем совершеннее юстировка.

Анализ табл. 4 позволяет сделать следующие выводы:

а) если угол наконечника имеет предельно допустимое значение $120 \pm 0,5^\circ$, то наименьшие погрешности измерений после юстировки будут для наконечника с нормальным радиусом закругления (строка 2);

б) если радиус закругления имеет наибольшее (наименьшее) допустимое значение 205 мк (195 мк), то наименьшие погрешности измерений после юстировки будут (строка 6) для наконечника наибольшим (наименьшим) допустимым значением угла $\alpha = 120,5^\circ$ ($119,5^\circ$);

в) расчетная компенсация отклонений угла без учета влияния последующей юстировки приводит к значительно худшим результатам, чем аналогичная компенсация отклонений радиуса. Наименьшие погрешности показаний юстированного прибора наблюдаются при компенсации предельного угла на высокой твердости (строка 3) и при компенсации предельного радиуса на низкой твердости (строка 8).

2. Исследуем возможности юстировки прибора в нескольких интересных частных случаях. Для того чтобы расширить область применения результатов, выразим погрешности до и после юстировки в долях абсолютной величины наибольшей погрешности после юстировки, которая должна совпадать с абсолютной величиной допустимой погрешности l .

В основе вычислений лежат формулы (6) и (8), результаты даны в табл. 5.

Таблица 5

Погрешности до юстировки			Изменение передаточного отношения $\frac{\Delta m}{l}$	Погрешности после юстировки		
$\frac{\Delta_1}{l}$	$\frac{\Delta_2}{l}$	$\frac{\Delta_3}{l}$		$\frac{\delta_1}{l}$	$\frac{\delta_2}{l}$	$\frac{\delta_3}{l}$
2,78	1,39	0	0,144	0,61	-0,19	-1
2,44	2,44	2,44	0,204	-0,63	0,20	-1
0	0,64	1,28	0,041	-0,62	0,19	1

Для рабочих приборов установлена допустимая погрешность $l=1$ е. т. При погрешностях прибора, одинаковых по величине на всех трех мерах, юстировка возможна в том случае, если эти погрешности не превышают 2,4 е. т. (средняя строка табл. 5). Аналогично можно сформулировать условия успешной юстировки и для двух других случаев.

Случайные погрешности

Исходные сведения

При градуировке меры образцовым прибором для определения твердости делают на ее поверхности несколько отпечатков, количество которых определяется из расчета нанесения одного отпечатка на каждые 3 см^2 площади. На обычно применяемых прямоугольных мерах размерами $4 \times 6 \text{ см}^2$ наносят 8 отпечатков. Твердость меры принимается равной среднему арифметическому из отдельных результатов, соответствующих каждому отпечатку.

При проверке прибора образцовой мерой указанного размера на ней наносят 5 отпечатков. Показание прибора на мере принимают равным среднему арифметическому из отдельных значений твердости, соответствующих каждому отпечатку.

Нормативные документы устанавливают для первого случая допустимые значения «вариаций показаний меры» ([11], п. 18, прилож. 2) и для второго — допустимые значения «вариаций показаний прибора» ([10], п. 51). В обоих случаях под «вариацией...» понимается разность наибольшей и наименьшей величины твердости, найденных при нанесении установленного числа отпечатков. Такое различие терминов, как показано ниже, является совершенно неоправданным и вводящим в заблуждение.

Результат h_i каждого единичного определения твердости в какой-либо i -й точке меры следует рассматривать как сумму двух случайных величин: x_i — неизвестного значения твердости в данной точке и y_i — случайной погрешности прибора при измерении в этой точке:

$$h_i = x_i + y_i. \quad (15)$$

Мы предполагаем, что систематические погрешности прибора были исключены при его юстировке или исключаются путем введения поправок. Для упрощения анализа будем также считать, что случайные погрешности наблюдателя объединяются со случайными погрешностями прибора, т. е. будем рассматривать данное сочетание прибора и наблюдателя.

Соотношение (15) позволяет утверждать, что дисперсия результатов измерений твердости σ^2 равна сумме дисперсии неоднородности твердости на мере σ_m^2 и дисперсии случайных погрешностей прибора σ_n^2 :

$$\sigma^2 = \sigma_m^2 + \sigma_n^2. \quad (16)$$

Задача разработки рационального метода оценки случайных погрешностей измерения твердости по Роквеллу сводится по существу к отысканию способов раздельной оценки слагаемых σ_m^2 и σ_n^2 на каждом этапе поверочной схемы. Исходя из поверочной схемы для приборов и мер твердости, утвержденной в 1959 г., можно составить перечень метрологических характеристик процесса передачи единиц твердости от эталона к рабочим приборам (табл. 6).

Таблица 6

Прибор	Разряд	М е р ы	
		1 разряд	2 разряд
Эталонный	0	H_1, σ_1, n_1 $\sigma_1^2 = \sigma_{n0}^2 + \sigma_{m1}^2$	
Настроенный по образцовым мерам	1	H_2, σ_2, n_2 $\sigma_2^2 = \sigma_{n1}^2 + \sigma_{m1}^2$	H_3, σ_3, n_3 $\sigma_3^2 = \sigma_{n1}^2 + \sigma_{m2}^2$
Рабочий	2		H_4, σ_4, n_4 $\sigma_4^2 = \sigma_{n2}^2 + \sigma_{m2}^2$
Принятые обозначения: H_j — число твердости на мере, $H_j = \frac{\sum h_{ij}}{n_j}$; σ_j — стандарт измерений твердости; σ_{nj} — стандарт погрешностей прибора; σ_{mj} — стандарт неоднородности меры; n_j — число измерений.			

Пользуясь обозначениями табл. 6, можно решить частные задачи трех типов и можно формулировать математически общую задачу.

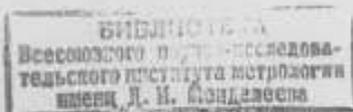
Юстировка прибора

Ранее, говоря о юстировке прибора, мы не затрагивали вопроса о том, какое различие среднего показания прибора H_{2k} от среднего значения меры H_{2k-1} следует признавать значимым при существующей дисперсии результатов. Как известно из математической статистики, критерием различия средних служит условие

$$\frac{H_{2k} - H_{2k-1}}{s_D} > t_{\alpha}, \quad (17)$$

где s_D — стандарт разности, определяемый по формуле

$$s_D = \sqrt{\frac{(n_{2k-1} - 1) s_{2k-1}^2 + (n_{2k} - 1) s_{2k}^2}{n_{2k-1} + n_{2k} - 2} \left(\frac{1}{n_{2k-1}} + \frac{1}{n_{2k}} \right)}, \quad (18)$$



t_{α} — величина, определяемая по таблице распределения Стьюдента для заданной доверительной вероятности α по числу степеней свободы, равному

$$f = n_{2k-1} + n_{2k} - 2. \quad (19)$$

Прибор подлежит юстировке, если имеет место неравенство (17). Применение этого критерия допустимо в том случае, если s_{2k}^2 и s_{2k-1}^2 имеют одинаковый порядок величины. Выбор численного значения доверительной вероятности до настоящего времени официально еще не произведен. То широкое применение, которое раньше находило правило „утроения стандарта“ для вычисления предельной погрешности без учета числа измерений, подсказывает, что для нужд метрологии можно было бы, пожалуй, принять $\alpha = 0,95$. (В самом деле, уравнение $t_{\alpha} = 3$ при бесконечно большом числе измерений имеет решение $\alpha = 0,997$, а при 5 измерениях $\alpha = 0,96$.)

Сравнение приборов

Измеряя твердость одной и той же меры разными приборами, можно произвести разностное сравнение их дисперсий. Предположим, что в формулах табл. 6

$$\sigma_{m1}^2 = \sigma_{m2}^2,$$

тогда получим:

при последовательном сравнении

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{m2}^2 - \sigma_{n1}^2 &= \sigma_4^2 - \sigma_3^2 \\ \sigma_{n1}^2 - \sigma_{n0}^2 &= \sigma_2^2 - \sigma_1^2 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

при сравнении с эталоном

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{m2}^2 - \sigma_{n0}^2 &= \sigma_4^2 + \sigma_2^2 - (\sigma_3^2 + \sigma_1^2) \\ \sigma_{n1}^2 - \sigma_{n0}^2 &= \sigma_2^2 - \sigma_1^2 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Для того чтобы при заданной доверительной вероятности считать, скажем, второй прибор существенно отличным от первого, необходима достаточно надежная оценка отношения σ_4^2/σ_3^2 . Это требование обязывает ставить для сравнения приборов специальные многократные измерения. При нанесении обычно принятых 5 отпечатков сравниваемые дисперсии могут быть признаны существенно различающимися с доверительной вероятностью 0,95, если их отношение будет больше 4,5. Анализ затрудняется, кроме того, двумя особенностями, присущими измерениям твердости по Роквеллу: а) неповторимостью измерения в данной точке меры; б) изнашиваемостью меры в процессе измерений (нанесение каждого отпечатка уменьшает полезную площадь меры, измерение постепенно уничтожает сам объект измерения).

Сравнение мер

Измеряя на одном и том же приборе твердость разных мер, можно произвести разностное сравнение этих мер. Предположим, что дисперсии мер занумерованы в порядке возрастающей величины

$$\sigma_{m1}^2 < \sigma_{m2}^2 < \dots < \sigma_{mj-1}^2 < \sigma_{mj}^2.$$

Мы можем сравнивать дисперсии всех мер с дисперсией первой меры

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{m2}^2 - \sigma_{m1}^2 &= \sigma_2^2 - \sigma_1^2 \\ \sigma_{m3}^2 - \sigma_{m1}^2 &= \sigma_3^2 - \sigma_1^2 \\ \dots &\dots \\ \sigma_{mj}^2 - \sigma_{m1}^2 &= \sigma_j^2 - \sigma_1^2 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Для того чтобы считать дисперсии сравниваемых мер существенно различающимися, надо располагать большим числом измерений, как и в случае сравнения приборов. Обычно принятые количества отпечатков, 5 или 8, не позволяют делать какие-либо заключения с приемлемой доверительной вероятностью (0,9 и выше). Проведение специальных многократных измерений для сравнения мер затруднено тем, что нанесение большого числа отпечатков лишает меру практического значения, так как она будет тогда израсходована при исследовании и не сможет потом применяться для проверки приборов.

Общая задача оценки случайных погрешностей мер и приборов

Общая задача может быть сформулирована следующим образом. Имеется ν приборов и μ мер, составить план измерений, который позволил бы найти оценку случайных погрешностей каждого прибора и каждой меры в отдельности.

Естественно начать поиски с наиболее простого случая, когда твердость каждой меры измеряется только по одному разу на каждом приборе. Тогда будем иметь $\nu\mu$ результатов, по которым надо найти $(\nu + \mu)$ неизвестных. Поскольку $\nu\mu > (\nu + \mu)$, если ν и μ больше 2, можно предположить, что поставленная задача разрешима способом наименьших квадратов. На самом же деле задача неразрешима, что легко показать на любом конкретном примере.

Предположим, например, что твердость трех приблизительно одинаковых мер измеряется на двух приборах. Принятые обозначения и условные уравнения указаны в табл. 7.

Таблица 7

Мера		Прибор	
		1	2
		$\sigma_{n1}^2 = x$	$\sigma_{n2}^2 = y$
1	$\sigma_{m1}^2 = u$	$x + u = c$	$y + u = d$
2	$\sigma_{m2}^2 = v$	$x + v = e$	$y + v = f$
3	$\sigma_{m3}^2 = w$	$x + w = g$	$y + w = h$

Величины c, d, e, f, g, h предполагаются найденными путем многократных измерений.

Условные уравнения в табл. 7 приводят к системе нормальных уравнений

$$3x + u + v + w = c + e + g$$

$$3y + u + v + w = d + f + h$$

$$x + y + 2u = c + d$$

$$x + y + 2v = e + f$$

$$x + y + 2w = g + h$$

которая не имеет решений, так как ее детерминант равен нулю. Увеличение числа измерений, а также добавление новых приборов или мер не может спасти положение, потому что структура условных уравнений при этом сохраняется — дисперсии всегда складываются и левая часть каждого нового уравнения будет, опять-таки, содержать сумму двух неизвестных. Для решения задачи надо иметь самостоятельную оценку дисперсий всех приборов или всех мер.

В рассматриваемом примере добавление двух условных уравнений, $x = a$ и $y = b$, позволяет составить систему разрешимых нормальных уравнений.

Для того чтобы наметить для будущего пути преодоления встретившейся трудности, рассмотрим на графике соотношения дисперсий прибора и меры (рис. 3). Отложим дисперсию прибора на оси абсцисс, дисперсию меры — на оси ординат. Прямая AB , образующая угол $BAO = 45^\circ$, является геометрическим местом измерений твердости с заданным значением дисперсии результатов, равной сумме дисперсий прибора и меры. Прямая CD соответствует дисперсии, существенно отличной от дисперсии на прямой AB при доверительной вероятности 0,95.

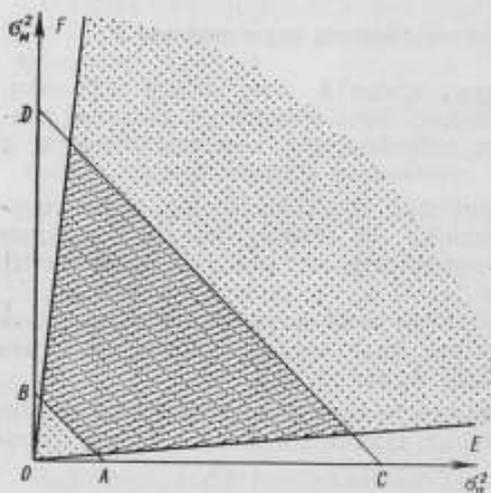


Рис. 3.

Угловым коэффициентом прямой OE равен 0,1, прямой OF — равен 10.

В секторе AOE дисперсия меры на порядок ниже дисперсии прибора, и поэтому дисперсия измерений твердости может быть приблизительно отождествлена с дисперсией прибора. В секторе EOF дисперсии прибора и меры являются величинами одного и того же порядка. В секторе FOB дисперсия прибора на порядок ниже дисперсии меры и поэтому дисперсия измерений твердости может быть приблизительно отождествлена с дисперсией меры. В настоящее время дисперсии приборов и мер являются величинами одного и того же порядка, т. е. точки, соответствующие измерениям, ложатся в средний сектор, где они недоступны для разделения. Выйти из заколдованного круга можно или существенным повышением однородности мер или существенным понижением дисперсии показаний прибора. Задача в будущем, вероятно, решится путем изготовления мер высокой однородности.

В настоящее время в целях поддержания единства измерений и повышения точности передачи единиц твердости можно рекомендовать следующие мероприятия.

1. Большое внимание должно быть уделено разработке технологии изготовления образцовых мер, способствующей повышению их однородности.

2. До тех пор, пока не будут созданы высокооднородные меры, во избежание трудно контролируемого накопления погрешностей, поверочная схема должна быть предельно короткой:

эталонный прибор — образцовая мера — рабочий прибор.

3. Изготовление мер и их градуировка должны быть централизованы на хорошо оснащенном специализированном предприятии. Качество выпускаемых мер должно периодически в строго установленные сроки проверяться путем контрольных испытаний с большим числом измерений.

4. Все вновь изготавливаемые приборы должны проходить типовые испытания, которые позволяли бы на основе многократных измерений надежно характеризовать их точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 9013—59. Измерение твердости по Роквеллу.
2. Tschirf L., VDI — Berichte, Bd. 11, 1957, S. 85.
3. Зайцев Г. П., Труды Сиб. физ.-техн. ин-та, вып. 34, Томск, 1955, стр. 22.
4. Зайцев Г. П., Смолич С. А., «Заводская лаборатория», т. 16, № 11, 1950, стр. 1355.
5. Зайцев Г. П., Славина Н. П., Труды Хим.-металлург. ин-та, Зап.-Сиб. филиала АН СССР, вып. 11, 1958, стр. 151.
6. Степанов С. С., Труды ВНИИМ, вып. 37(97), 1959, стр. 106.
7. Овсянников Б. М., Столяров В. А., Тимошук Л. Т., «Заводская лаборатория», т. 25, № 8, 1959, стр. 996.
8. Hild K., Wissenschaftliche Abhandlungen der PTB, Bd. 10, 1959, S. 333.
9. ГОСТ 9031—59. Образцовые меры твердости.
10. Инструкция 235—56 по поверке приборов для определения твердости металлов.
11. Методические указания № 169 по поверке (градуировке) образцовых мер твердости 2-го разряда.

Поступила в редакцию
29/IX 1959 г.

Б. И. ПИЛИПЧУК, С. С. СТЕПАНОВ
ВНИИМ

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛМАЗНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ К ПРИБОРАМ ТВЕРДОСТИ

В статье описаны методы исследования алмазных наконечников, принятые во ВНИИМ: внешний осмотр, измерение геометрических параметров, проверка показаний на образцовых мерах твердости. Рассмотрен метод вычисления угла между осью алмазного конуса и его образующей в каком-либо осевом сечении наконечника по Роквеллу с учетом величины угла в другом сечении и «ламинограммы» — кривой сечения поверхности алмаза плоскостью, перпендикулярной оси конуса.

Проверка алмазных наконечников конической и пирамидальной формы для измерения твердости по Роквеллу [1] и Виккерсу [2] состоит из внешнего осмотра их, измерения основных геометрических параметров и определения показаний на мерах твердости.

При внешнем осмотре выясняется соответствие оправы алмаза техническим условиям, прочность заделки в оправе, состояние и качество рабочей поверхности алмаза.

Общий осмотр поверхности алмаза производится на стереоскопическом микроскопе при 50-кратном увеличении. Глубина резкости при этом увеличении достаточна, чтобы видеть всю рабочую часть наконечника. Стереоскопичность изображения и возможность кругового поворота осветителя позволяют заметить мельчайшие дефекты поверхности алмаза, размеры которых могут быть в дальнейшем измерены на интерференционном микроскопе.

Чистота поверхности определяется интерференционным микроскопом акад. В. П. Линника. Наконечник помещают на столик микроскопа (рис. 1) в приспособлении, дающем возможность поворачивать его вокруг своей оси и устанавливать так, чтобы измеряемый участок рабочей поверхности наконечника был примерно перпендикулярен оптической оси объектива.

Современное состояние технологии изготовления наконечников обеспечивает в большинстве случаев получение средней высоты микронеровностей не выше 0,06 мк, что соответствует 14 классу чистоты по ГОСТ 2789—59.

Алмазный конический наконечник Роквелла характеризуется двумя основными геометрическими параметрами — радиусом сферического закругления и углом раскрытия конуса.

Для измерения радиуса закругления применяется микропроектор. Наконечник устанавливается на столик проектора так, чтобы его ось была перпендикулярна оси параллельного пучка лучей осветителя. Теневое изображение контура наконечника, увеличенное в 300 раз, проектируется на специальный подвижный экран с нанесенным на нем семейством равноотстоящих дуг окружностей, сопряженных со сторонами угла в 120° .

Радиусы дуг соответствуют радиусам закругления от 140 до 260 мк через каждые 5 мк. Определение радиуса закругления теневое изображение наконечника достигается совмещением его с одной из линий на экране. Измерение производится всегда в двух взаимно перпендикулярных осевых сечениях, одно из которых должно быть параллельно плоскости лыски на хвостовике оправы наконечника. Измерение радиусов кривизны только в двух сечениях является теоретически вполне



Рис. 1.

оправданным потому, что, как известно из теории поверхностей, средняя кривизна поверхности в какой-либо точке, равная полусумме значений кривизны линий пересечения поверхности двумя взаимно перпендикулярными плоскостями, проходящими через нормаль к поверхности в данной точке,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

является величиной, не зависящей от выбора тех плоскостей, в которых измеряются радиусы R_1 и R_2 .

Форма наконечника Роквелла должна быть такова, чтобы в точке пересечения оси конуса с поверхностью закругления нормаль к этой поверхности совпадала с осью. Радиус закругления должен быть равен (200 ± 10) мк, а разность радиусов закругления в двух сечениях не должна превышать 10 мк. Как показала практика измерения большого числа наконечников, радиусы R_1 и R_2 конечны и всегда имеют одинаковый знак, т. е. с точки зрения теории поверхностей «вершины наконечников», понимаемые как точки пересечения оси конуса с поверхностью закругления, относятся к точкам эллиптического типа. Значительно реже встречающиеся наконечники с «вершинами» параболического типа, у которых один из радиусов бесконечно велик, бракуются при проверке.

Угол раскрытия конуса α измеряется при 120-кратном увеличении в тех же двух осевых сечениях, в которых измерялись радиусы закругле-

ния. Значения угла раскрытия в других сечениях могут быть оценены по «ламинограмме» (см. ниже). Угол должен быть равен $(120 \pm 0,5)^\circ$, а разность углов в двух сечениях не должна превышать $0,25^\circ$.

Правильность сопряжения закругления вершины с конической поверхностью проверяется визуально при измерении как радиусов закругления на проекторе, так и угла на микроскопе.

У пирамидальных наконечников при 120-кратном увеличении измеряются углы между противоположными боковыми ребрами пирамиды. Среднее арифметическое из полученных значений переводится по специальной таблице в значение угла между противоположными боковыми гранями, которое должно быть равно $(136 \pm 0,5)^\circ$.

Длина «перемычки» — ребра на вершине пирамиды, определяемая при 250-кратном увеличении, не должна превышать 3 мк.

Для более полного и наглядного представления о форме рабочей части наконечников применяется способ нанесения на поверхность алмаза «ламинограммы». Сущность способа очень проста [3]. При вдав-

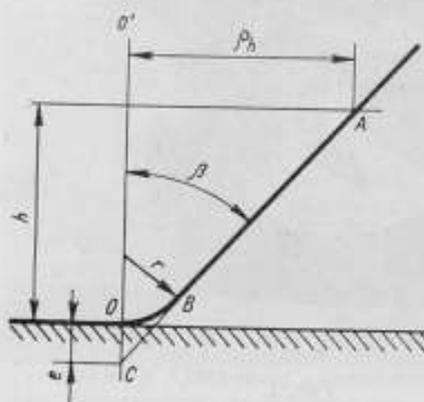


Рис. 2.

лывании алмазного наконечника в металл на месте пересечения поверхности алмаза с поверхностью металла на алмазе наблюдается адгезия частиц мелкодиспергированного металла. Если после вдавливания в металл наконечник установить на столике микроскопа, то при наблюдении в темном поле на поверхности алмаза можно увидеть яркую тонкую кривую. Если вдавливать наконечник несколько раз в плоскую металлическую пластинку перпендикулярно ее поверхности, последовательно уменьшая глубину вдавливания на некоторую наперед заданную величину «шага», то в результате получим ламинограмму — семейство кривых, характеризующих форму сечения поверхности алмаза равноотстоящими параллельными плоскостями, проходящими на разных расстояниях от вершины. С геометрической точки зрения ламинограмма представляет собой систему горизонталей, нанесенных параллельно основанию наконечника. В отличие от интерферограммы, которая способна охватить в глубину лишь десятки микрон, ламинограмма характеризует форму всей рабочей части наконечника.

При выборе малого «шага» ламинограмма дает возможность построить пространственную модель любого наконечника, при выборе крупного «шага» она позволяет решать ряд задач, относящихся к характеристике геометрической формы наконечника.

Практически наиболее важна задача определения угла $\beta = \frac{\alpha}{2}$ между образующей и осью конуса в заданном сечении. На рис. 2 приняты следующие обозначения:

- ρ_h — радиус-вектор точки A на одной из кривых;
- h — глубина вдавливания наконечника Роквелла;
- r — радиус закругления вершины наконечника;
- e — отрезок OC , т. е. расстояние по оси конуса OO' между вершиной наконечника O и точкой пересечения продолжения образующей AB с OO' .

Как легко видеть из рис. 2, угол β определяется по формуле

$$\beta = \arctg \left(\frac{\rho h}{h + e} \right),$$

где e может быть вычислена с помощью выражения

$$e = r \left(\frac{1}{\sin \beta} - 1 \right).$$

Поскольку $\beta \approx 60^\circ$, для нахождения величины β можно пользоваться приближенной формулой

$$\beta \approx \arctg \left(\frac{\rho h}{h + 0,155r} \right). \quad (2)$$

Значение угла β , вычисленное по формуле (2), будет иметь большую погрешность, связанную с погрешностями линейных измерений на ламнограмме. В том случае, если угол β_1 в каком-либо сечении ON был найден непосредственным измерением, значение величины угла β_2 в любом другом сечении OM можно с достаточной точностью найти иначе (рис. 3). Если предполагать, что радиусы закругления в обоих сечениях одинаковы $r_1 \approx r_2 = r$ и что, кроме того, в сечении ON имеет место равенство $Oa = Ob$, то, вводя обозначения $Ob = \rho_1$ и $OC = \rho_2$, получим следующее выражение угла β_2 через угол β_1 :

$$\beta_2 \approx \arctg \left(\operatorname{tg} \beta_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{h + 0,155r} \right).$$

Разложение в ряд Тэйлора для случая, когда $\beta_1 = 60^\circ$, приводит к очень простой формуле для вычисления разности углов $(\beta_2 - \beta_1)$ в минутах

$$\beta_2 - \beta_1 = 859 \frac{\rho_2 - \rho_1}{h + 0,155r}. \quad (3)$$

Приведенные формулы справедливы в том случае, если образующие прямолинейны. При кривых образующих теория несколько усложняется, но зато она дает возможность оценить величину их кривизны.

Наличие ламнограммы позволяет, таким образом, избежать кропотливой работы по измерению уг-

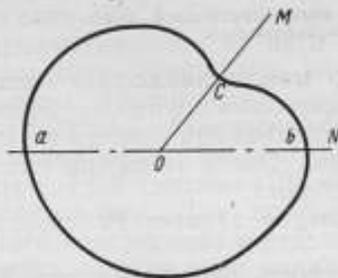


Рис. 3.



Рис. 4. Пресс для нанесения ламнограммы.

лов конического наконечника во многих сечениях.

Для нанесения ламнограммы изготовлен специальный пресс (рис. 4). Наконечник укрепляют на шпинделе прессы, на столик которого кладут

полированную латунную пластинку. Исходное положение наконечника перед вдавливанием, когда его вершина должна коснуться поверхности пластинки, определяют по способу Физо.

Наконечник вдавливают на ряд заранее избранных глубин в порядке убывания их значений. При обычных работах, не требующих особой точности, для получения ламинограммы вдавливание производят на глубины 300, 250, ..., 100, 50 мк. Фотографирование обеспечивает 64-кратное увеличение. Ламинограммы наконечников представлены на рис. 5.

Наконечники обычно изготавливают из кристаллов алмаза, имеющих форму октаэдра или додекаэдроида. Готовый наконечник Роквелла в первом случае имеет форму конуса, в котором проступают ребра четырехугольной пирамиды, а во втором случае — шестигульной. В зависи-

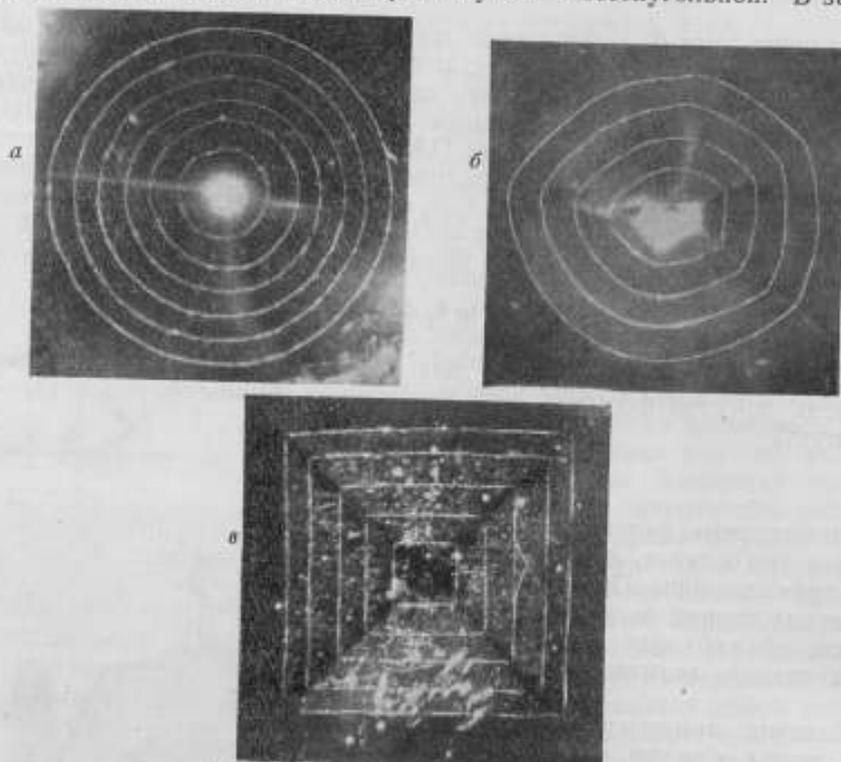


Рис. 5. Ламинограммы наконечников.

а — хорошего наконечника; б — плохого, имеющего форму неправильной шестигульной пирамиды; в — правильной пирамидальной.

мости от степени развития отдельных ребер можно наблюдать также трехугольные и изредка даже пятиугольные «скрытые» пирамиды. Форма вершины конуса должна дополнительно определяться при помощи интерференционного микроскопа акад. В. П. Линника. Очень часто она имеет пирамидальную форму с закругленными ребрами.

Результаты измерения твердости существенно зависят от свойств применяемых алмазных наконечников.

Наибольший интерес представляет зависимость чисел твердости по Роквеллу от геометрических параметров наконечника. Специальное исследование, проведенное в 1957 г. [4], позволило вывести следующие формулы:

$$\frac{\partial \text{HRC}}{\partial z} = 1,446 + (1 - 2,38\text{HRC}) \cdot 10^{-4}\text{HRC}; \quad (4)$$

$$\frac{dHRC}{dr} = 1,62 \cdot 10^{-2} - 0,75(1 - 0,1HRC) \cdot 10^{-4}HRC, \quad (5)$$

где α — угол раскрытия конуса, град;
 r — радиус закругления, мк.

Формулы (4) и (5) пригодны для твердостей, лежащих в пределах 25–65 единиц шкалы С (Роквелла).

Удалось также установить влияние кривизны выпуклых образующих. Если угол раскрытия конуса α_1 , измеренный в месте сопряжения закругления с боковой поверхностью, на $\Delta\alpha$ превышает угол раскрытия конуса α_2 , измеренный на глубине 227 мк от вершины, то показания такого наконечника будут примерно на $0,8 \Delta\alpha$ единиц выше, чем показания наконечника с прямыми образующими и углом раскрытия α_2 :

$$(HRC)_{\Delta\alpha} \approx (HRC)_0 + 0,8\Delta\alpha, \quad (6)$$

где $(HRC)_{\Delta\alpha}$ — показания наконечника с выпуклыми образующими;
 $(HRC)_0$ — " " " " с прямыми образующими.

Применение формул (4)–(6) для предвычисления разности показаний двух наконечников с хорошо известными параметрами оправдывается статистически, однако бывают случаи, когда наконечник правильной формы имеет выпадающие показания. С другой стороны, встречаются наконечники неправильной формы, показания которых близки к показаниям правильных наконечников. Поскольку в настоящее время невозможно, исходя из результатов измерения геометрических параметров наконечника, достаточно точно предсказать его показания, приходится сопоставлять эти показания с показаниями образцового наконечника на одном и том же приборе.

Для проверяемых конических наконечников такое сопоставление производят на трех образцовых мерах твердости (25 ± 5 ; 45 ± 5 ; 65 ± 5 единиц HRC). Отклонение среднего арифметического из пяти значений твердости образцовой меры, полученных проверяемым наконечником, от среднего, найденного образцовым наконечником, не должно превышать $\pm 0,5$ единицы HRC на каждой из трех мер. Для любого проверяемого наконечника в отдельности допускается отклонение только одного знака по всем трем мерам.

Для успешного проведения этого этапа проверки необходимо обеспечить строго одинаковые условия измерения как образцовым, так и проверяемыми наконечниками. Это достигается, во-первых, выбором прибора, дающего очень стабильные показания, и тщательной юстировкой его; во-вторых, одинаковым креплением и обжимкой на приборе;

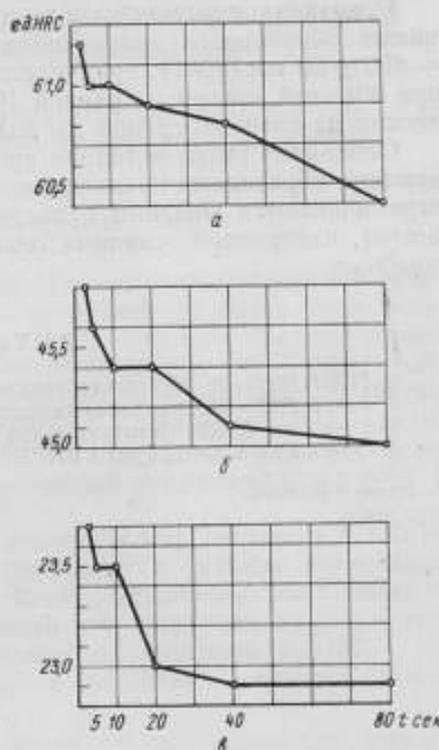


Рис. 6. Влияние времени нагружения на значение твердости.
 a — высокая твердость; $б$ — средняя; $в$ — низкая.

в-третьих, соблюдением одинакового времени приложения и выдержки дополнительной нагрузки ($10 \pm 0,5$) сек при помощи секундомера.

Время 10 сек выбрано при анализе выполненных опытов по влиянию времени нагружения на значения твердости.

Оказалось, что наиболее интенсивное изменение значения твердости в зависимости от времени выдержки происходит на участке от 0 до 10 сек (см. рис. 6).

Обработка по способу наименьших квадратов результатов многочисленных опытов позволила установить следующую эмпирическую формулу, полезную для грубой оценки возможных погрешностей за счет изменения режима приложения основной нагрузки:

$$H = H' + \frac{b}{t}, \quad (7)$$

где H — значение твердости при заданном времени t , H' — предельное значение твердости при бесконечно большом значении t , t — полное время приложения основной нагрузки, т. е. сумма времени нарастания нагрузки от 10 до 150 кгс и времени выдержки полной нагрузки 150 кгс. Для рабочих приборов на образцовых мерах при $H = 25$ е. т. $b \approx 5$, при 45 е. т. $b \approx 3$ и при 65 е. т. $b \approx 2$.

Можно поэтому рассматривать указанный промежуток времени как минимально возможный для получения устойчивых результатов измерения твердости.

Показания пирамидального наконечника сопоставляются с показаниями образцового наконечника на трех образцовых мерах ($HV = 450 \pm 50$ кгс·мм⁻²), градуированных при нагрузках 5, 30 и 100 кгс, при обычной выдержке, равной 10 сек. Отклонения средних арифметических из пяти измерений не должны превышать 1%.

Описанная выше методика применяется в полном объеме при исследовании образцовых наконечников. При проверке рабочих наконечников ограничиваются внешним осмотром их (без измерения чистоты поверхности), измерением основных геометрических параметров и проверкой на приборе.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 9013—59, Измерение твердости по Роквеллу.
2. ГОСТ 2999—59, Измерение твердости алмазной пирамидой (по Виккерсу).
3. Гидель А. Ю., «Измерительная техника», № 3, 1957, стр. 33.
4. Степанов С. С., Труды ВНИИМ, вып. 37(97), 1959, стр. 106.

Поступила в редакцию
29/IX 1959 г.

Е. А. ВОЛКОВА, А. В. СМИРНОВ
ВНИИМ

НЕОДНОРОДНОСТЬ МЕР ТВЕРДОСТИ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ И СПОСОБЫ ЕЕ УСТРАНЕНИЯ

В статье приводится статистическая обработка данных поверочной лаборатории ВНИИМ за 1957 г. по поверке стальных мер 2-го разряда, МТР и МТВ.

Статистические данные

Одной из задач, связанных с повышением точности измерений твердости, является разработка рекомендаций по выбору марки стали, сортамента и технологии термической обработки для изготовления образцовых мер твердости, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 9031—59. Допустимый разброс значений твердости при 5 измерениях по этому ГОСТ (табл. 1) немного сужен по сравнению с «Методическими указаниями» Комитета стандартов № 169, 1958 г. [1, 2], действовавшими до 1 января 1960 г. (допустимая разность размеров мер отпечатков в табл. 1 приводится также при 5 измерениях).

В настоящее время отдельные изготовители мер твердости в СССР применяют различные марки стали, сортамент и условия термообработки, причем, если исходить из табл. 2—4, составленных на основании статистической обработки данных поверки мер твердости, присылаемых различными организациями в поверочную лабораторию ВНИИМ, то брак мер из-за неоднородности твердости (разброса) достигает огромных размеров.

В табл. 2 приведены результаты статистической обработки данных поверочной лаборатории ВНИИМ по поверке в 1957 г. 11 336 мер твердости 2-го разряда, представленных 113 предприятиями. Количество мер дано в процентах от общего их числа. Испытание каждой меры проводилось в 5—8 (в среднем в 6) точках.

Из табл. 2 видно, что процент брака мер, испытанных согласно действующим «Методическим указаниям» № 169, составляет для мер 2-го разряда 22,2%, а по условиям ГОСТ 9031—59 — 58,0%.

В табл. 3 приведены данные за 1957 г. о количестве мер с разным разбросом по Виккерсу (HV) в процентной зависимости от общего числа поверенных мер и от применяемой нагрузки.

Таблица 1

Условные обозначения мер	Шкала твердости или нагрузки	Единицы измерений	Допустимый разброс значений мер твердости		Допустимая разность размеров отпечатков	
			1-го разряда	2-го разряда	1-го разряда	2-го разряда
МТВ	30 Д ²	Проценты	1,0	2,0 (3,0)	1,0	2,0 (2,0)
	10 Д ²					
	2,5 Д ²					
МТР	С	Единицы	0,3	0,6 (1,0)	—	—
	В		0,4	0,7	—	—
	А		0,3	0,6	—	—
МТСР	Н	Единицы	0,4	1,0	—	—
	Т		0,4	1,0	—	—
МТВ	5 кгс	Проценты	1,0	1,5 (2,5)	1,0	2,0 (2,0)
	30 кгс		0,5	1,0	1,0	2,0
	100 кгс		0,5	1,0	1,0	2,0

Примечание. Цифры в скобках относятся к „Методическим указаниям“ № 160.

Таблица 2

Разброс, единицы HRC	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Свыше 1,0 (брак)
Количество мер, %	3,5	7,3	7,6	7,2	9,5	6,9	8,6	10,7	7,7	8,8	22,2

Таблица 3

Количество		Нагрузка при поверке, кгс	Меры с разбросом по HV, %					
предприятий, прилавочных мер	шт.		0—0,5	0,5—1,0	1—1,5	1,5—2	2—2,5	выше 2,5
9	385	5	0,5	2,6	8,0	7,8	13,2	67,9
8	225	30	0,4	8,4	18,2	16,1	56,9	—
2	181	100	3,9	17,7	17,1	17,7	43,6	—

Примечание. Цифры за жирной чертой стрелы указывают процент бракованных мер согласно ГОСТ 9031—59.

Из табл. 3 видно, что брак по HV более велик, чем по HRC, и возрастает по мере уменьшения нагрузки на наконечник.

Таблица 4

Марка стали	Количество испытанных мер (шт.) с твердостью			Брак по твердости*					
	низкой	средней	высокой	низкой		средней		высокой	
				шт.	%	шт.	%	шт.	%
У12А	270	101	80	75	28	12	12	3	4
X2	—	345	—	—	—	174	50	—	—
XBG	298	235	54	39	13,1	9	3,8	9	5,6
ШХ15	74	73	597	47	64	28	38	211	35,3
У10А**	300	300	300	51	17	26	8,7	8	2,7
Среднее . . .	—	—	—		30,5		22,5		11,9

* По „Методическим указаниям“ № 109.

** Изготовитель мер — завод „Эталон“, поверка — в лаборатории механических измерений ВНИИМ.

Из табл. 4, в которой приведены статистические данные о браке мер твердости по HRC в зависимости от марки стали, применяемой различными потребителями, можно сделать следующие выводы:

1) все предприятия применяют для изготовления мер твердости заэвтектоидную инструментальную сталь независимо от требуемой твердости;

2) брак по неоднородности недопустимо велик;

3) средний процент брака по высокой твердости вдвое меньше, чем по средней, и втрое меньше, чем по низкой;

4) для низкой и средней твердости наименьший брак наблюдается для мер, изготовленных из ст. XBG, а по высокой — из ст. У10А.

Из обработки статистических данных можно сделать следующие выводы:

1) для мер высокой твердости можно сохранить ст. У10А или У12А (более дешевые марки, чем XBG);

2) выбор для мер средней и низкой твердости марок инструментальной стали с высоким содержанием углерода ничем не оправдывается. Необходимо подобрать и испытать для этих мер марки конструкционной стали.

Общие соображения по выбору стали и по обработке образцовых мер различной твердости

Для получения минимального разброса твердости в образцовых мерах имеют значение: а) марка стали; б) сортамент; в) металлургическое производство («качественность», способ раскисления и величина природного зерна, прокаливаемость, микроструктура проката, поступающего для производства мер); г) термическая обработка; д) шлифование и полирование.

Марка стали

С точки зрения однородности для мер высокой твердости желательно иметь в результате термообработки мелкозернистую однофазную структуру стали. Все обычно применяемые для этих мер стали (табл. 4) — заэвтектоидные и в результате правильной термообработки (в зависимо-

сти от отпуска) должны иметь двухфазную структуру: мартенсит, троостит или сорбит со свободными карбидами. При низком отпуске возможно наличие в стали остаточного аустенита, т. е. трехфазной структуры.

Но, судя по данным табл. 4, при низком отпуске двух- и даже трехфазность структуры мало сказывается на разбросе твердости в связи с тем, что отпечатки измерений значительно больше размеров как карбидов, находящихся в свободном состоянии, так и включений аустенитной фазы.

По подсчетам, приведенным в работе [3], в хорошо отожженной на зернистый перлит стали марки У10 на 1 мм^2 поверхности шлифа наблюдается $1,8 \cdot 10^5$ карбидов диаметром до 2 мк . Количество карбидов в испытанной по HRC и HV закаленной углеродистой инструментальной заэвтектонидной стали У10А в зависимости от площади, захватываемой отпечатком, указано в табл. 5.

Таблица 5

Способ измерения	Твердость образца*, кг/мм ²	Площадь отпечатка, мм ²	Число карбидов на площади отпечатка, шт.
HRC-150	61,0	0,170	4 590
HV-5	857	0,005	135
HV-30	862	0,032	865
HV-100	865	0,107	2 890

* Все отпечатки взяты на одном образце.

Если при закалке при температуре 780 – 790°C в мартенсит перейдет $0,83\%$ углерода от всего его количества в $0,96\%$, т. е. примерно 85% карбидов, то 15% карбидов останется в структурно свободном состоянии, что составит $2,7 \cdot 10^4$ карбидов на 1 мм^2 . Следовательно, площадь отпечатка $0,170 \text{ мм}^2$ (табл. 5) на закаленной на HRC-61 стали У10 захватывает примерно 4590 карбидов. Отсюда можно сделать вывод, что микронеоднородность в отношении карбидной фазы при низком отпуске не скажется на разбросе твердости. Что касается испытаний по HV, то в этом случае как площадь отпечатка, так и количество захватываемых карбидов во много раз меньше.

Величина карбидной фазы, судя по табл. 3, начинает играть большую роль при испытании по HV при малых нагрузках.

При среднем и, в особенности, при высоком отпуске свободные карбиды увеличиваются в размере при одновременном выделении массы карбидов из раствора и быстром их росте. Этим может объясняться существенное увеличение разброса при среднем и высоком отпуске высокоуглеродистой стали (табл. 4).

Таблица 6

Марка стали	Число карбидов на $0,01 \text{ мм}^2$ поверхности образца при их диаметре, мк								
	0,36	0,72	1,08	1,43	1,72	2,15	2,51	2,86	> 2,86
У7	1079	2500	994	378	189	41	26	12	6
У10	1075	1735	1043	695	244	121	75	28	37
У12	540	1512	768	597	299	152	100	52	24

По данным [3] в табл. 6 приведены данные о числе и размерах карбидов в стали после оптимального отжига на зернистый перлит при 730—740°С в течение 2 ч и охлаждения со скоростью 20 град/ч.

Из табл. 6 следует, что с увеличением содержания углерода в стали, отожженной на зернистый перлит, количество мелких карбидов уменьшается, а крупных возрастает.

Что касается остаточного аустенита, который не изменяется при низком отпуске, то его рассеяние в объеме стали, видимо, таково, что оно не отражается на результатах разброса даже при испытании по НВ, и это подтверждается следующими данными. В работе Митсухашаи [4], посвященной изучению связи между разбросом и термообработкой стальных мер высокой твердости, углеродистые стали с содержанием углерода 1,29; 0,99; 0,77 и 1,06% подвергались глубокому охлаждению (до -75°С) сухим льдом в нефтяном эфире после закалки до отпуска и после отпуска по разным режимам. Во всех случаях наблюдался прирост твердости по НВ, но не наступало уменьшения разброса в сравнении с термообработкой без глубокого охлаждения. В наших опытах со ст. У7А сразу после закалки в воде производилось глубокое охлаждение при -70°С в течение 2 ч. Был отмечен, в согласии с [4], прирост твердости с 57,8 до 63,5 по HRC и с 675 до 759 по НВ и незначительное уменьшение разброса. Известно, что достаточно высокую твердость в результате резкой закалки можно получить в стали с содержанием углерода от 0,6% и выше (рис. 1), т. е. для всех марок инструментальной стали, начиная от ст. У7. Дзэвтектоидная сталь имеет преимущества в смысле большей однородности закаленной структуры. Так, в стали с содержанием

- С = 0,7% — получится мартенсит;
- С = 0,83% — » мартенсит и остаточный аустенит;
- С > 0,83% — » мартенсит, остаточный аустенит и карбиды.

С другой стороны, заэвтектоидная сталь требует меньшей температуры нагревания перед закалкой, что представляет меньшую опасность образования закалочных трещин.

В работе [4] были испытаны стали с 0,77; 0,84; 0,99; 1,06 и 1,29% углерода после одинаковой термической обработки: отжиг 1½ ч при 780° и 5 ч при 600° и охлаждение с печью, закалка 50 мин от 780° в 4% NaOH с переносом от 320° в масло, отпуск 100° в течение 2 ч. Полученные результаты о разбросе твердости в сопоставлении с содержанием углерода в стали, приведенные в табл. 7, позволяют сделать вывод, что нет существенной разницы в разбросе между испытанными сталями, так как причиной большого разброса НВ у сталей с содержанием углерода 0,84 и 1,29% могло являться большее число измерений (n = 70 и 75 против 38 у других сталей).

В работе А. Л. Немчинского [5] дается связь между толщиной образца, содержанием углерода в стали и склонностью ее к закалочным трещинам (рис. 2). Как видно из рис. 2, при принятых в ГОСТ толщинах мер (8—15 мм) в опасной зоне лежат стали с 0,60—0,65% углерода. Поэтому для образцовых мер высокой твердости следует исключить ст. У7 и У7А.

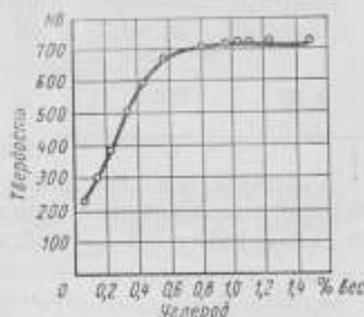


Рис. 1. Максимальное значение твердости углеродистых сталей с содержанием 0,15—0,30% Si и 0,50—0,60% Mn после закалки в воде от 760—780°С [9].

С, %	HV, среднее арифметическое	Разброс от HV	Средняя квадратичная погрешность	Число измерений, n	Примечание
0,65	815,0	97	20,77	32	По нашим измерениям после закалки от 780° С, без отпуска
0,77	868,8	31	6,40	38	
0,84	850,3	50	9,6	70	
0,99	878,0	27	6,25	38	
1,06	930,1	32	6,79	38	
1,29	870,5	77	16,2	75	Перед отпуском образцы проходили глубокое охлаждение до -75° С

Учитывая все сказанное, следует считать, что для образцовых мер высокой твердости необходимо остановиться на ст. У9А (0,85—0,94% С) по ГОСТ 1435—54. Эта сталь дает при закалке наивысшую твердость основы, практически не содержит карбидов и показывает наиболее равномерную твердость и структуру в закаленном состоянии [6]. Близко к этой стали лежит часто применяемая ст. У10А.

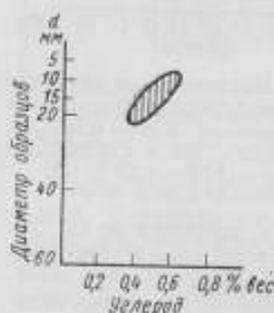


Рис. 2. d — C диаграмма для однократной закалки стали в холодной воде с 800—850° С.

Заштрихована область трещин на цилиндрической поверхности [5].

Выбору углеродистой стали для мер высокой твердости не противоречит также недавно опубликованная работа Вуда [7], в которой сравниваются изготовленные из полосы 63,5 × 12,7 мм бруски из углеродистой стали с 1,1% С и 0,4% Mn (типа У12) с брусками из легированной стали Stayloform состава (%): 1,0 С; 1,2 Mn; 0,6 Cr; 0,5 Ni; 0,2 W; 0,2 Si; 0,01 S и 0,03 P (типа ХВГ, но более сложно легированная сталь). Брусочки помещали в цианистую ванну и выдерживали 7 мин при 450° С для равномерного прогрева. Затем температуру повышали до 760—780° С для углеродистой стали и до 800—820° С для легированной.

Закалку брусков производили при комнатной температуре в соленой воде, отпускали на разные твердости. Особенно тщательно проводили последующую обработку (шлифование и полирование). При проверке термообработанных брусков по шкале HV с непосредственной нагрузкой 30 кгс получена максимальная вариация твердости 11 единиц для углеродистой стали и 16 единиц для легированной. Замечено, что появление троостита в углеродистой стали вызывает увеличение разброса. Отсюда можно сделать вывод, что обе стали пригодны для изготовления образцовых мер различной твердости.

Сортамент

До сих пор некоторые потребители применяют кольцевые меры, изготовленные из круглого проката поперек волокна. Возможность изготовления таких мер предусмотрена и в ГОСТ 9031—59. Однако наи-

лучшей однородности следует ожидать от проката с максимальным обжатием. В этом смысле полоса толщиной 10—15 мм несравнима с полосой круглого сечения диаметром 60 мм, так как при прокатке она подвергается гораздо большему обжатию. Из этих соображений, так же как и из соображений экономии, размеры полосовой стали следует выбирать по возможности ближе к рекомендуемым размерам мер. Так как глубина обезуглероженного слоя в горячем прокате при толщине полос 10—16 мм не превышает 0,40 мм на сторону, то для мер толщиной 10 мм следует взять полосу толщиной 12 мм и шириной 4—5 мм.

ГОСТ 1435—54 допускает выбор микроструктуры поставки по шкале № 1, оценки остатков цементитной сетки по шкале № 2 и прокаливаемости по шкале № 3. Для мер твердости следует взять микроструктуру № 2—7 по шкале № 1, балл 1 или 2 по шкале № 2 и группу II прокаливаемости (при закалке от 760°С) по шкале № 3. Для мер твердости HRC и HV надо применять сталь $\frac{\text{полоса } 12 \times 45 \text{ ГОСТ } 4405 - 48}{\text{У9А гр. V ГОСТ } 1435 - 54}$.

Металлургическое производство

Помимо точности изготовления мер твердости по допустимому максимальному содержанию примесей (кроме углерода), которое устанавливается маркой стали и отметкой «А», указывающей на высококачественность, некоторые особенности металлургического производства могут оказывать влияние на разброс. Особенности, относящиеся к ведению плавки и к порядку и способу раскисления, скажутся главным образом на строении границ природного зерна, на росте зерна при нагреве и на прокаливаемости.

Наше отношение к этому вопросу мы определили, выбрав для мер твердости сталь группы V, отвечающую условиям сквозной прокаливаемости.

Нельзя не отметить, однако, что способы ведения плавки и раскисления, приводящие или не приводящие к образованию высококремнистых силикатов и к их адсорбции на границах зерен, продолжают изучать металлурги (см., например, [8]). Так, если бы удалось доказать, что отсутствие поверхностноактивных высококремнистых силикатов приводит в конце концов к большей равномерности твердости в мерах, то целесообразно было бы заказывать стали специальных марок для производства образцовых мер в государственном масштабе. Поскольку, однако, таких доказательств еще нет, мы должны основываться на принятом в настоящее время металлургическом производстве.

Термическая обработка

Если рассмотреть имеющиеся в нашем распоряжении технологические карты различных изготовителей мер твердости с указанием применяемых ими марок стали и режимов термообработки (табл. 8), то мы увидим, что первой термической операцией при изготовлении является нормализация или отжиг.

В работе [4] также изучены условия отжига стали с 0,84% углерода и установлено, что отжиг 1½ ч при 780°С с переносом на 5 ч в печь 600°С и дальнейшим охлаждением с печью дает меньший разброс по сравнению с отжигом 1½ ч при 840°С и охлаждением с печью. Выбраны, таким образом, условия отжига, приводящие к образованию зернистого цементита. Возможно, что при ненадлежащем сортamente и структурном состоянии полученной стали потребителю придется при-

бегать к дополнительному отжигу, но в ГОСТ 1435—54 гарантированная твердость поставки (не более 192 по НВ для стали У9А и не более 197 для стали У10А) и шкала микроструктур уже обеспечивают полученные структуры зернистого цементита формы и размеров, наиболее благоприятных для последующей термообработки и получения однородной твердости. При правильном заказе и контроле поступающего заказа потребителю нет надобности прибегать к операции отжига.

Таблица 8

Сталь	Исходное состояние	Условия		Охлаждающая среда	Условия отпуска
		предварительного отжига	нагрева для закали		
ШХ15	Кованая	Нормализация 900—920°, отпуск 680°	840°, 12 мин, в соляной ванне	Керосин	140—150°, 1½—2 ч
У12А	Катаная	Отжиг 2½ ч при 760°	760°, 25 мин, в печи	Вода с 20% соли	130°, 4 ч
У10А	"	Отжиг 30 мин при 900±20°, в чугунной стружке	800°, 12 мин, в соляной ванне	Вода с 15% соли при 25°	160—180°, 6 ч, в соляной ванне

Примечание. Температура приведена в °С.
В таблице использованы технические условия на меры твердости: 2-го Шарикового, ГЗИП и „Эталон“.

В работе [4] указывается, что меры из стали с 0,84% углерода при закалке в воде с температурой 10°С и с переносом в масло с температурой 320°С имели трещины, а при закалке в тех же условиях в воде, но с 4% NaOH, трещин не имели.

Благоприятное действие солей и щелочей, растворенных в воде, для изделий среднего размера из высокоуглеродистой стали отмечается и в [5], причем указывается, что закалка в солевых растворах способствует также исчезновению трещин—сколов кромок.

Закалку стали У9А следует, таким образом, производить с нагревом 760—780°С в воде с 3—4% NaOH, при этом должна получаться структура с твердостью по HRC не менее 62. Эта закалка для однородности мер должна осуществляться на автомате. Чтобы избежать трещин, следует применять прерванную закалку в двух жидких средах, вода—масло, с тем расчетом, чтобы мартенситное превращение развивалось в более мягкой среде (масле). Согласно [4] сталь, охлаждающаяся в воде до 320°С, следует переносить для полного охлаждения в масло, что требует применения бака специальной конструкции.

В ст. У9А после закали может быть от 5 до 10% остаточного аустенита (рис. 3 по [9]). Выше были приведены данные, указывающие на то, что уменьшение его количества обработкой глубоким охлаждением до (—70)÷(—75°) увеличивает твердость, но не уменьшает разброс твердости. Однако полное превращение аустенита в стали с 0,9% С требует более глубокого охлаждения: до —100°С (рис. 4) по [9]. Кроме того, возможно, что для мер по Виккерсу при нагрузке 5 кгс, требующих особой однородности, такая обработка будет необходима. Нужно только учесть, что глубокое охлаждение должно быть проведено сразу же после закали во избежание стабилизации остаточного аустенита [9]. Поэтому необходимо более тщательно изучить влияние глубокого охлаждения на разброс твердости.

В [4] для стали с 0,84% С рекомендуется отпуск при 100° С в течение 2 ч, хотя и указывается, что в пределах до 200° С (табл. 9) разброс измерений твердости тем меньше, чем выше температура отпуска.

Таблица 9

Температура отпуска, °С	Число измерений, n	Твердость (средняя арифметическая), НУ	Медиана, М	Разброс, V	Термическая обработка
100	70	850,3	852	50	Сталь с 0,84% С, закалка 50 мин при 800° С в растворе 40% NaOH; отпуск 2 ч
150	70	812,7	812	42	
200	70	722,4	722	20	

На рис. 5 (по [6]) приведена кривая 1 уменьшения твердости при отпуске для стали с 0,94% С сразу после закалки и кривая 2 — для стали с 0,8% С после закалки и глубокого охлаждения до -195°. Снижение твердости начинается от 150° С. По-видимому, эту температуру и следует принять как температуру отпуска для ст. У9А.

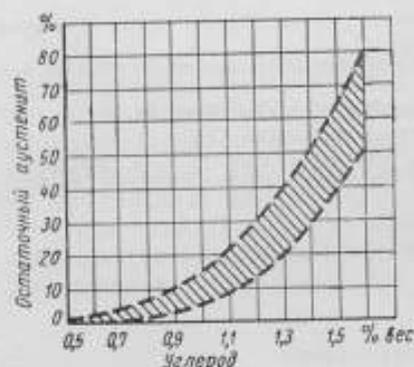


Рис. 3. Влияние содержания углерода на количество остаточного аустенита в закаленной стали [9]. Заштрихованная область — рассеяние полученных значений.

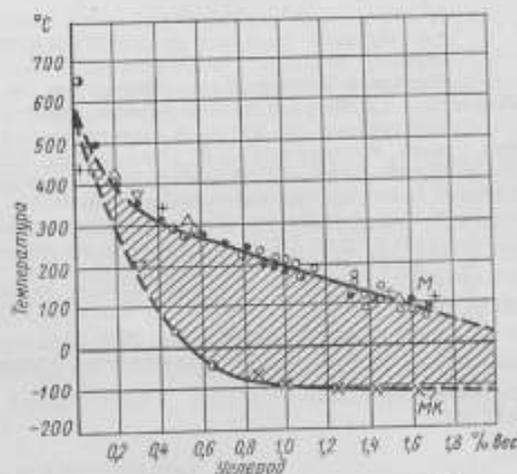


Рис. 4. Мартенситная диаграмма [9]. Точки M (верхняя кривая) — температура начала и точки МК (нижняя кривая) — температура конца мартенситного превращения в зависимости от содержания углерода. Заштрихован интервал мартенситного превращения.

- Одну и ту же твердость можно получить двумя способами:
- при кратковременном отпуске и повышенной температуре и
 - при длительном отпуске, но при пониженной температуре.

Вероятно, следует предпочесть последние условия, так как они приводят к более полному завершению разных субмикроскопических процессов (например, выделению из феррита азота, углерода, кислорода и водорода вследствие уменьшения их растворимости в альфа-железе). Это, в свою очередь, приводит к большей стабилизации структуры и свойств стали. Выдержка 2 ч при температуре отпуска 150° С является, по-видимому, оптимальной.

Шлифование и полирование

Разогрев поверхности во время шлифования может привести к образованию сетки шлифовочных трещин, а неравномерный разогрев — к неоднородному снижению твердости. В [4] приведен пример значительного разброса, от 77 до 293 единиц по HV, вследствие местного разо-

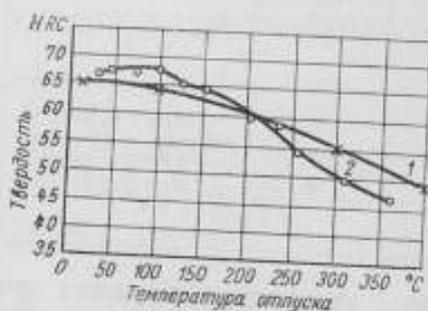


Рис. 5. Зависимость падения твердости закаленной на мартенсит стали от температуры отпуска.
1 — сталь с 0,94% C и 0,40% Mn; 2 — сталь с 0,8% C, прошедшая закалку от 815° C и глубокое охлаждение при — 195° C [6].

грева при шлифовании и связанных с ним структурных изменений. Поэтому вопрос тщательной машинной шлифовки, а также выбор метода полирования требуют внимательного изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указание Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР № 169, Стандартгиз, 1958.
2. Инструкция № 235-56 Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, Стандартгиз, 1957.
3. Белоручев Л. В., Оптимальные условия образования зернистого перлита при отжиге. Кандидатская диссертация, 1949.
4. Mitsuhashi T. (Tokio), Härtemessungen Betrieb, VDI, Berichte, b. 11, 1957.
5. Немчинский А. Л., Закалочные трещины, Судпромгиз, 1958.
6. Гудремон Э., Специальные стали, т. I, Металлургиядат, 1959 (с немецкого).
7. Wood I. G., Tests blocks for indentation Hardness Testing, Engineer, № 5405, 1959, 208.
8. Баранов С. М., «Сталь», № 4, 1948.
9. Гуляев А. П., Металловедение, Оборонгиз, 1956.

Поступила в редакцию
24/IX 1959 г.

С. А. СМОЛНЧ
ВНИИМ

ОБРАЗЦОВЫЙ ПРИБОР СИСТЕМЫ ВНИИМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО РОКВЕЛЛУ

В статье дано описание устройства и принципа действия образцового прибора системы ВНИИМ для воспроизведения и хранения единицы твердости по шкалам Роквелла. Приведены особенности прибора, отличающие его от других приборов того же назначения. Изложены результаты исследования прибора, а также анализ его погрешностей.

Образцовый прибор предназначен для воспроизведения и хранения единицы твердости по шкалам Роквелла. Его отличительными особенностями являются: а) приложение нагрузки к наконечнику методом непосредственного нагружения, б) автоматический процесс вдавливания наконечника, в) жесткость станины, исключая влияние деформации ее на результат измерения, г) отсутствие воздействия рабочей нагрузки на части прибора, несущие измерительные устройства, д) пониженная на порядок (по сравнению с обычными приборами) погрешность измерения деформации, получаемой при вдавливании наконечника.

Устройство и принцип действия

Общий вид прибора дан на рис. 1. Предварительная нагрузка создается весом коромыслового коромысла 1, в котором закреплен наконечник 2. Одно целое с коромыслом составляет кронштейн-держатель шкалы 3. Против шкалы на неподвижном кронштейне 4 установлен отсчетный микроскоп 5. Подъем и опускание коромысла с наконечником и шкалой осуществляется малой поршневой парой, находящейся сзади прибора, под действием которой коромысло поворачивается на своей оси. Основная нагрузка создается весом гирь 7, лежащих на поддоне 8 грузовой рамы 6. Последняя своим штырем может опираться на наконечник. Подъем и опускание грузовой рамы осуществляется гидравлическим подъемником 9. В табл. 1 приведена пооперационная схема измерения твердости рассматриваемым прибором.

В пульте управления (рис. 2) находятся гидравлический привод и устройства для автоматического управления: дистрибутор 2 и реле времени 3. Дистрибутор, состоящий из пяти электромагнитных заслонок

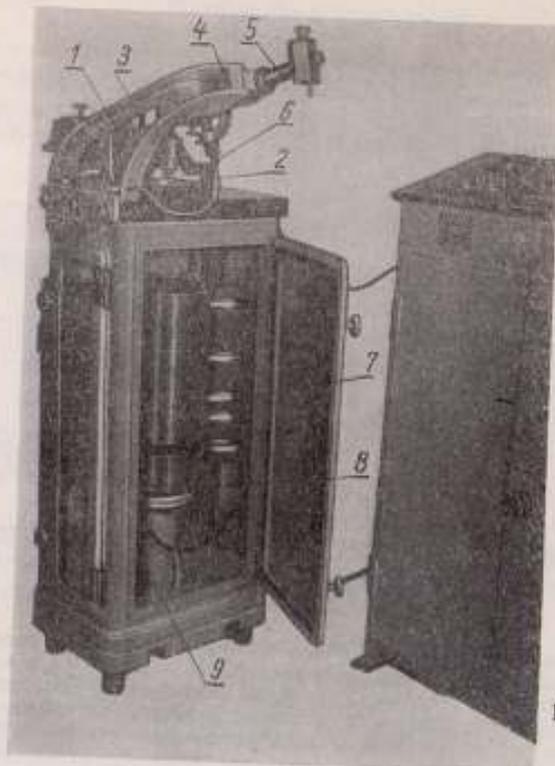


Рис. 1. Общий вид прибора.

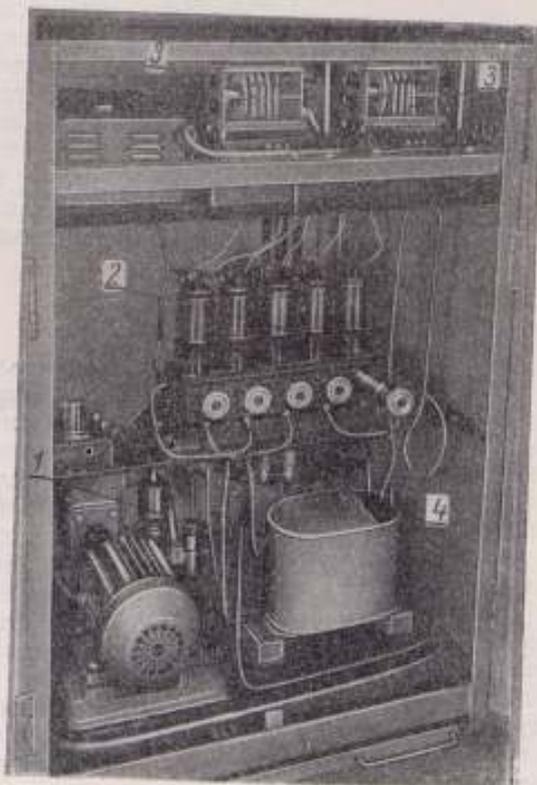
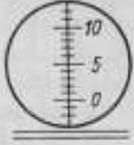
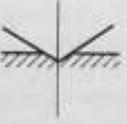
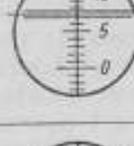


Рис. 2. Пульт управления.

с регулировочными кранами, направляет поток масла в соответствующую поршневую пару или выпускает оттуда масло. Вследствие этого происходит соответственно снятие или приложение нагрузки. Время протекания отдельных операций процесса вдавливания устанавливается с помощью двух электромеханических реле времени типа Е-58. Постоянное давление рабочей жидкости в системе поддерживает гидроаккумулятор 4, который периодически заряжают с помощью приводного насоса 1. На рис. 3 показана общая блок-схема описываемого прибора.

Таблица 1

Положение		Измерительная операция
наконечника	штрихов шкалы	
		Исходное положение: наконечник над испытуемой поверхностью на высоте $a \approx 0,5$ мм
		Приложена предварительная нагрузка. Совмещение биштриха шкалы с нулем окулярного микрометра
		Приложена основная нагрузка
		Снята основная нагрузка. Берется отчет по окулярному микрометру
		Снята предварительная нагрузка. Наконечник в исходном положении

Станина прибора представляет массивную литую тумбу, на которой укреплен неподвижный столик в виде плитки толщиной около 40 мм. Верхняя поверхность столика снабжена канавками, что обеспечивает плотное прилегание опорной поверхности градуируемой меры твердости. Жесткость станины исключает возможность такой осадки столика под влиянием нагрузки, которая может отразиться на измерении глубины вдавливания наконечника в испытуемый металл. Таким образом жесткость корыччатого коромысла исключает изгиб его, что могло бы исказить результаты измерения.

В отличие от рабочих твердомеров типа ТК в рассматриваемом приборе наконечник укреплен с помощью прижимного колпачка. Благодаря этому, независимо от размера хвостовика, правильности его формы и посадки в отверстие втулки коробчатого коромысла, наконечник всегда прочно прижат своей базовой кольцевой поверхностью к торцу втулки.

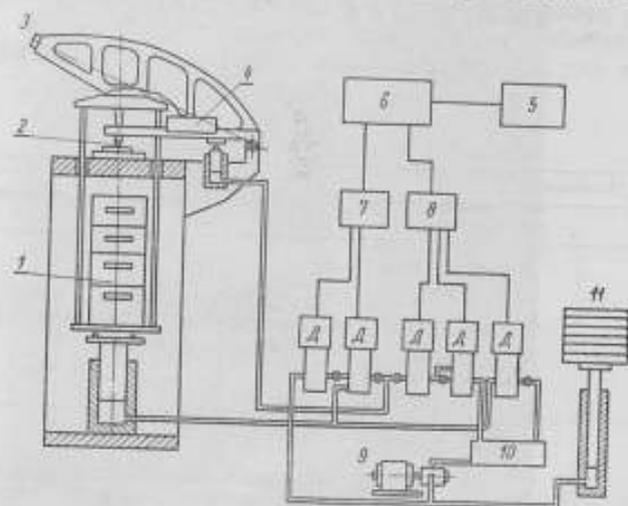


Рис. 3. Блок-схема прибора.

1 — основная нагрузка; 2 — наконечник; 3 — оптическая ось микроскопа; 4 — предварительная нагрузка; 5 — блок питания; 6 — пульт; 7 и 8 — реле времени; 9 — насос; 10 — сливной бак; 11 — титровкумулятор; Д — Д — дистрибутор с 5 электромагнитными заслонками.

Перпендикулярность оси наконечника к испытуемой поверхности обеспечивается точностью изготовления и сборки коробчатого коромысла и входящих в него деталей. Вертикальность оси наконечника проверяют 60-секундным уровнем, который устанавливают на площадку, перпендикулярную оси наконечника. В этот момент вершина наконечника и ось

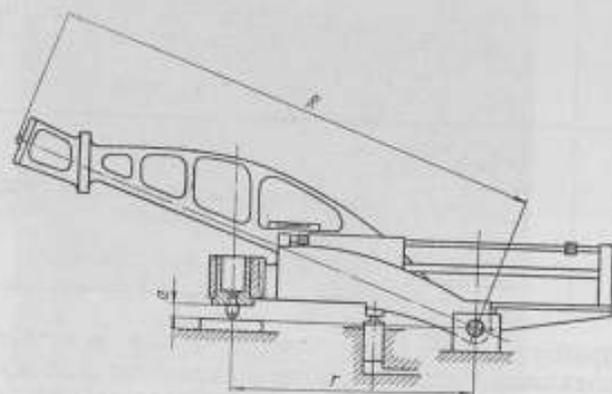


Рис. 4. Схема коробчатого коромысла.

вращения коробчатого коромысла должны находиться в одной горизонтальной плоскости [при соблюдении размера a (рис. 4) у наконечника]. При такой юстировке возможные отклонения оси наконечника от вертикали не превышают $2 \pm 3'$.

Наличие зазора между цапфой коромысла и подшипником привело бы к смещению оси вращения коромысла и соответственно, к повороту наконечника относительно оси, проходящей через его вершину. Проверить отсутствие зазора легко, наблюдая в окуляр за перемещением штриха шкалы. Если при подъеме и опускании наконечника «обратных» перемещений штриха шкалы не наблюдается, то зазор находится в допустимых пределах.

Предварительная нагрузка в рассматриваемом приборе создается весом коробчатого коромысла. Определение и подгонка этой нагрузки произведены при помощи образцовых весов 3-го разряда до 30 кг, причем прибор не разбирали. При взвешивании был определен порог чувствительности, величина которого зависит от трения в опорах коробчатого коромысла. Эта величина оказалась равной 0,015 кг. Для устранения ее влияния (что возможно, так как наконечник при вдавливании всегда движется сверху вниз) вес коробчатого коромысла был увеличен на ту же величину. Общая погрешность подгонки предварительной нагрузки не превысила 0,001 кгс.

Основная нагрузка прикладывается к наконечнику с помощью штыря 4 (рис. 5) без передаточных устройств. Взвешивание грузовой рамы и гирь, составляющих основную нагрузку, производилось на образцовых весах 2-го разряда. Масса грузовой рамы и гирь была подогнана для получения необходимых нагрузок при значении $g = 981,931 \text{ см/сек}^2$. Погрешность подгонки веса грузовой рамы и гирь не превышала для гирь $+0,0025\%$ и для грузовой рамы $+0,005\%$.

Плавное и вертикальное перемещение грузовой рамы при приложении и снятии основной нагрузки является одним из основных условий правильности работы образцового прибора. Для этого грузовая рама, образуемая верхней траверзой 1, поддоном 2 и боковыми тягами 3, должна иметь форму правильного прямоугольника и продолжение оси штыря 4 должно пройти через центр тяжести нагрузки. Балансировка сначала только рамы, а затем рамы вместе с гирями производилась отдельно от прибора с помощью уровня, накладываемого на поддон 2 и на гири в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При этом грузовая рама опиралась шаровым наконечником штыря 4 на твердую закаленную плиту. Балансировка считалась удовлетворительной, если отклонение, указанное уровнем, не превышало $1'$.

Регулировка трех опор 5 и ограничивающих упоров 6 позволила достигнуть одновременного соприкосновения опор с поверхностью поддона грузовой рамы и срабатывания упоров. Этим была обеспечена вертикальность перемещения заранее сбалансированной грузовой рамы с гирями.

В качестве измерительного устройства применен микроскоп с окулярным микрометром МПВ-1, дающий общее 330-кратное увеличение, и стеклянная шкала. Микроскоп укреплен на неподвижном кронштейне, стеклянная шкала — на коробчатом коромысле. Цена деления микроскопа $0,3 \text{ мк/дел.}$ Шкала имеет два штриха, причем один штрих приме-

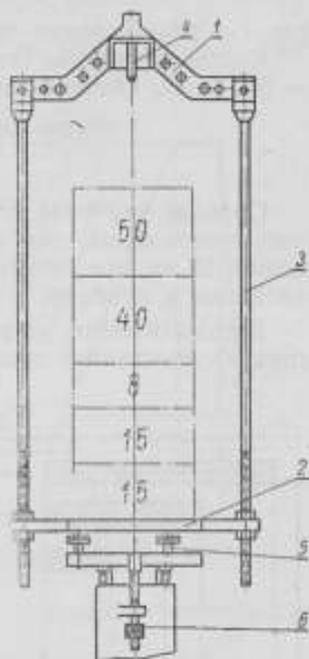


Рис. 5. Грузовая рама с поддоном.

няется для измерений, а оба штриха — для контроля фокусировки микроскопа. При измерениях передвижной штрих окулярного микрометра наводят на середину штриха шкалы.

Необходимо отметить, что в рассматриваемом приборе движение наконечника происходит не по прямой, а по дуге окружности с радиусом около 300 мм. Соответствующее смещение наконечника в направлении, перпендикулярном его оси, не превосходит 0,00007 мм.

Как следует из рис. 4, глубина внедрения наконечника h будет

$$h = \frac{r}{R} l, \quad (1)$$

где l — перемещение шкалы, наблюдаемое в микроскоп.

Соответствующие измерения дали значения $r = 299,8$ мм и $R = 599,5$ мм. Отсюда зависимость между h и l имеет вид

$$h = \frac{1}{2,000 \pm 0,0006} l.$$

Среднее значение периодических погрешностей шага винта окулярного микрометра, как показали экспериментальные данные, не превышает 0,15 мк, что учтено внесением поправок в переводные таблицы, прилагаемые к прибору.

Автоматическое устройство, состоящее из реле времени и дистрибутора, осуществляет пооперационную схему измерения твердости, приведенную в табл. 1. Предварительная настройка прибора заключается в установке необходимых промежутков на реле времени.

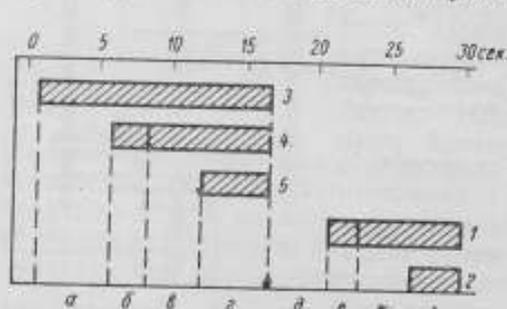


Рис. 6. Схема настройки прибора.

1—5 — номера электромагнитных заслонок; а — приложение предварительной нагрузки; б — выдержка предварительной нагрузки; в — установка на нуль; г — приложение основной нагрузки; д — выдержка основной нагрузки; е — снятие основной нагрузки; ж — отсчет; з — снятие предварительной нагрузки.

общей продолжительности цикла, равной 60 сек. Произведенные опыты, в которых режим нагружения контролировался с помощью секундомера, показали, что отклонения продолжительности отдельных операций от заданных значений не превышают 1 сек.

Режим нагружения, как показали исследования М. П. Марковца [1] и С. С. Степанова [2], имеет существенное значение для единства измерений твердости. Поэтому, согласно действующему ГОСТ 9013—59 [3], автоматическое устройство прибора отрегулировано на цикл, соответствующий требованиям этого ГОСТ. Диаграмма цикла, приведенная на рис. 7, рассматривается ниже.

Прибор отрегулирован так, что скорость наконечника в момент соприкосновения с поверхностью испытуемой меры не превосходит 0,1 мм/сек. При этом условии кинетическая энергия коромысла будет

не выше 5% от работы, производимой предварительной нагрузкой при вдавливании наконечника.

С момента касания вершиной наконечника поверхности меры начинается промежуток времени t'_1 приложения предварительной нагрузки, в течение которого внедрение наконечника происходит со скоростью, зависящей только от свойств испытуемого металла. Поэтому промежуток времени t'_1 не может быть одинаковым для разных металлов.

Время t'_2 выдержки наконечника под предварительной нагрузкой, мало влияющее на значение чисел твердости, выбрано равным 5 сек (что является достаточным для установки нуля шкалы окулярного микрометра на штрих шкалы прибора).

Время t_1 нарастания основной нагрузки от 0 до 100% выбрано равным 6 сек. При нарастании нагрузки до ее наибольшего значения процесс деформирования протекает по-разному в металлах с различными механическими свойствами. В то время как в твердых металлах за время t_1 внедрение почти завершается, и наконечник достигает глубины, близкой к предельной, в мягких металлах после достижения наибольшего значения нагрузки и по истечении промежутка времени t_1 внедрение наконечника продолжается.

Время t_2 выдержки наконечника под основной нагрузкой, в соответствии с упомянутым ГОСТ, выбрано равным 2 сек. При этом процесс течения металла, который даже для закаленной стали длится не менее 5 сек, искусственно прерывается на различных стадиях в зависимости от свойств испытуемого металла.

Время t_3 снятия основной нагрузки ГОСТ не нормирует. Как видно из рис. 7, оно равно примерно 1 сек.

Погрешности прибора

Источниками погрешностей результатов измерений рассматриваемым прибором могут быть: а) величина и направление нагрузок, б) режим нагружения, в) измерительное устройство и г) вдавливаемый наконечник.

Надлежащая подгонка веса коромысла и гирь (см. выше) гарантирует только значение веса нагрузки. Однако усилие, действующее на наконечник, равно весу нагрузки лишь при совпадении точки опоры штыря грузовой рамы с осью наконечника. При несоблюдении этого условия значение соответствующей погрешности определяется формулой

$$\Delta P^0 |_{\%} = \frac{b}{r} 100, \quad (2)$$

где b — расстояние точки приложения основной нагрузки от оси наконечника;

r — расстояние оси наконечника от оси вращения коромысла.

Значение этой погрешности при $b < 0,005$ мм составит $\Delta P < 0,002\%$. Поэтому суммарная погрешность, определяемая как подгонкой нагрузок, так и несоосностью, не превысит 0,005%.



Рис. 7. Диаграмма нагружения.

Для проверки режима нагружения вместо наконечника был установлен стальной закаленный грибок, а на столик вместо образца был помещен стальной закаленный шар $\varnothing 22$ мм, который, как показали наблюдения, исключал возможность появления заметных деформаций. Затем при определенной настройке реле времени автоматического цикла прибора был повторен 30 раз. Наблюдения показали, что отклонения продолжительности основных операций от заданных значений не превосходят $1-2$ сек.

При пользовании измерительным устройством основными источниками погрешностей являются: а) неточная фокусировка и б) неточное наведение штрихов окулярного микрометра.

Эти две погрешности составляют ошибку наблюдателя, которая установлена многократными измерениями ряда наблюдателей. Ошибка наблюдателя, отнесенная к глубине внедрения наконечника, оказалась не превышающей $0,2$ мк, что соответствует $0,1$ единицы Роквелла при пересчете на числа твердости.

Наконечник, установленный в приборе, характеризуется следующими параметрами: угол конуса $120^\circ \pm 5'$ ($120 \pm 0,08^\circ$); радиус закругления $0,2 \pm 0,002$ мм. При этих условиях погрешность измерения твердости, как следует из работы [2] и отчета ВНИИМ по теме № 20 1957 г., не превысит $0,2$ единицы Роквелла.

Кроме рассмотренных двух основных параметров, на получаемые значения твердости оказывают влияние и другие свойства макро- и микрогеометрии наконечника: а) правильность формы наконечника, б) чистота поверхности рабочей части его, в) кристаллографическая ориентация алмаза в оправе и г) твердость самого алмаза. Однако влияние этих свойств на результат измерений пока не изучено. Поэтому оценить соответствующую составляющую общей погрешности не представляется возможным.

Суммарную погрешность измерения твердости рассматриваемым прибором можно оценить по формуле:

$$\xi_{\text{HRC}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \text{HRC}}{\partial P_1} \xi_{P_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{HRC}}{\partial P_2} \xi_{P_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{HRC}}{\partial h} \xi_h\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{HRC}}{\partial r} \xi_r\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{HRC}}{\partial \beta} \xi_\beta\right)^2}. \quad (3)$$

Зависимости чисел твердости от нагрузок и от параметров наконечника даны в работе [2] и отчете ВНИИМ по теме № 33 1950 г. На основании этих исследований принимаем для подстановки в формулу (3) значения частных производных, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Диапазоны твердости, HRC	$\frac{\partial \text{HRC}}{\partial P_1}$	$\frac{\partial \text{HRC}}{\partial P_2}$	$\frac{\partial \text{HRC}}{\partial r}$	$\frac{\partial \text{HRC}}{\partial \beta}$
65	0,3	-0,2	43	0,90
45	0,8	-0,3	28	1,94
25	1,3	-0,4	19	2,60

Для глубины внедрения h частную производную, выражающую изменение числа твердости при увеличении глубины на 1 мм, принимаем равной

$$\frac{\partial \text{HRC}}{\partial h} \cdot \frac{\text{с. т.}}{\text{мм}} = 500.$$

Отдельные частные погрешности в формуле (3) равны:

$$\xi P_1 = 0,001 \text{ кгс}; \quad \xi P_2 = 0,005 \text{ кгс}; \quad \xi h = 0,0002 \text{ мм}; \\ \xi r = 0,002 \text{ мм}; \quad \xi \beta = 0,08^\circ.$$

Подстановка численных значений величин, входящих в формулу (3), дает теоретическое значение суммарной погрешности, равное:

$$\xi \text{HRC} = 0,15 \text{ единицы при HRC 65,} \\ \xi \text{HRC} = 0,19 \quad \text{"} \quad \text{при HRC 45,} \\ \xi \text{HRC} = 0,23 \quad \text{"} \quad \text{при HRC 25.}$$

Таким образом, если погрешности определения основных величин, от которых зависит число твердости, укладываются в принятые нами значения частных производных, то суммарная погрешность составит примерно 0,2 единицы Роквелла.

Экспериментальное определение точности образцового прибора производилось на основании оценки результатов многократных измерений твердости образцовых мер. Для экспериментов были отобраны меры с разбросом твердости не более 0,5 единицы Роквелла при 8 измерениях. На каждой мере сделано 10—12 групп измерений и в каждой группе по 8 измерений. Полученные данные были обработаны методом дисперсионного анализа. Результаты оценки дисперсии, равной

$$S_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{v=1}^{n_i} (X_{iv} - \bar{X})^2}{n-1},$$

основанные на рассеивании внутри групп измерений, даны в табл. 3 (в единицах Роквелла).

Таблица 3

№ мер твердости	Число групп k	Арифметическое среднее \bar{X}	Среднее инвариантное отклонение S_0
427	11	63,1	0,18
486	12	42,9	0,25
459	10	24,5	0,22

Указанные значения S_0 включают также погрешности, зависящие от неоднородности меры. Дополнительные соображения, основанные на изучении неоднородности примененных мер твердости, позволяют утверждать, что средняя квадратичная погрешность единичного измерения рассматриваемым прибором не превосходит 0,08 единицы Роквелла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марковец М. П., «Заводская лаборатория», 1936, № 12.
2. Степанов С. С., Труды ВНИИМ, вып. 37(97), 1959.
3. ГОСТ 9013—59, Металлы. Методы испытаний. Измерение твердости по Роквеллу.

Поступила в редакцию
29/IX 1959 г.

ОБРАЗЦОВЫЙ УПРУГИЙ ДИНАМОМЕТР 1-го РАЗРЯДА
ТИПА ВНИИМ

Статья посвящена результатам исследования причин погрешностей группы образцовых переносных упругих динамометров 1-го разряда типа ВНИИМ до 10 000 кгс.

Приводится описание динамометра, а также результатов исследования как упругого элемента, так и динамометра в целом. Установлена аналитическая зависимость показаний динамометров от нагрузки. Дан анализ погрешностей динамометров, найдено численное значение температурного коэффициента упруго напряженных динамометров.

Во ВНИИМ в результате ряда работ [1, 2] создан в 1959 г. упругий динамометр 1-го разряда для измерения усилий в пределах 500–10 000 кгс. Благодаря этому осуществлены измерение и передача значения силы от эталона к образцовым стационарным силоизмерительным машинам 2-го разряда.

На рис. 1 представлен общий вид образцового упругого динамометра 1-го разряда, а на рис. 2 — его схема. Мерой усилия, приложенного к динамометру, является деформация упругого элемента. В рассматриваемых динамометрах принят предложенный Н. Г. Токарем упругий элемент (рис. 2). К его выступам приварены два флажка. Под действием растягивающего усилия элемент деформируется, концы флажков сближаются и величина этого сближения определяет деформацию динамометра. Данная форма упругого элемента обеспечивает сравнительно равномерное распределение напряжений и наибольшую абсолютную упругую деформацию примерно 5 мм; упругая же деформация динамометров других форм обычно не превышает 1 мм.

Оптическое отсчетное устройство, предназначенное для измерения деформации (рис. 3), жестко укреплено на нижней части динамометра. Оно состоит из двух объективов, расположенных против прозрачных шкал 2, укрепленных на концах флажков упругого элемента, и системы призм 4 и зеркал 5, обеспечивающей наблюдение по обеим шкалам одним микроскопом 3, 6. По другую сторону шкал расположены осветители 1. В окуляр микроскопа, в зависимости от очередности включения осветителя, можно видеть шкалу, укрепленную на левом или правом конце флажка. При возрастании нагрузки левая шкала перемещается слева направо, а правая — справа налево. Отсчет снимают одним и тем

же микроскопом, поэтому на левой шкале порядок цифр идет справа налево, а на правой — слева направо. Суммарный отсчет по окулярному микроскопу равен сумме отсчетов по двум шкалам. Цена деления микроскопа 0,001 мм/дел.

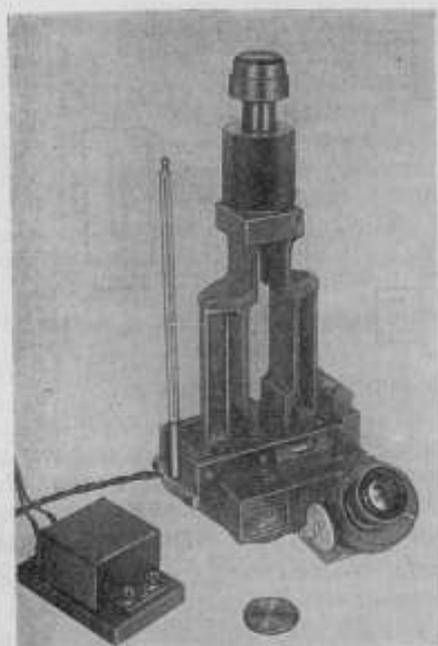


Рис. 1. Общий вид динамометра.

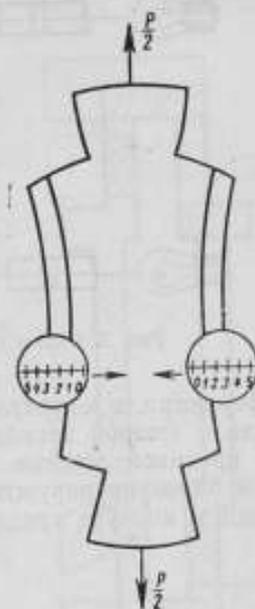


Рис. 2. Схема деформации упругого элемента.

Исследование упругого элемента

Для достижения наименьшей относительной погрешности показаний динамометра следовало выбрать форму упругого элемента, обеспечивающую наибольшую абсолютную деформацию. Кроме того, выбранная форма должна характеризоваться равномерным распределением напряжений и отсутствием участков концентрации их. С целью выбора формы, соответствующей этим требованиям, методом фотоупругости были исследованы напряжения на прозрачных моделях упругих элементов различных динамометров [1]: круглое кольцо (динамометры Ольсена — Петренко), звено цепи (динамометры Цвика, Вацау и др.), ромбическая петля (динамометров Хаберера, обладающих наибольшей стабильностью показаний) и, наконец, сложной формы упругий элемент динамометров Токаря. В результате установили, что наилучшую форму из числа исследованных имеют динамометры Н. Г. Токаря. В них достигнута наибольшая равномерность распределения напряжений: напряжения во всех участках, исключая места заделки, практически одинаковы и не превышают 30 кг/мм².

Как известно, силовые изгибающих моментов замкнутых тел при переходе из одной «четверти» в другую меняют свой знак. На рис. 4 представлена фотодиаграмма напряжений, а на рис. 5 схематически обозначены цифрами зоны наиболее интересных участков. Следует отметить хорошую сходимость точек перегиба. Весьма существенно также, что

оптический метод позволил изучить участки, не поддающиеся теоретическим расчетам. В зонах 1 заделки балок максимальные напряжения не превышают 10 кг/мм^2 . Зоны рабочих участков 2—3, соответствующие участкам практически чистого изгиба, дают почти параллельные полосы

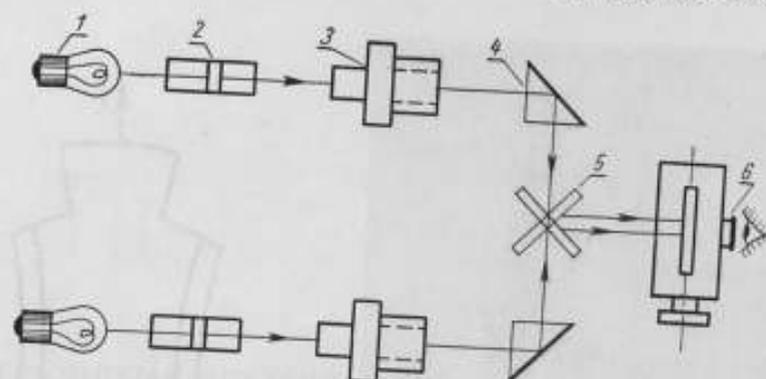


Рис. 3. Схема оптического устройства к динамометру.

интерференции, и направление изгибов в них находится в полном соответствии с элюрой изгибающих моментов, которые на участках 2 и 3 имеют противоположные знаки. Наибольшее напряжение ниже и верхней балок на наружном контуре достигает 28 кг/мм^2 , тогда как на внутреннем контуре срединной балки оно равно 29 кг/мм^2 . В критиче-

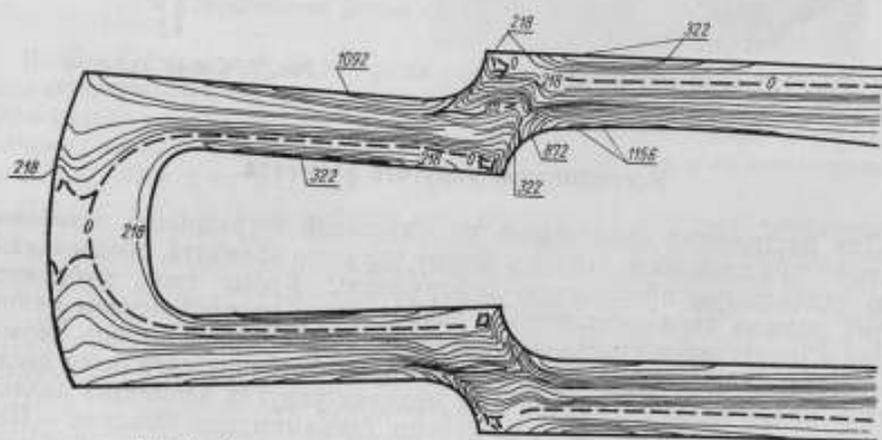


Рис. 4. Фотодиаграмма напряжений упругого элемента.

ской зоне 4 (рис. 5), где эюра моментов меняет свой знак, нейтральные (пунктирные) линии $O-O$ на рис. 4 проходят близ контуров модели. Наибольшее напряжение на этих участках имеет место у границы сочленения балок, а максимальные напряжения этих участков не превышают 24 кг/мм^2 в нижней части и 21 кг/мм^2 в верхней части. На участках крепления флажков напряжения отсутствуют. Таким образом, изоклиническая картина данной модели подтверждает рациональность выбранной формы упругого элемента как по равномерности распределения напряжений на рабочих участках, так и по отсутствию напряжений на деталях, служащих средством измерения деформации. Это обстоятель-

ство в соединении с тем, что динамометры работают при напряжениях, не превышающих $40 \div 50\%$ предела пропорциональности, значительно повышает стабильность показаний динамометров.

Изготовление упругих элементов

Динамометры были изготовлены заводом «Эталон», причем для упругих элементов взята сталь 35ХГСА, хорошо изученная и длительное время оправдывавшая себя на практике при изготовлении образцовых динамометров.

Для ускорения старения упругих элементов были созданы искусственные условия: их длительно перегревали и обжимали с перегрузкой, а в естественных условиях в течение $1\frac{1}{2}$ лет систематическую нагрузку чередовали с отдыхом.

Опытное исследование динамометров

После периода старения упругих элементов динамометры были подвергнуты опытному исследованию, позволившему установить их характеристики. Все исследования проводили на эталонной установке, воспроизводящей значение силы с погрешностью, не превышающей $0,01\%$ от измеряемого усилия.

Предварительно были проведены исследования и анализ погрешностей, вносимых отсчетным прибором при измерении деформации.

К числу достоинств рассматриваемых динамометров относятся:

- а) отсутствие передаточного механизма от упругого элемента к отсчетному прибору;
- б) жесткое крепление отсчетного прибора на упругом элементе;
- в) возможность применения в качестве отсчетного прибора специального микроскопа, обеспечивающего измерение по любой из шкал, смонтированных в динамометре;
- г) наибольшая по абсолютному значению деформация по сравнению с другими известными динамометрами.

Два первых обстоятельства позволили, если не исключить, то свести к минимуму две составляющие общей погрешности и, в частности, погрешность юстировки. Применение одного микроскопа (вместо двух) упростило конструкцию, сохранив неизменной точность измерений. Сравнительно большая деформация упругого элемента повысила относительную точность измерения.

Деформация упругого элемента, определяемая линейным перемещением флажков со шкалами, составляет $5 \div 6$ мм, оптическое увеличение микроскопа — 61,7-кратное.

Погрешности отсчетного прибора складываются из погрешностей самого микроскопа и взаимной юстировки шкал, а также из погрешностей отсчета.

Точность отсчета по динамометру характеризуется величиной суммарного отсчета в условных единицах шкалы. Окуляр-микрометр (ОМС-3) имеет цену деления $0,001$ мм, взаимное перемещение объекти-

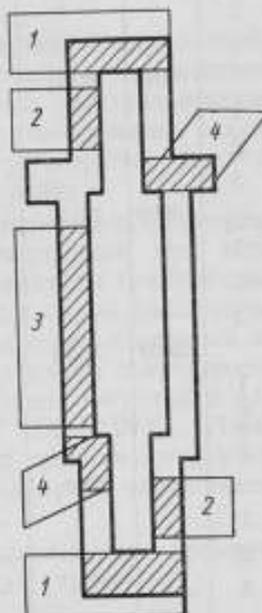


Рис. 5. Наиболее интересные зоны рассматриваемых напряжений.

Таблица 1

№ серии	Динамометр № 6 до 10 000 кгс					Динамометр № 5 до 3000 кгс				
	P	N_2	$\bar{\Delta}$	$\bar{\sigma}$	R	P	N_2	$\bar{\Delta}$	$\bar{\sigma}$	R
	3000	1592 ₄			0,04	500	1182 ₂			0,03
1			+0,02	0,03				+0,02	0,02	
2			-0,02	0,04				-0,01	0,03	
3			+0,01	0,02				0	0,03	
	4000	2111 ₅			0,03	1000	2329 ₂			0,03
1			+0,02	0,03				-0,02	0,02	
2			-0,02	0,02				+0,01	0,03	
3			+0,02	0,03				+0,01	0,03	
	5000	2619 ₅			0,03	1500	3435 ₇			0,03
1			+0,02	0,02				+0,02	0,02	
2			0	0,03				-0,02	0,02	
3			-0,0	0,02				0	0,03	
	6000	3126 ₅			0,03	2000	4508 ₂			0,02
1			+0,02	0,02				0	0,02	
2			+0,01	0,02				+0,01	0,02	
3			-0,02	0,02				-0,01	0,02	
	7000	3620 ₇			0,03	2500	5548 ₂			0,02
1			+0,03	0,02				+0,01	0,02	
2			-0,02	0,02				-0,01	0,02	
3			-0,01	0,02				-0,01	0,01	
	8000	4104 ₁			0,03	3000	6555 ₇			0,01
1			-0,03	0,02				+0,01	0,01	
2			+0,01	0,02				-0,02	0,02	
3			+0,01	0,01				0	0,02	
	9000	4587 ₂			0,02					
1			0	0,01						
2			-0,02	0,02						
3			+0,02	0,02						
	10000	5061 ₉			0,02					
1			0	0,01						
2			+0,01	0,02						
3			-0,01	0,02						

Примечание. В табл. 1 и 3 приняты следующие обозначения:
 P — измеряемое усилие, кгс;
 Δ и $\bar{\Delta}$ — отклонения средних арифметических значений между отдельными сериями измерений, в процентах от измеряемого значения, соответственно до и после введения температурной поправки;
 σ и $\bar{\sigma}$ — средние квадратичная погрешность ряда измерений соответственно до и после введения температурной поправки;
 α_t — температурная поправка, приходящаяся на 1° С для упруго напряженного динамометра;
 N и N_2 — средние значения отсчета по динамометру, приведенные к 20° С соответственно для одной и для трех серий;
 R — среднее квадратичное результата из 30 измерений.

вов 5 мм, т. е. суммарный отсчет при полной нагрузке составляет 5000 условных единиц с возможной оценкой на глаз 0,2 деления. Таким образом, точность отсчета не превышает 0,002—0,004% при предельной и 0,01% при наименьшей нагрузке.

Разброс показаний динамометров типа ВНИИМ в отдельных рядах измерений достигает 10+12 мк, следовательно, погрешность отсчета примерно в 5+6 раз меньше этого разброса. Результаты обработки большого числа измерений подтвердили, что для прибора ОМС-3 предельная погрешность отсчета не превышает 0,2 мк.

Исследование погрешностей, являющихся следствием непрямолинейного перемещения флажков и вызванного этим неполного соответствия масштабов шкал объектива и окуляра на некоторых участках шкалы, показало, что отклонение от прямолинейности пренебрежимо мало, а незначительное несоответствие масштабов легко устраняется соответствующим выбором начального отсчета при юстировке.

Точность измерения динамометром можно характеризовать по результатам градуировки конкретного динамометра, выполненной при нормальных условиях ($20 \pm 1^\circ \text{C}$). В табл. 1 даны результаты градуировок динамометров № 5 до 3000 кгс и № 8 до 10 000 кгс в нормальных условиях. Для каждого динамометра выполнено по три серии измерений из 10 рядов. Как видно из табл. 1, средняя квадратичная погрешность динамометров № 5 и № 8 убывает по мере возрастания нагрузки и для любого ряда измерений находится в пределах 0,01+0,03%. Лишь в одном из 24 рядов наблюдений динамометра № 8 средняя квадратичная погрешность достигла 0,04% от измеряемого значения на наименьшей степени нагружения.

Измерения выполнены через значительные промежутки времени, после работы с динамометром в различных пунктах страны.

Зависимость показаний динамометра от нагрузки

Существенный интерес представили исследования зависимости показаний динамометра от измеряемой нагрузки. С этой целью для каждого из динамометров № 5—8 были вычислены первые, а затем вторые приращения показаний, приходящихся на каждую ступень нагружения. В табл. 2 приведен пример обработки наблюдений для динамометра № 6. Оказалось, что для всех динамометров первые приращения положительны, вторые — отрицательны и практически постоянны. Средние значения вторых приращений составили

для динамометров № 5 и № 7 до 3000 кгс

$$\Delta^2 y = -0,035 \text{ мм на } 500 \text{ кгс};$$

для динамометров № 6 и № 8 до 10 000 кгс

$$\Delta^2 y = -0,0065 \text{ мм на } 1000 \text{ кгс}.$$

Постоянство второго приращения говорит о том, что для динамометров типа ВНИИМ имеет место квадратичная зависимость деформации от измеряемой нагрузки (по всей вероятности это вызвано поворотом флажков в процессе деформирования динамометров при различных нагрузках).

Обработка данных табл. 2 и результатов градуировок других динамометров привела к следующим зависимостям между деформацией динамометра и нагрузкой на него:

динамометр № 8 до 10 000 кгс

$$\bar{y} = 542,23x - 3,610x^2;$$

динамометр № 6 до 10 000 кгс

$$\bar{y} = 527,81x - 3,654x^2;$$

динамометр № 5 до 3000 кгс

$$\bar{y} = 2397,1x - 70,79x^2;$$

динамометр № 7 до 3000 кгс

$$\bar{y} = 2376,4x - 67,72x^2.$$

Таблица 2

Экспериментальные				Расчетные	
$x - P$	y	Δy	$-\Delta^2 y$	\bar{y}	$\frac{y - \bar{y}}{y} \cdot 100$
2	1046,0			1041,0	—
3	1552,0	0506	0006	1551,0	0,06
4	2052,0	0500	0006	2052,8	0,04
5	2546,5	0494	0006	2547,7	0,05
6	3035,5	0489	0008	3035,3	0,01
7	3516,5	0481	0008	3515,6	0,03
8	3989,0	0473	0008	3988,7	0,01
9	4454,0	0465	0004	4454,4	0,01
10	4915,0	0461		4912,8	0,04

Примечание. Обозначения, принятые в таблице:
 $x - P$ — прилагаемая к динамометру № 6 нагрузка, кгс;
 y — деформация, измеряемая при данной нагрузке в условиях единичных шпалам;
 \bar{y} — расчетные значения, найденные по формуле

$$\bar{y} = 527,81x - 3,654x^2;$$

 Δy — первые приращения деформации;
 $\Delta^2 y$ — вторые приращения деформации.

В табл. 2 сопоставлены значения y динамометра № 6, найденные расчетным путем и полученные из опытов. Расхождения находятся в пределах погрешностей, допустимых для образцовых динамометров 1-го разряда. Полученные результаты указывают на допустимость интерполирования показаний динамометров. Погрешности интерполяции не превысят погрешностей, допустимых для динамометров 1-го разряда, при условии, что проверка выполнена не менее чем в трех точках, равномерно распределенных в диапазоне измеряемых усилий.

Влияние температуры на показания динамометров

Образцовый упругий динамометр 1-го разряда должен поверяться при температуре $20 \pm 1^\circ \text{C}$. Однако работа с динамометрами может происходить и в других температурных условиях. Поэтому для выяснения влияния температуры на показания динамометров необходимо было определить:

- 1) зависимость показаний динамометра от температуры;
- 2) время, необходимое для установления температурного равновесия между динамометром и окружающей средой;
- 3) численное значение температурного коэффициента упруго напряженных динамометров;
- 4) допустимые колебания температуры в процессе работы с динамометрами и
- 5) стабильность показаний динамометров во времени.

Эти исследования выполнены по методике, описанной в работе [2]. Здесь можно лишь отметить, что закон температурного выравнивания динамометров ВНИИМ также имеет вид экспоненциальной зависимости:

$$\tau = e^{-\frac{ct}{m}}$$

- где τ — время температурного выравнивания в часах;
 c — постоянная;
 $\theta = (u - t)$ — разность между начальной u и конечной t температурой динамометра, $^\circ\text{C}$;
 m — темп регулярного режима.

Таблица 3

$P, \text{ кгс}$	Δ	σ	σ_t	N	$\bar{\Delta}$	$\bar{\sigma}$	Δt
1	2	3	4	5	6	7	8
Динамометр № 8 до 10 000 кгс							
3 000	0,24	0,10	0,033	15 926	0,05	0,03	
4 000	0,24	0,11	0,033	21 108	0,04	0,02	
5 000	0,21	0,11	0,030	26 207	0,03	0,02	
6 000	0,20	0,10	0,029	31 243	0,03	0,02	
7 000	0,20	0,10	0,029	36 206	0,03	0,02	
8 000	0,19	0,09	0,028	41 048	0,02	0,01	
9 000	0,20	0,10	0,029	45 859	0,02	0,02	
10 000	0,19	0,10	0,028	50 613	0,02	0,02	
Среднее арифметическое	0,21	0,10	0,030		0,03	0,02	7°C
Динамометр № 5 до 3 000 кгс							
500	0,12	0,06	0,037	11 822	0,04	0,03	
1 000	0,09	0,05	0,029	23 291	0,03	0,02	
1 500	0,11	0,06	0,030	34 360	0,03	0,02	
2 000	0,09	0,05	0,029	45 083	0,04	0,02	
2 500	0,10	0,05	0,030	55 485	0,01	0,02	
3 000	0,10	0,05	0,030	65 557	0,02	0,02	
Среднее арифметическое	0,10	0,05	0,031		0,03	0,02	$3,3^\circ \text{C}$

Для исследованных динамометров

$$m = (0,84 \pm 0,05) \text{ ч}^{-1}.$$

Эта величина позволяет определить время, необходимое для температурного выравнивания динамометров. В зависимости от условий оно находится в пределах $2 \div 10$ ч.

Наибольший интерес в исследовании представила суммарная оценка погрешностей динамометров по результатам большого числа измерений, выполненных на протяжении достаточно большого отрезка времени. С этой целью градуировки выполнялись в различных температурных условиях ($\Delta t^\circ = 7^\circ \text{C}$) с интервалами до 10 мес. Таким образом, общая погрешность результата отягощена неисключенными погрешностями, вызванными влиянием времени, температуры и прочих внешних условий.

В табл. 3 приведены результаты градуировки динамометров № 8 и № 5. Для каждого динамометра было выполнено по 3 серии измерений, каждая из которых состояла из 10 рядов. Наибольший размах температур между отдельными сериями для динамометра № 8 достигал 7°C , для динамометра № 5 — $3,3^\circ \text{C}$. Средняя квадратичная погрешность для обоих динамометров ни в одном ряду измерений не превысила 0,03% от измеряемого значения.

Таким образом, исследованные динамометры удовлетворяют требованиям, предъявляемым к динамометрам 1-го разряда. Однако этот вывод справедлив при условии введения температурных поправок.

В противном случае, как видно из табл. 3 (столбец 3), расхождения между отдельными сериями измерений для динамометра № 8 более чем вдвое превышают погрешность, допустимую для динамометров 1-го разряда. Для динамометров № 5 эти расхождения также превышают величину допустимой погрешности. Из табл. 3 видно, что в пределах точности измерений относительные расхождения между средними значениями отдельных серий измерений находятся в прямо пропорциональной зависимости от разности температур, при которых выполнялась градуировка. В столбце 4 табл. 3 приведены численные значения температурного коэффициента упруго напряженного динамометра α_t , найденные по формуле

$$\alpha_t = \frac{\Delta}{\Delta t},$$

где Δ — расхождения средних арифметических значений между двумя сериями наблюдений, выраженные в долях процента от измеряемого значения;

Δt — разность температур, при которых выполнялись эти наблюдения.

Для динамометра № 8

$$\alpha_t = (0,00030 \pm 0,00063) \text{ град}^{-1};$$

для динамометра № 5

$$\alpha_t = (0,00030 \pm 0,00005) \text{ град}^{-1}.$$

Заметим, что при $\alpha_t = 0,0003 \text{ град}^{-1}$ изменение температуры на 1° дает погрешность показаний, равную 0,03% от допустимой для динамометров 1-го разряда. Отсюда вытекает, что колебания температуры в процессе градуировки должны быть не выше 1°C .

Аналогичная обработка результатов выполнена и для динамометров № 6 и № 7. Результаты обработки большого числа измерений ($200 \div 250$ для каждого динамометра) показали, что для любой ступени

нагружения предельная погрешность каждого из динамометров не превышала 0,1% от измеряемого значения при доверительной вероятности не менее 0,98.

Заключение

Выполненные исследования привели к следующим результатам:

1. Точность измерения динамометрами типа ВНИИМ характеризуется средней квадратичной погрешностью в пределах $0,01 \pm 0,04\%$ от измеряемого значения в зависимости от нагрузки. Погрешность убывает с возрастанием нагрузки.
2. Указанные значения погрешностей справедливы при условии введения поправок, зависящих от температуры.
3. Температурный коэффициент упруго напряженных динамометров составляет $0,0003 \text{ град}^{-1}$.
4. Зависимость показаний динамометра от нагрузки в пределах погрешностей, допустимых для динамометров 1-го разряда, характеризуется кривой второго порядка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коточигова М. И., Труды ВНИИМ, вып. 37(97), 1959, стр. 29.
2. Коточигова М. И., Там же, стр. 14.

Поступила в редакцию
23/IX 1959 г.

М. А. ГУЛЯЕВ, В. А. РЫЖОВ
ВНИИМ

ОБРАБОТКА КАПИЛЛЯРОВ ДЛЯ ОБРАЗЦОВЫХ КОМПРЕССИОННЫХ МАНОМЕТРОВ

*В статье изложена технология обработки капиллярных трубок
для компрессионных манометров*

От качества капилляров, как известно, в значительной мере зависит точность манометров.

Описанная ниже методика обработки применялась для трубок с диаметрами от 1 до 5 мм. Процесс подбора и обработки капиллярных трубок состоит из следующих операций:

- а) отбор заготовок;
- б) изготовление притиров;
- в) шлифовка;
- г) исследование шлифованных капиллярных трубок и выбор пригодных.

В процессе отбора пригодными считаются только те трубки, разность внутренних диаметров концов которых на длине 350—400 мм не превышает 0,1 мм. Измерение диаметров можно производить пробкой-калибром. Набор притиров для шлифовки каналов изготавливают из латуни или красной меди; размеры притиров указаны в табл. 1.

Таблица 1

Притиры	Диаметр, мм	Длина, мм
№ 1	$D - 0,10$	20—25
№ 2	$D - 0,05$	30—35
№ 3	$D - 0,02$	40—50

D — диаметр канала заготовки.

Каждый притир должен быть снабжен штоком, длина которого на 50—70 мм больше длины обрабатываемого капилляра, а диаметр примерно равен $\frac{2}{3}$ диаметра притира. Шток скрепляют с притиром резьбой или припаивают.

Для предупреждения касания штока со стенками капилляра применяют оправку (рис. 1), назначение которой понятно из рис. 2.

Шлифовку каналов производят при скорости вращения притира 500 об/мин. Капилляр с оправкой на конце плавно перемещают вдоль оси притира в обоих направлениях с тем, чтобы притир проходил по всей длине канала капилляра.

При первой шлифовке (притиром № 1) в окно оправки подают шлифующую жидкость, представляющую взвесь в воде оптического порошка (марки КЗ-180).

После шлифовки канала капилляра притиром № 1 и промывки его водой ту же операцию производят притиром № 2, в качестве шлифующей жидкости берут порошок № 3 (марки КЗ-240). Промыв тщательно

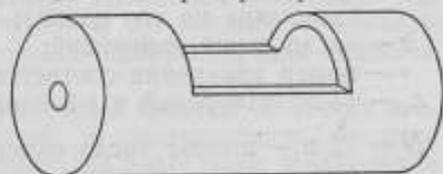


Рис. 1. Оправка для шлифовки капилляров

канал капилляра, шлифовку производят в третий раз притиром № 3, обильно смачивая канал раствором в воде порошка марки М10 или М4.

При шлифовке каналов капилляров по описанной технологии нельзя допускать больших нагрузок на притир, которые могут возникнуть (особенно при первом проходе) из-за сужений канала капилляра (так как отбор капиллярных трубок производился только по диаметрам их концов).

В случае «заедания» притира нужно заменить его другим с меньшим диаметром.

Описанный метод был применен для изготовления капилляров к двум наборам образцовых компрессионных манометров*.

Для определения диаметра шлифованного капилляра был применен следующий метод. Капилляр погружали в стеклянную ванну с плоскопараллельным дном, заполненную толуолом. Толуол имеет коэффициент преломления, весьма близкий к коэффициенту преломления молибденового стекла № 46 или ЗС-5.

При наблюдении в проходящем свете стенки капилляра почти «исчезают», а границы шлифованного канала четко и резко видны.

Измерение диаметра производили на универсальном измерительном микроскопе типа УИМ-21. Для того чтобы убедиться в отсутствии эллиптичности сечения, измерения проводили в двух взаимно перпендикулярных сечениях (рис. 3). Таким образом были получены две группы измерений для каждого капилляра.

* См. статью настоящего сборника, стр. 62.

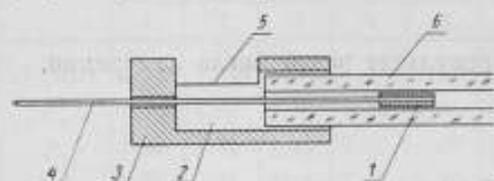


Рис. 2. Схема шлифовки капилляров.
1 — притир; 2 — ванна для шлифующей жидкости;
3 — оправка; 4 — шток; 5 — окно; 6 — капилляр.

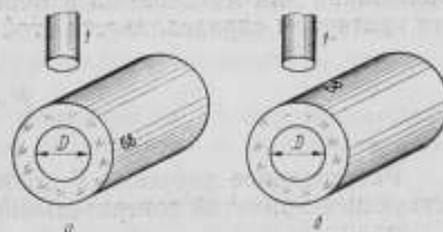


Рис. 3. Положения капилляра при измерении диаметра канала: а — номером в сторону; б — номером вверх.

1 — микроскоп.

Результаты измерений были обработаны методом дисперсионного анализа.

При обработке результатов приняты следующие обозначения:

D — внутренний диаметр капилляра;
 i — номер серии измерения (серия охватывает некоторый участок капилляра по его длине);

k — число серий измерений;

ν — номер измерения соответствующей серии;

n_i — число измерений в i -й серии;

$N = \sum_{i=1}^k n_i$ — полное число измерений;

$D_{\nu i}$ — результат ν -го измерения в i -й серии;

$\bar{D}_i = \frac{\sum_{\nu=1}^{\nu} D_{\nu i}}{n_i}$ — среднее значение результата измерения в i -й серии;

$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^k \bar{D}_i n_i}{N}$ — средневзвешенный результат всего числа измерений.

$S_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{\nu=1}^{n_i} (D_{\nu i} - \bar{D}_i)^2}{N - k}$ — внутрисерийная дисперсия;

$S_a^2 = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (\bar{D}_i - \bar{D})^2}{k - 1}$ — межсерийная дисперсия.

Если принять нулевую гипотезу о равенстве средних, что в нашем случае равносильно предположению об отсутствии систематических колебаний или монотонных изменений диаметра капилляра по длине, то критерием справедливости этой гипотезы может служить функция

$$F = \frac{S_a^2}{S_r^2}.$$

Рассчитанное значение F должно быть не больше F_{α} — соответствующей принятой доверительной вероятности.

Если

$$F \leq F_{\alpha}$$

то среднее значение диаметра капилляра равно D . Дисперсию отклонений вычисляли по формуле

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{\nu=1}^{n_i} (D_{\nu i} - \bar{D})^2}{N - 1}$$

и среднюю квадратичную погрешность — по формуле

$$\sigma \approx \sqrt{S^2} \approx S.$$

Если же оказывалось, что

$$F > F_{gr}$$

то приходилось предполагать, что наблюдаются систематические колебания или монотонные изменения диаметра капилляра, или, иначе, что «капилляр состоит из разных участков», т. е. его следует браковать. Описанным методом обработаны обе группы измерений (два положения) каждого капилляра.

Если полученные из обеих групп измерений средние значения диаметра капилляра отличались на величину, не превышающую предельной погрешности ($2,5\sigma$), то капилляр считался пригодным, в противном случае его браковали, как имеющий эллиптическую форму сечения. Результаты обработки экспериментальных данных приведены в табл. 2.

Таблица 2

	Результаты измерения диаметров шлифованных капилляров №											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D (мм)	1,931	1,444	1,465	1,222	2,511	2,430	1,793	1,144	1,100	4,500	1,500	4,570
F_{-}	1,10	1,63	1,36	1,32	1,82	1,97	1,33	2,70	1,28	1,79	2,15	1,94
F_{1}	1,48	1,75	1,43	1,21	1,67	1,07	1,67	1,25	1,09	2,04	1,96	2,16
$F_{0,05}$	1,55	2,44	2,44	2,44	2,44	2,44	2,44	2,87	2,87	1,95	1,79	1,77
$F_{0,01}$	1,85	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	4,43	4,43	2,67	2,28	2,24
σ (мк)	1,1	1,2	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,4	1,3	1,5	1,9	1,8

F_{-} и F_{1} — значения функции F , полученные для двух взаимно перпендикулярных положений капилляров.

Данные таблицы указывают, что разработанный метод позволяет получить высокого качества капилляры с номинальными внутренними диаметрами 1–5 мм. Средний диаметр такого капилляра постоянен по всей его длине, а случайные отклонения на участках длиной до 400 мм характеризуются средней квадратичной погрешностью, не превышающей 2 мк.

Этот метод шлифовки капилляров позволяет не только ограничить явления «прилипания» ртути к стенкам капилляра, но и существенно повысить точность измерения давления.

Описанный метод измерения диаметров выгодно отличается от известного метода калибровки ртутью значительно меньшей трудоемкостью и большей полнотой сведений о размерах внутреннего диаметра как по длине, так и в разных сечениях.

Поступила в редакцию
31/III 1963 г.

М. А. ГУЛЯЕВ, А. В. ЕРЮХИН, В. А. РЫЖОВ
ВНИИМ

НАБОРЫ ОБРАЗЦОВЫХ КОМПРЕССИОННЫХ МАНОМЕТРОВ ВНИИМ

В статье дан анализ погрешностей компрессионных манометров, предложен метод статистической оценки погрешностей путем сличения показаний манометров и приведены основные технические данные двух наборов образцовых компрессионных манометров 1-го разряда, созданных во ВНИИМ.

Созданные во ВНИИМ два набора образцовых компрессионных манометров 1-го разряда предназначены для воспроизведения единицы абсолютного давления в диапазоне $20 \div 10^{-4}$ мм рт. ст. и поверок образцовых манометров 2-го разряда. Каждый набор состоит из четырех манометров (рис. 1 и 2), пределы измерения которых взаимно перекрываются. Параметры манометров приведены в табл. 1.

Особенностью манометров набора является применение капилляров со шлифованными каналами. Методика шлифовки каналов и измерения их диаметра разработана во ВНИИМ*. Систематические изменения диаметров капилляров («волны», конусность) на длине трубки порядка 350 мм не превышают 2 мк. Применение таких капилляров приводит к значительному уменьшению погрешностей измерения давления.

Уравнение измерения компрессионного манометра имеет вид

$$p = \frac{K_0}{1 - K_0(h_0 - h)} (h_0 - h)(h_1 - h), \quad (1)$$

при этом

$$K_0 = \frac{\pi d^2}{4V}. \quad (2)$$

Здесь, согласно рис. 3,

- d — диаметр канала капилляра;
- V — начальный объем сжатия от патрубка А до вершины измерительного капилляра h_0 ;
- h_0 — уровень, соответствующий запаянному концу капилляра;
- h и h_1 — уровень ртути в измерительном и в сравнительном капиллярах.

* См. статью настоящего сборника на стр. 58.

Таблица 1

Параметры	Манометры набора № 1				Манометры набора № 2				
	1	2	3	4	1	2	3	4	
Начальный объем сжатия $V, \text{мл}^3$	799 200	191 700	46 210	24 150	787 100	200 200	48 410	24 540	
Диаметр капилляра $d, \text{мм}$	1,100	1,931	2,511	4,570	1,144	1,500	2,430	4,500	
Постоянная $K_0 = \frac{\pi d^2}{4V}, \text{мл}^{-1}$	$1,189 \cdot 10^{-6}$	$1,528 \cdot 10^{-5}$	$1,072 \cdot 10^{-4}$	$6,792 \cdot 10^{-4}$	$1,300 \cdot 10^{-6}$	$8,827 \cdot 10^{-6}$	$9,584 \cdot 10^{-5}$	$6,482 \cdot 10^{-4}$	
Длина измерительного капилляра, мм	150	171	163	165	150	155	155	157	
Предел измерения (мм рт. ст.) по шкале:	$\left\{ \begin{array}{l} \text{нижний} \\ \text{верхний} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1,2 \cdot 10^{-4} \\ 3,0 \cdot 10^{-2} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot 10^{-3} \\ 4,5 \cdot 10^{-1} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1,1 \cdot 10^{-2} \\ 2,9 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 6,8 \cdot 10^{-2} \\ 20,0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1,3 \cdot 10^{-4} \\ 2,9 \cdot 10^{-2} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 8,8 \cdot 10^{-4} \\ 2,1 \cdot 10^{-1} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 9,6 \cdot 10^{-3} \\ 2,3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 6,6 \cdot 10^{-2} \\ 17,0 \end{array} \right.$

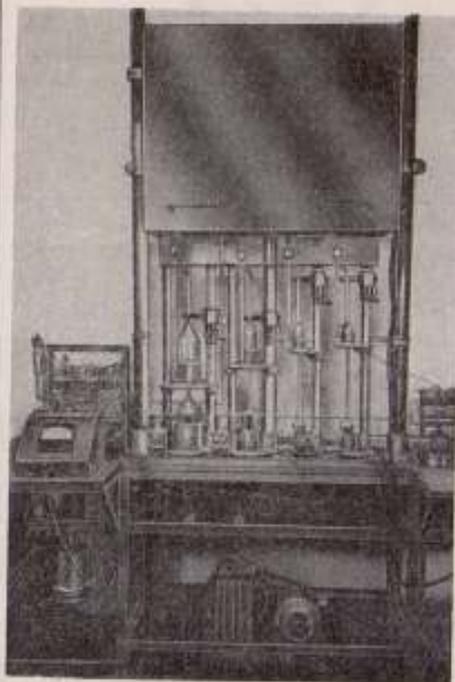


Рис. 1. Общий вид набора образцовых компрессионных манометров ВНИИМ.

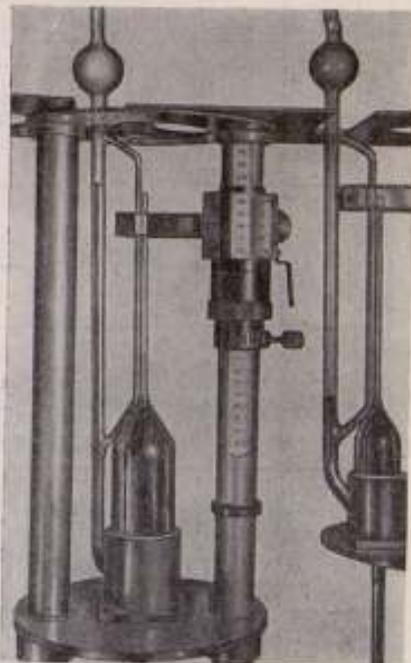


Рис. 2. Образцовый компрессионный манометр.

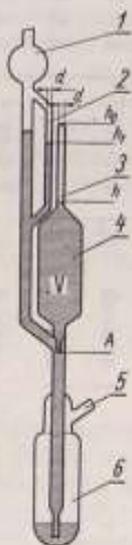


Рис. 3. Схема образцового компрессионного манометра.

1 — трубка к вакуумной системе; 2 — сравнительный капилляр; 3 — измерительный капилляр; 4 — баллон сжатия; 5 — трубка для впуска воздуха и откачки; 6 — баллон со ртутью.

Погрешности при измерении давления компрессионными манометрами могут быть разбиты на 3 группы:

1. Систематические погрешности, общие для всех компрессионных манометров и обусловленные неточностью исходных положений, на которых основан метод измерения давлений компрессионными манометрами.

2. Систематические погрешности, присущие данному компрессионному манометру и возникшие вследствие неточности знания отдельных параметров, значения которых входят в уравнение измерения, а также вследствие систематических отклонений в отсчетах уровней ртути в капиллярах, обусловленных явлениями депрессии и прилипания ртути.

3. Случайные погрешности, имеющие место при каждом отдельном измерении давления и обусловленные случайными отклонениями в отсчетах уровней ртути, которые, в свою очередь, вызываются местными явлениями депрессии и прилипания ртути, случайными колебаниями давления в отдельных частях вакуумной системы манометров и, наконец, погрешностью отсчета.

К первой группе следует отнести погрешности, возникающие вследствие того, что для вывода уравнения (1) применен закон Бойля — Мариотта вместо более точного уравнения Ван-дер-Ваальса. Как показано в работе [1], такая замена при измерении давления азота, сухого воздуха и целого ряда других газов не может вызвать ошибок, больших 0,2%. Сюда же относятся погрешности, обусловленные явлениями сорбции и десорбции газа на стенках измерительного капилляра. Оценка этих погрешностей довольно затруднительна, однако есть основания полагать [1], что они существенны только при измерении давлений ниже 10^{-5} мм рт. ст.

Вторая группа погрешностей включает, в первую очередь, погрешности K_0 и h_0 .

Постоянные K_0 вычислены с помощью формулы (2) по результатам измерения диаметров капилляров и объемов сжатия. Начальные объемы сжатия V определены весовым методом со средней квадратичной погрешностью 0,1%. Значение среднего квадратичного отклонения диаметра не превышает 2 мк. Поэтому средняя квадратичная погрешность K_0 составила $0,1 \div 0,2\%$ при диаметрах капилляров $1 \div 4$ мм.

Систематическая погрешность в отсчете h_0 зависит от формы запаянного конца капилляра [2—4]. Влияние ее на результат измерения давления тем сильнее, чем меньше разность $(h_0 - h)$. Относительное значение этой погрешности колеблется в пределах $0,1 \div 1\%$.

Систематические отклонения в отсчетах уровней h и h_1 вследствие капиллярной депрессии и прилипания ртути [1] могут иметь место в тонких капиллярах, однако благодаря шлифовке каналов капилляров они невелики, и обусловленную ими относительную погрешность можно оценить как $0,2 \div 1\%$.

Таким образом, суммарная систематическая погрешность компрессионного манометра, обусловленная перечисленными выше случайными причинами, при 99% доверительной вероятности не должна превышать $0,4 \div 1,6\%$ при диаметрах капилляров от 1 до 4 мм.

Третья группа — случайные погрешности — может быть охарактеризована средним квадратичным отклонением σ_h при отсчетах уровней ртути в капиллярах; значение σ_h определяется перечисленными в п. 3 причинами.

В общем случае формула относительной средней квадратичной погрешности измеренного давления, следующая из уравнения (1), имеет вид

$$\sigma_0 = \sigma_h \sqrt{\left(\frac{1}{h_0 - h} + \frac{1}{h_1 - h}\right)^2 + \left(\frac{1}{h_1 - h}\right)^2}. \quad (3)$$

При измерениях по квадратичной шкале и на верхнем пределе измерений по линейной шкале $h_1 = h_0$, и формула (3) упрощается

$$\sigma_0 = \sqrt{5} \frac{\sigma_h}{h_0 - h}. \quad (4)$$

При измерениях на нижнем пределе линейной шкалы, когда $(h_1 - h) \ll (h_0 - h)$, в формуле (3) можно пренебречь значением $(h_0 - h)^{-1}$ по сравнению с $(h_1 - h)^{-1}$, тогда формула (3) принимает вид

$$\sigma_0 = \sqrt{2} \frac{\sigma_h}{h_1 - h}. \quad (5)$$

Таблица 2

Шкала	Пределы измерения	Теоретические оценки относительных средних квадратичных погрешностей (в %) при σ_h (в мм)			
		0,05	0,10	0,15	0,20
Линейная ($h_0 - h = 150$ мм)	Нижний ($h_1 - h = 10$ мм)	0,7	1,4	2,1	2,8
	Верхний ($h_1 - h = 150$ мм)	0,1	0,2	0,2	0,3
Квадратичная ($h_1 = h_0$)	Нижний ($h_0 - h = 10$ мм)	1,1	2,2	3,4	4,5
	Верхний ($h_0 - h = 150$ мм)	0,1	0,2	0,2	0,3

В табл. 2 приведены результаты теоретической оценки относительных средних квадратичных погрешностей измерения давления (в процентах). Они характеризуют случайные погрешности при измерениях давлений компрессионным манометром по линейной и квадратичной шкалам, вычисленные для различных возможных значений σ_h от 0,05 до 0,20 мм.

Оценка фактически имевших место погрешностей образцовых компрессионных манометров проводилась методом сличения их показаний. Сличение осуществлялось при измерениях по квадратичным шкалам, так как только в этом случае обеспечивалось перекрытие пределов измерений соседних манометров в достаточно широкой области и, следовательно, можно было производить сличение соседних манометров в таком диапазоне давлений, в котором они дают показания с достаточно высокой точностью.

Сличение показаний манометров осложнялось тем обстоятельством, что в вакуумной системе манометров, даже при отсутствии заметной течи или откачки газа, давление претерпевало некоторые случайные изменения во времени. В результате разброс показаний манометров при повторении измерений мог зависеть не только от погрешностей показаний отдельных манометров, но и от изменений самого значения изме-

ряемого давления. Для устранения этой зависимости измерения давления проводились при одновременной «отсечке» ртутью газа, подвергаемого сжатию в объемах манометров.

Дисперсия D разности одновременных показаний p_1 и p_2 двух манометров, являющихся независимыми случайными величинами, равна сумме дисперсий величин p_1 и p_2 :

$$D(p_1 - p_2) = D(p_1) + D(p_2). \quad (6)$$

Следовательно, в общем случае найденное значение $D(p_1 - p_2)$ не позволяет определить дисперсии показаний каждого манометра. Однако в двух частных случаях задача решается достаточно просто:

1) при сличении двух одинаковых манометров, изготовленных по одной технологии, имеющих одинаковые постоянные и прочие характеристики, можно положить

$$D(p_1 - p_2) = 2D(p_1) = 2D(p_2); \quad (7)$$

2) если дисперсия показаний одного из манометров во много раз меньше дисперсии показаний второго, то можно положить $D(p_1) \approx 0$ и, следовательно,

$$D(p_2) \approx D(p_1 - p_2). \quad (8)$$

Именно эти два случая имели место при сличении образцовых манометров: первый — при сличении однотипных манометров разных наборов; второй — при сличении соседних манометров одного или разных наборов (рис. 4). Результаты сличений манометров сведены в табл. 3 и 4. В табл. 3 даны рекомендуемые пределы измерений (для квадратичных шкал) и оценки средних квадратичных погрешностей при различных номинальных давлениях для измерения каждым манометром набора.

Таблица 3

№ набора манометров	Пределы измерений по квадратичной шкале		Статистические оценки относительных средних квадратичных погрешностей (в процентах) при давлениях (мм рт. ст.)							
	номинальные	рекомендуемые	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	2,3	12,2	
1	1	$1,2 \cdot 10^{-4} \div 3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-4} \div 3,0 \cdot 10^{-2}$	2,9	0,7	0,2	0,7	—	—	—
	2	$1,5 \cdot 10^{-3} \div 4,5 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-2} \div 4,5 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	1,6	0,4	—	—
	3	$1,1 \cdot 10^{-2} \div 2,9$	$4,5 \cdot 10^{-1} \div 2,9$	—	—	—	—	1,6	0,1	—
	4	$6,8 \cdot 10^{-2} \div 20,0$	$2,9 \div 20,0$	—	—	—	—	—	0,4	0,1
2	1	$1,3 \cdot 10^{-4} \div 2,9 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-4} \div 2,9 \cdot 10^{-2}$	2,9	0,7	0,2	0,7	—	—	—
	2	$8,8 \cdot 10^{-4} \div 2,1 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-2} \div 2,1 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	1,1	0,4	—	—
	3	$9,6 \cdot 10^{-3} \div 2,3$	$2,1 \cdot 10^{-1} \div 2,3$	—	—	—	—	1,3	0,1	—
	4	$6,5 \cdot 10^{-2} \div 17,0$	$2,3 \div 17,0$	—	—	—	—	—	0,3	0,1

При пользовании квадратичными шкалами благодаря большим областям перекрытия диапазонов соседних манометров оказалось возможным рекомендовать для каждого манометра (кроме первых) такие пределы измерения, при которых наименьшая разность уровней ртути в измерительном и сравнительном капиллярах равна 40–50 мм. Таким образом, исключены те области измерения, в которых возможны наибольшие случайные и систематические погрешности. Приведенные

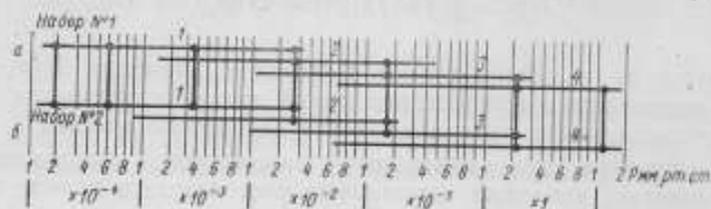


Рис. 4. Схема сличения двух наборов образцовых компрессионных манометров.

Жирными вертикальными линиями соединены точки давления, в которых сличались манометры.
а — пределы давления, охватываемого манометрами 1–4 набора № 1;
б — то же набора № 2.

в табл. 3 и 4 статистические оценки погрешностей получены на основании обработки результатов сличения манометров. В тех точках рабочего диапазона манометров, где проводилось сличение только двух однотипных манометров (рис. 4), а также при сличении манометров на верхнем пределе измерения, в качестве оценки случайных погрешностей взята

Таблица 4

№		Статистические оценки относительных систематических погрешностей в процентах к среднему из показаний пары однотипных манометров при давлении (мм рт. ст.)						
набора	манометра	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	2,3	12,2
1	1	0	0	+0,2	0	—	—	—
	2	—	—	—	+0,9	+1,3	—	—
	3	—	—	—	—	0	+0,6	—
	4	—	—	—	—	—	-0,4	+0,6
2	1	0	0	-0,2	0	—	—	—
	2	—	—	—	-0,9	-1,3	—	—
	3	—	—	—	—	0	-0,6	—
	4	—	—	—	—	—	+0,4	-0,6

Примечание. Нулями отмечены случаи, когда средние разности удовлетворяют критерию (9).

средняя квадратичная погрешность, вычисленная по формуле (7). В тех точках, где, согласно схеме сличения, проводилось одновременное сличение четырех манометров, имелась возможность получить 3 независимые оценки случайных погрешностей для той пары манометров, которые сличались в среднем участке своего рабочего диапазона: а) по половине дисперсии разности показаний манометров данной пары; б) по дисперсии разности показаний двух соседних манометров одного набора; в) по дис-

перси разности показаний данного манометра и соседнего манометра из другого набора. Как правило, все три оценки отличались одна от другой не более чем в 1,5 раза. В табл. 3 вносилась наибольшая из оценок.

Из сравнения табл. 3 и 2 видно, что порядок полученных оценок случайных погрешностей совпадает с расчетным. Наиболее высокая точность достигнута, как и ожидалось, в верхней части диапазона давлений, измеряемых как каждым манометром, так и их набором. Наименьшая точность наблюдается на нижнем пределе измерения.

Результаты сличения манометров позволили также оценить систематические погрешности их (относящиеся к упомянутой выше второй группе погрешностей). Для этой цели был применен критерий

$$\frac{\overline{\Delta p}}{s_n} \leq 2,5, \quad (9)$$

где $\overline{\Delta p}$ — средняя разность показаний сличаемых манометров при одном номинальном давлении \overline{p} , или, что то же самое, разность между средними показаний сличаемых манометров;
 s_n — статистическая оценка средней квадратичной погрешности среднего арифметического n измерений разности показаний манометров.

Представление о систематических погрешностях дает табл. 4. В ней приведены отношения средней разности показаний двух манометров к измеряемому давлению, выраженные в процентах. Порядок расхождений, приведенных в таблице, совпадает с порядком соответствующих величин, найденных выше теоретически.

Таким образом, примененный метод сличения манометров позволил получить статистические оценки как случайных, так и систематических погрешностей.

Созданные наборы компрессионных манометров позволяют производить измерения абсолютного давления в пределах 20 ± 10^{-4} мм рт. ст. с относительной средней квадратичной погрешностью не более 1,5%. Высокая точность приборов позволила аттестовать их в качестве образцовых приборов 1-го разряда.

Основное назначение созданных наборов — поддержание единства измерений в области вакуумметрии и соответственно поверка образцовых манометров 2-го разряда.

Кроме того, эти наборы, а равно отдельные экземпляры приборов, аналогичные одному из манометров набора, могут быть рекомендованы для научных исследований и проведения испытаний выпускаемых промышленностью манометров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jansen C. G. J., Venema A., A McLeod Manometer with Prescribed Volumes for Use as a Standard Instrument, «Vacuum», v. 9, No 3—4, 1959, p. 219—230.
2. Clark R. J., A Method of Calibration of a McLeod Gauge, «Journal of Scientific Instruments», v. 5, No 4, 1928, p. 126—130.
3. Rosenberg P., The Design of an accurate McLeod Gauge, «Review of Scientific Instruments», v. 10, No 4, 1939, p. 131—134.
4. Engel A., New Trends in vacuum research based on ionisation phenomena, «Vacuum», v. 1, No 4, 1951, p. 257—265.

Поступила в редакцию
31/III 1960 г.

А. В. ЕРЮХИН
ВНИИМ

ПОВЕРКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ ИОНИЗАЦИОННЫХ И ТЕРМОПАРНЫХ ВАКУУММЕТРОВ

В статье рассмотрены условия, необходимые для раздельной поверки измерительных блоков и манометрических ламп ионизационных и термопарных вакуумметров, а также описана образцовая установка, предлагаемая для поверки измерительных блоков.

Ионизационные и термопарные вакуумметры представляют собой измерительные комплекты, состоящие из преобразователей (манометрических ламп) и измерительных блоков (электрических устройств, осуществляющих питание манометрических ламп и позволяющих выполнять необходимые электрические измерения).

В обычных условиях эксплуатации вакуумметров преобразователи и измерительные блоки должны быть взаимозаменяемы, так как часто возникает необходимость замены вышедшей из строя манометрической лампы, замены измерительных блоков, применения одного измерительного блока с несколькими манометрическими лампами и т. п. Технические условия на манометрические лампы и измерительные блоки должны учитывать это обстоятельство и, в частности, допускать раздельную поверку ламп и блоков. Между тем отдельная поверка измерительных блоков предусмотрена техническими условиями только на ионизационные вакуумметры.

Технические условия на манометрические лампы определяют значения постоянных или форму градуировочных кривых и допустимые пределы отклонений для заданного режима питания.

Технические условия на измерительные блоки устанавливают значение их предельной погрешности во всем диапазоне измеряемых давлений (равное 5%). Однако анализ погрешностей измерительных блоков ионизационных и термопарных вакуумметров показывает, что при указанных в технических условиях классах точности измерительных приборов упомянутая погрешность может значительно превышать 5%.

Чтобы удовлетворить требованию взаимозаменяемости, технические условия на манометрические лампы должны содержать допуски на пределы возможных колебаний параметров накала, а условия на измери-

тельные блоки — соответствующие требования, связанные с необходимостью обеспечивать нормальный режим питания при колебаниях параметров ламп, не выходящих за пределы указанных допусков. Этим требованиям соответствующие технические условия не содержат.

Специальные исследования манометрических ламп, выполненные для определения имеющих место пределов колебаний указанных параметров, дали следующие результаты.

При поддержании требуемого техническими условиями тока эмиссии (5 ма) в разных лампах типа ЛМ-2 и при разных давлениях возможен разброс тока накала в пределах $1,26 \div 1,47$ а, а напряжения накала — в пределах $6,4 \div 8,3$ в. Разброс параметров нагревателя ламп типа ЛМ-2 оказался невелик и не обнаружил сколько-нибудь существенного влияния на работу измерительного блока.

Таким образом, как технические условия на вакуумметры, так и методика их поверки требуют существенных дополнений.

Оценка погрешностей измерительных блоков

Формула измерения ионного тока усилителем ионизационного вакуумметра

$$i_{изм} = \frac{c_i N - \alpha - \gamma}{i_2 r_2} i_n r_{вх} + \alpha + \beta, \quad (1)$$

где $i_{изм}$ — значение тока, измеряемого прибором на выходе усилителя;

c_i — цена деления шкалы измерительного прибора по току;

N — полное число делений шкалы измерительного прибора;

i_n — ионный ток на коллектор лампы ЛМ-2, являющийся мерой давления;

$r_{вх}$ — входное сопротивление усилителя;

i_2 — ток электронной эмиссии лампы ЛМ-2;

r_2 — градуировочное сопротивление;

α — погрешность измерительного прибора при установке стрелки на нуль;

β — то же при отсчете;

γ — " " при градуировке усилителя (на верхнем пределе шкалы);

α, β, γ определяются классом точности измерительного прибора.

Из формулы (1) видно, что возможными источниками погрешности при измерении ионного тока могут явиться как измерительный прибор, по которому производится отсчет, так и отклонения значений сопротивлений $r_{вх}$ и r_2 от номинальных, а также значение тока эмиссии, по которому производится градуировка усилителя. Последнее определяется точностью измерительного прибора. Оставляя в стороне погрешность самой лампы ЛМ-2, погрешностью величины i_n можно пренебречь при условии, что электрический режим находится в пределах допусков.

Измеряемая величина	Относительные предельные погрешности (проценты)		
	10% шкалы	50% шкалы	100% шкалы
$i_{изм}$	21	6	5
$i_{изм}$ без учета ф-лы (3)	25	6	4
$i_{изм}$ с учетом ф-лы (3)	27	11	10

Результаты расчета относительных предельных погрешностей измерительных блоков ионизационных вакуумметров $i_{изм}$ по формуле (1) и данным технических условий приведены в таблице.

Электродвижущая сила, измеряемая прибором термодатного вакуумметра, определяется уравнением

$$e_{изм} = K \frac{e}{r_t + r_{пр} + r_d} + \varepsilon, \quad (2)$$

при этом

$$e = f(i_n), \quad (3)$$

$e_{изм}$ — значение э. д. с., измеренное по шкале измерительного прибора;

e — действительное значение измеряемой э. д. с.;

$K = \frac{c_e}{c_i}$, где c_e — цена деления прибора при градуировке его по э. д. с., c_i — цена деления по току;

r_t — сопротивление термодатры, равное, согласно техническим условиям, 7 ± 1 Ом;

$r_{пр}$ — внутреннее сопротивление измерительного прибора;

r_d — добавочное сопротивление, подбираемое таким образом, чтобы отклонение стрелки прибора до верхнего предела шкалы соответствовало э. д. с. термодатры, равной 10 мВ;

ε — погрешность измерительного прибора;

i_n — ток нагревателя термодатры.

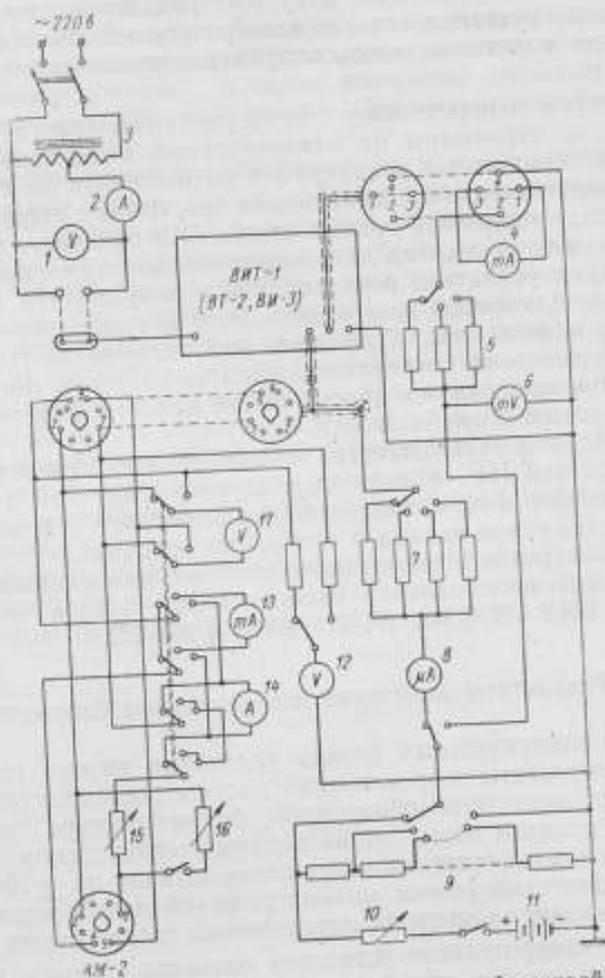
Погрешности величин, входящих в правую часть уравнения (2) определяются классом точности измерительного прибора (2,5) и допусками на сопротивления r_t и r_d . Они позволяют рассчитать относительную предельную погрешность $e_{изм}$, которая оказывается на верхнем пределе шкалы равной 4% (см. таблицу). Однако, если принять во внимание уравнение (3), то $e_{изм}$ имеет дополнительную погрешность, зависящую от i_n , дисперсия которой равна $\left(\frac{\partial e}{\partial i_n} \Delta i_n\right)^2$, где Δi_n определяется классом точности измерительного прибора. Зависимость (3) была установлена эмпирически, путем исследования нескольких ламп типа ЛТ-2. Оказалось, что при учете зависимости (3) предельные погрешности $e_{изм}$ возрастают до недопустимо больших значений (см. таблицу). Погрешность e , обусловленная манометрической лампой ЛТ-2, как и погрешность i_n в случае ионизационного вакуумметра, при расчете погрешности измерительного блока во внимание не принимается. Из уравнений (2) и (3) следует, что погрешности могут быть уменьшены путем применения измерительного прибора более высокого класса точности с большим внутренним сопротивлением. Однако и в этом случае погрешности измерительного блока в начальной части шкалы не могут быть ограничены 5% от измеряемой величины.

При поверке измерительных блоков термодатных вакуумметров источником э. д. с. является не термодатра с нагревателем, а делитель напряжения; поэтому погрешность, обусловленная зависимостью (3), не может быть обнаружена. Следовательно, в этом случае необходимо руководствоваться приведенными в таблице пониженными значениями $e_{изм}$ без учета (3).

Образцовая измерительная установка

Проведение поверки измерительных блоков требует специальной измерительной установки, которая должна содержать не только образцовые

приборы для сличения с ними приборов, имеющихся в измерительном блоке, но и специальные источники питания, заменяющие собой преобразователи вакуумметров — манометрические лампы. Кроме того, установка должна содержать целый ряд приборов для контроля электрического режима манометрических ламп, обеспечиваемого измерительным блоком.



Принципиальная электрическая схема образцовой измерительной установки.

Принципиальная электрическая схема образцовой установки для проверки измерительных блоков вакуумметров представлена на рисунке. Установка имеет следующие узлы:

- I) узел питания измерительного блока, включающий: автотрансформатор 3, амперметр 2, вольтметр 1;
- II) источник регулируемого постоянного напряжения, включающий: батарею аккумуляторов 11, магазин сопротивлений 10, делитель 9;
- III) узел проверки измерительного блока ионизационного вакуумметра, включающий: набор сопротивлений 7, многопредельный микроамперметр 8, миллиамперметр 13, микроамперметр 12 (выполняющий функции высокоомного вольтметра), амперметр 14 и вольтметр 17 для

измерений в цепи переменного тока и сопротивления цепи катода манометрической лампы, шунтирующее 16 и добавочное 15;

IV) узел проверки измерительного блока термопарного вакуумметра, включающий: миллиамперметр 4, милливольтметр 6 и сопротивление 5, заменяющее собственное сопротивление термопары.

Установка позволяет производить испытания измерительных блоков ионизационных и термопарных вакуумметров, необходимые для обеспечения их взаимозаменяемости с манометрическими лампами, а также все электрические испытания, предусмотренные техническими условиями на вакуумметры.

Для проверки измерительного прибора термопарного вакуумметра вместо э. д. с. термопары на измерительный блок подается разность потенциалов, снимаемая с делителя 9 и уменьшенная на падение напряжения на сопротивлении 5, заменяющем собственное сопротивление термопары. Сопротивление 5 можно изменять в пределах, предусмотренных техническими условиями для сопротивления термопары.

Для проверки усилителя ионизационного вакуумметра также применяют делитель 9, который дает необходимое значение постоянного тока, заменяющего ионный ток. При этом значительная часть напряжения, снимаемого с делителя, сосредоточивается на одном из сопротивлений 7, благодаря чему исключается шунтирование входной цепи усилителя низкомным сопротивлением делителя.

Проверка работы стабилизатора тока эмиссии ионизационного вакуумметра осуществляется с помощью шунтирующего 16 и добавочного 15 сопротивлений в цепи катода, которые позволяют искусственно изменить ток и напряжение накала в требуемых пределах.

Пределы измерения и погрешности величин, измеряемых образцовой установкой, допускают проверку измерительных блоков вакуумметров типов ВИТ-1, ВИТ-1П, ВТ-2, ВТ-2П, ВИ-3 и ВИ-3П.

Результаты испытаний измерительных блоков

Испытания измерительных блоков указанных типов вакуумметров подтвердили результаты теоретического расчета погрешностей, а в некоторых случаях позволили обнаружить систематические погрешности, выходящие за пределы норм, установленных техническими условиями. Оказалось, что при отклонениях напряжения питания на $\pm 10\%$ от номинального электрический режим манометрической лампы ионизационного вакуумметра выходит за пределы, определенные техническими условиями.

Образцовая измерительная установка позволила изучить работу стабилизатора тока эмиссии при различных напряжениях питания и установить пределы изменения параметров накала манометрических ламп и напряжения питания, в которых обеспечивается нормальная стабилизация тока эмиссии.

Установка позволяет производить проверки измерительных блоков силами технического персонала средней квалификации в короткие сроки, поэтому она может быть рекомендована для поверочных работ на предприятиях, где имеется большое число измерительных блоков.

Заключение

1. Испытания манометрических ламп и измерительных блоков можно проводить независимо одно от другого при соблюдении следующих условий:

а) испытание лампы должно заключаться в определении ее постоянной (для ламп типа ЛМ-2) или формы градуировочной кривой (для ламп типа ЛТ-2) при заданном техническими условиями режиме питания. Кроме того, при испытаниях ламп типа ЛМ-2 следует контролировать параметры накала, при которых лампа обеспечивает номинальное значение тока эмиссии так же, как у ламп типа ЛТ-2 контролируется значение сопротивления термопары;

б) испытание измерительного блока должно включать поверку схемы измерения ионного тока или э. д. с. (для ионизационного и термопарного вакуумметров соответственно), а также измерение основных величин, характеризующих электрический режим, обеспечиваемый блоком для манометрической лампы.

2. Существующие технические условия на манометрические лампы и на измерительные блоки должны обеспечивать взаимозаменяемость ламп и блоков. Поэтому в них необходимо дополнительно указать:

а) или предельные погрешности измерительных блоков на разных участках шкал измерительных приборов или приведенные погрешности. Однако последнее, как видно из таблицы, приведет к значительному преувеличению погрешностей в начальных участках шкалы;

б) допуски на пределы возможных колебаний электрического режима ионизационных вакуумметров не только при номинальном напряжении питающей сети, но и при допустимых отклонениях от него;

в) пределы допустимых колебаний параметров накала при заданном рабочем режиме и разных давлениях для лампы ЛМ-2, и соответствующие требования к стабилизатору тока эмиссии для измерительных блоков ионизационных вакуумметров.

3. Технические условия на термопарные вакуумметры должны предусматривать отдельную поверку измерительного блока при измерении э. д. с. термопары по методике, ясной из схемы установки, приведенной на рисунке.

М. И. ДРИГА
ВНИИМ

ТЕПЛОВОЙ (ТЕРМОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ) МАНОМЕТР С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОДВЕСОМ

Статья дает описание термомолекулярного поршневого манометра для измерения абсолютного давления в пределах $10^{-4} \div 10^{-7}$ мм рт. ст.

В результате теоретических и экспериментальных исследований, направленных к усовершенствованию ранее созданного теплового манометра, во ВНИИМ осуществлен манометр новой конструкции, описание которого приводится ниже.

Теория манометра

Принципиальная схема манометра дана на рис. 1. В средней части стеклянного корпуса 1 манометра, имеющей цилиндрическую форму, находится поршень-диск 2, расположенный в вертикальной плоскости. Поршень разделяет корпус на две камеры I и II, сообщающиеся друг с другом через узкий кольцевой зазор между корпусом и поршнем. С помощью термостатов, обозначенных пунктиром, температуры камер I и II поддерживаются неизменными, равными соответственно T_1 и T_2 , причем $T_1 > T_2$. Температура цилиндрического участка корпуса изменяется непрерывно в направлении оси корпуса от T_1 до T_2 . При этих условиях на поршень действует сила, обусловленная разностью давлений в камерах, которая и является мерой измеряемого давления. Поршень укреплен на горизонтальном рычаге, подвешенном на тонкой нити. Сила, действующая на поршень, определяется по углу отклонения подвижной части манометра; этот угол отсчитывается с помощью светового сигнала, отраженного от зеркала 3, или с помощью компенсационного устройства.

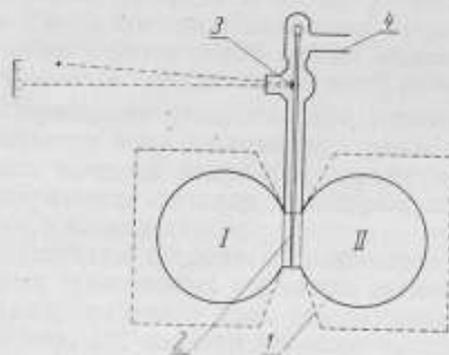


Рис. 1. Принципиальная схема манометра.

Манометр соединен трубкой 4 с колбой (камерой), в которой измеряют давление. При измерении давления поршень имеет постоянную температуру T_0 в пределах $T_1 > T_0 > T_2$.

При теоретическом исследовании прибора необходимо рассмотреть 2 случая: когда коэффициенты аккомодации на поверхности поршня и камер равны единице и когда они отличаются от единицы.

Коэффициенты аккомодации на поверхности поршня и камер равны единице

Давление P на поршень-диск в каждой камере манометра можно в соответствии с методом, принятым еще в работах Киудсена [1], Г. Сливака [2] и др., рассматривать как сумму парциальных давлений двух групп молекул:

- 1) молекул, только приходящих к поршню (группа A),
- 2) молекул, только уходящих от поршня (группа B).

Если обозначим

n_1 и c_1 — число и среднюю квадратичную скорость молекул группы A в камере I ,

n_2 и c_2 — то же в камере II ,

n_0 и c_0 — то же, молекул группы B в обеих камерах, тогда парциальные давления на поршень будут:

- 1) оказываемое молекулами, приходящими со стороны камеры I

$$P_{A1} = \frac{1}{6} m n_1 c_1^2; \quad (1)$$

- 2) оказываемое молекулами, приходящими со стороны камеры II

$$P_{A2} = \frac{1}{6} m n_2 c_2^2; \quad (2)$$

- 3) оказываемое молекулами группы B (в камерах I и II) при их концентрации n_0 и средней квадратичной скорости c_0

$$P_{B1} = P_{B2} = \frac{1}{6} m n_0 c_0^2. \quad (3)$$

Необходимо иметь в виду, что формулы (1)–(3) имеют силу только для высоко Разреженного газа (средняя длина свободного пробега молекул $\lambda \gg d$) при стационарном состоянии его. Поэтому давления на поршень в камерах I и II будут

$$P_1 = P_{A1} + P_{B1} = \frac{m}{6} (n_1 c_1^2 + n_0 c_0^2); \quad (4)$$

$$P_2 = P_{A2} + P_{B2} = \frac{m}{6} (n_2 c_2^2 + n_0 c_0^2). \quad (5)$$

Из (4) и (5) получим разность давлений $P_1 - P_2$ в следующем виде:

$$P_1 - P_2 = \frac{m}{6} (n_1 c_1^2 - n_2 c_2^2). \quad (6)$$

Условие стационарности дает

$$n_1 c_1 = n_2 c_2 = n c; \quad \frac{c_1}{c} = \sqrt{\frac{T_1}{T}}; \quad \frac{c_2}{c} = \sqrt{\frac{T_2}{T}}, \quad (7)$$

где n , c и T — число молекул в 1 см^3 объема баллона, в котором измеряют давление газа P , их средняя квадратичная скорость и температура газа в этом баллоне.

Объединив (6) и (7) и введя площадь поршня S , получим

$$P = \frac{2F\sqrt{T}}{S(\sqrt{T_1} - \sqrt{T_2})}, \quad (8)$$

где $F = (P_1 - P_2)S$ — сила, действующая на поршень манометра.

Формула (8) позволяет рассчитать искомое давление P , если предварительно измерены величины, входящие в правую часть ее.

Коэффициенты аккомодации на поверхности поршня и камер не равны единице

В этом общем случае температуры групп молекул A_1 , A_2 , B_1 и B_2 отличаются от температур камер I и II и от температуры поршня.

Если обозначить

T_{A_1} , T_{A_2} , T_{B_1} и T_{B_2} — температуры групп молекул A_1 , A_2 , B_1 и B_2 соответственно индексам;

a_1 , a_2 и a_0 — коэффициенты аккомодации на поверхности камер I , II и на поверхности поршня,

то соответствующие упомянутым группам молекул давления будут

$$\left. \begin{aligned} P_{A_1} &= \frac{1}{6} mn_1 c_1^2 \\ P_{A_2} &= \frac{1}{6} mn_2 c_2^2 \\ P_{B_1} &= \frac{1}{6} mn_{01} c_{01}^2 \\ P_{B_2} &= \frac{1}{6} mn_{02} c_{02}^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Из уравнений (9) получаем следующие формулы для давлений P_1 , P_2 и их разности:

$$P_1 = \frac{m}{6} (n_1 c_1^2 + n_{01} c_{01}^2); \quad (10)$$

$$P_2 = \frac{m}{6} (n_2 c_2^2 + n_{02} c_{02}^2); \quad (11)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{m}{6} (n_1 c_1^2 + n_{01} c_{01}^2 - n_2 c_2^2 - n_{02} c_{02}^2). \quad (12)$$

В рассмотренном ранее случае соотношения (7) справедливы ввиду того, что распределение скоростей молекул в них подчиняется закону Максвелла. В общем случае этого утверждать нельзя. Если площадь поршня во много раз меньше площади поверхности камеры, то распределение скоростей молекул в группах A_1 и A_2 может лишь незначительно отличаться от максвелловского, так как при этом условии молекулы групп A_1 и A_2 попадают на поршень после большого числа столкновений со стенками камеры I или II и находятся в температурном равновесии со стенками данной камеры.

Распределение скоростей в группах молекул B_1 и B_2 может отличаться от максвелловского значительно больше, так как на поверхности поршня, если она плоская, не может быть многократных столкновений. Только в том случае, когда коэффициент аккомодации на поверхности поршня близок к единице (либо к нулю), подавляющее большинство этих групп молекул находится в температурном равновесии с поверх-

Далее введем обозначения:

z — число молекул, ударяющихся или покидающих в единицу времени единицу поверхности поршня в камере l манометра;

$\beta = \frac{S}{S_k}$ — отношение площади поршня к площади внутренней поверхности камеры S_k .

Температуру группы молекул T_{A1} в камере l можно определить как среднее значение температур групп молекул вида $1, 2, 3, \dots, i$, если известны z_1, z_2, \dots, z_i — относительные количества молекул каждого вида,

$$T_{A1} = \frac{z_1(T)1 + z_2(T)2 + z_3(T)3 + \dots + z_i(T)i}{z_1 + z_2 + z_3 + \dots + z_i} \quad (18)$$

$z_1, z_2, z_3, \dots, z_i$ найдем из следующих рассуждений. При сферической или приближающейся к сферической форме камеры молекулы газа, покидающие в единицу времени поверхность поршня в количестве zS , в соответствии с законом косинуса распределятся равномерно по всей поверхности камеры. Из этого количества молекул после одного столкновения с поверхностью камеры на поршень попадают $z_1 = \beta zS$ молекул вида 1 . Остальные молекулы, покидающие поверхность поршня после одного столкновения с поверхностью камеры, попадут вторично на эту поверхность в количестве $zS(1 - \beta)$. Из этого количества молекул после двух последующих друг за другом столкновений с поверхностью камеры на поверхность поршня попадет $z_2 = zS(1 - \beta)\beta$ молекул вида 2 . После трехкратного столкновения с поверхностью камеры на поршень попадет $z_3 = zS(1 - \beta)^2\beta$ молекул вида 3 и т. д.

Уравнение (18) после подстановки в него значений $(T)_i$ из уравнений (17), соответствующих значений z_i и элементарных преобразований можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} T_{A1} &= T_1 + K_1(T_{B1} - T_1), \\ K_1 &= \frac{\sum_{i=1}^{i=\infty} (1 - a_1)^i (1 - \beta)^{i-1}}{\sum_{i=1}^{i=\infty} (1 - \beta)^{i-1}} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где

Далее, температуру группы молекул B_2 в камере II можно определить на основании зависимости (15) по формуле

$$T_{B2} - T_{A2} = a_0(T_0 - T_{A2}). \quad (20)$$

Температуру группы молекул A в камере II нельзя определить, пользуясь непосредственно зависимостью (15), ввиду того, что молекулы этой группы, прежде чем попасть на поршень, имеют многократные столкновения с поверхностью камеры II . Однако, пользуясь изложенным выше способом разделения группы A на подгруппы с одинаковой кратностью ударов о поверхность камеры, можно определить температуру T_{A2} как среднюю температуру всех этих подгрупп по формуле

$$\left. \begin{aligned} T_{A2} &= T_2 + K_2(T_{B2} - T_2), \\ K_2 &= \frac{\sum_{i=1}^{i=\infty} (1 - a_2)^i (1 - \beta)^{i-1}}{\sum_{i=1}^{i=\infty} (1 - \beta)^{i-1}} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где

Совместное решение уравнений (16) и (19) дает следующие выражения для температур T_{A1} , T_{B1} :

$$T_{A1} = T_1 + \frac{a_0 K_1}{1 - (1 - a_0) K_1} (T_0 - T_1) = T_1 + \Delta T_{A1}, \quad (22)$$

$$T_{B1} = T_1 + \frac{a_0}{1 - (1 - a_0) K_1} (T_0 - T_1) = T_1 + \Delta T_{B1}. \quad (23)$$

Аналогично, уравнения (20) и (21) дадут

$$T_{A2} = T_2 + \frac{a_0 K_2}{1 - (1 - a_0) K_2} (T_0 - T_2) = T_2 + \Delta T_{A2}; \quad (24)$$

$$T_{B2} = T_2 + \frac{a_0}{1 - (1 - a_0) K_2} (T_0 - T_2) = T_2 + \Delta T_{B2}. \quad (25)$$

Уравнения (22) — (25) могли бы быть подставлены в уравнение (14) в качестве расчетных, однако в них входит температура поршня T_0 и коэффициенты аккомодации на поршне a_0 и стенках камер a_1 и a_2 , точное определение которых чрезвычайно затруднительно. Можно, однако, показать, что при надлежащем выборе конструктивных элементов прибора влияние неопределенности значений T_0 , a_0 , a_1 и a_2 может быть сведено к минимуму и в границах заданной точности исключено.

Из выражений (22) — (25) видно, что при стремлении коэффициента аккомодации на поршне a_0 к единице и коэффициентов K_1 и K_2 — к нулю, T_{A1} и T_{A2} стремятся к T_1 и T_2 (соответственно), а T_{B1} и T_{B2} — к T_0 .

Тогда формула (14) переходит к формуле (8), являющуюся удобной расчетной формулой термомолекулярного манометра.

Требования, при которых (14) переходит в (8), сводятся к следующему.

1. Для того чтобы коэффициенты K_1 и K_2 стремились к нулю, необходимо, как показывает исследование формул (19) и (21), чтобы коэффициенты аккомодации a_1 и a_2 на стенках камер стремились к единице или отношение площади поршня к площади камеры β стремилось к нулю.

Вычисленная по формуле (19) табл. 1 дает численные значения K_1 при разных a_1 и β .

Из табл. 1 видно, что коэффициент K_1 быстро убывает при увеличении a_1 и уменьшении β , из чего следует, что можно подобрать такие их значения, когда коэффициент K_1 будет пренебрежимо мал.

2. Для того чтобы коэффициент аккомодации a_0 на поршне приближался к единице, следует изготовить поршень из тонкой металлической фольги с глубокими гофрами, как показано на рис. 2. Применение такого гофрированного поршня позволяет значительно уменьшить погрешность, вызываемую неточностью определения температуры поршня. Схема на рис. 2 дает представление о движении молекул вблизи такого поршня.

При замене формулы (14) формулой (8) в результате расчета давления войдет систематическая погрешность, обусловленная тем, что фактически K_1 и K_2 больше нуля. Для оценки этой погрешности можно полагать, что приближенно температура поршня равна

$$T_0 \approx \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Таблица 1

β	a_1			
	0,50	0,75	0,90	0,95
0,2	0,44	0,14	0,08	0,040
0,1	0,10	0,03	0,01	0,004

и определить поправки T_{A1} и T_{A2} . Абсолютные значения $[\Delta T_{A1}] = [\Delta T_{A2}]$ приведены в табл. 2. При вычислении их исходили из формул (22) и (24) при условии, что $a_0 = 1$ и коэффициенты аккомодации на поверхности камер имеют различные численные значения.

Таблица 2

β	a_i			
	0,50	0,75	0,90	0,95
0,2	47	1,5	8,6	4,3
0,1	10,7	8,6	1,1	0,43

Из табл. 2 видно, что абсолютные систематические погрешности ΔT_1 и ΔT_2 могут быть сведены к долям градуса.

Таким образом, показано, что при надлежащем выборе геометрических размеров камер и поршня, а также при соответствующей конструкции поршня, в расчетную формулу (8), которая

является общей, не входят коэффициенты аккомодации на внутренних частях прибора, и термомолекулярный манометр является абсолютным прибором.

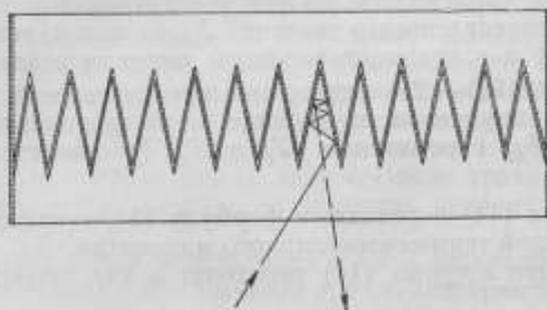


Рис. 2. Гофрированный поршень.

Расчетные формулы (8) и (14) выведены при упрощающем расчет допущении, что камеры I и II манометра имеют шарообразную форму. Однако расчет остается верным и для камер другой формы при условии, что их объем достаточно велик.

Конструкция манометра

Конструкция манометра схематически представлена на рис. 3. Манометр имеет стеклянный цилиндрический корпус 1 (диаметр 10 см, длина 60 см) с припаянной к нему стеклянной трубкой 4. Корпус расположен так, что ось его и ось трубки 4 находятся в одной горизонтальной плоскости. Корпус 1 установлен в литой силуминовой коробке 15, к которой прикреплены на винтах съемные кожухи 16 и 9 с двойными стенками, предназначенные для термостатирования одной половины стеклянного корпуса при -194°C и другой половины его — при $+20^\circ\text{C}$.

В зазоре между кожухом 9 и корпусом 1, а также между корпусом и силуминовой коробкой 15 циркулирует вода, температура которой поддерживается равной $+20^\circ\text{C}$ с помощью термостата типа ТС-15. Зазор между кожухом 16 и корпусом заполняют жидким азотом (или смесью льда с водой). Между стенками кожуха 9 расположен стеклянный сосуд Дьюара 17.

Подвижная часть прибора состоит из рычага 8, расположенного в горизонтальной плоскости и подвешенного на вертикальном подвесе (вольфрамовая нить $\varnothing 25 \mu\text{м}$). К рычагу прикреплены: поршень 2,

металлический диск 14 электрического динамометра (конденсатора), назначение которого объяснено ниже, зеркальце 3, предназначенное для светового отсчета угла отклонения рычага и два небольших цилиндрических магнита 6, взаимодействующих с компенсационной катушкой 5, укрепленной неподвижно. Магниты 6 расположены в вертикальной плоскости и направлены в противоположные стороны с целью предотвращения влияния посторонних магнитных полей. Оба они взаимодействуют с компенсационной катушкой.

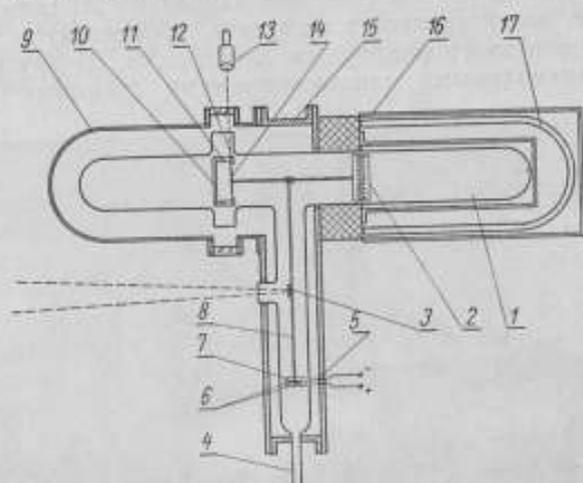


Рис. 3. Конструкция манометра.

Несколько ниже цилиндрических магнитов укреплена пластинка 7 из чистой меди, предназначенная для демпфирования манометра вихревыми токами, индуцируемыми в ней при колебаниях подвижной части. С целью предотвращения влияния вибрации почвы манометр установлен на отдельном фундаменте.

Отсчеты угла отклонения рычага манометра производят по равномерной миллиметровой шкале, находящейся на расстоянии 3 м от оси вращения подвижной части манометра. В осветителе применена дополнительная линза для фокусировки луча, отраженного от зеркальца прибора, что дает возможность отсчитывать по шкале перемещения тонкой теневой линии «зайчика» порядка $0,25 \pm 0,5$ мм.

Специальный плоский конденсатор, предназначенный для измерений силы (рис. 3), состоит из стеклянного диска 10 (диаметр 92 мм, толщина 4 мм), укрепленного неподвижно, металлического диска 14 (диаметр 50 мм, толщина 0,2 мм), укрепленного на подвижной части манометра, и стеклянного охранного кольца 12 (диаметр наружный 92 мм, внутренний 52 мм, толщина 4 мм). Плоские поверхности стеклянного кольца и диска, обращенные внутрь конденсатора, сошлифованы и притерты, а затем на них нанесен тонкий слой серебра путем распыления в вакууме.

Стеклянный диск 10 и охранное кольцо 12 конденсатора прижаты металлизированными сторонами к стеклянному кольцу 11 с плоскопараллельными торцевыми поверхностями (наружный диаметр 92 мм, внутренний 80 мм, толщина 30 мм), чем достигается надежность установки неподвижного диска 10 и охранного кольца 12 конденсатора на взаимном расстоянии 30 мм с погрешностью, не большей 0,01%. Диск 14 конденсатора, укрепленный на подвижной части манометра, устанавли-

ливают в плоскости охранный кольца 12 при регулировке нулевого (не отклоненного) положения подвижной части манометра с помощью микроскопа 13 с погрешностью, не превышающей $\pm 0,5\%$.

В вакуумную систему измерительной установки, кроме манометра, входят: 1) стеклянный баллон, к которому трубками присоединяют поверяемые манометрические лампы вакуумметров ВТ-2 и ВИ-3, и 2) насосы — диффузионный, типа ММ-40, и форвакуумный, типа ВН-461М. Манометр и баллон ограждены ловушками от попадания на них паров масел и паров смазки кранов. Ловушки наполнены жидким азотом. Просушка воздуха, поступающего в манометр, производится с помощью осушителя, наполненного фосфорным ангидридом. Диффузионный насос и баллон с напариваемыми манометрическими лампами установлены

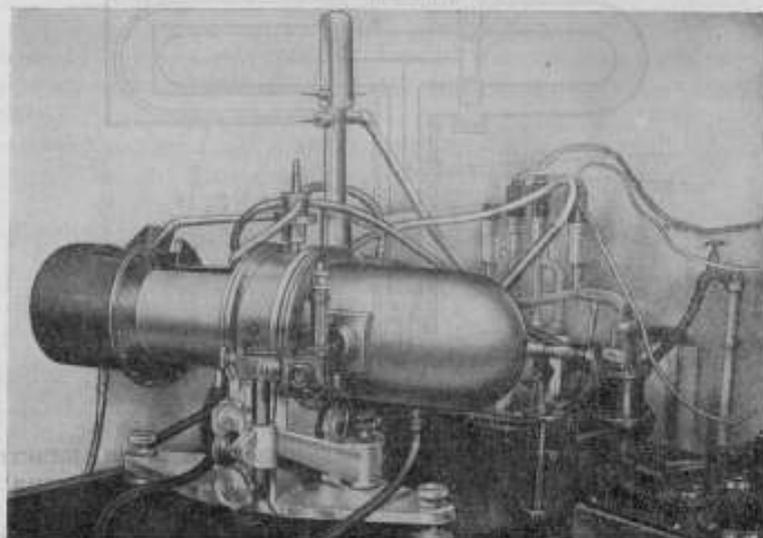


Рис. 4. Общий вид манометра.

на столике вместе с манометром, а форвакуумный насос с целью предотвращения передачи вибрации на установку установлен отдельно и соединен с ней резиновым вакуумным шлангом. Общий вид манометра показан на рис. 4.

Измерение силы, действующей на поршень манометра

В манометре применен компенсационный метод измерения силы, действующей на поршень. Момент этой силы во время измерения давления непосредственно уравновешивается моментом силы взаимодействия небольшого цилиндрического магнита *b* (рис. 3), укрепленного на подвижной части манометра, и компенсационной катушки *б*, по которой проходит постоянный ток, подбираемый так, чтобы уравновешивание происходило при неотклоненном положении подвижной части прибора. Мерой измеряемого давления является ток *I*, проходящий в катушке *б* во время равновесия. Этот ток связан линейной зависимостью с силой взаимодействия магнита и компенсационной катушки и, следовательно, также с силой *F*, действующей на поршень при равновесии:

$$F = kI, \quad (26)$$

где *k* — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, при известном k измерение силы, действующей на поршень, сводится к отсчету показаний миллиамперметра в цепи компенсационной катушки.

Значение коэффициента k должно быть определено экспериментально. В манометре с вертикальным поршнем определение этого значения производилось при помощи образцовой гири-рейтера, а при горизонтальной конструкции поршня применение гири невозможно, поэтому k в манометре с вертикальным подвесом определяют при помощи плоского конденсатора, являющегося, таким образом, электрическим динамометром. Сила взаимодействия F_s между пластинами конденсатора при условии однородности электрического поля может быть рассчитана по известной формуле

$$F_s = \frac{\epsilon U^2 S_n}{d^2}, \quad (27)$$

где U — разность потенциалов на пластинах конденсатора;

S_n — площадь пластин;

d — расстояние между пластинами;

ϵ — диэлектрическая постоянная.

Форма компенсационной катушки 5 (рис. 3) и расстояние ее до магнита 6 выбраны такими, что при уравнивании момента электростатической силы конденсатора моментом магнитоэлектрической силы получается устойчивое равновесие, что существенно для работы прибора.

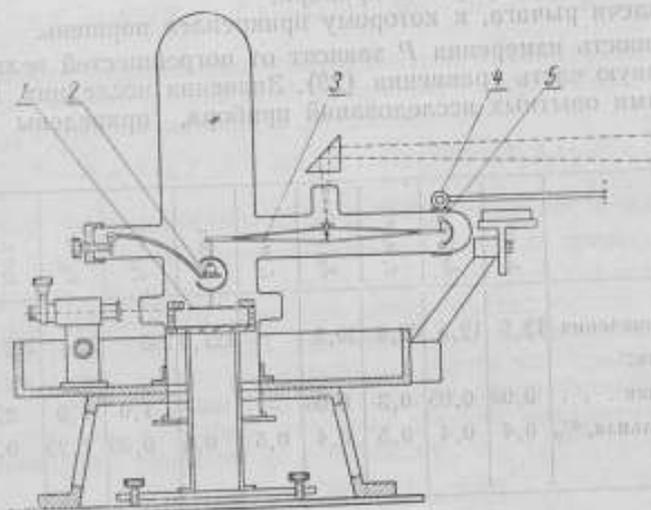


Рис. 5. Измерительная установка.

Однако так как выбранные размеры конденсатора не дают уверенности в равномерности поля, то F_s проверяли экспериментально на созданной для этой цели измерительной установке. Схема последней дана на рис. 5. Главную часть установки составляют микровесы. На плече коромысла 3 подвешена подвижная пластина 1 конденсатора и на это же плечо можно накладывать гирю-рейтер 2. На другом плече подвешен магнитик 6, взаимодействующий с катушкой 4, укрепленной неподвижно. Измерение заключается в определении тока, необходимого для равновесия весов, сначала — когда на плече находится гиря, а затем — когда к пластинам конденсатора подведена заданная разность потен-

сигналов. Этим путем можно отградуировать конденсатор, найдя зависимость между его разностью потенциалов и силой взаимодействия между пластинами.

Установлено, что измеренная сила взаимодействия пластин плоского конденсатора на 3,5% меньше расчетной, полученной по формуле (27).

Погрешности показаний манометра

Надежная оценка погрешностей современных ионизационных манометров для измерений давлений от 10^{-5} мм рт. ст. и ниже затруднена отсутствием в этой области образцовых приборов. Однако ряд соображений, а равно значения погрешностей, указываемых изготовителями, позволяют полагать, что эти погрешности составляют 15% при давлениях 10^{-5} мм рт. ст. и возрастают до 50% при давлениях 10^{-7} мм рт. ст. Поэтому прибор с погрешностью, меняющейся от 5% при $P = 10^{-5}$ мм рт. ст. до 15% при $P = 10^{-7}$ мм рт. ст., для этой области давлений можно принять за образцовый. Эти значения и были приняты за верхние пределы допустимых погрешностей описываемого прибора.

Для оценки расчета последних необходимо рассмотреть уравнение измерений, которое имеет вид

$$P = \frac{2I_2 U^2 S_n I \sqrt{T}}{I_1 I_1 a^2 S (\sqrt{T_1 - \Delta T_{A1}} - \sqrt{T_2 + \Delta T_{A2}})}, \quad (28)$$

где I_1 — ток при градуировке прибора;

I_1, I_2 — плечи рычага, к которому прикреплен поршень.

Погрешность измерения P зависит от погрешностей величин, входящих в правую часть уравнения (28). Значения последних, являющиеся результатами опытных исследований прибора, приведены в табл. 3.

Таблица 3

	$I_1, \text{см}$	$I_2, \text{см}$	$S, \text{см}^2$	$S_n, \text{см}^2$	$I, \text{мкА}$	$I_2, \text{мкА}$	$T_1, \text{°К}$	$T_2, \text{°К}$	$T, \text{°К}$	$U, \text{в}$	$d, \text{см}$
Численные значения	12,5	12,5	62,8	20,3		127,8	293	79	293	740	3,0
Погрешность:											
абсолютная . . .	0,05	0,05	0,3	0,08	—	—	1,0	1,0	2,0	3,7	0,01
относительная, %	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,33	1,25	0,7	0,5	0,35

Подстановка их в формулу

$$\begin{aligned} \frac{D(P)}{P} = & \frac{D(I_1)}{I_1} + \frac{D(I_2)}{I_2} + \frac{D(I)}{I} + \frac{D(I_2)}{I_1} + \frac{D(S)}{S^2} + \\ & + \frac{D(S_n)}{S_n^2} + 4 \frac{D(U)}{U^2} + 4 \frac{D(d)}{d^2} + \frac{1}{4} \frac{D(T)}{T^2} + \\ & + \frac{D(T_1)}{4 [(\sqrt{T_1 - \Delta T_{A1}} - \sqrt{T_2 + \Delta T_{A2}}) \sqrt{T_1 - \Delta T_{A1}}]^2} + \\ & + \frac{D(T_2)}{4 [(\sqrt{T_1 - \Delta T_{A1}} - \sqrt{T_2 + \Delta T_{A2}}) \sqrt{T_2 + \Delta T_{A2}}]^2}, \quad (29) \end{aligned}$$

в которой D означает дисперсию соответствующей величины, дает возможность найти дисперсию и среднюю квадратичную погрешность измеряемого давления P . Последняя, как показывает соответствующий расчет, составляет $\frac{\sigma_P}{P} = 2\%$.

В указанный расчет не вошли погрешности поправок ΔT_{A1} и ΔT_{A2} а также погрешность уравнивания коромысла весов при градуировке специального (плоского) конденсатора, которые необходимо оценить отдельно.

Погрешности поправок ΔT_{A1} и ΔT_{A2} обусловлены недостаточной определенностью значений коэффициентов аккомодации, входящих в множители K_1 и K_2 формул (19) и (21), и неточностью определения температуры поршня T_0 . Первая из них может быть снижена до достаточно малой величины, но при этом прибор становится громоздким.

При выбранных размерах поршня и камер $\beta = 0,2$. Полагая, что коэффициенты аккомодации на поверхности камер I и II манометра имеют численное значение $a_1 = a_2 = 0,75$, а температура поршня T_0 равна среднему арифметическому из температур камер I и II , т. е.

$$T_0 = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{293 + 79}{2} = 186^\circ \text{K},$$

будем иметь

$$\Delta T_1 = K_1 (T_1 - T_0) = 0,14 (293 - 186) = 15^\circ \text{K},$$

$$\Delta T_2 = K_2 (T_0 - T_2) = 0,14 (186 - 79) = 15^\circ \text{K}.$$

Погрешности определения коэффициентов аккомодации и температуры поршня имеют порядок 10%, поэтому погрешности δ поправок ΔT_{A1} и ΔT_{A2} будут находиться в пределах:

$$-4 < \delta(\Delta T_{A1}) < 4^\circ; \quad -3 < \delta(\Delta T_{A2}) < 3^\circ.$$

Эти пределы погрешностей ΔT_{A1} и ΔT_{A2} приводят к максимальным возможным погрешностям измеряемого давления, не превышающим 3%.

Погрешность микровесов определена опытным исследованием. Ее главными составляющими оказались непостоянства «нуля», погрешность отсчета и влияние посторонних магнитных полей. При измерении массы специальных гирек миллиграммового разновеса установлено, что средняя квадратичная погрешность взвешивания не превышает 1%.

Таким образом, расчетное значение средней квадратичной погрешности измеряемого давления не превышает

$$\sigma_P = \sqrt{2^2 + 1^2 + 1^2} \approx 2,5\%.$$

Дополнительная погрешность, обусловленная неточностью поправок ΔT_{A1} и ΔT_{A2} , находится в пределах $\pm 3\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Knudsen M., Ann. d Phys., 32, 1910, 809.
2. Спивак Г., ЖТФ, 2, 1932, стр. 265.

Поступила в редакцию
29/IX 1959 г.

Е. Ф. ДОЛИНСКИЙ, П. В. ИНДРИК
ВНИИМ

ЭТАЛОН ДАВЛЕНИЙ

Статья содержит описание эталонных работ в области измерения давлений, выполненных во ВНИИМ. Дана методика измерений и обработки результатов, необходимая для хранения единицы давления и для поверки вторичного эталона.

Воспроизведение единицы давления и передача ее с необходимой точностью рабочим приборам представляет основную проблему прикладной метрологии в области измерения давления, которая делится на две отдельные задачи.

Первая из них заключается в создании первичного и вторичного эталонов давлений, а вторая — в разработке методик периодических исследований первичного эталона, обработке результатов выполненных при этом измерений, а также в разработке методики сличений, необходимой для поверки вторичного (рабочего) эталона давлений.

Настоящая статья посвящена двум этим задачам и освещает содержание эталонных работ в области измерения избыточного давления.

Первый эталон давлений был создан Д. И. Менделеевым в 1900-е годы в основанной им манометрической лаборатории Главной палаты мер и весов. Этот прибор представлял двухжидкостный ртутно-водяной многоколенный манометр с верхним пределом измерений 100 кгс/см^2 . Его применяли примерно до 20-х годов настоящего столетия, когда получили развитие грузопоршневые манометры.

Точность первого эталона давлений оказалась недостаточной и поэтому необходимо было перейти на новый эталон. Отсутствие хорошо разработанной теории грузопоршневых манометров, а также недостаточные экспериментальные материалы по этим приборам не позволяли в то время отказаться от ртутного манометра, как единственного, «абсолютного» прибора (в том смысле, что воспроизводимое им давление можно рассчитать). Однако для существенного повышения точности эталона необходимо было снизить верхний предел измерений его до $1,5 \text{ кгс/см}^2$.

Созданный второй (в исторической последовательности) эталон представлял U-образный ртутный манометр до 1200 мм рт. ст. Трубки его были отобраны и откалиброваны со всей возможной для того времени точностью. Разность высоты столбов ртути определялась катетометром, снабженным оптическим устройством, позволявшим отсчитывать 0,05 мм.

Общая погрешность воспроизводимой вторым эталоном единицы давления имела порядок $0,05 \pm 0,1$ мм рт. ст., или около $0,005 \pm 0,01\%$ (при давлении в $1,5$ кгс/см²), применяли его для определения приведенных площадей образцовых грузопоршневых манометров с пределами измерений $1 \div 50$ кгс/см².

В конце 20-х годов эта методика хранения единицы давления подверглась ревизии. И. И. Сидоров создал, по существу, вторичный эталон давления, состоявший из двух грузопоршневых манометров с номинальной площадью сечения поршня 1 см², по конструкции близких к современным приборам типа МОП-60.

Оба прибора подверглись подробному изучению путем сличения их показаний с эталонным ртутным манометром при давлениях $1 \div 1,5$ кгс/см². Этим способом была определена приведенная площадь их поршней и в дальнейшем по ним проверяли все образцовые грузопоршневые манометры. Такая методика давала безусловный прогресс, так как уменьшалась трудоемкость работ по поверке образцовых приборов.

Упомянутые два грузопоршневых прибора сохраняли значение вторичного эталона вплоть до окончания Великой Отечественной войны и позволили сохранять единство измерений в эти трудные для нашей страны годы.

В конце 30-х годов аэрогидрометрическая лаборатория ВНИИМ приступила к созданию эталонного ртутного барометра. Одновременно лаборатория давлений приступила к созданию эталонного ртутного манометра. Конструкция обоих приборов была одинакова, они предназначались для измерения как атмосферного, так и избыточного давления. Во время войны работы были приостановлены и закончить их удалось только в конце 40-х годов. Исследование этих ртутных приборов показало, что они имеют высокую точность, значительно превосходящую точность ртутного манометра, применявшегося до этого времени в качестве эталона. Естественно было поэтому заменить его двумя новыми приборами, составившими верхнее звено поверочной схемы измерения давлений.

В начале 50-х годов П. В. Индик обратил внимание на ряд недостатков существовавшей поверочной схемы. Одним из главных недостатков ее являлась значительная потеря точности при передаче единицы давления от эталонного ртутного манометра грузопоршневым манометрам.

Из приведенной на рис. 1 схемы сличений следует, что искомая рабочая площадь F поршня поверяемого по эталону прибора равна

$$F = \frac{G \left(1 - \frac{\gamma_1 h}{\gamma H} + \frac{\gamma_2 H_2}{\gamma H} - \frac{\gamma_3 H_3}{\gamma H} \right)}{g_{98} (1 - \beta t) H [1 + \alpha (t - 20)]} \quad (1)$$

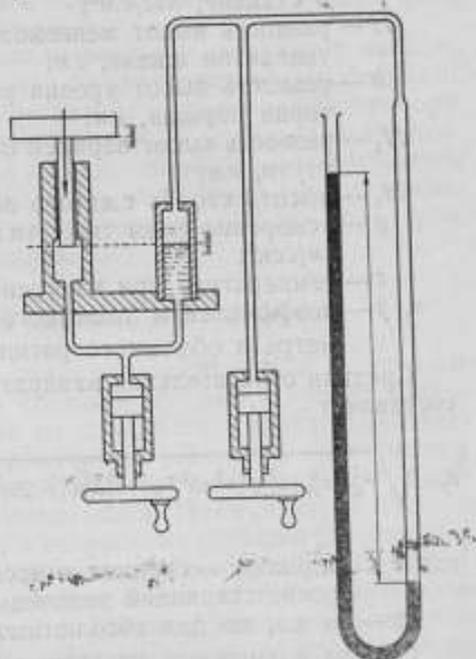


Рис. 1.

где G — вес поршня с наложенными на него грузами (с учетом поправки на вес вытесненного воздуха), $кгс$;

ρ_0 — плотность ртути при $t=0^\circ C$, $кгс \cdot сек^2/см^4$;

γ — удельный вес ртути при температуре измерения, $кгс/см^3$,

γ_1 — удельный вес рабочей жидкости в грузопоршневом манометре, $кгс/см^3$;

γ_{20} , γ_2 — удельный вес воздуха при атмосферном давлении и сжатого в трубке между нижним уровнем ртути и уровнем жидкости в стакане, $кгс/см^3$;

H — разность высот менисков ртути в ртутном манометре, отсчитанная по шкале, $см$;

h — разность высот уровня рабочей жидкости в стакане и нижнего торца поршня, $см$;

H_1 — разность высот верхней плоскости тарелки и верхнего мениска ртути, $см$;

H_2 — высота столба сжатого воздуха, $см$;

g — ускорение силы тяжести в месте, где производится измерение, $см/сек^2$;

t — температура при измерениях;

α , β — коэффициенты линейного расширения шкалы ртутного манометра и объемного расширения ртути, $град^{-1}$.

Средняя относительная квадратичная погрешность искомой площади составляет

$$\sigma_F = \sqrt{\sigma_G^2 + \sigma_H^2 + \sigma_{\rho_0}^2 + (\alpha^2 + \beta^2) \Delta_1^2 + t^2 \Delta_2^2 + (t-20)^2 \Delta_3^2 + \left(\frac{\gamma_1}{\gamma H} \Delta_h\right)^2 + \left(\frac{h \Delta_1}{\gamma H}\right)^2 + \Delta_2^2 \left(\frac{\gamma_2 H_1}{\gamma H}\right)^2 + \Delta_2^2 \left(\frac{\gamma_2 H_2}{\gamma H}\right)^2} \quad (2)$$

где σ с индексом — средняя относительная квадратичная погрешность соответствующей величины, входящей в формулу (1),

Δ — то же, но для абсолютных погрешностей.

Оценка возможных численных значений величин, входящих в формулу (2), показывает, что погрешность измерения определяют слагаемые σ_H^2 и $\left(\frac{\gamma_1}{\gamma H} \Delta_h\right)^2$ суммы, стоящей под корнем.

Для старого ртутного прибора $\sigma_H \cong 0,002\%$, а для нового эталонного барометра $\sigma_H \cong 7 \cdot 10^{-4}\%$.

Как показали опытные исследования, необходимо принять $\Delta_h = 1$ мм и соответственно $\frac{\gamma_1 \Delta_h}{\gamma H} \cong 0,8 \cdot 10^{-2}\%$. Поэтому для старого мановакуумметра $\sigma_F \cong 1,5 \cdot 10^{-2}\%$, а для нового эталонного барометра $\sigma_F \cong 0,8 \cdot 10^{-2}\%$.

Уменьшение этой погрешности, обусловленной сличением разнородных по принципу действия и пределам измерения приборов, если не невозможно, то, во всяком случае, крайне затруднительно. Ее основной составляющей является погрешность, связанная с необходимостью поддерживать нижний торец поршня испытуемого прибора на одной горизонтальной плоскости с уровнем жидкости в распределительном резервуаре. Относительное значение этой составляющей велико, так как верхний предел ртутного бароманометра составляет всего 1 $кгс/см^2$.

Измерение на избыточном давлении, соответствующем только 1/60 верхнего предела испытуемого прибора, приводит также к дополнительным погрешностям, являющимся следствием относительно малой чув-

ствительности и малой продолжительности вращения поршня прибора при этом давлении.

Таким образом, существенное повышение точности передачи единицы давления, воспроизводимой эталоном, требовало создания нового эталона, основанного на таком же принципе, как и образцовые приборы, т. е. на принципе неуплотненного поршня. Теория приборов с неуплотненным поршнем, разработанная М. К. Жоховским, и богатый экспериментальный материал по исследованию грузопоршневых манометров, накопленный лабораторией давлений и обработанный П. В. Индриком, позволили успешно решить эту проблему.

Создание нового эталона потребовало решения следующих частных задач: а) установления вида эталона; б) установления технических условий и разработки технологии изготовления основного узла прибора: пары поршень—цилиндр; в) экспериментального исследования изготовленной опытной группы приборов и отбора наиболее совершенных; г) определения метрологических параметров отобранной группы с максимально возможной точностью; д) окончательного отбора приборов, входящих в эталон, и аттестации эталона.

Вид эталона давлений

Характерными эталонами-прототипами являются метр и килограмм. Процесс сличений с ними вторичных эталонов, которые проводят крайне редко, сравнительно мало влияет на их износ. Это условие позволяет в указанных областях измерения ограничиться эталонами-прототипами.

Эталон давлений, осуществленный в виде грузопоршневого манометра-прототипа, был бы крайне нерационален. Прежде всего, процесс сличений влияет на износ манометра в несравнимо большей степени, чем это имеет место при сличениях эталонов длины и массы. Далее, вторичный эталон должен иметь в своем составе довольно много приборов, требующих относительно частых поверок. Таким образом, единственный грузопоршневой манометр, подвергающийся значительной эксплуатации, ведущей к быстрому износу его, не может быть надежным хранителем единицы измерения.

Наиболее рациональным эталоном давления следует считать набор грузопоршневых манометров, обеспечивающих одну и ту же относительную точность воспроизведения единицы давления в пределах измеряемых ныне давлений, т. е. от 1 до 10—15 тыс. $кгс/см^2$.

Однако создание такого набора в настоящее время не представляется возможным. Приборы для измерения высоких давлений требуют введения поправок, обусловленных деформациями поршня и цилиндра. Определение этих поправок с высокой точностью невозможно и потому попытка создания эталонного набора манометров привела бы при повышении предела измерений к различной, довольно резко понижающейся точности манометров, составляющих набор.

Все изложенное привело к заключению, что эталон давлений должен быть создан в виде группового эталона, состоящего из нескольких равноценных по своим высоким метрологическим качествам приборов. Верхний предел измерений приборов, включенных в эталон, был принят в 1954 г. равным $50 кгс/см^2$ и позже повышен до $60 кгс/см^2$.

Число приборов эталона было принято равным пяти, так как результаты взаимных сличений этих приборов можно считать достаточно надежными. Такая группа из пяти приборов формально и по существу представляет групповой эталон переменного состава. Необходимо, однако, заметить, что замена приборов, входящих в эталон, будет происходить

довольно редко (как указывает опыт лаборатории давлений ВНИИМ, примерно через 20—25 лет).

Основные технические требования, соблюдение которых позволяет создать прибор высокого качества, сводятся к следующему.

Поршень и цилиндр прибора должны иметь возможно близкую к правильной геометрическую форму при минимальном зазоре между ними. Крайне затруднительно дать числовые допуски, конкретно отражающие это требование; эта трудность особенно возрастает в случае изготовления приборов эталонной группы, так как требующиеся при этом допуски на подгонку выходят за пределы самых высоких норм, устанавливаемых требованиями точного машиностроения. Тем не менее совместная работа П. В. Индрика и завода «Эталон» позволила добиться изготовления приборов весьма высокого качества.

Первая и, несомненно, наибольшая технологическая трудность при создании прибора высокого качества заключается в получении отверстия цилиндра необходимого размера. Процесс распадается на ряд операций: сверление исходного отверстия, развертывание его, термическую обработку и, наконец, доводку. Существенно при этом не только применение станочного оборудования соответствующего класса точности, но также и специально подготовленных инструментов и сверл. Развертывание отверстия до необходимого размера должно производиться набором специальных спиральных разверток с постепенным уменьшением ступеней при переходе к увеличению диаметра отверстия. Процесс термообработки должен исключать возможность деформации поршня и цилиндра.

Окончательная доводка канала цилиндра, обеспечивающая необходимую чистоту его внутренней поверхности, производится электрополировкой.

Следует отметить, что в процессе притирки и доводки необходимо соблюдать равномерность обработки канала по всей длине, так как в противном случае обычно появляется так называемая «корсетность» формы канала (сужение в средней части цилиндра с некоторым расширением к концам). Поршень высокого качества изготовить легче, так как при этом можно контролировать его размеры. Однако и здесь требуется станочное оборудование самого высокого класса.

Одним из трудных моментов является получение поверхности наивысшей чистоты в подгонка поршня под заданное отверстие в цилиндре.

В изготовленной паре поршень — цилиндр контроль непосредственными линейными измерениями возможен только для поршня. Пара поршень — цилиндр в целом контролируется только косвенными методами — измерением скорости опускания и продолжительности вращения поршня.

Теоретические соображения, а также изучение большого числа опытных данных привели к следующим нормам, принятым для эталонных приборов:

$$v < 0,2 \text{ мм/мин}; \quad T > 10 \text{ мин},$$

где v — скорость опускания,

T — продолжительность вращения поршня.

Для отклонений диаметра поршня от его среднего значения принят допуск

$$\Delta_{\text{max}} \leq 0,5 \text{ мк}.$$

Эти три параметра определяли условия, которым должны были удовлетворять поршни и цилиндры приборов, предназначенных для эталонной группы.

В распоряжении лаборатории имелись 4 прибора, удовлетворяющих указанным условиям: Бр-121, СТ-121, № 7 и № 19.

Прибор Бр-121 с бронзовым цилиндром и прибор СТ-121 со стальным цилиндром были изготовлены в 1946 г. С этого же времени в лаборатории прибор Бр-121 является фактически эталоном давления. Проводимые лабораторией испытания приборов 1-го разряда позволили выбрать еще один прибор, № 77, удовлетворяющий упомянутым условиям. Все перечисленные приборы относились к манометрам с непосредственно нагружаемым поршнем.

Кроме того, лаборатория специально заказала 5 приборов: № Э-1, Э-2, Э-3, Э-4 и Э-5, законченных изготовлением в 1953 г. Нагрузка на поршень в этих приборах передавалась через опорную штангу.

Введение в группу двух различных конструкций объяснялось необходимостью произвести наиболее исчерпывающее исследование всех возможных решений задачи создания эталона.

Таким образом, исследованию подлежала группа, состоящая из 10 приборов. При предварительном испытании, имевшем целью отбор 5 приборов, измеряли скорости опускания и продолжительность вращения поршня.

Погрешность определения рабочей площади поршня, как уже указывалось, зависит в значительной мере от величины зазора. Это обстоятельство заставило поставить на первый план измерение скоростей опускания поршней. Результаты указанных исследований даны в табл. 1.

Таблица 1

	Рабочая жидкость									
	Керосин			Керосин 0,6 и трансформаторное масло 0,4						
Приборы . . .	Бр-121	№ 77	№ 7	СТ-121	№ 19	Э-1	Э-2	Э-3	Э-4	Э-5
Скорость опускания поршня, м/мин	0,1	0,018	0,15	0,16	0,15	0,17	0,2	0,12	0,23	0,27
Длительность вращения, мин .	17	22,4	18	12	25	7,5	6,5	6,5	12,0	7,3

Из табл. 1 видно, что у приборов Э-4 и Э-5 скорости опускания поршней оказались больше, чем у других приборов. Для четырех приборов из той же группы «Э» продолжительность вращения поршней оказалась недостаточной. Кроме того, канал цилиндра прибора Э-1 оказался коническим. По указанным причинам все 5 приборов этой группы были исключены.

После этого была произведена попытка перекомплектовать поршни и цилиндры приборов группы «Э». При этом поршни приборов Э-1, Э-2 и Э-3 были скомплектованы с цилиндром Э-3, а поршни Э-4 и Э-5 — с цилиндром Э-2.

Таким путем был создан новый прибор Э-2-4, который и присоединили к оставшейся группе из 5 приборов. Эта группа из 6 приборов подлежала дальнейшему изучению и включала манометры: Бр-121, № 77, № 7, № 19, СТ-121 и Э-2-4.

Для 6 отобранных приборов среднее квадратичное отклонение от среднего диаметра поршня колебалось в пределах $0,1 \div 0,4$ мк, т. е. соответствовало установленным выше требованиям.

Результаты измерения группы манометров, предназначенной для включения в групповой эталон, приведены в табл. 2.

Для этих шести приборов были определены площади поршней по результатам линейных измерений диаметров и зазоры. Затем гидростатическим методом были произведены взаимные перекрестные сличения.

Дальнейшая часть исследований заключалась в отборе прибора, из которых следовало образовать групповой эталон. В их состав вошли 5 приборов:

1) уже хорошо изученный манометр Бр-121, фактически выполнявший роль эталона давлений;

2) манометры СТ-121 и Э-2-4 — как приборы, обладающие цилиндрами с более высокими механическими качествами и одинаковыми температурными коэффициентами для поршня и цилиндра;

3) прибор № 77, с минимальным зазором между поршнем и цилиндром;

4) прибор № 19, имеющий наиболее правильную геометрическую форму поршня (наибольшая возможная погрешность результата при определении его диаметра составляет 0,1 мк).

Таким образом, групповой эталон был составлен из 5 приборов: Бр-121, СТ-121, Э-2-4, № 77 и № 19.

Исследование эталонной группы

После отбора эталонной группы каждый из приборов, входящих в нее, подвергся тщательному исследованию для установления наиболее достоверных значений его параметров путем многократных перекрестных сличений друг с другом всех приборов, составляющих группу.

Кроме того, определялись скорости опускания поршней при разных давлениях и в разных жидкостях.

Определению скорости опускания было уделено особое внимание, так как по нему устанавливали зазор каждого из приборов.

Многолетний опыт лаборатории показывает, что скорость опускания заданного поршня в заданном цилиндре, определяемая при одних и тех же условиях (жидкость, температура), может иногда значительно колебаться, что зависит не только от качества прибора, но и от ряда причин, связанных с самой постановкой эксперимента.

Для получения достоверных и надежных результатов был применен следующий прием. Подготавливали переходную гайку с глухим дном и с отверстием для выхода воздуха.

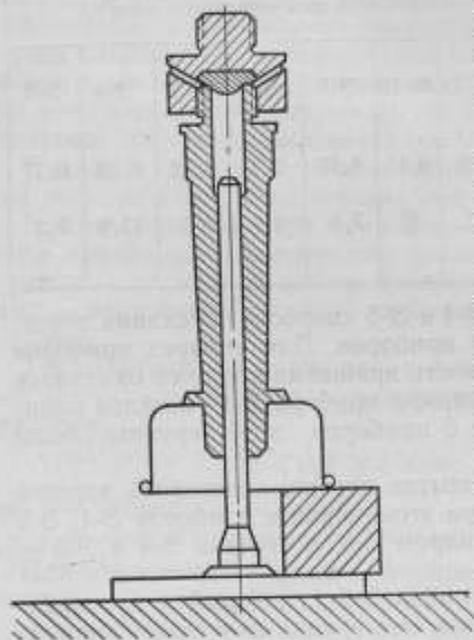


Рис. 2.

Колонку опрокидывали, как это показано на рис. 2, и между тарелкой колонки и цилиндром устанавливали шаблон такой высоты, чтобы тарелка в нормальном положении занимала исходное положение для испытания на опускание.

Таблица 2

Прибор	Количество измерений на горизонтальном оптиметре	Средний диаметр поршня по измерению на горизонтальном оптиметре, см	Зазор между поршнем и цилиндром, мм	Примененная площадь поршня, см ²		Среднее квадратичное отклонение диаметров от среднего диаметра поршня
				по линейным измерениям	по гидростатическим измерениям с БР-121	
Бр-121 № 77 СТ-121 № 19 № 7 З-2-4	34	1,12873	1,9	1,00096	1,00094*	$2 \cdot 10^{-3}$
	36	1,12891	1,08	1,00113	1,00112	$4 \cdot 10^{-3}$
	35	1,12878	3,00	1,00124	1,00121	$4 \cdot 10^{-3}$
	25	1,12876	3,01	1,00121	1,00119	$1 \cdot 10^{-3}$
	17	1,12826	2,33	1,00019	1,00017	$2 \cdot 10^{-3}$
39	1,12894	3,51	1,00163	1,00162	$3 \cdot 10^{-3}$	

* Значение установлено согласно предельным последованиям.

Таблица 3

Прибор	Количество измерений на горизонтальном оптиметре	Расстояние от торца поршня, в которых производились измерения, мм				Средний диаметр поршня, см	Среднее квадратичное отклонение диаметров от среднего диаметра поршня
		10-30	30-60	60-90	90-120		
Бр-121 СТ-121 № 19 № 77 З-2-4	32	1,12875	1,12874	1,12873	1,12872	1,12873	$2 \cdot 10^{-3}$
	35	1,12880	1,12879	1,12879	1,12874	1,12878	$4 \cdot 10^{-3}$
	39	1,12876	1,12875	1,12875	1,12875	1,12876	$1 \cdot 10^{-3}$
	36	1,12887	1,12887	1,12893	1,12898	1,12891	$4 \cdot 10^{-3}$
	31	1,12891	1,12897	1,12892	1,12896	1,12894	$3 \cdot 10^{-3}$

Таблица 4

Измерения	Рабочая жидкость	Зазоры прибора, мк				
		Бр-121	СТ-121	№ 19	№ 77	Э-24
1	Керосин 1,0 и трансформаторное масло 0	1,82	2,91	2,98	1,07	3,50
		1,98	2,87	2,97	1,06	3,49
		1,94	3,01	2,91	1,09	3,46
2	Керосин 0,8 и трансформаторное масло 0,2	1,95	3,09	3,13	1,08	3,52
		1,84	3,11	3,07	1,09	3,55
		1,95	3,07	3,05	1,10	3,58
3	Керосин 0,6 и трансформаторное масло 0,4	1,83	3,15	2,93	1,07	3,49
		1,88	3,02	2,91	1,09	3,47
		1,97	3,03	2,89	1,07	3,47
4	Керосин 0,4 и трансформаторное масло 0,6	1,82	2,85	3,06	—	3,50
		1,93	2,88	3,05	—	3,52
		1,89	2,90	3,18	—	3,57
5	Керосин 0,2 и трансформаторное масло 0,8	1,84	3,02	3,10	—	3,55
		1,83	3,04	3,14	—	3,49
		1,97	3,10	3,12	—	3,46
6	Керосин 0 и трансформаторное масло 1,0	1,95	2,88	3,04	—	3,54
		1,97	2,94	2,90	—	3,55
		1,98	2,95	2,94	—	3,47
	Среднее арифметическое	1,91	2,99	3,02	1,08	3,51
	Средняя квадратичная погрешность	0,06	0,09	0,09	0,013	0,04
	Относительная средняя квадратичная погрешность по отношению к измеряемой приведенной площади поршня, %	$21 \cdot 10^{-4}$	$16 \cdot 10^{-4}$	$16 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
	Относительная средняя квадратичная погрешность результата по отношению к приведенной площади поршня, %	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$0,7 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$

В опрокинутой колонке верхнее свободное пространство в цилиндре над поршнем заполняли рабочей жидкостью (керосин и его смеси с трансформаторным маслом). Затем на колонку навертывали переходную гайку-заглушку. При этом воздух и излишки жидкости выходили через отверстие в переходной гайке.

После окончательного поджатия переходной гайки колонку вместе с гайкой устанавливали в гнездо поверочного пресса и регулировали колонку по уровню. Так как заполнение небольшого зазора требует некоторого времени, то прежде чем начать измерение колонку держали под требуемой нагрузкой 10—15 мин.

По результатам измерения диаметров поршней на горизонтальном оптиметре (табл. 3) и значениям зазоров между поршнем и цилиндром манометров эталонной группы, найденным по скорости опускания поршней в разных жидкостях (табл. 4), были вычислены значения приведенных площадей по формуле

$$F = \frac{\pi d^2}{4} \left[1 + \frac{2\Delta_r}{d} \right]. \quad (3)$$

Таким образом были получены значения рабочей площади поршня для каждого из приборов эталонной группы, опирающиеся на линейные измерения.

Взаимные перекрестные сличения приборов вели на поверочном прессе до 2000 кг/см^2 , попеременно заполняемом требуемой рабочей

Таблица 5

Отношение нагрузок на поршни Q_{10}/Q_{50}	Отклонения от среднего арифметического отношения	
	$p \cdot 10^6$	$p^2 \cdot 10^{12}$
1,000210	-40	1600
1,000210	-40	1600
1,000240	-10	100
1,000250	0	0
1,000260	+10	100
1,000260	+10	100
1,000260	+10	100
1,000270	+20	400
1,000270	+20	400
1,000260	+10	100
Среднее арифметическое 1,000250		$\sum_{i=1}^n p_i^2 = 4500 \cdot 10^{-12}$
Средняя квадратичная погрешность ряда измерений $\sigma = \sqrt{\frac{4500}{9} \cdot 10^{-12}} = 22,4 \cdot 10^{-6}$, или $\approx 0,002\%$.		
Наибольшая возможная погрешность результата $\mu = \frac{22,4 \cdot 3}{\sqrt{10}} \cdot 10^{-6} = 21 \cdot 10^{-6}$, или $\approx 0,002\%$.		
Обратное отношение нагрузок $Q_{50}/Q_{10} = 0,999750$.		

жидкостью. Пресс был снабжен двумя специальными головками, допускающими правильную установку по уровню каждого из сличаемых приборов независимо от регулировочных ножек стола прессы.

Взаимные сличения приборов (табл. 5, где даны результаты обработки данных гидростатического сличения манометров № 19 с Бр-121) позволили установить отношения значений приведенных площадей поршней, полученные независимым от первого методом. Поэтому задача нахождения наиболее достоверных значений приведенной рабочей площади поршня каждого из приборов сводилась к соответствующей обработке полученных результатов.

Обработка результатов

Линейные измерения диаметров и скоростей опускания поршней, описанные выше, дали значения приведенной площади поршня каждого из пяти приборов эталонной группы, т. е. всего 5 уравнений. Взаимные сличения приборов друг с другом дали 10 независимых уравнений. Таким образом, получилась система в 15 уравнений с 5 неизвестными, отражающая результаты двух различных независимых измерений (линейных и гидростатических сличений).

Наиболее достоверные значения искомых площадей были найдены способом наименьших квадратов.

Для упрощения вычислений в систему введены величины x , y , z , u и t , определяемые следующими равенствами, выраженными в см^2 :

$$x = (F_{\text{Бр}} - 1); \quad y = (F_{\text{СТ}} - 1); \quad z = (F_{19} - 1); \\ u = (F_{77} - 1); \quad t = (F_9 - 1),$$

где $F_{\text{Бр}}$, $F_{\text{СТ}}$, F_{19} , F_{77} и F_9 — соответственно приведенные площади поршней каждого из отобранных в эталонную группу приборов.

Введение величин x , y , ... позволило представить упомянутую систему из 15 уравнений в следующем виде:

$$\begin{aligned} 1) \quad x &= 0,00096; & 6) \quad x - 0,99973y &= -0,00027 \\ 2) \quad y &= 0,00124; & 7) \quad x - 0,99975z &= -0,00025 \\ 3) \quad z &= 0,00121; & 8) \quad x - 0,999815u &= -0,000185 \\ 4) \quad u &= 0,00113; & 9) \quad x - 0,99932t &= -0,00068 \\ 5) \quad t &= 0,00163; & 10) \quad y - 1,000026z &= 0,000026 \\ & & 11) \quad y - 1,000118u &= 0,000118 \\ & & 12) \quad y - 0,99959t &= -0,00041 \\ & & 13) \quad z - 1,000059u &= 0,000059 \\ & & 14) \quad z - 0,999577t &= -0,000423 \\ & & 15) \quad u - 0,99949t &= -0,00051 \end{aligned}$$

Решение системы привело к следующим результатам:

$$\begin{aligned} x &= 0,000957; & F_{\text{Бр}} &= 1,000957; \\ y &= 0,001235; & F_{\text{СТ}} &= 1,001235; \\ z &= 0,001207; & F_{19} &= 1,001207; \\ u &= 0,001131; & F_{77} &= 1,001131; \\ t &= 0,001638; & F_9 &= 1,001638. \end{aligned}$$

Средние квадратичные погрешности найденных значений, подсчитанные обычным для способа наименьших квадратов методом, оказались равными

$$\sigma_{\text{бр}} = \sigma_{\text{ст}} = \sigma_{19} = \sigma_{77} = \sigma_3 = 5,5 \cdot 10^{-4} \%$$

Полученные значения приведенных площадей поршней испытанных приборов позволили рекомендовать рассматриваемую группу приборов для утверждения в качестве эталона давлений.

Исследование показало, что если в дальнейшем окажется необходимым повысить точность воспроизведения единицы давления, то решение проблемы не вызовет принципиальных трудностей. Такая задача может быть решена переходом на новый эталон давлений, отличающийся от описываемого в настоящей работе значением диаметров поршней.

Необходимый диаметр поршня может быть определен из следующих соображений. Основное влияние на точность воспроизведения единицы давления имеет погрешность линейных измерений диаметра поршня. Поэтому увеличение рабочей площади приборов эталонной группы в 10 раз и применение специально разработанной методики измерений диаметров поршней позволит, как показывают соответствующие расчеты, повысить точность эталона примерно на половину или даже на один порядок.

Однако необходимо при этом учесть не только большие технические трудности, которые встретятся при изготовлении эталонов, но также и серьезные материальные затраты, которых потребует создание новой эталонной группы. Эти затраты в настоящий момент не могут считаться оправданными, так как достигнутая точность достаточна для удовлетворения задач как техники, так и науки.

Работы по повышению точности должны вестись в области высоких давлений (начиная от 2000 кг/см^2), где эта точность понижена вследствие недостаточной изученности вопросов о поправках на деформацию пары поршень — цилиндр.

Хранение эталона

Хранение эталона должно предусматривать периодические взаимные сличения (один раз в 2 года) приборов, входящих в эталон, и измерения приведенных площадей поршней приборов двумя независимыми методами по описанной выше методике.

Последние измерения следует проводить не реже одного раза в 5 лет и во всех случаях, когда необходимо заменить один из приборов, входящих в состав эталона.

Взаимные сличения приборов эталона, проводимые гидростатическим методом, должны состоять из многократных измерений, при которых каждый из приборов сличают с остальными не менее 5 раз при каждом из давлений: 10, 40 и 60 кг/см^2 . Таким образом, каждый прибор участвует не менее чем в 60 измерениях.

Обработка результатов измерений должна дать сводную таблицу, аналогичную таблицам, отражающим результаты исследования группового эталона давления в 1956 г. (табл. 6) и в 1958 г. (табл. 7). В этих таблицах даны значения ΔK , представляющие разности между отношением площадей при очередном сличении и отношением, полученным при предыдущих измерениях двумя методами, описанными выше. Последнее отношение обозначено индексом, указывающим год, и значком «абс».

Таблица 6

	$\Sigma \rho_j^2 \cdot 10^{12}$	$K_{\text{избс}}$	$K_{\text{об}}$	$\Delta K \cdot 10^6$
Группа СТ-121				
x/y	58	0,999730	0,999726	-4
z/y	170	0,999972	0,999986	+14
u/y	125	0,999896	0,999908	+12
t/y	93	1,000402	1,000408	+6
$\Sigma \rho_j^2$	446	—	—	—
σ	$5,5 \cdot 10^{-6}$	—	—	$\Delta_{\text{ср}} = +7 \cdot 10^{-6}$
Группа Бр-121				
y/x	58	1,000270	1,000274	+4
z/x	86	1,000250	1,000250	0
u/x	175	1,000174	1,000180	+6
t/x	126	1,000680	1,000680	0
$\Sigma \rho_j^2$	445	—	—	—
σ	$5,5 \cdot 10^{-6}$	—	—	$\Delta_{\text{ср}} = +2 \cdot 10^{-6}$
Группа № 19				
z/y	170	0,999972	0,999980	+8
z/x	86	1,000250	1,000250	0
z/u	208	1,000076	1,000074	-2
z/t	240	0,999570	0,999569	-1
$\Sigma \rho_j^2$	704	—	—	—
σ	$7 \cdot 10^{-6}$	—	—	$\Delta_{\text{ср}} = +1 \cdot 10^{-6}$
Группа № 77				
u/y	125	0,999896	0,999908	+12
u/x	175	1,000174	1,000180	+6
u/z	210	0,999924	0,999926	+2
u/t	222	0,999494	0,999501	+7
$\Sigma \rho_j^2$	732	—	—	—
σ	$7 \cdot 10^{-6}$	—	—	$\Delta_{\text{ср}} = +7 \cdot 10^{-6}$
Группа Э-2-4				
t/y	93	1,000402	1,000408	+6
t/x	126	1,000680	1,000680	0
t/z	260	1,000430	1,000432	+2
t/u	222	1,000506	1,000499	-7
$\Sigma \rho_j^2$	701	—	—	—
σ	$7 \cdot 10^{-6}$	—	—	$\Delta_{\text{ср}} = 0$

Примечание. Значения $\Delta_{\text{ср}}$ позволяют предполагать следующее о приведенной рабочей площади эталона:

- 1) СТ-121 — площадь уменьшилась на $7 \cdot 10^{-6}$ см²;
- 2) Бр-121 на $2 \cdot 10^{-6}$ см²;
- 3) № 19 увеличилась на $1 \cdot 10^{-6}$ см²;
- 4) № 77 на $7 \cdot 10^{-6}$ см²;
- 5) Э-2-4 — площадь осталась неизменной.

Таблица 7

	$\Sigma \rho_i^2 \cdot 10^{12}$	K_{54-30c}	K_{56}	K_{58}	$\Delta K \cdot 10^6$
Группа СТ-121					
x/y	176	0,999730	0,999726	0,999724	-6
z/y	282	0,999972	0,999986	0,999973	+1
u/y	354	0,999896	0,999908	0,999896	0
t/y	93	1,000402	1,000408	1,000402	0
$\Sigma \rho_i^2$	905	—	—	—	—
σ	$7,5 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	$\Delta_{cp} = -1 \cdot 10^{-6}$
Группа Бр-121					
y/x	176	1,000270	1,000274	1,000277	+7
z/x	15	1,000250	1,000250	1,000250	0
u/x	190	1,000174	1,000180	1,000173	-1
t/x	62	1,000680	1,000680	1,000680	0
$\Sigma \rho_i^2$	443	—	—	—	—
σ	$5,5 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	$\Delta_{cp} = +1,5 \cdot 10^{-6}$
Группа № 19					
z/y	282	0,999972	0,999980	0,999973	+1
z/x	16	1,000250	1,000250	1,000250	0
z/u	45	1,000076	1,000074	1,000075	-1
z/t	84	0,999570	0,999569	0,999569	-1
$\Sigma \rho_i^2$	427	—	—	—	—
σ	$5 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	$\Delta_{cp} = 0$
Группа № 77					
u/y	320	0,999896	0,999908	0,999896	0
u/x	176	1,000174	1,000180	1,000173	-1
u/z	260	0,999924	0,999926	0,999923	-1
u/t	51	0,999494	0,999501	0,999492	-2
$\Sigma \rho_i^2$	807	—	—	—	—
σ	$7 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	$\Delta_{cp} = -1 \cdot 10^{-6}$
Группа Э-2-4					
t/y	93	1,000402	1,000408	1,000402	0
t/x	61	1,000680	1,000680	1,000680	0
t/z	89	1,000430	1,000432	1,000431	+1
t/u	86	1,000506	1,000499	1,000507	+1
$\Sigma \rho_i^2$	329	—	—	—	—
σ	$4,5 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	$\Delta_{cp} = +0,5 \cdot 10^{-6}$

Примечание. Значения Δ_{cp} позволяют предполагать следующее о приведенной рабочей площади эталона:

- 1) СТ-121 — площадь увеличилась на $1 \cdot 10^{-6}$ см²;
- 2) Бр-121 — площадь уменьшилась на $1,5 \cdot 10^{-6}$ см²;
- 3) № 19 — площадь осталась неизменной;
- 4) № 77 — площадь уменьшилась на $1 \cdot 10^{-6}$ см²;
- 5) Э-2-4 — площадь увеличилась на $0,5 \cdot 10^{-6}$ см².

Измерения признают удовлетворительными, когда значение среднего квадратичного отклонения σ (табл. 6 и 7) для каждого прибора не превышает $1 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$. В противном случае все измерения этим прибором необходимо повторить и в случае получения второго неудовлетворительного результата следует выяснить причины, анализ которых может привести к заключению о необходимости исключить такой прибор из состава эталона.

Таким же образом повторяют сличения прибора со всеми остальными и в том случае, когда изменение его рабочей площади $\Delta_{\text{ср}}$ превысит $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$. При повторном получении такого же результата прибор исключают из состава эталона.

Поверка приборов вторичного (рабочего) эталона

Во вторичный эталон входят приборы с верхними пределами 6, 60 и 600 кгс/см^2 . Первый прибор поверяют на давлениях 4 и 6 кгс/см^2 , а остальные два — на давлениях 40 и 60 кгс/см^2 . На каждом давлении приборы поверяют не менее 10 раз.

Каждый прибор вторичного (рабочего) эталона должен быть сличен с двумя приборами первичного эталона. Последние последовательно применяют для поверок таким образом, чтобы каждый из пяти приборов эталона подвергался одинаковой с остальными эксплуатации.

По результатам таких сличений находят приведенную площадь поршня поверяемого прибора, которую принимают равной среднему арифметическому из результатов всех проведенных измерений. Кроме того, вычисляют среднее квадратичное отклонение. Последнее должно быть не выше $2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$. В противном случае измерения повторяют. Если и вторые измерения дают среднее квадратичное, превышающее указанное выше значение, то испытанный прибор не может быть аттестован в качестве входящего в состав вторичного эталона.

Поступила в редакцию
23/IX 1969 г.

№	Наименование прибора	Предел измерения	Дата поверки	Сличен с	Среднее квадратичное отклонение σ , см^2	Значение рабочей площади, см^2	Изменения рабочей площади $\Delta_{\text{ср}}$, см^2
1	11111,1	6	1969.09.23	11111,1; 11111,2	1,2	11111,1	0,0
2	11111,2	6	1969.09.23	11111,1; 11111,3	1,2	11111,2	0,0
3	11111,3	6	1969.09.23	11111,1; 11111,4	1,2	11111,3	0,0
4	11111,4	6	1969.09.23	11111,1; 11111,5	1,2	11111,4	0,0
5	11111,5	6	1969.09.23	11111,1; 11111,6	1,2	11111,5	0,0
6	11111,6	6	1969.09.23	11111,1; 11111,7	1,2	11111,6	0,0
7	11111,7	6	1969.09.23	11111,1; 11111,8	1,2	11111,7	0,0
8	11111,8	6	1969.09.23	11111,1; 11111,9	1,2	11111,8	0,0
9	11111,9	6	1969.09.23	11111,1; 11112,0	1,2	11111,9	0,0
10	11112,0	6	1969.09.23	11111,1; 11112,1	1,2	11112,0	0,0
11	11112,1	6	1969.09.23	11111,1; 11112,2	1,2	11112,1	0,0
12	11112,2	6	1969.09.23	11111,1; 11112,3	1,2	11112,2	0,0
13	11112,3	6	1969.09.23	11111,1; 11112,4	1,2	11112,3	0,0
14	11112,4	6	1969.09.23	11111,1; 11112,5	1,2	11112,4	0,0
15	11112,5	6	1969.09.23	11111,1; 11112,6	1,2	11112,5	0,0
16	11112,6	6	1969.09.23	11111,1; 11112,7	1,2	11112,6	0,0
17	11112,7	6	1969.09.23	11111,1; 11112,8	1,2	11112,7	0,0
18	11112,8	6	1969.09.23	11111,1; 11112,9	1,2	11112,8	0,0
19	11112,9	6	1969.09.23	11111,1; 11113,0	1,2	11112,9	0,0
20	11113,0	6	1969.09.23	11111,1; 11113,1	1,2	11113,0	0,0
21	11113,1	6	1969.09.23	11111,1; 11113,2	1,2	11113,1	0,0
22	11113,2	6	1969.09.23	11111,1; 11113,3	1,2	11113,2	0,0
23	11113,3	6	1969.09.23	11111,1; 11113,4	1,2	11113,3	0,0
24	11113,4	6	1969.09.23	11111,1; 11113,5	1,2	11113,4	0,0
25	11113,5	6	1969.09.23	11111,1; 11113,6	1,2	11113,5	0,0
26	11113,6	6	1969.09.23	11111,1; 11113,7	1,2	11113,6	0,0
27	11113,7	6	1969.09.23	11111,1; 11113,8	1,2	11113,7	0,0
28	11113,8	6	1969.09.23	11111,1; 11113,9	1,2	11113,8	0,0
29	11113,9	6	1969.09.23	11111,1; 11114,0	1,2	11113,9	0,0
30	11114,0	6	1969.09.23	11111,1; 11114,1	1,2	11114,0	0,0
31	11114,1	6	1969.09.23	11111,1; 11114,2	1,2	11114,1	0,0
32	11114,2	6	1969.09.23	11111,1; 11114,3	1,2	11114,2	0,0
33	11114,3	6	1969.09.23	11111,1; 11114,4	1,2	11114,3	0,0
34	11114,4	6	1969.09.23	11111,1; 11114,5	1,2	11114,4	0,0
35	11114,5	6	1969.09.23	11111,1; 11114,6	1,2	11114,5	0,0
36	11114,6	6	1969.09.23	11111,1; 11114,7	1,2	11114,6	0,0
37	11114,7	6	1969.09.23	11111,1; 11114,8	1,2	11114,7	0,0
38	11114,8	6	1969.09.23	11111,1; 11114,9	1,2	11114,8	0,0
39	11114,9	6	1969.09.23	11111,1; 11115,0	1,2	11114,9	0,0
40	11115,0	6	1969.09.23	11111,1; 11115,1	1,2	11115,0	0,0
41	11115,1	6	1969.09.23	11111,1; 11115,2	1,2	11115,1	0,0
42	11115,2	6	1969.09.23	11111,1; 11115,3	1,2	11115,2	0,0
43	11115,3	6	1969.09.23	11111,1; 11115,4	1,2	11115,3	0,0
44	11115,4	6	1969.09.23	11111,1; 11115,5	1,2	11115,4	0,0
45	11115,5	6	1969.09.23	11111,1; 11115,6	1,2	11115,5	0,0
46	11115,6	6	1969.09.23	11111,1; 11115,7	1,2	11115,6	0,0
47	11115,7	6	1969.09.23	11111,1; 11115,8	1,2	11115,7	0,0
48	11115,8	6	1969.09.23	11111,1; 11115,9	1,2	11115,8	0,0
49	11115,9	6	1969.09.23	11111,1; 11116,0	1,2	11115,9	0,0
50	11116,0	6	1969.09.23	11111,1; 11116,1	1,2	11116,0	0,0

А. С. ДМИТРИЕВ, А. А. ЧАСОВНИКОВ
ВНИИМ

ОБРАЗЦОВЫЙ МИКРОМАНОМЕТР ТИПА МНП-1 С ПРЕДЕЛАМИ ИЗМЕРЕНИЙ 400 ÷ 4000 кгс/м²

В статье дано описание образцового грузопоршневого микроманометра типа МНП-1 с пределами измерений 400 ÷ 4000 кгс/м². Предельная погрешность прибора принята равной 0,02%

Во ВНИИМ в 1957—1958 гг. был разработан, изготовлен и исследован образцовый грузопоршневой микроманометр типа МНП-1 с пределами измерений от 400 до 4000 кгс/м², внешний вид которого дан на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид микроманометра МНП-1.

Рабочие пределы прибора позволяют значительно повысить верхний предел измерений поверочных работ в области микроманометрии, составлявший до настоящего времени 500 кгс/м².

Основной узел прибора представляет поршневая пара. Номинальная площадь сечения поршня 5 см², вертикальное движение его наблюдают

в микроскоп по штриху, нанесенному на штоке поршня. Мерой измеряемого давления, как обычно для этих приборов, является частное от деления веса в воздухе поршневой системы q и наложенных грузов Q на приведенную площадь поршня F :

$$P = \frac{q + Q}{F} \text{ кгс/м}^2.$$

Поршень приводят во вращение с угловой скоростью 30 об/мин синхронным двигателем. Свободное вертикальное движение поршня достигается устройством привода. Рабочей жидкостью, заполняющей зазор между поршнем и цилиндром, является керосин, вводимый под давлением, несколько большим измеряемого.

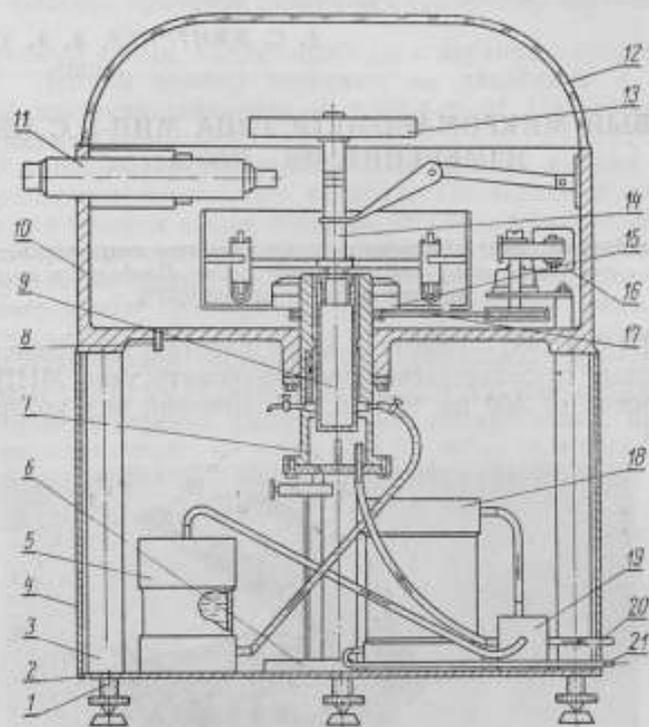


Рис. 2. Схема микроманометра.

Подробная схема конструкции прибора дана на рис. 2. Верхняя часть представляет корпус 10 прибора, герметически закрываемый крышкой 12 с прозрачным верхом. В центре основания корпуса 10 смонтирован измерительный цилиндр 7 с уплотненным поршнем 9. Цилиндр 7 изготовлен из бериллиевой бронзы и имеет внутри два кольцевых выступа, расположенных один над другим на расстоянии 45 мм. Номинальные диаметры кольцевых выступов цилиндра $D = 25,000$ мм. Поршень диаметром $d \approx 24,998$ мм изготовлен из стали марки 38ХМЮА с последующим азотированием. Зазор между стенками кольцевых выступов и поршня $\Delta \sim 0,001$ мм. Поршень 9 жестко соединен со штоком 14, на который накладывают грузы 13. На штоке укреплен поводок с колесиками. В центре корпуса 10 установлен опорный подшипник 15, вращаемый синхронным электродвигателем 16 типа СД-60 с помощью привода 17. Подшипник 15 передает движение поршню через жестко связанный с ним

приводной шкив и поводок с колесиками. Двигатель 16, питаемый от сети переменного тока напряжением 220 в, делает 60 об/мин.

Передаточное отношение шкива мотора к шкиву опорного подшипника составляет 1 : 2, таким образом, поршень вращается с угловой скоростью 30 об/мин. Основание корпуса 10 имеет отверстие, снабженное штуцером 8 для подачи меньшего из давлений (входящих в измеряемую разность их). На передней стороне корпус 10 имеет цилиндрическое отверстие, в котором установлен микроскоп 11 (МИР-1). Корпус крепится к круглой плате 2 с помощью трех стоек 3, имеющих установочные винты 1. На плате размещены: колодка с тремя проходными штуцерами (не видна), ресивер 18, служащий для сглаживания пульсации измеряемого давления, распределитель 19, напорный 5 и сливной 6 бачки для керосина. Измеряемое давление (или большее в случае измерения разности давлений) подается к штуцеру 21, который соединен резиновым шлангом с нижним штуцером ресивера 18; верхний штуцер ресивера соединен с распределителем. Распределитель соединен трубками: со штуцером нижнего основания измерительного цилиндра 7, с верхним штуцером керосиновой бачки 5 и со штуцером 20, через который резиновый шланг передает давление к поверяемому прибору. Меньшее давление через распределительную колодку (не показанную на рисунке) подводят к штуцеру 8 корпуса 10 и к поверяемому прибору.

Когда к прибору подана измеряемая разность давлений, то большее давление через ресивер и распределитель подается одновременно: под поршень измерительного цилиндра, к поверяемому прибору и к керосиновой бачке, который в рабочем положении установлен на выдвижной полочке на уровне основания корпуса 10. Под действием давления, несколько большего измеряемого, керосин поступает в пространство, ограниченное кольцевыми выступами измерительного цилиндра, стенками цилиндра и поршня. Ход поршня 15 мм и ограничен сверху и снизу. Нижняя часть прибора закрыта двумя полуцилиндрическими стенками 4.

Прибор снабжен семью грузами, позволяющими создавать и измерять давления (разности давлений), начиная от давления в 400 кгс/м² (определяемого весом поршневой системы без грузов) и далее через каждые 50 кгс/м² до верхнего предела 4000 кгс/м². Любые промежуточные давления можно получать, применяя разновес.

Оценка влияния сил трения проведена путем определения порога чувствительности прибора при сличении его показаний с показаниями микроманометра типа МКМ-II.

Измерения показали, что порог чувствительности, определяемый весом гири в 5 мг, составляет 0,01 кгс/м², т. е. ~ 0,0025% от величины нижнего рабочего предела микроманометра, и что прибор пригоден для измерения давлений, достигающих 4000 кгс/м², так как при этом давлении скорость опускания поршня не превышает 0,5 мм/мин.

Определение приведенной площади поршня

В поршневых измерительных приборах, как известно, погрешность определения приведенной площади поршня в основном определяет погрешность прибора. Исследуемый прибор, хотя и отличается рядом специфических особенностей, но принадлежит к системе грузопоршневых приборов, поэтому с метрологической точки зрения его следует сличать с рабочим грузопоршневым эталоном давления ВНИИМ. Такое сличение тем более существенно, что позволяет установить связь между измерениями малых давлений с измерениями средних и высоких давлений. В силу сказанного определение приведенных площадей трех комплектов

цилиндров и поршней для исследуемого прибора было выполнено путем сличения их с рабочим грузопоршневым эталоном давления ВНИИМ в лаборатории измерения давления ст. научным сотрудником к. т. н. П. В. Индриком.

Результаты определения приведенных площадей представлены в таблице.

№ комплектов	Приведенная площадь поршня, см ²	
	значение при 20° С	погрешность определения
1	4,99835	±0,00005
2	4,99975	±0,00005
3	4,99950	±0,00005

Интересно отметить, что диаметр цилиндра комплекта № 2, вычисленный по значению приведенной площади F в соответствии с формулой

$$D = \sqrt{\frac{8F}{\pi} - d^2},$$

где d — диаметр поршня, имеет $D = 2,5234$ см, тогда как этот же диаметр, найденный непосредственными измерениями, равен $D_1 = 2,5230$ см, отсюда

$$D - D_1 = 0,0004 \text{ см} = 4 \text{ мк.}$$

Погрешность измерения диаметра имеет порядок ± 5 мк. Таким образом, значения диаметров D и D_1 совпадают в пределах точности непосредственного измерения диаметра цилиндра. Зазор для трех изготовленных комплектов находится в пределах $1,5 + 2,5$ мк. Дополнительно приведенная площадь поршня комплекта № 2 была определена методом сличения с микроманометром № 1 типа МКМ-II. Приборы соединяли согласно схеме рис. 3. Особое внимание было обращено на поддержание в комнате постоянной температуры воздуха в пределах $20 \pm 0,2^\circ$ С. При

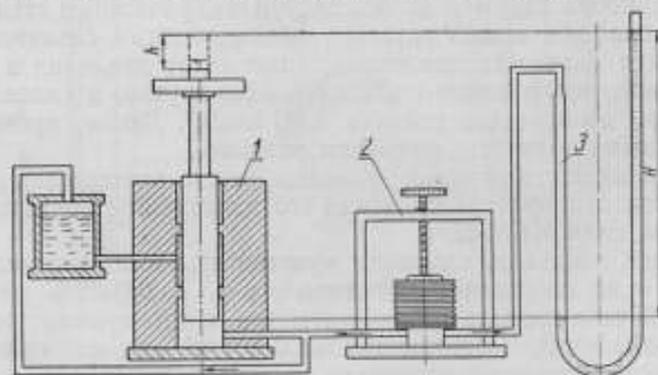


Рис. 3. Схема соединения приборов

1 — поверяемый прибор; 2 — сальфонный пресс; 3 — микроманометр № 1 типа МКМ-II.

каждом снятии показаний приборов фиксировали: температуру воздуха, температуру воды в резервуаре микроманометра № 1 типа МКМ-II и температуру цилиндра поршня. Приведенную площадь определяли по формуле

$$F = \frac{q}{\Delta P},$$

где q — вес поршневой системы в воздухе и ΔP — разность давлений, определяемая по микроманометру типа МКМ-II с учетом всех поправок.

Были сняты две серии наблюдения, по 12 измерений в каждой. Обработка наблюдений показала, что значение приведенной площади поршня для комплекта № 2 соответственно составляет: 4,99928 и 4,99934 см². В первом случае средняя квадратичная погрешность ряда измерений составила $3 \cdot 10^{-4}$ см², во втором $2 \cdot 10^{-4}$ см², или соответственно 0,006 и 0,004 %.

Различие в величине приведенной площади поршня, определяемой по методу сличения с рабочим эталоном давления и по методу сличения с микроманометром № 1 типа МКМ-II, составляет около 0,01 % (соответственно по сериям: 0,009 и 0,008 %). Совпадение в пределах до 0,01 % нужно признать вполне удовлетворительным, так как это находится в пределах точности измерений микроманометра типа МКМ-II.

Относительная погрешность измерений прибором будет

$$\delta_p = \pm \sqrt{\delta_G^2 + \delta_F^2 + \delta_T^2},$$

где δ_G — относительная погрешность определения веса груза и поршневой системы;

δ_F — относительная погрешность определения приведенной площади;

δ_T — относительная погрешность вертикальной составляющей сил трения привода.

Многочисленные измерения веса поршневой системы, когда поршень несет слой керосина, позволили определить ее вес с погрешностью не выше 15 мг. Следовательно, погрешность веса поршневой системы составляет 0,008 %.

Относительная погрешность измерения приведенной площади поршня составляет 0,001 % (см. таблицу) и не зависит от нагрузки прибора. Относительная погрешность за счет вертикальной составляющей сил трения привода составляет 0,002 % от нижнего предела измерений. Таким образом, погрешность измерений на нижнем пределе:

$$\delta_p = \pm \sqrt{0,008^2 + 0,001^2 + 0,002^2} = 8,3 \cdot 10^{-3} / \sigma,$$

т. е. около 0,01 %.

Указанное значение средней квадратичной погрешности позволяет принять предельную погрешность прибора равной 0,02 %.

Заключение

Выполненные исследования показали, что микроманометр типа МНП-1 обладает высокой точностью и большим диапазоном измерения ($400 \div 4000$ кгс/м²) и поэтому может быть применен в качестве образцового прибора 1-го разряда для поверки лабораторных и рабочих приборов с пределами измерений от 400 до 4000 кгс/м².

Поступила в редакцию
20/X 1959 г.

Н. Ф. ГОНЕК
ВНИИМ

АНАЛИЗ РАВНОМЕРНОСТИ РАБОТЫ РОТАЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ ГАЗА

В числе основных причин, объясняющих относительно высокие погрешности ротационных объемных счетчиков, в статье выдвигаются пульсации расхода газа, вызываемые ими. Из геометрических соображений выводятся формулы, описывающие эти пульсации.

Развивающаяся газификация промышленности и коммунального хозяйства страны ставит на очередь вопрос об организации массовой поверки ротационных газовых счетчиков высокой производительности. Решение этой задачи значительно упростилось бы, если бы можно было организовать поверку их с помощью контрольных газовых счетчиков, в свою очередь проверенных с помощью образцовой газомерной установки. Однако ряд попыток, предпринятых в этом направлении, не дал положительных результатов. Как правило, погрешность поверяемых счетчиков оказывалась в этом случае больше, чем в случае поверки по газовому мернику, и, что всего хуже, погрешность приобретала непостоянный характер.

Естественно высказать предположение, что два последовательно включенных счетчика влияют друг на друга. Такое влияние может происходить, например, вследствие наличия пульсирующих колебаний расхода газа, вызываемых работой ротационных счетчиков.

Данная работа имеет целью выяснить закон изменения и величину указанных пульсаций расхода и наметить меры устранения их вредного влияния. Для этого необходимо определить скорость изменения (с поворотом ротора) объема впускной или, что дало бы совершенно одинаковые результаты, выпускной измерительной камеры счетчика.

Для облегчения расчетов целесообразно выбрать упрощенную конфигурацию профиля ротора. Такое упрощение допустимо, поскольку получаемые при этом отклонения от действительных соотношений, оцениваемые в работе количественно, не превышают 1—2%.

Упрощенный профиль роторов

Пусть профиль ротора (рис. 1) очерчен четырьмя сопряженными без изломов дугами кругов одинаковых радиусов r . Следует отметить, что

изготовление точного профиля роторов значительно облегчается, если головки выступов профилей очерчены дугами окружностей, что и рекомендуется некоторыми авторами [1].

Далее приняты следующие обозначения:

$2a$ — расстояние между осями вращения роторов;

$2b$ — расстояние между центрами дуг окружностей, образующих головки (выступы) профиля ротора;

$2c$ — наименьший поперечник ротора;

d — длина прямой, соединяющей центры дуг соприкасающихся между собою головок роторов (прямой, проходящей через точку касания профилей);

$2R$ — наибольший поперечник ротора и

φ — угол поворота роторов, отсчитываемый как показано на рис. 2.

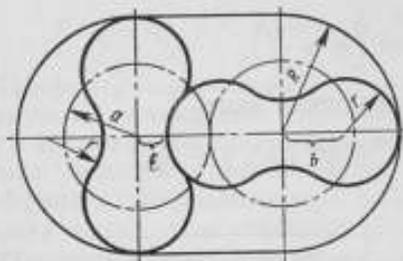


Рис. 1.

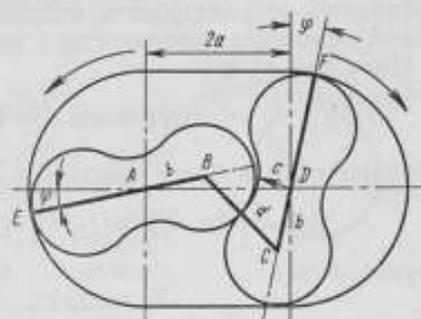


Рис. 2.

Можно написать:

$$R = b + r, \quad (1)$$

$$2a = c + R, \quad (2)$$

$$d^2 = [2a - b(\cos \varphi + \sin \varphi)]^2 + b^2(\cos \varphi + \sin \varphi)^2. \quad (3)$$

При вращении роторов профили их (в идеальном случае) должны постоянно соприкасаться между собой во избежание пропуска газа через щель. Для упрощенного профиля это условие дает

$$d = 2r, \quad (4)$$

что выполнимо не для любых φ . Пусть оно выполняется при

$$\varphi = 0, \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{1}{4}\pi. \quad (6)$$

Тогда подстановка в (3) сначала равенства (5), а затем (6) дает систему из двух уравнений

$$d^2 = (2a + b)^2 + b^2 \quad \text{и} \quad d^2 = (2a - \sqrt{2}b)^2 + (\sqrt{2}b)^2,$$

которые, при учете условия (4), приводят к

$$b = (\sqrt{8} - 2)a = 0,8284a. \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (3) — (5) и (7) дает

$$r = (\sqrt{6} - \sqrt{3})a = 0,7174a, \quad (8)$$

а также

$$R = b + r = 1,5459 a \quad (9)$$

и

$$c = 2a - R = 0,4541 a. \quad (10)$$

Теперь можно проверить, насколько не выполняется при упрощенном профиле упомянутое условие соприкосновения роторов при их вращении. Для этого достаточно определить d для всех промежуточных значений φ от 0 до $\frac{\pi}{4}$.

Если окажется, что $d > 2r$ для некоторых φ , это будет свидетельствовать о том, что между роторами при их вращении образуется зазор. Если же $d < 2r$, то зазор имеет отрицательную величину, т. е. профиль необходимо корректировать, исправить, а именно — углубить по направлению нормали к поверхности в точке касания роторов на $\Delta = 2r - d$.

Имея в виду, что

$$\cos \varphi + \sin \varphi = \sqrt{2} \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right),$$

перепишем (3) в более удобном для вычислений виде

$$d^2 = \left[2a - \sqrt{2}b \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) \right]^2 + 2b^2 \sin^2 \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right),$$

откуда

$$d = 2 \sqrt{a^2 - \sqrt{2} ab \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) + b^2 \sin^2 \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right)}. \quad (11)$$

В табл. 1 приведены изменения d , а также и зазора Δ в зависимости от φ , вычисленные по формуле (11) для $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}$. После подстановки в формулу (11) числовых значений* она приобретает такой вид:

$$d = 2 \sqrt{4064 - 4761 \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) + 2789 \sin^2 \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right)}.$$

Таблица 1

φ°	0	7,5	15	22,5	30	37,5	45
d	91,48	90,40	90,16	90,46	90,92	91,32	91,48
Δ	0	-1,08	-1,32	-1,02	-0,56	-0,16	0

Как видно из табл. 1, максимальное углубление профиля (на 1,32 мм по нормали) должно иметь место в точке касания роторов при $\varphi = 15^\circ$. При увеличении φ до 45° значение необходимого исправления сводится к нулю. Точка профиля, лежащая в глубине впадины ротора (на минимальном его поперечнике), также не требует никакой корректировки.

Необходимое исправление плавно меняется по длине профиля от 0 до 1,32 мм, в среднем на 0,66 мм, на отрезке, соответствующем (с каж-

* Расчет проделан применительно к газовому счетчику типа РС-600 [2], в котором $a = 63,75$ мм.

дой стороны ротора) дуге впадины ($70^{\circ}30'$) и двум сопряженным с нею отрезкам дуг выступов до точки касания профилей при $\varphi = 45^{\circ}$ (по $25^{\circ}35'$ каждый), т. е. всего (с каждой стороны ротора) на дуге

$$\alpha = 70^{\circ}30' + 2 \cdot 25^{\circ}35' = 70^{\circ}30' + 51^{\circ}10' = 121^{\circ}40'.$$

Представляет интерес сопоставление размеров роторов, полученных приведенным упрощенным теоретическим расчетом, с фактически имеющимися место размерами. Для счетчика РС-600, согласно данным, приведенным в статье П. П. Черникова [2], основные размеры роторов (мм) следующие: $a = 63,75$; $b = 49,5$; $c = 23$.

По формулам же (7), (8) и (10) при $a = 63,75$ мм остальные размеры ротора получаются такими:

$$b = 0,8284 a = 0,8284 \cdot 63,75 = 52,81;$$

$$r = 0,7174 a = 0,7174 \cdot 63,75 = 45,74;$$

$$c = 0,4541 a = 0,4541 \cdot 63,75 = 28,95.$$

Профиль, подсчитанный по выведенным выше формулам, оказывается несколько более полным, чем в выпускаемом промышленностью приборе. Для оценки полноты профиля ротора может служить коэффициент использования λ площади поперечного сечения круга, описываемого ротором радиуса R .

Площадь поперечного сечения ротора S_p , согласно принципу построения упрощенного профиля (рис. 3), равна сумме трех площадей: двух кругов радиуса r и площади, соединяющей их шейки ротора, обозначим ее буквой S . Последняя (заштрихованная область на рис. 3) представляет площадь ромба $ABCD$, уменьшенную на площади четырех секторов A , B , C и D окружностей с радиусом r , составляющих в сумме полную окружность. Таким образом

$$S = 2b(c+r) - \pi r^2 = 2\sqrt{2} b^2 - \pi r^2,$$

откуда

$$S_p = S + 2\pi r^2 = 2\sqrt{2} b^2 + \pi r^2. \quad (12)$$

Коэффициент использования λ определяется по формуле

$$\lambda = \frac{\pi R^2 - S_p}{\pi R^2}.$$

Подстановка сюда принятых численных значений дает

$$\lambda = \frac{\pi R^2 - \pi r^2 - 2b(c+r)}{\pi R^2} = \frac{16\,050}{30\,511} = 0,526.$$

Вследствие исправления профиля площадь ротора уменьшится на

$$2\alpha r \Delta = 2 \frac{\pi \cdot 121,67}{180} 45,74 \cdot 0,66 = 128 \text{ мм}^2$$

и отношение λ станет больше на 0,8%:

$$\lambda = \frac{16\,050 + 128}{30\,512} = 0,526 + 0,004 = 0,530.$$

Как видно из расчетов, исправление профиля очень незначительно изменяет первоначально принятую его конфигурацию.

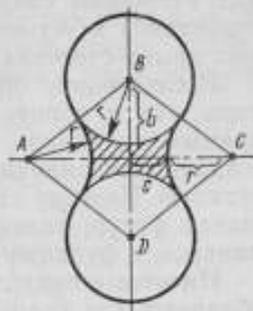


Рис. 3.

Для счетчика РС-600, выпускаемого промышленностью [2], $\lambda = 0,575$, т. е. всего на 8% более полученного выше. Для РС-100 коэффициент λ равен 0,595, что также достаточно близко к значению, полученному для упрощенного профиля.

Поэтому в дальнейшем при расчете скорости изменения объема измерительной камеры счетчика можно пренебрегать эффектом исправления профиля.

Подача газа счетчиком

Исследование пульсаций, возникающих при подаче газа ротационным счетчиком, сводится (если пренебречь сжимаемостью газа во время пульсаций) к установлению зависимости изменения объема измерительных камер счетчика в функции от времени.

Исследование облегчается в значительной степени тем, что как роторы, так и корпус, в котором роторы вращаются, выполнены в виде прямых цилиндров. Касаясь при этом взаимно по образующим, они создают две цилиндрические измерительные камеры — впускную и выпускную. Поэтому задача сводится к изучению скоростей изменения площадей фигур, являющихся основанием упомянутых измерительных цилиндров, в функции от угла поворота роторов.

Имеется в виду, что роторы, приводимые во вращение потоком газа, обладают (по сравнению с этим потоком) весьма значительной инерцией. На этом основании скорость их вращения, даже при наличии пульсаций, практически можно считать неизменной в продолжение каждого оборота. Поэтому при исследованиях время, в качестве независимой переменной, может быть заменено углом φ (рис. 2).

Следует отметить, что при любом положении роторов скорости изменения объемов впускной и выпускной камер равны по величине и обратны по знаку. Это вытекает из того, что сумма объемов впускной и выпускной камер всегда неизменна, будучи равна разности между постоянными объемами корпуса и роторов. Этим обуславливается возможность проведения анализа только для одной какой-либо измерительной камеры, например, впускной.

При изучении работы счетчика достаточно ограничиться изменением угла поворота ротора на $\frac{\pi}{2}$, так как за один полный оборот ротора процесс впуска (вытеснения) газа периодически повторяется четыре раза, протекая совершенно тождественно.

Исследование изменения площади сечения измерительных камер в зависимости от изменения угла φ удобно было бы осуществить, введя допущение, что ломаная $EVCF$ (рис. 2) является границей, разделяющей сечение корпуса на впускную и выпускную камеры.

При этом разбивка на элементарные площади и соответственно формулы, выражающие искомую зависимость, получаются несколько более простыми, нежели при ином подходе к решению задачи. Однако из выказанного допущения вытекает как следствие, что роторы всегда взаимно соприкасаются в точке пересечения их профилей с линией BC , соединяющей центры дуг, очерчивающих головки профилей обоих роторов. Следовательно, наклон отрезка BC по отношению к линии AD , соединяющей центры роторов, в момент $\varphi = 0$ должен изменяться скачком от угла $+35^{\circ}15' = \arcsin \frac{\sqrt{3}}{3}$ до угла $-35^{\circ}15'$ (при $\varphi = \frac{\pi}{2}$, аналогично, от $-35^{\circ}15'$ до $+35^{\circ}15'$). В эти моменты (в положениях роторов «встык») роторы должны были бы на мгновение соприкасаться по всей

дуге впадины профиля. При этом допущении пренебрегают эффектом исправления профилей впадин роторов. На самом же деле в результате исправления профиля в момент $\varphi = 0$ роторы взаимно касаются только в одной точке, лежащей на линии центров AD . Таким образом, истинная картина работы счетчика несколько искажается. Погрешность, получаемая при этом в определении мгновенного расхода газа, достигает примерно 4%.

Поэтому необходимо рассчитывать изменения объема измерительных камер относительно начального объема, соответствующего $\varphi = 0$ (расположению роторов «встык»), и, соответственно, относительно начальной площади сечения измерительной камеры S_0 . В результате поворота роторов на угол φ (рис. 4) к начальному прибавляются три объема: соответствующие площадям секторов AEG , DIF и треугольной фигуры $OO'O''$. В то же время из начального объема вычитаются объемы, соответствующие площадям фигур $AO'V$ и $DO'W$.

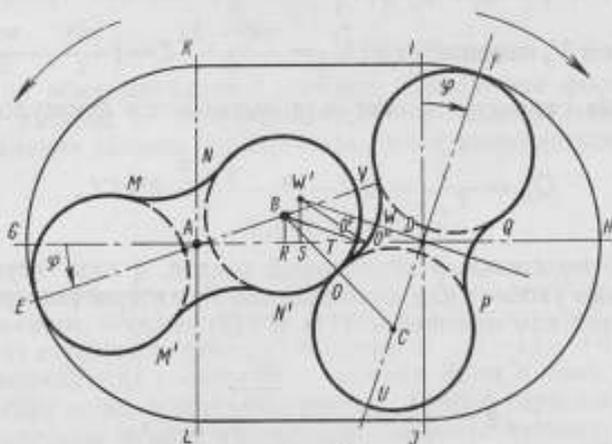


Рис. 4.

Итак, переменный объем впускной измерительной камеры складывается из следующего ряда элементарных объемов:

$$V_{\varphi} = S_{\varphi} L = (S_0 + S_{AEG} + S_{DIF} + S_{OO'O''} - S_{AO'V} - S_{DO'W}) L, \quad (13)$$

где L — длина ротора счетчика,

$$S_{AEG} = S_{DIF} = \frac{R^2}{2} \varphi,$$

$$S_{OO'O''} \approx \frac{O'O'' \cdot OI}{2} = \frac{b}{4} (\cos \varphi - \sin \varphi) [2a(1 - \cos \varphi) - r(\cos \beta - \cos \gamma)],$$

$$S_{AO'V} = \frac{b^2}{2} \cos \varphi \sin \varphi + \frac{br}{2} \cos \beta \sin \varphi + \frac{r^2}{2} (\beta + \varphi),$$

наконец (формула действительна только при $0 < \varphi < 35^{\circ}15'$):

$$S_{DO'W} = \frac{(c+r)^2}{2} \cos \varphi \sin \varphi - \frac{(c+r)r}{2} \cos \gamma \sin \varphi - \frac{r^2}{2} (\gamma - \varphi).$$

Кроме того,

$$\angle AO'B = \beta, \quad \angle AO'W' = \gamma, \quad \sin \beta = \frac{b}{r} \sin \varphi \quad \text{и} \quad \sin \gamma = \frac{c+r}{r} \sin \varphi.$$

Мгновенная скорость подачи газа счетчиком (расход газа) при условии, что $\varphi = Ct$, где C — постоянная, t — время, может быть получена из (13) дифференцированием

$$Q = \frac{dV_{\varphi}}{dt} = \frac{dS_{\varphi}}{d\varphi} CL = \left[R^2 - r^2 - \frac{r^2}{2} (M - N) \right] CL - \\ - \frac{ab}{2} \left(\cos \varphi + \sin \varphi - \frac{a-3b}{a} \cos 2\varphi - \sin 2\varphi \right) CL - \\ - \frac{br}{4} \left\{ [\cos \beta - M \sin \beta + N \sin \gamma - (2\sqrt{2} - 1) \cos \gamma] \cos \varphi - \right. \\ \left. - [\cos \beta + M \sin \beta - \cos \gamma - N (2\sqrt{2} - 1) \sin \gamma] \sin \varphi \right\} CL, \quad (14)$$

где

$$M = \frac{d\beta}{d\varphi} = \frac{b \cos \varphi}{r \cos \beta} \quad \text{и} \quad N = \frac{d\gamma}{d\varphi} = \frac{(c+r) \cos \varphi}{r \cos \gamma}.$$

При повороте роторов на угол $\varphi = \frac{\pi}{2}$, на что требуется время $T_{\frac{\pi}{2}} = \frac{\pi}{2C}$, объем V_{φ} изменяется на $V_{\frac{\pi}{2}} = \frac{\pi R^2 - S_P L}{2} = \left(\frac{\pi R^2}{2} - \frac{\pi r^2}{2} - \sqrt{2} b^2 \right) L$, отсюда средняя скорость подачи газа выражается формулой

$$Q_{\text{ср}} = \frac{V_{\frac{\pi}{2}}}{T_{\frac{\pi}{2}}} = \left(R^2 - r^2 - \frac{2\sqrt{2}}{\pi} b^2 \right) CL. \quad (15)$$

Наконец, относительный мгновенный расход q газа через счетчик, величина, весьма удобная для качественной характеристики работы счетчика, получается как отношение (14) и (15), т. е.

$$q = \frac{Q}{Q_{\text{ср}}} = \frac{\frac{dS_{\varphi}}{d\varphi}}{R^2 - r^2 - \frac{2\sqrt{2}}{\pi} b^2}, \quad (16)$$

а после подстановки численных значений

$$q = 1,491 - 0,2047 (M - N) - \\ - 0,329 (\cos \varphi + \sin \varphi + 1,4853 \cos 2\varphi - \sin 2\varphi) - \\ - 0,1182 [(\cos \beta - M \sin \beta + N \sin \gamma - 1,8284 \cos \gamma) \cos \varphi - \\ - (\cos \beta + M \sin \beta - \cos \gamma - 1,8284 N \sin \gamma) \sin \varphi].$$

Для $\varphi > 35^{\circ}15'$, ограничиваясь частным случаем $\varphi = 45^{\circ}$, имеем [3]

$$q = \frac{R^2 - a^2}{R^2 - r^2 - \frac{2\sqrt{2}}{\pi} b^2} = \frac{2,390 - 1}{1,257} = 1,106.$$

Таблица 2

φ°	0	15	30	45	60	75	90
q	0,868	0,965	1,060	1,106	1,060	0,965	0,868
Δq	-0,132	-0,035	+0,060	+0,106	+0,060	-0,035	-0,132

В табл. 2 приведены результаты вычисления по формуле (16) ряда значений мгновенного расхода q при соответствующих значениях φ . На рис. 5 результаты вычислений представлены графически. При расположении роторов «встык» расход уменьшается до минимума, в положениях же роторов «внахлестку» (под углом 45°) — возрастает до максимума.

Следует отметить, что А. М. Кац [3] дает общую формулу, связывающую изменения расхода газа с изменением величины радиуса-вектора

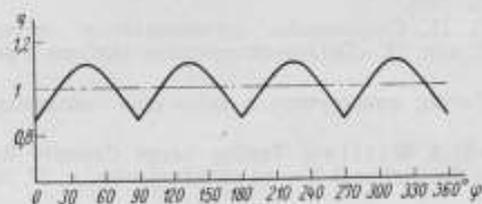


Рис. 5.

точки касания обкатывающихся роторов. Однако эта формула не дает зависимости расхода от угла поворота φ и поэтому, чтобы построить кривую изменения расхода, практически ею воспользоваться невозможно.

Заключение

Как видно из рис. 5 и табл. 2, расход газа через счетчик, если считать газ несжимаемым, несимметрично колеблется вокруг среднего значения, отклоняясь от него (теоретически) в пределах $\sim (-13 \div +11)\%$. Частота первой гармоники этих колебаний — порядка 80 гц и ниже в зависимости от расхода газа через счетчик. Амплитуда второй гармоники в 4—5 раз меньше амплитуды первой гармоники. Соответствующее этим колебаниям ускорение достигает почти 300 м/сек^2 , т. е. около 30 величин земного ускорения.

В силу инерции газ не в состоянии строго следовать этим изменениям. В моменты, когда скорость движения газа должна была бы увеличиваться, давление в приемной измерительной камере падает. В моменты же, соответствующие падению относительной скорости, давление, наоборот, увеличивается. Следствием этих колебаний давления в приемной камере является возникновение в трубопроводе воли изменения давления и скорости газа. Распространяясь по трубопроводу и встречая на своем пути местные сопротивления (вентили, угольники и т. п.), волны частично отражаются от них, образуя перед счетчиком более или менее ярко выраженные стоячие волны с узлами или пучностями, находящимися внутри измерительной камеры. В результате давление газа в измерительной камере в момент ее замыкания роторами может отклоняться от номинала [4]. Возникающие вследствие этого погрешности измерения могут в неблагоприятных случаях достигать нескольких процентов.

Устранение пульсаций расхода через ротационный счетчик при его проверке по контрольному сводится к устранению стоячих волн, образующихся как на входе, так и на выходе поверяемого и контрольного приборов. Могут быть различные конструктивные решения этой задачи. Рекомендация наиболее целесообразного из них может быть дана только после экспериментальной проверки и сравнения их эффективности.

Влиянием пульсации следует объяснить и слишком большую погрешность этих счетчиков ($\pm 2\%$ от номинального расхода). При устранении влияния пульсации погрешность прибора, по-видимому, могла бы быть снижена до 1 и даже до 0,5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карелин Н. М., Изготовление роторов ротационных газосчетчиков, «Измерительная техника», № 5, 1955.
2. Черников П. П., Современные промышленные счетчики расхода газа, Сб. ЛОНИТОПРИБОР, вып. II, «Теплоэнергетические приборы и регуляторы», Машгиз, 1954.
3. Кляц А. М., Расчет, конструкция и испытания воздуходувок типа РУТС, Машгиз, 1946.
4. Bean, Benesh & Witting, Testing Large Capacity Rotary Gas Meters, «Journal of Research of the National Bureau of Standards», v. 37, № 3, September 1946, Washington.

Поступила в редакцию
30 IX 1959 г.

П. П. КРЕМЛЕВСКИЙ

ВНИИ М

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОТОКОВ

В работе устанавливается обобщенный критерий успокоения пульсаций в газовых и жидкостных фильтрах и, в зависимости от него, определяется погрешность измерения пульсирующего расхода. Приводятся расчетные формулы степени и кратности успокоения в фильтрах, состоящих из одной, двух и трех ступеней, и определяется наиболее выгодное распределение объемов и сопротивлений между двумя ступенями фильтра. Устанавливаются границы применимости выведенных формул.

Сглаживание пульсаций

В самых различных областях техники часто возникает задача измерения расхода пульсирующих газовых и жидкостных потоков.

В большинстве случаев основную цель при этом представляет правильная оценка среднего расхода пульсирующего потока. Именно с этим приходится сталкиваться при промышленных измерениях, а также при автоматическом регулировании.

Обычно для обеспечения правильного измерения среднего расхода пульсирующего потока перед приемным элементом расходомера помещают успокоитель или фильтр, задачей которого является уменьшить величину пульсации. Это уменьшение должно быть тем сильнее, чем выше требования к точности измерения или к величине зоны нечувствительности регулятора.

Таким образом, задача измерения среднего расхода пульсирующего потока сводится в значительной степени к правильному расчету и изготовлению необходимого демпфера или успокоителя.

Простейший газовый успокоитель или фильтр, изображенный на рис. 1, представляет собою емкость и сопротивление, включенные последовательно между источником пульсации и приемным элементом расходомера.

На рис. 1 обозначено:

- V — объем успокоителя, m^3 ;
- P_1 — давление газа перед фильтром, $кгс/m^2$;
- γ_1 — удельный вес газа перед фильтром, $кгс/m^3$;
- P_2 — давление газа после фильтра, $кгс/m^2$;
- γ_2 — удельный вес газа после фильтра, m^3 ;
- δP — потеря давления в фильтре, $кгс/m^2$;

Q^0 — средний расход газа, м³/сек;
 V_n — объем газа, подаваемый на вход за один период, м³;
 H — коэффициент пульсации на входе;
 H_1 — то же на выходе.

Коэффициенты H на входе и H_1 на выходе имеют выражения

$$H = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{2Q^0} \quad \text{и} \quad H_1 = \frac{Q_{1\max} - Q_{1\min}}{2Q^0}. \quad (1)$$

Назовем степенью успокоения

$$\alpha_1 = \frac{H_1}{H} = \frac{Q_{1\max} - Q_{1\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \quad (2)$$

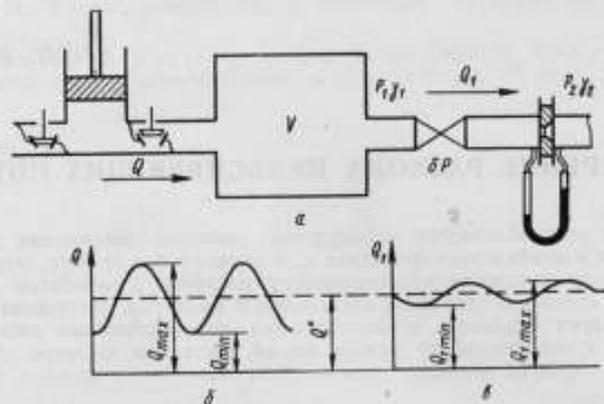


Рис. 1. Одноступенчатый газовый фильтр.
 а — схема; б — кривая пульсации на входе; в — на выходе.

и кратностью успокоения

$$\beta_1 = \frac{H}{H_1} = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{1\max} - Q_{1\min}}, \quad (3)$$

очевидно,

$$\beta_1 = \frac{1}{\alpha_1}. \quad (4)$$

Всегда имеем

$$\alpha_1 < 1 \quad \text{и} \quad \beta_1 > 1.$$

Величина степени или кратности успокоения является показателем эффективности работы газового фильтра.

Теория размерностей дает возможность определить характер зависимости α_1 или β_1 от параметров фильтра.

В общем случае имеем

$$H_1 = \varphi(H, V, P_1, \gamma_1, P_2, \gamma_2, \delta P, V_n, n), \quad (5)$$

где n — показатель политропы процесса работы газового фильтра.

Некоторые параметры, приведенные в правой части уравнения (5), зависят друг от друга. Действительно,

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}}$$

и

$$P_2 = P_1 - \delta P.$$

Следовательно, γ_2 и P_2 не являются независимыми переменными. Тогда

$$H_1 = \varphi(H, V, P_1, \gamma_1, \delta P, V_n, n).$$

Семь независимых переменных, при трех основных единицах измерения, на основании П-теоремы, позволяют составить 4 безразмерных критерия

$$\pi_1 = \frac{H_1}{H}; \quad \pi_2 = \frac{V}{V_n}; \quad \pi_3 = \frac{\delta P}{P_1}; \quad \pi_4 = 1.$$

Превращение критерия π_4 в единицу указывает на то, что число независимых переменных было принято нами излишним. Во всех полученных критериях отсутствует γ_1 , следовательно, H_1 не зависит от γ_1 .

Таким образом,

$$\pi_1 = F(\pi_2, \pi_3, n)$$

или

$$\frac{H_1}{H} = F\left(\frac{V}{V_n}, \frac{\delta P}{P_1}, n\right).$$

Учитывая, что

$$\alpha_1 = \frac{H_1}{H} \quad \text{и} \quad V_n = \frac{Q^0}{f},$$

где f — частота пульсаций (сек^{-1}), получим

$$\alpha_1 = F\left(\frac{Vf}{Q^0}, \frac{\delta P}{P_1}, n\right). \quad (6)$$

Выражение (6) указывает на зависимость степени успокоения α_1 газового фильтра от отдельных безразмерных параметров, но не дает конкретного вида этой функциональной зависимости. Для нахождения вида зависимости надо составить и решить уравнение, описывающее работу газового фильтра.

Работа газового фильтра

Для большей общности вопроса, а также для возможности сравнения эффективности работы одно-, двух- и трехступенчатого фильтра рассмотрим работу газового фильтра, показанного на рис. 2 и состоящего из

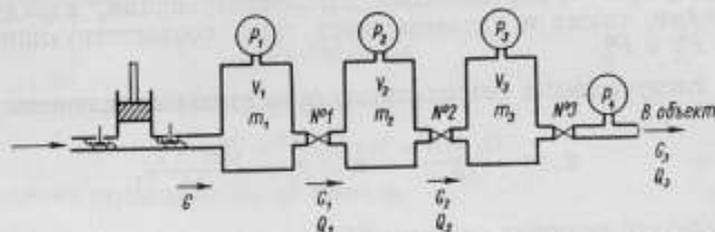


Рис. 2. Схема трехступенчатого газового фильтра.

трех ступеней, т. е. из трех емкостей и трех сопротивлений, последовательно включенных между источником пульсации и приемным элементом расходомера.

Обозначим:

V_i — емкость i -го бачка, м^3 ;

m_i — количество газа, находящегося в i -м бачке, кгс ;

- G^0 — средний весовой расход газа через систему, кгс/сек;
 G_i — мгновенное значение весового расхода газа, выходящего из i -го бачка, кгс/сек;
 P_i — абсолютное давление в i -м бачке, кгс/м²;
 P_i^0 — соответствующее расходу G^0 значение давления P_i , кгс/м²;
 Q_i^0 — объемный расход газа, соответствующий среднему весовому расходу G^0 при давлении P_i^0 , м³/сек;
 k_i — величину, характеризующую сопротивление у i -го бачка и удельный вес газа, соответствующий давлению P_i .

Процесс сжатия и расширения газа в каждой из емкостей происходит по адиабате или, в общем случае, по политропе с показателем n . Тогда, пренебрегая силами инерции, можно написать следующую исходную систему уравнений для трехступенчатого газового фильтра:

$$\left. \begin{aligned}
 G &= F(t); & \frac{dm_2}{dt} &= G_1 - G_2 \\
 G_1 &= k_1 (P_1 - P_2)^{\frac{1}{r}}; & \frac{dm_3}{dt} &= G_2 - G_3 \\
 G_2 &= k_2 (P_2 - P_3)^{\frac{1}{r}}; & \frac{dm_1}{dP_1} &= \frac{1}{n} \frac{m_1}{P_1} \\
 G_3 &= k_3 (P_3 - P_4)^{\frac{1}{r}}; & \frac{dm_2}{dP_2} &= \frac{1}{n} \frac{m_2}{P_2} \\
 \frac{dm_1}{dt} &= G - G_1; & \frac{dm_3}{dP_3} &= \frac{1}{n} \frac{m_3}{P_3}
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где r — показатель степени, зависящий от характера потока газа в сопротивлениях (обычно $r=2$).

При решении системы (7) полагаем давление P_4 в объекте постоянным и равным P_4^0 и принимаем допущение, что амплитуды колебаний расходов G_i и давлений P_i малы по сравнению со средним расходом G^0 и давлениями P_i^0 . Это позволит: 1) после разложения в ряд Тейлора правых частей уравнений расхода, входящих в систему (7), пренебречь членами, имеющими степень выше первой, и 2) считать величины k_1 , k_2 и k_3 постоянными, характеризующими, наряду с сопротивлениями, также и удельные веса газа, соответствующие давлениям P_1^0 , P_2^0 и P_3^0 .

Затем следует ввести безразмерные относительные величины вида

$$g_i = \frac{G_i - G^0}{G^0} \quad \text{и} \quad p_i = \frac{P_i - P_i^0}{P_i^0}.$$

В результате решения системы (7) получится следующее уравнение для определения пульсации расхода $g_3 = \frac{G_3 - G_3^0}{G_3^0}$ на выходе из фильтра в зависимости от пульсации на входе $g = \frac{F(t) - G^0}{G^0}$:

$$\begin{aligned}
 8T_1 T_2 T_3 \frac{d^3 g_3}{dt^3} + 4(T_1 T_{2-4} + T_{1-3} T_3 + T_2 T_3) \frac{d^2 g_3}{dt^2} + \\
 + 2(T_{1-4} + T_{2-4} + T_3) \frac{d g_3}{dt} + g_3 = g
 \end{aligned} \quad (8)$$

или

$$L \frac{d^2 g_3}{dt^2} + M \frac{dg_3}{dt} + N g_3 = g, \quad (9)$$

где

$$L = 8T_1 T_2 T_3; \quad M = 4(T_1 T_{3-4} + T_{1-3} T_3 + T_2 T_3); \quad N = 2(T_{1-4} + T_{2-4} + T_3);$$

$$T_1 = \frac{V_1}{nQ_1^0} \left(\frac{P_1^0}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \frac{P_1^0 - P_2^0}{P_1^0} \approx \frac{V_1}{nQ_1^0} \frac{P_1^0 - P_2^0}{P_1^0};$$

$$T_2 \approx \frac{V_2}{nQ_2^0} \frac{P_2^0 - P_3^0}{P_2^0}; \quad T_3 \approx \frac{V_3}{nQ_3^0} \frac{P_3^0 - P_4^0}{P_3^0};$$

$$T_{1-3} \approx \frac{V_1}{nQ_1^0} \frac{P_1^0 - P_3^0}{P_1^0}; \quad T_{1-4} \approx \frac{V_1}{nQ_1^0} \frac{P_1^0 - P_4^0}{P_1^0}; \quad T_{2-4} \approx \frac{V_2}{nQ_2^0} \frac{P_2^0 - P_4^0}{P_2^0}.$$

Уравнение (8), или (9), описывает работу трехступенчатого газового фильтра. Уравнения для двухступенчатого и одноступенчатого фильтров могут быть получены как частные случаи из уравнения (8) или (9). Так, для двухступенчатого фильтра имеем уравнение

$$M \frac{d^2 g_2}{dt^2} + N \frac{dg_2}{dt} + g_2 = g, \quad (10)$$

где

$$M = 4T_1 T_2; \quad N = 2(T_{1-3} + T_2),$$

а для одноступенчатого фильтра — уравнение

$$N \frac{dg_1}{dt} + g_1 = g. \quad (11)$$

где

$$N = 2T_1.$$

Если пульсация на входе в систему имеет синусоидальный характер

$$G = G^0 (1 + H \sin^2 \omega t),$$

где ω — угловая частота пульсации,

H — коэффициент пульсации,

то

$$g = H \sin \omega t.$$

Тогда решение уравнения (9) дает

$$g_3 = H_3 \sin(\omega t - \varepsilon),$$

где коэффициент пульсации H_3 на выходе

$$H_3 = \frac{H}{\sqrt{\omega^2(N - L\omega^2)^2 + (1 - M\omega^2)^2}}, \quad (12)$$

а угол ε сдвига фазы пульсации определяется из уравнения

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\omega(N - L\omega^2)}{1 - M\omega^2}. \quad (13)$$

Для двухступенчатого фильтра получим

$$H_2 = \frac{H}{\sqrt{N^2\omega^2 + (1 - M\omega^2)^2}} \quad (14)$$

и

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{N\omega}{1 - M\omega^2}, \quad (15)$$

а для одноступенчатого фильтра

$$H_1 = \frac{H}{\sqrt{1 + N^2\omega^2}}, \quad (16)$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon = N\omega. \quad (17)$$

Критерий успокоения пульсации

Из уравнения (16) непосредственно следует, что степень успокоения α_1 одноступенчатого фильтра имеет вид

$$\alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + (4\pi T_1 f)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{4\pi}{n} \cdot \frac{Vf}{Q^0} \cdot \frac{\partial P}{P_1^0}\right)^2}}, \quad (18)$$

где $f = \frac{\omega}{2\pi}$.

Уравнение (18) раскрывает вид функциональной зависимости (6) между степенью успокоения α_1 и безразмерными критериями или параметрами

$$\frac{Vf}{Q^0}; \quad \frac{\partial P}{P_1^0} \quad \text{и} \quad n.$$

Введем обозначения

$$k = T_1 f = \frac{Vf}{nQ^0} \cdot \frac{\partial P}{P_1^0}, \quad (19)$$

$$K = 4\pi k. \quad (20)$$

Тогда выражение для α_1 принимает следующий простой вид:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + (4\pi k)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + K^2}}. \quad (21)$$

Величину k (или K), включающую в себя все безразмерные параметры, от которых зависит степень успокоения, следует назвать обобщенным критерием успокоения пульсации в одноступенчатом газовом фильтре.

Зависимость кратности успокоения β_1 от критерия k (или K) имеет вид

$$\beta_1 = \sqrt{1 + (4\pi k)^2} = \sqrt{1 + K^2}. \quad (22)$$

При $k > 1$ можно принять

$$\alpha_1 \approx \frac{1}{4\pi k} \approx \frac{1}{K}; \quad \beta_1 \approx 4\pi k \approx K. \quad (23)$$

Формулы (21) и (22) получены для синусоидальной формы пульсации на входе. Любую другую кривую пульсации на входе можно представить как сумму гармонических составляющих. При этом амплитуда гармоники с наибольшим периодом в большинстве случаев довольно близка к амплитуде исходной кривой пульсации. Сглаживание колебаний этой гармоники при проходе ее через фильтр будет проходить в соответствии с формулами (21) и (22). Что касается последующих гармоник, то они будут затухать при проходе через данный фильтр тем быстрее, чем выше их частота или порядок. Поэтому их влияние на вид и

амплитуду кривой пульсации на выходе из фильтра, как правило, будет невелико.

Можно показать, что если кривая на выходе из фильтра близка к синусоиде, то для любой формы пульсации на входе, которая имеет вид

$$Q = Q^0 (1 + \sum a_i \sin \omega i t + \sum b_i \cos \omega i t),$$

степень успокоения α_1 , достигаемая в одноступенчатом газовом фильтре, будет

$$\alpha_1 = \sqrt{\sum_1^{\infty} \frac{a_i^2 + b_i^2}{1 + i^2 \kappa^2}}.$$

Если по этой формуле подсчитать α_1 , например, для пульсаций, имеющих на входе форму коммутированной синусоиды, причем в одном случае взять коэффициент времени подачи S равным 100%, а в другом 50%, то в обоих случаях получатся значения α_1 , близко совпадающие со значениями α_1 , определенными по уравнению (21). Между тем формы кривых пульсации на входе во всех трех случаях сильно отличаются друг от друга.

Заметим, что совпадение α_1 еще не означает совпадения коэффициентов пульсации H_1 на выходе. Последние (при одинаковых α_1) будут пропорциональны коэффициентам пульсации H на входе, которые у рассматриваемых кривых равны: единице (у синусоиды), $\pi/4$ (у коммутированной синусоиды с $S = 100\%$) и $\pi/2$ (у коммутированной синусоиды с $S = 50\%$).

В настоящее время [1] широким распространением для оценки эффективности газового фильтра пользуется число H_0 , или критерий Ходжсона.

Нетрудно видеть, что число Ходжсона является частным случаем критерия успокоения k при показателе политропы $n = 1$:

$$H_0 = nk.$$

Таким образом, степень успокоения можно характеризовать либо одним критерием k , либо числом Ходжсона совместно с показателем политропы. Очевидно, применение критерия k является более целесообразным. Одна кривая, дающая зависимость степени успокоения α_1 от k , заменяет семейство кривых зависимости α_1 от H_0 (для каждого n своя кривая).

Если рассмотреть процесс сглаживания жидкостного пульсирующего потока с помощью емкостей и сопротивлений, аналогичных изображенным на рис. 2, но при том неизменном условии, что верхняя часть резервуаров занята воздухом, то можно [2] получить те же уравнения (9) — (11) и тот же критерий успокоения k , что и для газового потока, если в формуле (19) под V понимать не весь объем резервуара, а лишь ту его часть, которая занята воздухом при среднем расходе через систему.

Эта часть объема может быть выражена через полный объем или, точнее, через ту его часть V_a , которая занята воздухом при атмосферном давлении P_a . Тогда критерий успокоения для одноступенчатого жидкостного фильтра будет иметь вид

$$k = \frac{V_a f}{n Q^0} \cdot \frac{\Delta P}{P_1^0} \cdot \frac{P_a}{P_1^0}. \quad (24)$$

Сравнительная эффективность работы одно-, двух- и трехступенчатого фильтра

Принимаем все три фильтра эквивалентными по суммарной емкости V и суммарному перепаду давления δP .

Выразим кратности успокоения, достигаемые двух- и трехступенчатым подобным газовым фильтром через критерий успокоения K одноступенчатого фильтра, имеющего эквивалентные V и δP .

Для случая, когда V и δP равномерно распределены между отдельными ступенями фильтров, получим:

для одноступенчатого фильтра

$$\beta_1 = \sqrt{1 + K^2},$$

для двухступенчатого фильтра

$$\beta_2 = \sqrt{\frac{9}{16} K^2 + \left(1 - \frac{K^2}{16}\right)^2}$$

и для трехступенчатого фильтра

$$\beta_3 = \sqrt{\frac{K^2}{9} \left(2 - \frac{K^2}{243}\right)^2 - \left(1 + \frac{5K}{81}\right)^2}.$$

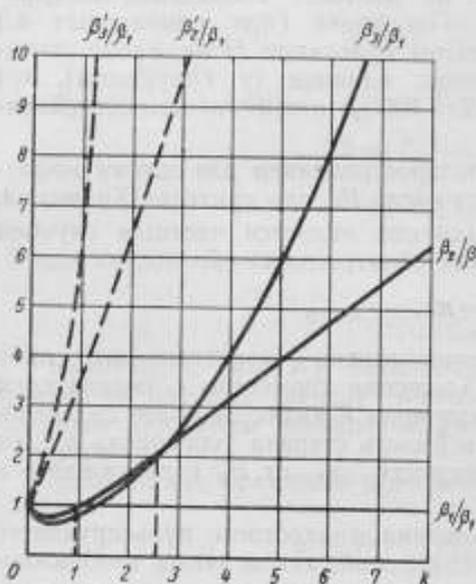


Рис. 3. Сравнительная эффективность одно-, двух- и трехступенчатого фильтров.

сферным давлением, когда δP будет приближаться к $(P_1^0 - 1)$, кривые β_2/β_1 и β_3/β_1 будут стремиться соответственно к кривым β_2'/β_1 и β_3'/β_1 .

Таким образом, эффективность многоступенчатого жидкостного фильтра по сравнению с одноступенчатым выше, чем у газового фильтра. Это объясняется тем, что при равных исходных емкостях объем, занимаемый воздухом в последующей ступени жидкостного фильтра, больше, чем в предыдущей.

Пользуясь полученными выражениями для β_1 , β_2 и β_3 и уравнениями (13), (15) и (17) для угла сдвига фазы ε , построим на рис. 4 в поляр-

Очевидно, кривые β_2/β_1 и β_3/β_1 будут показывать, во сколько раз двух- и трехступенчатые фильтры эффективнее одноступенчатого. Как видно из рис. 3, эта эффективность растет с увеличением критерия k . При малых же значениях k многоступенчатые фильтры не имеют преимущества перед одноступенчатым.

Для жидкостного пульсирующего потока кривые β_2/β_1 и β_3/β_1 будут также справедливы, но лишь в том предельном случае, когда $\frac{\delta P}{P_1^0}$ будет весьма мало по сравнению с $\frac{Vf}{nQ^0}$.

С увеличением отношения $\left(\frac{\delta P}{P_1^0}\right)$ к $\left(\frac{Vf}{nQ^0}\right)$ эффект сглаживания будет возрастать и в пределе при истечении в среду с атмо-

ных координатах кривые, дающие зависимость степеней успокоения $\alpha_1 = \frac{1}{\beta_1}$; $\alpha_2 = \frac{1}{\beta_2}$ и $\alpha_3 = \frac{1}{\beta_3}$ и соответствующих углов сдвига фазы от величины критерия успокоения k .

Полученные графики являются амплитудно-фазовыми характеристиками одно-, двух- и трехступенчатых газовых фильтров, имеющих эквивалентные суммарные объемы и суммарные перепады давления. При этом как объемы, так и давления считаем распределенными равномерно по ступеням. Рис. 4 дополняет рис. 3 и указывает, что угол ϵ сдвига фазы в одноступенчатом фильтре может меняться в пределах от 0 до -90° , причем в большинстве практических случаев он будет близко лежать к -90° . В двухступенчатом фильтре угол сдвига может быть в пределах от 0 до -180° (в большинстве случаев от -90 до -180°) и в трехступенчатом фильтре угол сдвига лежит в пределах от 0 до -270° . Амплитудно-фазовая характеристика для одноступенчатого жидкостного фильтра совпадает с рис. 4, а, а для жидкостных фильтров с двумя и тремя ступенями будет близка к рис. 4, б и 4, в.

Таким образом, мы видим, что критерий успокоения k служит для характеристики работы не только одно-, но также двух- и трехступенчатых фильтров.

Все сказанное относительно к случаю равномерного распределения емкостей и сопротивлений между отдельными звеньями двух- и трехступенчатого фильтра.

Теперь рассмотрим работу двухступенчатого газового фильтра при произвольном распределении объемов и сопротивлений между двумя ступенями.

Можно показать [2], что кратность успокоения β_2 такого фильтра имеет вид

$$\beta_2 = \sqrt{b^2 [(a-x) + zx]^2 + [1 - b^2 z(1-z)x(a-x)]^2}, \quad (25)$$

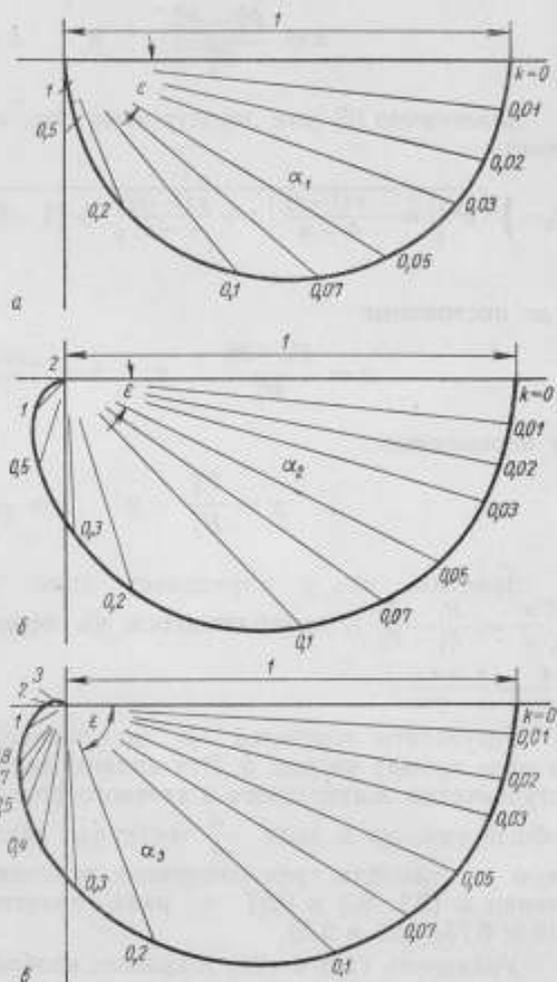


Рис. 4. Амплитудно-фазовые характеристики газовых фильтров.

а — одноступенчатого; б — двухступенчатого; в — трехступенчатого.

где постоянные a и b

$$a = \frac{P_1^0 - P_3^0}{P_1^0} \quad \text{и} \quad b = \frac{2(V_1 + V_2)J}{nQ_1^0},$$

а переменные x и z

$$x = \frac{P_1^0 - P_2^0}{P_1^0} \quad \text{и} \quad z = \frac{V_1}{V_1 + V_2}.$$

Аналогично [2] для двухступенчатого жидкостного фильтра будем иметь

$$\beta_2 = \sqrt{b^2 \left[\left[a - \frac{y(1-y)}{1-a} \right] z + \frac{y(1-y)}{1-a} \right]^2 + \left[1 - b^2 z(1-z) \left(\frac{y}{1-a} - 1 \right) (1-y) \right]^2}, \quad (26)$$

где постоянные

$$a = \frac{P_1^0 - P_3^0}{P_1^0} \quad \text{и} \quad b = \frac{2(V_{1a} + V_{2a})J}{nQ^0} \sqrt{\frac{P_0}{P_1^0}}$$

и переменные

$$y = \frac{P_3^0}{P_2^0} \quad \text{и} \quad z = \frac{V_{1a}}{V_{1a} + V_{2a}}.$$

Заметим, что y определяет долю общего перепада давления $\left(\frac{x}{a} = \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_3} \right)$, приходящегося на первую ступень, по уравнению $\frac{x}{a} = \frac{y + a - 1}{ya}$.

Результаты подсчетов β_2 по уравнениям (25) и (26) изображены в виде кривых на рис. 5. Эти кривые дают кратности успокоения двухступенчатых жидкостного и газового фильтров в зависимости от доли z общей емкости и доли $\frac{x}{a}$ перепада давления, приходящихся на первую ступень для трех различных величин относительного дросселирования a (0,1; 0,3 и 0,5) и ряда значений критерия успокоения k (0,5; 0,75; 1,25 и 2,5).

Уравнения (25) и (26) и кривые, изображенные на рис. 5, позволяют решить задачу о наиболее выгодном распределении объемов и перепадов давления между первой и второй ступенями фильтров.

Анализ частных производных $\frac{\partial \beta_2}{\partial x}$ и $\frac{\partial \beta_2}{\partial z}$, а также $\frac{\partial \beta_2}{\partial y}$ и $\frac{\partial \beta_2}{\partial z}$ показывает, что, начиная с $k \geq 0,88$, двухступенчатый газовый фильтр становится выгоднее одноступенчатого, причем с ростом k наиболее выгодные значения как z , так и $\frac{x}{a}$ стремятся к 0,5. Эти же результаты получаются и для жидкостного фильтра при весьма малых значениях относительного дросселирования a . По мере увеличения a оптимальное значение величины $\frac{x}{a}$ несколько возрастает, оптимальное же значение z продолжает, как и у газового фильтра, стремиться к 0,5 с ростом критерия успокоения k .

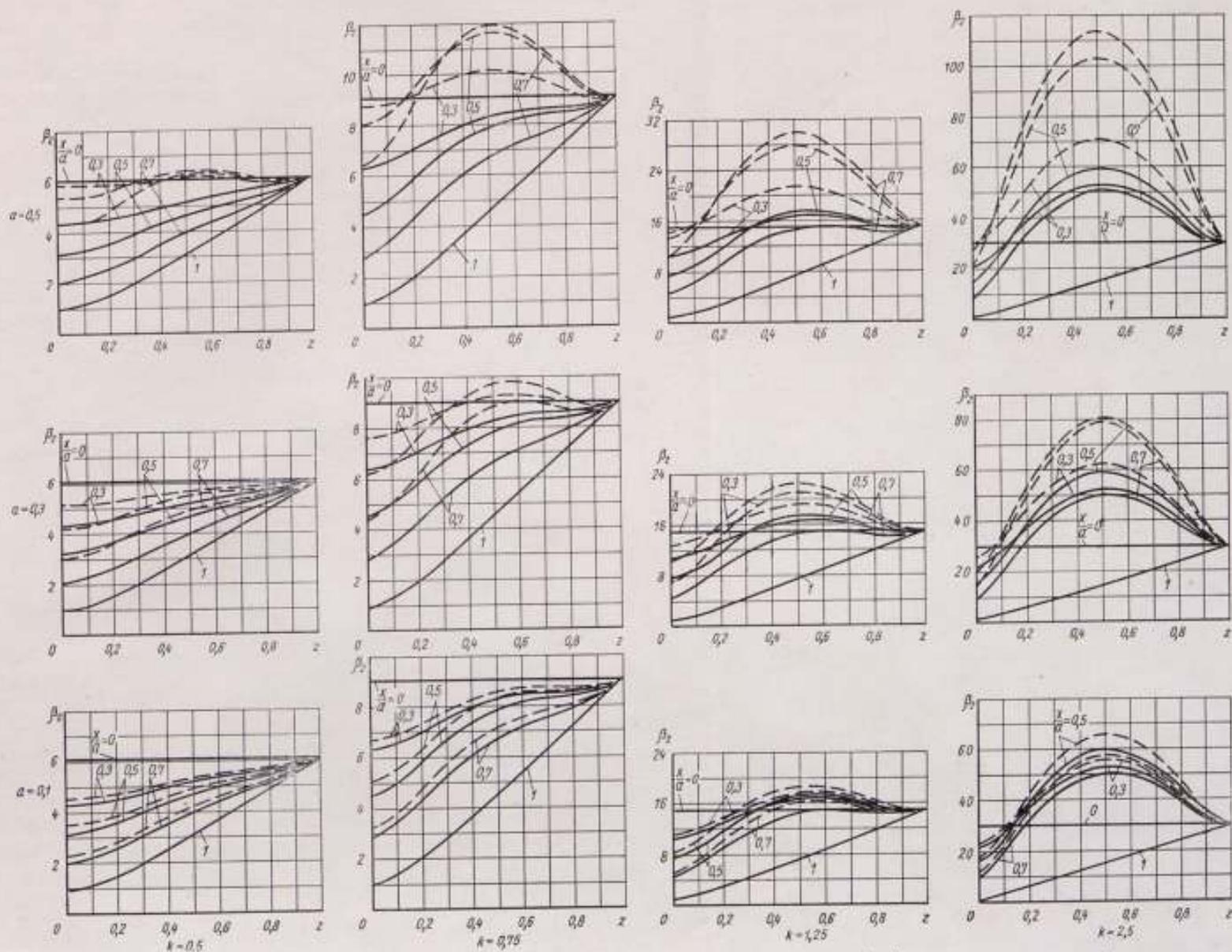


Рис. 5. Кратность успокоения β_2 двухступенчатого фильтра в зависимости от доли z общей емкости, приходящейся на первую ступень, и доли $\frac{x}{a}$ общего перепада давления, приходящейся на сопротивление между первой и второй ступенью, для различных значений критерия k (0,5; 0,75; 1,25 и 2,5) и различных значений относительного дросселирования a (0,1; 0,3 и 0,5).
 — для газового потока, - - - для жидкостного потока.

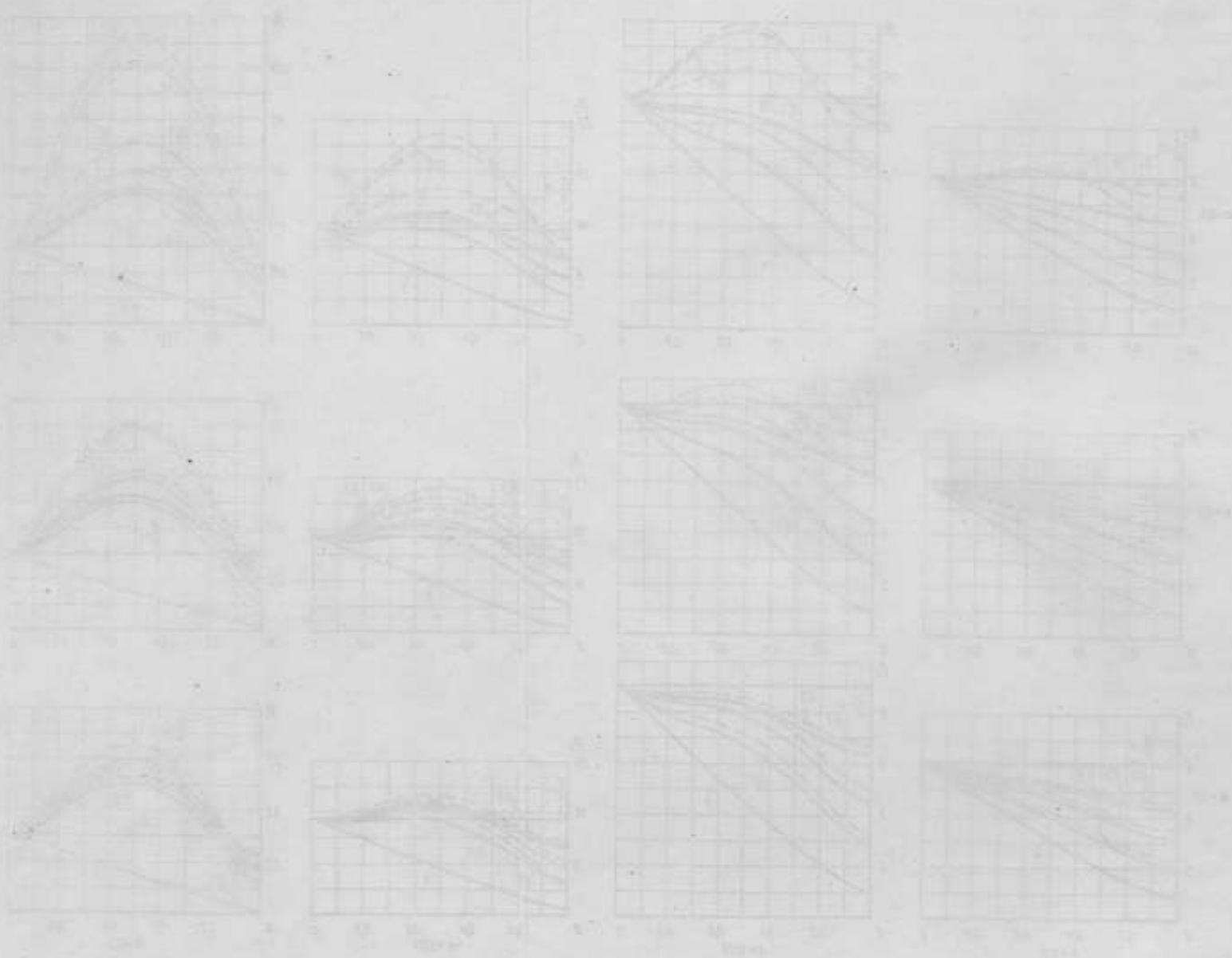


Fig. 2. Curves of the function $y = \sin(x) + \epsilon \sin(2x)$ for different values of ϵ . The curves are plotted for x from 0 to 2π . The parameter ϵ varies from 0 to 1. The curves show the effect of the second harmonic on the first harmonic.

Зависимость погрешности показаний расходомера переменного перепада давления от критерия успокоения k

Погрешность измерения пульсирующего расхода возникает вследствие того, что дифманометр показывает средний перепад давления, а не перепад, соответствующий среднему расходу. Относительная погрешность измерения расхода $\frac{\Delta Q}{Q^0}$ будет [2]

$$\frac{\Delta Q}{Q^0} = \frac{\Delta G}{\Delta G^0} = \sqrt{1 + \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} g_1^2 dt} - 1, \quad (27)$$

где t_0 — длительность периода пульсации (сек).

Если колебания расхода имеют синусоидальную форму и коэффициент пульсации до фильтра равен единице, то, принимая во внимание (21), получим

$$\frac{\Delta Q}{Q^0} = \sqrt{1 + \frac{1}{2(1+k^2)}} - 1. \quad (28)$$

В общем случае, когда пульсация на входе происходит не по синусоиде получим [2]

$$\frac{\Delta Q}{Q^0} = \sqrt{1 + \frac{1}{2} \sum_1^{\infty} \frac{a_i^2 + b_i^2}{1+i^2 K^2}} - 1, \quad (29)$$

где a_i и b_i — коэффициенты i -х членов ряда Фурье, описывающего пульсацию на входе в фильтр.

Формула (29) для пульсаций на входе, имеющих форму коммутированной синусоиды с различными коэффициентами времени подачи S (100; 83,3; 66,7; 50; 33,3 и 16,7%), дает семейство кривых, изображенных на рис. 6.

В частном случае при показателе политропы $n = 1,37$ получаются кривые [3, 4], приведенные в Правилах 27—54. При других показателях политропы эти кривые уже не будут справедливы. Кривые же, построенные на рис. 6 в зависимости от критерия успокоения k (или K), верны во всех случаях. Кривые, приведенные в Правилах 27—54, построены в зависимости от числа Ходжсона, в котором отсутствует показатель политропы. То обстоятельство, что при построении [3] этих кривых все же был принят во внимание показатель политропы ($n = 1,37$), является их внутренним противоречием. Положение еще более осложняется тем, что в Правилах 27—54 ничего не сказано об этом показателе и, таким образом, приводимым там кривым придан универсальный характер, что неверно. Поэтому необходимо заменить кривые, приведенные в Правилах 27—54, на кривые, изображенные на рис. 6.

Аналогичным образом и остальные три графика Правил 27—54 в разделе измерения пульсирующих расходов должны быть перестроены так, чтобы на одной из координатных осей был отложен критерий успокоения k (или K) вместо числа Ходжсона.

Пульсация на выходе из одноступенчатого фильтра по уточненным уравнениям

При решении системы уравнений (7) было принято допущение о малости амплитуд колебаний расходов и давлений в фильтре. Кроме того, сама система (7) написана без учета сил инерции. Весьма важно установить, насколько эти допущения могли отразиться на точности выведенных путем решения системы (7) уравнений (8)—(11) и каковы в связи с этим границы их применимости.

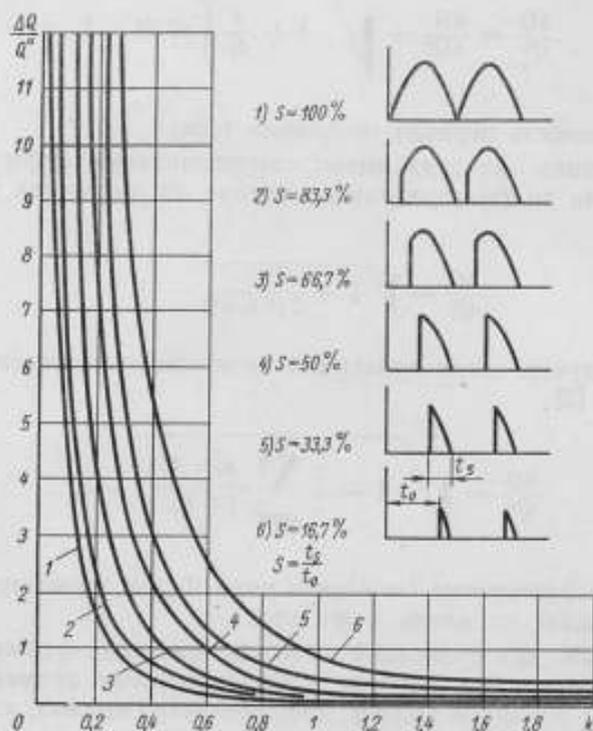


Рис. 6. Погрешность измерения в зависимости от критерия успокоения k для пульсации на входе по закону коммутированной синусоиды (при различных временах подачи S).

Дальнейшее исследование разделено на две части. Вначале определены погрешности, являющиеся следствием допущений, принятых при решении системы (7), затем рассмотрены погрешности, возникающие от неучета инерционных сил.

Для решения первой задачи следует провести численное интегрирование (например, по методу Эйлера — Адамса) уточненных уравнений, полученных при решении системы (7) без предположения о малости амплитуд колебаний давлений и расходов, и сравнить результаты с теми, которые получаются по приближенным уравнениям (8)—(11). Ниже для ряда конкретных числовых примеров проводятся указанные расчеты. При этом принято, что пульсация на входе имеет синусоидальный характер и что зависимость между расходом и перепадом — квадратичная ($r=2$).

Решение уравнения (11) для одной ступени демпфирования дает

$$g_1 = \frac{H}{\sqrt{1+N^2\omega^2}} \sin(\omega t - \arctg N\omega). \quad (30)$$

Подставляя значения g_1 и H в уравнение (30) и учитывая, что $G_{\max} = 2G^0$; $G_{\min} = 0$; $\omega = 2\pi f$ и $2k = N\omega$, получим

$$\frac{G_1}{G^0} = 1 + \frac{\sin(2\pi ft - \arctg 4\pi k)}{\sqrt{1+16\pi^2 k^2}}, \quad (31)$$

откуда следует

$$\frac{P_1 - P_2^0}{P_1^0 - P_2^0} = \left[1 + \frac{\sin(2\pi ft - \arctg 4\pi k)}{\sqrt{1+16\pi^2 k^2}} \right]^2. \quad (32)$$

По уравнениям (31) и (32) можно построить кривые пульсаций расхода $\frac{G_1}{G^0}$ и перепада давления $P_1 - P_2^0$ или давления P_1 для любых значений k и ω .

Уравнения (31) и (32) будут справедливы и для жидкости, если вместо $\frac{G_1}{G^0}$ поставить $\frac{Q_1}{Q^0}$, а под V , входящим в выражение для K , иметь в виду объем газа V_1^0 в емкости при давлении P_1^0 .

Перейдем к выводу уточненных дифференциальных уравнений для тех же условий. Для газа исходная система уравнений будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} G &= G^0(1 + \sin 2\pi ft) \\ G_1 &= G^0 \left(\frac{P_1}{P_1^0} \right)^{\frac{1}{2n}} \left(\frac{P_1 - P_2^0}{P_1^0 - P_2^0} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \frac{dm_1}{dt} &= G - G_1 \\ \frac{dm_1}{dP_1} &= \frac{1}{n} \frac{m_1}{P_1} = \frac{G^0 V_1 (P_1^0)^{-\frac{1}{n}}}{n Q_1^0} P_1^{\frac{1-n}{n}} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Из (33) следует

$$\frac{V_1 (P_1^0)^{-\frac{1}{n}}}{n Q_1^0} P_1^{-\left(\frac{n-1}{n}\right)} \frac{dP_1}{dt} + \left(\frac{P_1}{P_1^0} \right)^{\frac{1}{2n}} \left(\frac{P_1 - P_2^0}{P_1^0 - P_2^0} \right)^{\frac{1}{2}} = 1 + \sin 2\pi ft. \quad (34)$$

Если ввести новую переменную

$$x = \frac{V_1}{Q_1^0} \left(\frac{P_1}{P_1^0} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (35)$$

то предыдущее уравнение примет вид

$$\frac{dx}{dt} = (1 + \sin 2\pi ft) - [cx(c_1 x^n - P_2^0)]^{\frac{1}{2}}, \quad (36)$$

где $c = \frac{Q_1^0}{V_1 (P_1^0 - P_2^0)}$ и $c_1 = \left(\frac{Q^0}{V_1} \right)^n P_1^0$ — постоянные.

Для приближенного численного интегрирования полученного уравнения надо знать начальное значение x , определяемое по начальному значению P_1 . Последнее же может быть получено из уравнения (32) при $t=0$. Численное интегрирование уравнения (36) надо производить до тех пор, пока получаемые значения x не станут периодически повторяться (т. е. пока не кончится переходное состояние). Затем по найденным (для периода в 360°) значениям x следует, пользуясь уравнением (35), определить соответствующие значения P_1 . После этого легко определяются значения $\frac{P_1 - P_2^0}{P_1^0 - P_2^0}$ и $\frac{G_1}{G^0} = \left(\frac{P_1}{P_1^0}\right)^{\frac{1}{2n}} \left(\frac{P_1 - P_2^0}{P_1^0 - P_2^0}\right)^{\frac{1}{2}}$, по которым и строятся уточненные кривые пульсации перепада давления и расхода.

Для жидкости исходная система уравнений будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} Q &= Q^0 (1 + \sin 2\pi ft) \\ Q_1 &= Q^0 \left(\frac{P_1 - P_2^0}{P_1^0 - P_2^0}\right)^{\frac{1}{2}} \\ \frac{dV_1}{dt} &= Q_1 - Q \\ \frac{dV_1}{dP_1} &= -\frac{V_1}{nP_1} = -\frac{V_1^0 (P_1^0)^{\frac{1}{n}}}{n} P_1^{-\left(\frac{1+n}{n}\right)} \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

Решая эту систему уравнений, получим

$$\frac{V_1^0 (P_1^0)^{\frac{1}{n}}}{nQ^0} P_1^{-\left(\frac{n+1}{n}\right)} \frac{dP_1}{dt} + \left(\frac{P_1 - P_2^0}{P_1^0 - P_2^0}\right)^{\frac{1}{2}} = 1 + \sin 2\pi ft \quad (38)$$

и после введения переменной

$$x = \frac{V_1^0}{Q^0} \left(\frac{P_1}{P_1^0}\right)^{-\frac{1}{n}} \quad (39)$$

предыдущее уравнение примет вид

$$\frac{dx}{dt} = (cx^{-n} - c_1)^{\frac{1}{2}} - (1 + \sin 2\pi ft), \quad (40)$$

где $c = \left(\frac{V_1^0}{Q^0}\right)^n \frac{P_1^0}{(P_1^0 - P_2^0)}$ и $c_1 = \frac{P_2^0}{P_1^0 - P_2^0}$ — постоянные.

Дальнейшие рассуждения аналогичны предыдущим.

Для приближенного численного решения уравнений (36) и (40) цикл пульсации (360°) разбивается на ряд равных, достаточно малых промежутков φ° . Каждому такому промежутку соответствует промежуток времени t_h , определяемый по формуле $t_h = \frac{\varphi}{360f}$.

Затем последовательно находятся значения x_{n+1} в конце каждого промежутка времени t_h по значению x_n в начале этого промежутка по формуле Эйлера*

$$x_{n+1} = x_n + \left(\frac{dx}{dt}\right)_n t_h$$

или по формуле Адамса

$$x_{n+1} = x_n + \eta_n + \frac{1}{2} \Delta_1 \eta_{n-1} + \frac{5}{12} \Delta_2 \eta_{n-2} + \frac{3}{8} \Delta_3 \eta_{n-3},$$

где $\eta_n = \left(\frac{dx}{dt}\right)_n t_h$; $\Delta_1 \eta_{n-1} = \left[\left(\frac{dx}{dt}\right)_n - \left(\frac{dx}{dt}\right)_{n-1}\right] t_h$;

$$\Delta_2 \eta_{n-2} = \left[\left(\frac{dx}{dt}\right)_{n-1} - \left(\frac{dx}{dt}\right)_{n-2}\right] t_h \quad \text{и} \quad \Delta_3 \eta_{n-3} = \left[\left(\frac{dx}{dt}\right)_{n-2} - \left(\frac{dx}{dt}\right)_{n-3}\right].$$

Формула Адамса дает значительно более точный результат, чем формула Эйлера, но требует для своего применения знания четырех значений производных (в конце четырех предыдущих промежутков времени t_h). Поэтому начало расчета до момента получения нужного числа производных следует вести по формуле Эйлера, применяя при этом, для обеспечения высокой точности расчетов, достаточно малые промежутки времени $t_h = \frac{1}{100}$, соответствующие $\varphi = 2^\circ 15'$ при $f=1$. Далее следует перейти на интегрирование с помощью формулы Адамса и брать промежутки времени $t_h = \frac{1}{80}$ в два раза большие, соответствующие $\varphi = 4^\circ 30'$ при $f=1$.

Результаты таких расчетов приведены в табл. 1, где даны погрешности определения кривых пульсации давления и расхода у газовых и жидкостных потоков, и частично представлены кривыми на рис. 7 и 8.

Данные, приведенные в табл. 1 и 2, показывают, что даже при столь малой величине критерия успокоения, как 0,1, погрешность в определении коэффициента пульсации δH_1 по упрощенной формуле не превосходит для газовых потоков (10 ÷ 20)%, а для жидкостных (5 ÷ 9)%. С увеличением критерия успокоения k погрешность в определении коэффициента пульсации становится еще меньше и снижается до 7% и менее для газовых потоков при $k=1$ и до 1% для жидкостных — при $k=0,5$.

Кривые пульсации давления и расхода, приведенные на рис. 7 и 8 и подсчитанные как по точным, так и по упрощенным формулам, также показывают хорошие совпадения друг с другом, особенно для жидкостных потоков, несмотря на относительно большие амплитуды пульсации давления и расхода.

Пульсация на выходе из двухступенчатого фильтра по уточненным уравнениям

Решение приближенного уравнения (10) для двухступенчатого газового фильтра дает

$$\frac{G_2}{G_0} = 1 + \frac{\sin \left(2\pi f t - \arctg \frac{2\pi f N}{1 - 4\pi^2 f^2 M} \right)}{\sqrt{4\pi^2 f^2 N^2 + (1 - 4\pi^2 f^2 M)^2}} \quad (41)$$

* См. Крылов А. Н., Лекции о приближенных вычислениях, АН СССР, 1935, стр. 404.

Таблица 1

Величина	Размерность	Обозначение, формула	Критерий		успокоения в газовых потоках				Критерий успокоения в жидкостных потоках					
			1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Постоянная времени бачка	—	$T_V = \frac{V_1}{nQ_1^0}$	10	5	1	0,5	0,228	0,2	5	1	0,5	0,316	0,237	0,224
Давление в бачке (среднее)	кгс/см ²	P_1^0	20	20	20	10	10	10	20	20	10	10,237	10,396	10,854
„ „ объекте	„	P_2^0	18	18	18	8	5,614	5	18	18	8	7,000	6,000	6,000
Перепад давления (средний)	„	$P_1^0 - P_2^0$	2	2	2	2	4,386	5	2	2	2	3,237	4,396	4,854
Относительное дросселирование	—	$a = \frac{P_1^0 - P_2^0}{P_1^0}$	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4386	0,5	0,1	0,1	0,2	0,316	0,423	0,447
Частота пульсации	сек ⁻¹	f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Показатель подтропы	—	n	1	1	1	1	1,5	1	1	1	1	1	1,5	1
Коэффициенты пульсации:														
давления в бачке	—	$\frac{P_{1max} - P_{1min}}{2P_1^0}$	0,016	0,03	0,11	0,22	0,45	0,50	0,03	0,12	0,26	0,43	0,55	0,63
перепада давления	—	$\frac{P_{1max} - P_{1min}}{2(P_1^0 - P_2^0)}$	0,157	0,31	1,13	1,10	1,02	1,00	0,31	1,24	1,30	1,36	1,37	1,41
расхода	—	$H_1 = \frac{G_{1max} - G_{1min}}{2G^0}$	0,085	0,17	0,70	0,74	0,78	0,80	—	—	—	—	—	—
„	—	$H_1 = \frac{Q_{1max} - Q_{1min}}{2Q^0}$	—	—	—	—	—	—	0,16	0,67	0,68	0,66	0,67	0,66
Погрешность определения по формулам (31) и (32):														
наибольшего давления в бачке	%	δP_{1max}	0,07	0,1	2,68	6,5	15,8	19,2	0,07	0,66	-0,74	-3,6	-5,4	-7,8
наименьшего давления в бачке	„	δP_{1min}	0,04	0,1	0,94	3,4	5,4	8,2	0,01	0,86	1,57	-1,4	0,67	-4,9
наибольшего расхода	„	$\delta G_{1max}; \delta Q_{1max}$	-0,4	-1,2	-0,1	-2,1	-8	-7,9	0,3	1,9	-0,9	-3,1	-4	-5,6
наименьшего	„	$\delta G_{1min}; \delta Q_{1max}$	-0,9	2,1	61,8	109	86,6	122	0,0	44,5	75,0	13,2	3,9	-3,3
коэффициента пульсации расхода	„	δH_1	-7,0	-9,8	-10,5	-15,6	-20,3	-21,6	-1,0	-6,5	-8,3	-7,1	-6,2	-4,8

и далее

$$\frac{P_2 - P_3}{P_2^0 - P_3^0} = \left[1 + \frac{\sin \left(2\pi ft - \arctg \frac{2\pi fN}{1 - 4\pi^2 f^2 M} \right)}{\sqrt{4\pi^2 f^2 N^2 + (1 - 4\pi^2 f^2 M)^2}} \right] \quad (42)$$

Для жидкости полученные уравнения также справедливы, если вместо $\frac{G_3}{G^0}$ употреблять $\frac{Q_3}{Q^0}$, а в выражениях N и M под V_1 понимать объем газа V_1^0 в первой емкости при давлении P_1^0 и под V_2 — объем газа V_2^0 во второй емкости при давлении P_2^0 .

Теперь выведем уточненные дифференциальные уравнения для двухступенчатой системы демпфирования.

Исходная система уравнений для газового потока имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} G &= G^0 (1 + \sin 2\pi ft) \\ G_1 &= G^0 \left(\frac{P_1}{P_1^0} \right)^{\frac{1}{2n}} \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1^0 - P_2^0} \right)^{\frac{1}{2}} \\ G_2 &= G^0 \left(\frac{P_2}{P_2^0} \right)^{\frac{1}{2n}} \left(\frac{P_2 - P_3}{P_2^0 - P_3^0} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \frac{dm_1}{dt} &= G - G_1 \\ \frac{dm_2}{dt} &= G_1 - G_2 \\ \frac{dm_1}{dP_1} &= \frac{G^0 V_1 (P_1^0)^{-\frac{1}{n}}}{n Q_1^0} P_1^{\frac{1-n}{n}} \\ \frac{dm_2}{dP_2} &= \frac{G^0 V_2 (P_2^0)^{-\frac{1}{n}}}{n Q_2^0} P_2^{\frac{1-n}{n}} \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Эта система преобразуется в систему из двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_1 (P_1^0)^{-\frac{1}{n}}}{n Q_1^0} P_1^{\frac{1-n}{n}} \frac{dP_1}{dt} + \left(\frac{P_1}{P_1^0} \right)^{\frac{1}{2n}} \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1^0 - P_2^0} \right)^{\frac{1}{2}} &= 1 + \sin 2\pi ft \\ \frac{V_2 (P_2^0)^{-\frac{1}{n}}}{n Q_2^0} P_2^{\frac{1-n}{n}} \frac{dP_2}{dt} + \left(\frac{P_2}{P_2^0} \right)^{\frac{1}{2n}} \left(\frac{P_2 - P_3}{P_2^0 - P_3^0} \right)^{\frac{1}{2}} &= \left(\frac{P_1}{P_1^0} \right)^{\frac{1}{2n}} \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1^0 - P_2^0} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

Введем новые функции x и y , определяемые уравнениями

$$x = \frac{V_1}{Q_1^0} \left(\frac{P_1}{P_1^0} \right)^{\frac{1}{n}}; \quad y = \frac{V_2}{Q_2^0} \left(\frac{P_2}{P_2^0} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (45)$$

Тогда вместо системы уравнений (44) получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} + [c_1 x (c_1 x^n - c_2 y^n)]^{\frac{1}{2}} &= 1 + \sin 2\pi ft; \\ \frac{dy}{dt} + [c_2 y (c_2 y^n - c_1 x^n)]^{\frac{1}{2}} &= [c_1 x (c_1 x^n - c_2 y^n)]^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

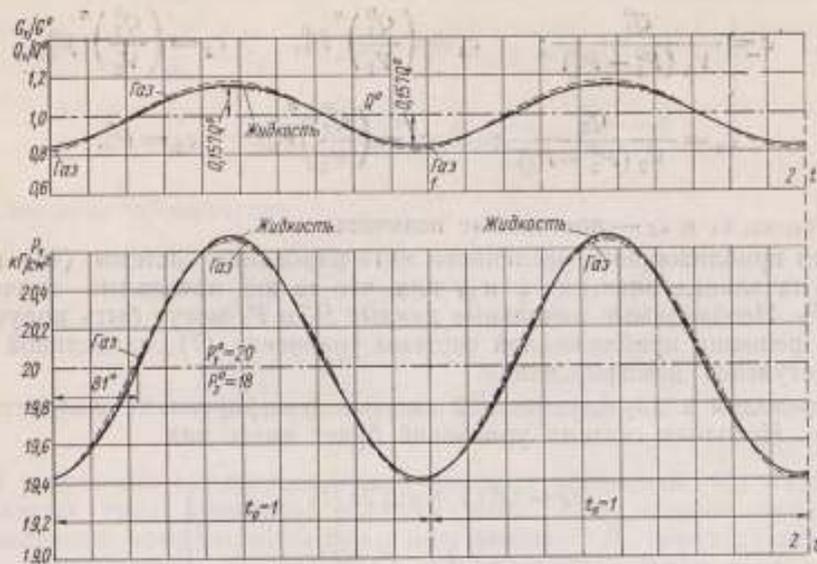


Рис. 7. Кривые пульсации расхода и давлений в одноступенчатом фильтре ($k = 0,5$; $n = 1$; $a = 0,1$).
По формулам: — упрощенной; — — — уточненной для жидкости; — — — то же для газа.

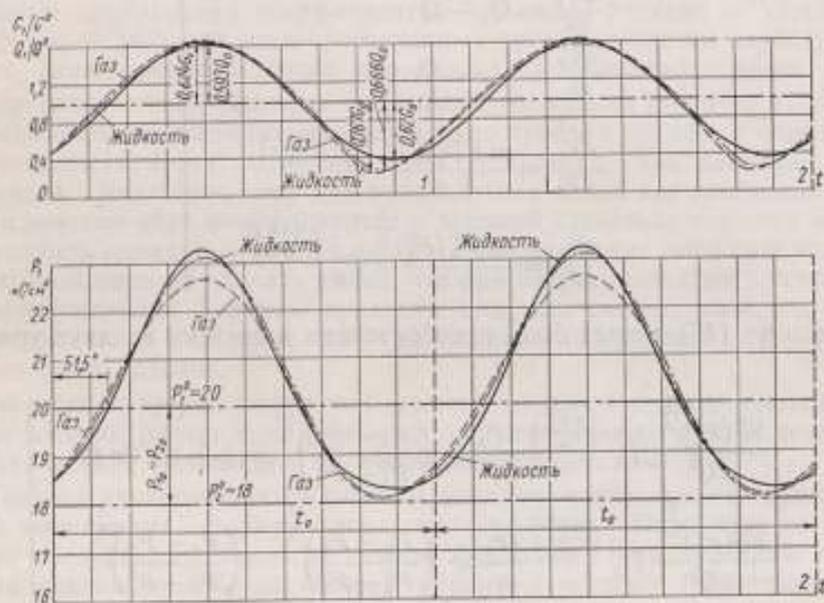


Рис. 8. Кривые пульсации расхода и давления в одноступенчатом фильтре ($k = 0,1$; $n = 1$; $a = 0,1$).
По формулам: — упрощенной; — — — уточненной для жидкости; — — — то же для газа.

где введены обозначения

$$c = \frac{Q_1^0}{V_1 (P_1^0 - P_2^0)}; \quad c_1 = \left(\frac{Q_1^0}{V_1} \right)^n P_1^0; \quad c_2 = \left(\frac{Q_2^0}{V_2} \right)^n P_2^0;$$

$$c_3 = \frac{Q_2^0}{V_2 (P_2^0 - P_3^0)}; \quad c_4 = \left(\frac{Q_2^0}{V_2} \right)^n P_2^0; \quad c_5 = P_3^0.$$

c, c_1, c_2, c_3, c_4 и c_5 — постоянные величины.

Для приближенного численного интегрирования системы (46) надо знать начальные значения x и y или, что то же, начальные значения P_1 и P_2 . Необходимые начальные данные P_1 и P_2 могут быть получены путем решения приближенной системы уравнения (7), написанной для двух ступеней демпфирования.

Переходим к двухступенчатой системе демпфирования жидкостного потока. Исходная система уравнений будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} Q &= Q^0 (1 + \sin 2\pi ft) \\ Q_1 &= Q^0 \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1^0 - P_2^0} \right)^{\frac{1}{2}} \\ Q_2 &= Q^0 \left(\frac{P_2 - P_3}{P_2^0 - P_3^0} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \frac{dV_1}{dt} &= Q_1 - Q \\ \frac{dV_2}{dt} &= Q_2 - Q_1 \\ \frac{dV_1}{dP_1} &= -\frac{V_1^0 (P_1^0)^{\frac{1}{n}}}{n} P_1^{-\left(\frac{n+1}{n}\right)} \\ \frac{dV_2}{dP_2} &= -\frac{V_2^0 (P_2^0)^{\frac{1}{n}}}{n} P_2^{-\left(\frac{n+1}{n}\right)} \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

Система (47) может быть преобразована в систему из двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_1^0 (P_1^0)^{\frac{1}{n}}}{n Q^0} P_1^{-\left(\frac{n+1}{n}\right)} \frac{dP_1}{dt} + \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1^0 - P_2^0} \right)^{\frac{1}{2}} &= 1 + \sin 2\pi ft \\ \frac{V_2^0 (P_2^0)^{\frac{1}{n}}}{n Q^0} P_2^{-\left(\frac{n+1}{n}\right)} \frac{dP_2}{dt} + \left(\frac{P_2 - P_3}{P_2^0 - P_3^0} \right)^{\frac{1}{2}} &= \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1^0 - P_2^0} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

Введем новые функции x и y , определяемые уравнениями

$$x = \frac{V_1^0}{Q^0} \left(\frac{P_1}{P_1^0} \right)^{-\frac{1}{n}}; \quad y = \frac{V_2^0}{Q^0} \left(\frac{P_2}{P_2^0} \right)^{-\frac{1}{n}}. \quad (49)$$

Тогда вместо системы уравнений (48) получим следующую систему:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= (c_1 x^{-n} - c_2 y^{-n})^{\frac{1}{2}} - (1 + \sin 2\pi ft) \\ \frac{dy}{dt} &= (c_3 y^{-n} - c_4)^{\frac{1}{2}} - (c_1 x^{-n} - c_2 y^{-n})^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

где введены обозначения

$$c_1 = \left(\frac{V_1^0}{Q^0} \right)^n \frac{P_1^0}{P_1^0 - P_2^0}; \quad c_2 = \left(\frac{V_2^0}{Q^0} \right)^n \frac{P_2^0}{P_1^0 - P_2^0};$$

$$c_3 = \left(\frac{V_2^0}{Q^0} \right)^n \frac{P_2^0}{P_2^0 - P_3^0}; \quad c_4 = \frac{P_3^0}{P_2^0 - P_3^0}.$$

В результате численного интегрирования уравнений (46) и (50) для указанных трех примеров получим табл. 2, в которой приведены вычисленные коэффициенты пульсации давления P_2 , перепада давления ($P_2 - P_3$) и расхода G_2 или Q_2 , а также относительные погрешности определения $P_{2 \max}$; $P_{2 \min}$; $G_{2 \max}$; $G_{2 \min}$; $Q_{2 \max}$; $Q_{2 \min}$ и коэффициентов пульсации $H_1 = \frac{G_{2 \max} - G_{2 \min}}{2G^0}$ и $H_1 = \frac{Q_{2 \max} - Q_{2 \min}}{2Q^0}$ по упрощенным формулам (41) и (42).

Как видно из кривых, приведенных на рис. 9, и данных табл. 2, погрешность определения коэффициентов пульсации расхода по упрощенной формуле (41) для всех просчитанных примеров систем двухступенчатого демпфирования также оказалась отрицательной и менее 10%.

Все проведенные подсчеты указывают на весьма широкие границы применимости упрощенных формул для построения кривых и определения соответствующих коэффициентов пульсации как давления, так и расхода. Учитывая, что для практических целей нет необходимости в определении этих коэффициентов с высокой степенью точности и что погрешность порядка $\pm 10\%$ (а иногда и выше) может считаться вполне допустимой, следует сделать вывод, что при одноступенчатом демпфировании упрощенные формулы пригодны для всех систем, имеющих критерий успокоения k не менее 0,1 — для жидкостных потоков и 0,1–0,2 — для газовых потоков.

Так как критерий успокоения меньше 0,1 почти не встречается, то, следовательно, расчет всех реальных одноступенчатых систем демпфирования можно производить по упрощенным формулам.

В случае двухступенчатой системы демпфирования граница применимости выведенных формул несколько сужается. Подобную систему можно рассчитывать по упрощенным формулам, если критерий успокоения эквивалентной, по общему объему и общему сопротивлению, одной ступени будет не менее 0,4–0,5.

Однако смысл применения двух ступеней заключается в достижении глубокого сглаживания, при котором критерий k эквивалентной одной ступени обычно будет более 0,5. Отсюда можно сделать вывод о применимости упрощенных формул также и для расчета большинства двухступенчатых систем.

Таблица 2

Величина	Размерность	Обозначение	Текучая среда		
			газ	жидкость	
Объем бачка № 1	м ³	V_1	0,5	0,25	5
" " № 2	"	V_2	0,5	0,25	5
Средний расход из бачка № 1	м ³ /сек	Q_1^c	0,1	0,1	0,1
Среднее давление в бачке № 1	кгс/см ²	P_1^0	20	20	20
То же, в бачке № 2	"	P_2^0	19	19	19
Давление в объекте	"	P_3^0	18	18	18
Частота пульсации	сек ⁻¹	f	1	1	1
Показатель политропы	—	n	1	1	1
Постоянная времени бачка № 1	—	$T_{1V} = \frac{V_1}{nQ_1^0}$	5	2,5	2,5
То же, бачка № 2	—	$T_{2V} = \frac{V_2}{nQ_2^0} \frac{P_2^0}{P_1^0}$	4,75	2,37	2,63
Критерий успокоения одноступенчатого фильтра, эквивалентного по перепаду давления и суммарной емкости	—	k	1	0,5	0,5
Коэффициенты пульсации:					
давления в бачке № 2	—	$\frac{P_{2max} - P_{2min}}{2P_2^0}$	0,0089	0,0242	0,0201
перепада давления на входе в объект	—	$\frac{P_{2max} - P_{2min}}{2(P_2^0 - P_3^0)}$	0,1505	0,46	0,382
расхода	—	$\frac{G_{2max} - G_{2min}}{2G^0}$	0,0854	0,22	0,194
то же по формуле (41)	—	"	0,0775	0,202	0,193
Погрешность определения по формулам (41) и (42):					
наибольшего давления в бачке № 2	0/0	δP_{2max}	-0,036	0,15	0,196
то же, наименьшего	"	δP_{2min}	0,165	-1,24	0,15
наибольшего расхода	"	δG_{2max} и δQ_{2max}	-0,75	-0,08	1,31
то же наименьшего	"	δG_{2min} и δQ_{2min}	2,36	4,65	2
коэффициента пульсации расхода	"	δH_1	-9,2	-8,2	-0,5

Далее, как следует из табл. 1 и 2, погрешность в определении коэффициента пульсации во всех случаях отрицательна. Это указывает на возможность, в случае необходимости, внесения соответствующих уточняющих поправок в результаты вычислений по упрощенным формулам.

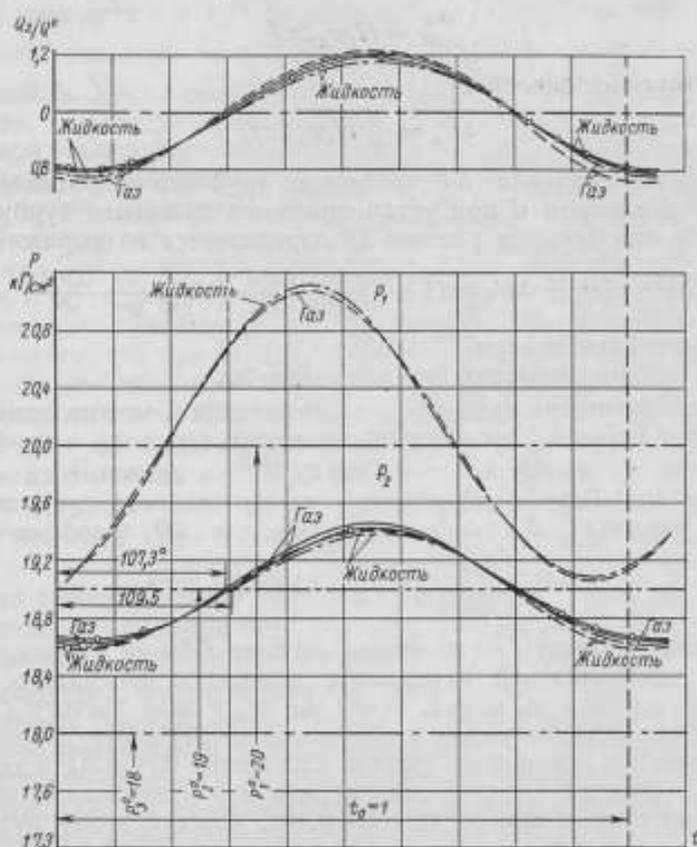


Рис. 9. Кривые пульсации расхода и давления в двухступенчатом фильтре.

По формулам: — упрощенной для газа; — о — о — то же для жидкости; — — — уточненной для газа; — — — то же для жидкости.

Влияние инерционных сил

В газовых и жидкостных фильтрах влияние сил инерции может проявляться главным образом в сопротивлениях, если последние трубного типа.

Давление $\Delta P_{ин}$, необходимое для ускорения среды, находящейся в трубном сопротивлении длиной l , может быть выражено формулой

$$\Delta P_{ин} = \frac{\gamma l}{g} \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Если пульсация расхода происходит по синусоиде, то зависимость скорости ω от средней скорости ω_0 и коэффициента пульсации H_1 имеет вид

$$\omega = H_1 \omega_0 \sin 2\pi ft,$$

откуда

$$\frac{dw}{dt} = H_1 \omega_0 2\pi f \cos 2\pi f t.$$

Полагая $t=0$, получим максимальное ускорение

$$\frac{dw}{dt} = H_1 \omega_0 2\pi f$$

и соответствующее давление

$$\Delta P_n = \frac{\gamma l}{g} H_1 \omega_0 2\pi f. \quad (51)$$

Перепад же давления ΔP на концах трубного сопротивления длиной l и диаметром d при установившемся движении турбулентного характера и при среднем расходе Q^0 определяется из выражения

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = (1 + \zeta) \frac{8\gamma}{g\pi^2} \frac{(Q^0)^2}{d^4} + \lambda \frac{l}{d} \frac{8\gamma}{g\pi^2} \frac{(Q^0)^2}{d^4}, \quad (52)$$

где ΔP_1 — входная потеря,

ΔP_2 — потеря давления по длине трубы.

Здесь коэффициент входного сопротивления ζ можно принять равным единице (начало трубы вдвинуто внутрь емкости), а коэффициент λ определять по формуле $\lambda = 0,3169 \text{Re}^{-0,25}$ в зависимости от числа Рейнольдса Re . Если одновременно длину трубного сопротивления l положить равной $10d$, то формула (52) для ΔP преобразуется так:

$$\Delta P = \frac{8\gamma}{g\pi^2} \frac{(Q^0)^2}{d^4} (2 + 31,64 \text{Re}^{-0,25}). \quad (53)$$

Эта формула позволяет по величине расхода Q^0 и по перепаду давления ΔP на сопротивлении определить диаметр d последнего, а затем и среднюю скорость ω_0 в нем. Имея же ω_0 и зная частоту f и коэффициент H_1 пульсации, можно по уравнению (51) найти давление ΔP_n , определяемое инерционными силами. Сравнение ΔP_n и ΔP и дает ответ на вопрос о степени влияния сил инерции и о возможности пренебрежения этими силами при расчете фильтра. Следуя этому пути, определим величину $\frac{\Delta P_n}{\Delta P}$ у газового и жидкостного одноступенчатого фильтра для различных частных случаев. Примем частоту пульсации $f = 1 \text{сек}^{-1}$ и критерий успокоения фильтра равным 0,5. Для этого критерия из табл. 1 получаем значение коэффициента пульсации H_1 для газа ($H_1 = 0,17$) и для жидкости ($H_1 = 0,16$). Тогда в случае газового фильтра (рабочая среда воздуха $P_1 = 10 \text{кгс/см}^2$) при сопротивлениях его ΔP , лежащих в пределах $0,1 \div 5 \text{кгс/см}^2$, и любых расходах в пределах $0,01 \div 10 \text{л/сек}$ давление ΔP_n будет, как правило, меньше $0,5\%$ ΔP .

Для жидкостного фильтра (рабочая среда воды) и тех же пределов расходов при значительных сопротивлениях фильтра (ΔP порядка 5кгс/см^2) значение величины ΔP_n будет не более 1% ΔP . С уменьшением сопротивления фильтра отношение $\frac{\Delta P_n}{\Delta P}$ станет возрастать и достигнет при $\Delta P = 0,1 \text{кгс/см}^2$ значения величины порядка $1 \div 20\%$. Последняя цифра получается только при большом расходе Q^0 порядка 10л/сек .

Таким образом, в подавляющем большинстве рассмотренных случаев инерционное сопротивление является малой величиной, которой можно пренебречь.

С увеличением критерия успокоения k инерционное сопротивление делается еще меньше. Если принять очень малый критерий успокоения $k = 0,1$, при котором (см. табл. 1) коэффициент пульсации H_1 равен для жидкости 0,67 и для газа 0,74, то и в этом случае инерционный напор возрастет по сравнению с ранее приведенными цифрами лишь в 4,19 раза для жидкости и в 4,35 раза для газа. Поэтому и здесь отношение $\frac{\Delta P_{in}}{\Delta P}$ будет невелико, за исключением случая больших Q^0 и малых ΔP для жидкости. Увеличение частоты пульсации f увеличивает инерционный напор. Но следует иметь в виду, что большая частота встречается обычно при малых расходах, и преимущественно при газовых потоках, где влияние инерционного напора незначительно, а, кроме того, при большой частоте критерий успокоения, как правило, не имеет малых значений, потому что пульсации высокой частоты легко сглаживаются фильтрами. Таковы выводы о влиянии сил инерции при трубном сопротивлении, у которого $l = 10d$. Если же сопротивление осуществлялось в виде местного сужения, то влияние сил инерции будет еще более снижено. Заметим, что при этом диаметр местного сужения почти не будет отличаться от диаметра трубного сопротивления потому, что при $l = 10d$ сопротивление по длине составляет всего около 10% ΔP , а примерно 90% ΔP приходится на сопротивление входа. Таким образом, особого смысла в применении трубного сопротивления нет.

Во всех случаях учет инерционных сил в газовом или жидкостном фильтре приведет лишь к некоторому незначительному снижению коэффициента пульсации расхода. Таким образом, силы инерции как бы помогают работе газового или жидкостного фильтра, а расчет емкости и сопротивления фильтра без учета сил инерции приводит лишь к некоторому запасу в размере емкости или величины сопротивления фильтра.

Если вместе с фильтром рассматривать и всю длину идущего после него производственного трубопровода, то инерционный напор возрастет, но не очень значительно, так как при приведении массы среды, находящейся в трубопроводе, к скорости в отверстии сопротивления надо эту массу умножить на отношение диаметров (сопротивления и трубопровода), взятых в 4-й степени.

Выводы

1. Работа одноступенчатого фильтра определяется критерием успокоения k , который является произведением частоты пульсации и постоянной времени фильтра. Число Ходжсона является частным случаем этого критерия успокоения.

2. Степень и кратность успокоения одноступенчатого фильтра следует определять по формулам (21) и (22) в зависимости от критерия успокоения.

3. Выгодность применения многоступенчатых фильтров растет с ростом критерия успокоения k . При малых значениях k ($k < 1$) применение многоступенчатых фильтров нецелесообразно.

4. Наиболее выгодное распределение емкостей и сопротивлений между двумя ступенями двухступенчатого фильтра следует производить, руководствуясь уравнениями (25) и (26) и кривыми на рис. 7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила 27—54 по применению и поверке расходомеров с нормальными диафрагмами, соплами и трубами Вентури, Комитет стандартов, мер и измерительных приборов, Машгиз, 1955.
2. Кремлевский П. П., Сглаживание пульсирующих потоков жидкости, газа и пара, Сборник НТО приборостроительной промышленности, вып. III, «Теплоэнергетические приборы и регуляторы», Машгиз, 1956.
3. Herning F. und Schmidt Ch., Durchflussmessung bei pulsierender Strömung Theoretische Grundlagen zur Fehlerermittlung und Betriebsversuche, z. VDI, Bd. 82, № 38, 1938, S. 1107—1114.
4. Schmidt Ch., Messfehler bei der Durchflussmessung pulsierender Gasströme, z. VDI, Bd. 84, № 33, 1940, S. 596—598.

Поступила в редакцию
31/IX 1959 г.

В. Л. ЛАССАН

ВНИИМ

**ОБРАЗЦОВАЯ ТАХОМЕТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ В ПРЕДЕЛАХ
5 ÷ 60 000 об/мин**

В статье приведены выбор метода, описание, результаты исследования, анализ погрешностей новой установки для поверки тахометров с пределами измерения 5 ÷ 60 000 об/мин и погрешностью 0,01%

Развитие современной техники неразрывно связано с повышением угловых скоростей вращения ведущих и ведомых валов машин и механизмов. В настоящее время имеются механизмы, угловые скорости которых достигают 100 000 об/мин. В связи с этим появляются новые типы приборов, с более широким диапазоном измерения угловых скоростей. Одновременно возрастают требования к точности измерения этих скоростей. Ранее существовавшие образцовые установки для поверки и градуировки тахометров уже не в состоянии в полной мере обеспечить поверку всех существующих в настоящее время типов этих приборов. Поэтому возникла необходимость создать новую образцовую установку, обладающую по сравнению с существующими более широким диапазоном угловых скоростей и имеющую большую точность. Такая установка создана во ВНИИМ. Минимально необходимый диапазон воспроизведения и измерения угловых скоростей новой установкой лежит в пределах от 5 до 60 000 об/мин при погрешности измерений, не превышающей 0,01%.

Краткий обзор существующих установок для поверки тахометра

Применяемые в настоящее время образцовые тахометрические установки можно разделить на 4 группы по следующим признакам: 1) по назначению — универсальные и специальные, т. е. предназначенные для поверки группы приборов специального назначения; 2) по диапазону создаваемых и измеряемых угловых скоростей; 3) по характеру изменения угловых скоростей (непрерывное изменение по диапазону или ряд дискретных значений угловой скорости); 4) по величине погрешности угловой скорости.

В табл. 1 приведены основные характеристики различных современных тахометрических установок.

Таблица 1

Название или тип установки	Назначение	Характер изменения скорости	Диапазон, об/мин	Погрешность, %	Направление шпинделя установки
КТ-1	Специальное	Дискретный	50—600	0,01	Горизонтальное и вертикальное
КТУ-1	Специальное, поверка авиационных тахометров	.	200—4000	0,1	Горизонтальное
Германской фирмы „Дауте Верке“*	Универсальное	Непрерывный	0—6000	—	То же
Национального бюро стандартов США	.	Дискретный	До 12 000	0,1	.
Швейцарской фирмы „Жакет“	.	Непрерывный	30—40 000	0,5	.
Завода „Эталон“	.	Дискретный	30—30 000	0,1	Горизонтальное и вертикальное

* Погрешность установки „Дауте Верке“ зависит от погрешности частоты питающего ее переменного 3-фазного тока.

Установка КТ-1

В этой установке постоянные значения угловых скоростей обеспечиваются с помощью синхронного мотора, который приводится в действие переменным электрическим током, получаемым от генератора образцовой частоты. Угловая скорость вращения мотора определяется значением образцовой частоты, подаваемой на его клеммы. Синхронный мотор вращает одновременно 16 валиков, которые образуют своеобразный магазин образцовых угловых скоростей от 50 до 600 об/мин через каждые 50 об/мин и от 600 до 1000 об/мин через каждые 100 об/мин. Погрешность значений угловых скоростей не превышает 0,01%. Установка предназначена для поверки небольшой группы тахометров специального назначения.

Установка КТУ-1

Датчиком служит 2-фазный генератор. Токи в двух обмотках генератора сдвинуты по фазе на угол 90° . С помощью индуктивного сопротивления ток в одной из обмоток получает, кроме того, дополнительный сдвиг по фазе на угол 90° . В результате токи в двух обмотках оказываются сдвинутыми по фазе на угол 180° . Магазин активных сопротивлений дает возможность подобрать таким образом сопротивления, определяющие угловую скорость, чтобы абсолютные значения находящихся в противофазе токов были равны.

Погрешность данного способа измерения угловой скорости определяется главным образом непостоянством индуктивности дросселя и составляет величину порядка 0,1%.

Установка «Дауте Верке» (Германия)

Установку приводит в движение синхронный мотор 3-фазного переменного тока. С помощью коробки скоростей выходным шпинделям можно через каждые 100 об/мин задавать угловую скорость в пределах 100—5900 об/мин. Помимо этого, посредством планетарной передачи от отдельного моторчика, регулируемого реостатом, угловую скорость вращения выходных шпинделей можно изменять в пределах каждых 100 оборотов. Дополнительное изменение значения угловой скорости измеряют контрольным тахометром с пределом 0—100 об/мин и с ценой деления 0,5 об/мин. Таким образом, установка позволяет задавать выходным шпинделям любую скорость в пределах 0—6000 об/мин. Погрешность измерения угловой скорости определяется отклонением частоты сети переменного тока от нормального значения, равного 50 гц, и погрешностью контрольного магнитного тахометра. Основным недостатком данной установки является зависимость угловых скоростей от частоты питающего ее переменного тока электрической сети.

Установка фирмы «Жакет» (Швейцария)

Установку приводит в движение мотор 3-фазного переменного тока мощностью 400 вт. Плавная регулировка скорости вращения основного вала установки осуществляется механическим шаровым регулятором скорости. Пределы плавной регулировки скорости 4:1. Угловые скорости в пределах 30—40 000 об/мин могут быть получены на 6 выходных валиках. Каждый валик имеет свой определенный диапазон угловых скоростей (30—120, 100—400, 300—1200, 1000—4000, 3000—12 000, 10 000—40 000 об/мин). Измеряют угловую скорость центробежным тахометром, погрешность которого не превышает 0,5%. Установка предназначена для проверки тахометров с горизонтальным расположением осей.

Установка завода «Эталон»

Эта установка является конструктивно преобразованной установкой ВНИИМ, разработанной еще в 1938 г. Основной вал ее вращает шунтовой двигатель постоянного тока, питаемый от сети переменного тока с помощью системы Леонардо. Вал соединен с редуктором, представляющим коробку скоростей, которая позволяет получить на горизонтальном и вертикальном шпинделях любую угловую скорость в пределах 30—10 000 об/мин. Подключение высокооборотной приставки позволяет получить угловые скорости до 30 000 об/мин. Схема Леонардо обеспечивает плавную регулировку угловых скоростей. Измерение угловых скоростей производят стробоскопическим методом. Стробоскопический диск освещают вспышками света неоновой лампы, на которую короткие импульсы тока подаются от пьезоэлектрического генератора с делителем частоты до 50 гц.

Стробоскопический метод обеспечивает получение дискретных значений угловых скоростей с погрешностью не выше 0,1%. Приближенное значение угловой скорости может быть получено с помощью вспомогательного электротахометра.

К недостаткам этой установки следует отнести: 1) довольно сложную систему питания, 2) сложный редуктор со значительным количеством различных шестерен, нарушающих постоянство угловых скоростей,

а также 3) необходимость вспомогательного тахометра, ошибка которого может привести к промаху наблюдателя при определении порядка появления стробоскопического изображения соответствующей фигуры.

Метод воспроизведения и измерения угловых скоростей образцовой тахометрической установки

Современные пьезокварцевые генераторы поддерживают значения частоты с достаточно высокой степенью точности. Поэтому наиболее точным методом создания или измерения угловой скорости является метод, который обеспечивает непосредственную связь угловой скорости с частотой электрического тока, питающего синхронный мотор, создающий вращательное движение. Из рассмотренных установок наиболее высокую точность создания и измерения угловых скоростей (погрешность $\approx 0,01\%$) обеспечивает установка КТ-1. В ней скорость вращения синхронного мотора определяется значением частоты электрического тока, получаемого от образцового генератора. Однако применить этот метод для универсальной установки не представляется возможным, так как получение большого количества дискретных значений угловых скоростей связано с изготовлением очень сложной и громоздкой коробки скоростей и применением большого количества шестерен, нарушающих постоянство угловой скорости. Применение электрического моста с индуктивной и активными ветвями, как это сделано в установке КТУ-1, также не представляется возможным, так как уменьшение погрешности этого метода до величин, меньших $0,1\%$, ограничено нестабильностью индуктивности дросселя.

В установках завода «Эталон» и Национального бюро стандартов США применен стробоскопический метод.

Рассмотрим этот метод и его недостатки. Для того чтобы наблюдать стробоскопический эффект, необходимо вращающийся предмет освещать периодически повторяющимися короткими вспышками света. Длительность каждой световой вспышки должна быть такой, чтобы предмет за время вспышки переместился на расстояние, незаметное для глаза. Кроме того, частота вспышек $f_{всп}$ в герцах должна равняться:

$$f_{всп} = n \text{ об/сек.}$$

Наблюдения при измерениях угловой скорости производят с помощью специального стробоскопического диска, на котором по концентрическим окружностям нанесен ряд одинаковых фигур. В случае непосредственного освещения вращающегося предмета он за время между двумя последовательными вспышками должен совершить один или несколько полных оборотов, т. е. при этом

$$f_{всп} = \frac{n}{i},$$

где i — ряд целых чисел, определяющих порядок появления стробоскопического изображения.

В случае применения стробоскопического диска должно удовлетворяться следующее равенство:

$$f_{всп} = k \frac{n}{i},$$

где k — количество фигур на концентрических окружностях диска.

Угловую скорость N обычно измеряют в оборотах в минуту, поэтому

$$60f_{\text{осн}} = \frac{60kn}{i}$$

или

$$60f_{\text{осн}} = \frac{kN}{i}.$$

Значение $i=0$ соответствует остановке диска, а $i=1$ соответствует первой остановке ряда стробоскопических фигур из k фигур в ряду.

Применение современных кварцевых генераторов обеспечивает достаточно высокую точность и стабильность значения частоты вспыхив. Однако из этого не следует, что с такой же степенью точности стробоскопическим методом измеряют и угловую скорость; ее измеряют при этом с более низкой степенью точности вследствие того, что стробоскопический эффект можно наблюдать не только при точном соблюдении приведенного выше равенства.

Допустим, что

$$N - i \frac{60f}{k} = \pm \Delta N.$$

Если значение ΔN невелико, то стробоскопический эффект наблюдается, но только ряд фигур на стробоскопическом диске будет медленно вращаться в зависимости от знака ΔN в ту или иную сторону. Скорость вращения фигур будет зависеть от величины ΔN . Если $\Delta N=0$, то фигуры останавливаются. Соответствующая погрешность наблюдения, обусловленная трудностью фиксации полной остановки фигуры, имеет порядок 0,1%. Эта величина и определяет относительную погрешность измерения угловой скорости рассматриваемым методом.

Метод воспроизведения угловых скоростей

Одним из главных условий, значительно облегчающих измерения и позволяющих достигнуть высокой степени точности, является стабильность измеряемой величины, в рассматриваемом случае — угловой скорости. Постоянства угловой скорости сравнительно просто достигают применением синхронного мотора, питаемого переменным током от пьезокварцевого генератора. Однако такой двигатель непригоден для широкого диапазона угловых скоростей. Для расширения этих пределов при заданном электрическом генераторе необходимо ввести промежуточное звено, позволяющее получить большое количество дискретных значений угловых скоростей. Таким звеном может служить специальный делитель частоты, с помощью которого на синхронный мотор может быть подан ряд дискретных значений образцовых частот. Кроме того, универсальная установка должна быть достаточно мощной, чтобы обеспечивать поверку тахометров различных типов, поэтому целесообразно применить синхронный мотор в качестве стабилизатора угловой скорости основного вала, приводимого во вращение обычным шунтовым двигателем. В качестве делителя частоты может быть применен фотоэлектрический делитель, который обеспечивает необходимое количество дискретных значений частоты. Погрешность измеренных значений угловой скорости в этом случае определяется исключительно погрешностью значения частоты генератора.

Вращение вспомогательных шпинделей установки должно быть равномерным, лишенным периодических изменений угловой скорости, так как последние приведут к вибрациям, которые могут исказить показа-

ния поверяемого тахометра. Поэтому необходимо стремиться к упрощению механического редуктора установки, к сведению до минимума количества его шестерен.

Применение в качестве двигателя шунтового мотора постоянного тока обеспечивает плавную регулировку скорости. Но регулировка ско-

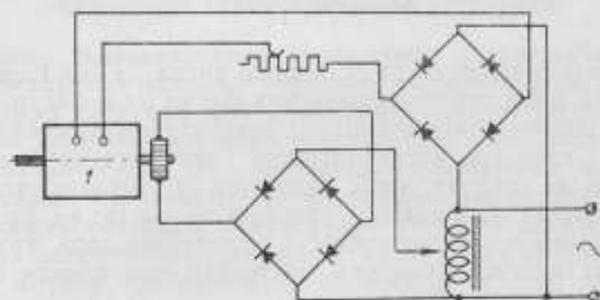


Рис. 1. Схема установки с питанием шунтового мотора от сети переменного тока через селеновые или германиевые выпрямители.

1 — двигатель постоянного тока

рости только в шунтовой цепи не позволяет получить достаточно широкий диапазон, ограничивая его 1,5—2-кратным изменением угловой скорости вала мотора. Поэтому, чтобы упростить редуктор, необходимо увеличить диапазон регулировки скоростей вала мотора.

Анализ различных схем привел к установке (рис. 1), в которой питание шунтового мотора производят от сети переменного тока через селе-

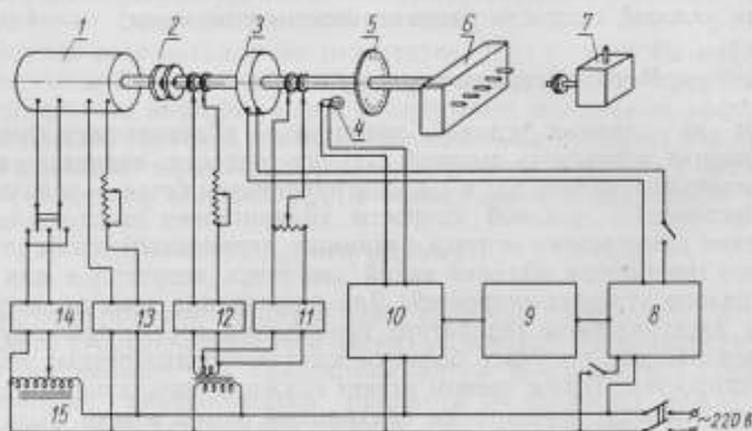


Рис. 2. Блок-схема тахометрической установки от 5 до 60 000 об/мин с погрешностью 0,01%

1 — шунтовый мотор постоянного тока мощностью 0,7 кка; 2 — магнитная муфта; 3 — стабилизатор оборотов; 4 — неоновый или ксеноновый импульсный лампа; 5 — стробоскопический диск; 6 — редуктор с 5 горизонтальными шпинделями; 7 — переходный релюитер на вертикальный шпиндель; 8 — усилитель; 9 — фотоэлектрический делитель частоты; 10 — пьезокварцевый генератор с делителями частоты до 1000, 600 и 50 гц; 11 — 14 — селеновые или германиевые выпрямители; 15 — вентор напряжения.

новые или германиевые выпрямители. Эта схема, так же как и схема Леонардо, допускает регулировку числа оборотов в широких пределах. Шунтовая обмотка двигателя питается через реостат от 2-тактного селенового выпрямителя. Цепь якоря питается также от селенового выпрямителя, напряжение на клеммах которого можно изменять в широких

пределах. Сопротивление селеновых шайб прямому току невелико, поэтому в цепи якоря даже при малом напряжении обеспечивается ток, вполне достаточный для надежной работы двигателя.

Описание тахометрической установки

Схема вновь созданной установки приведена на рис. 2. Она состоит из нескольких блоков. Установку приводит в действие шунтовой мотор (первый блок) типа ПН-0,7 *ка*, ротор которого соединен магнитной муфтой с главным валом установки. Питается двигатель от сети переменного тока, напряжением в 220 в, через селеновые выпрямители. Второй блок включает главный вал, стабилизатор оборотов, якорь которого укреплен на валу, и стробоскопический диск, также укрепленный на валу. Третий блок составляют основной и дополнительный редукторы угловых скоростей. Первый из них содержит 5 горизонтальных шпинделей, а второй — 1 вертикальный. Передаточные числа зубчатых передач, примененных в редукторе: 0,05; 0,20; 1,00; 5,00; 20,00.

Блок питания

Блок питания составляют: шунтовой двигатель, вариатор напряжения и выпрямитель.

Шунтовой двигатель допускает регулировку угловой скорости в пределах от 100 до 3000 *об/мин*, которую производят, изменяя напряжения на зажимах якоря. Вариатор напряжений включен между сетью и выпрямителем. Кроме того, дополнительную регулировку можно осуществить, изменяя сопротивление, включенное последовательно с шунтовой обмоткой. Для изменения направления вращения ротора двигателя введен специальный переключатель.

Передаточный блок

Главный вал приводит во вращение магнитная муфта, исключая жесткую связь между ротором двигателя и валом. Вследствие этого нестабильность угловой скорости ротора двигателя не отражается на работе стабилизатора оборотов и, соответственно, на постоянстве угловой скорости валов.

Стабилизатор оборотов представляет специально разработанный синхронный мотор со следующими характеристиками: а) синхронная скорость равна двойной частоте питания, б) якорь мотора представляет 60-полюсный электромагнит, питаемый постоянным током (2-3 *а*) от выпрямителя. На статор стабилизатора оборотов подают переменный ток различной частоты от усилителя мощности. Последний соединен с фотоэлектрическим делителем частоты, управляемым пьезокварцевым генератором (генератор завода «Эталон»). Делитель частоты позволяет получить следующие дискретные значения частот: от 50 до 750 *гц* через каждые 25 *гц* и от 750 до 1500 *гц* — через 50 *гц*. Соответствующие значения угловых скоростей главного вала (в *об/мин*) будут в 2 раза больше. Фотоэлектрический делитель состоит из синхронного мотора, диска, укрепленного на валу мотора, и фотоэлемента с осветителем.

Диск разделен на 29 концентрических окружностей, на каждой из которых имеется определенное количество прозрачных штрихов. При угловой скорости вращения диска 5 *об/мин* значение частот будет изменяться в зависимости от номера ряда от 50 до 750 *гц*, а при скорости вра-

щения 10 об/мин — от 100 до 1500 гц. Шаг между прозрачными полосками для всех рядов диска одинаковый. Специальный механический переключатель позволяет перемещать фотоэлемент вместе с лампочкой вдоль диска от центра к окружности с шагом, равным расстоянию между концентрическими окружностями диска. На рис. 3 показан диск фотоделителя; на верхней панели видны шкала и рукоятка, которая служит для переключения частот.

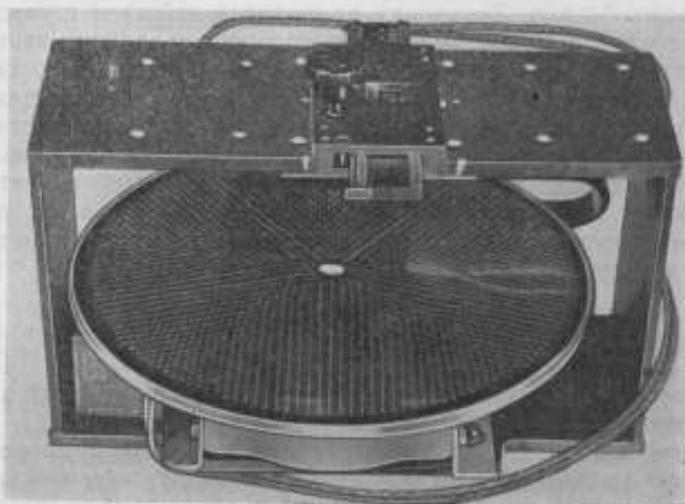


Рис. 3. Диск фотоделителя.

Редукторы

На рис. 4 приведена кинематическая схема редукторов. Вспомогательный редуктор служит для передачи вращения от горизонтального вала к вертикальному. Основной редуктор состоит из 4 пар шестерен.

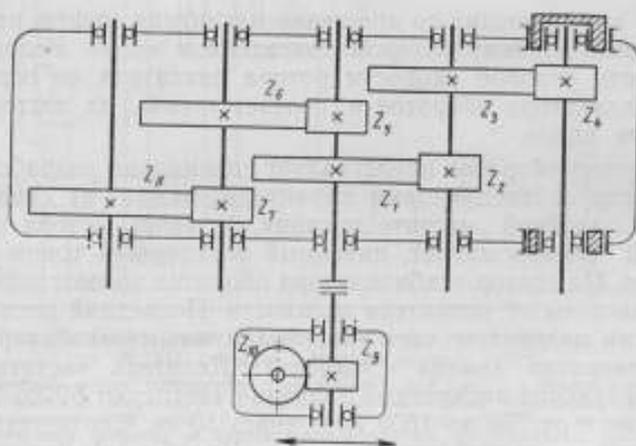


Рис. 4. Кинематическая схема редукторов.

Передаточные числа отдельных пар (от ведущего к ведомому валу): 0,2 и 0,25 — в сторону понижения угловой скорости и 5 и 4 — в сторону повышения. Общие передаточные числа, соответственно, равны 0,05 и 20. Шестерни для плавности хода выполнены косозубыми и изготовлены из

текстолита. Главный вал и валы шестерен выведены из коробки скоростей через специальные лабиринты, выполняющие роль сальников. К 5 шпинделям основного редуктора может быть присоединен испытуемый тахометр. Для уменьшения износа шестерен и подшипников последнего высокоскоростного вала его можно отключать от приводного вала. Добавочный редуктор имеет пару винтовых косозубых шестерен, также находящихся в масляной ванне. Вспомогательный редуктор с вертикальным шпинделем перемещается в горизонтальных направляющих вдоль ряда шпинделей основного редуктора и может быть подключен по выбору к любому из них за исключением последнего. Эти шпиндели позволяют получить значения угловых скоростей, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Шпиндель	Угловая скорость, об/мин	
	предел	кратная
1	5 ÷ 150	2,5
2	20 ÷ 600	10
3	100 ÷ 3000	50
4	500 ÷ 15 000	250
5	2000 ÷ 60 000	1000
Вертикальный	5 ÷ 15 000	—

На рис. 5 показан общий вид тахометрической установки. Она состоит из 2 отдельных узлов. В первом помещен двигатель, магнитная муфта, стабилизатор оборотов, стробоскопический диск с неоновой лампой и редуктор, во втором — выпрямители, трансформаторы, кварцевый генератор, фотоэлектрический делитель, усилитель и элементы управ-

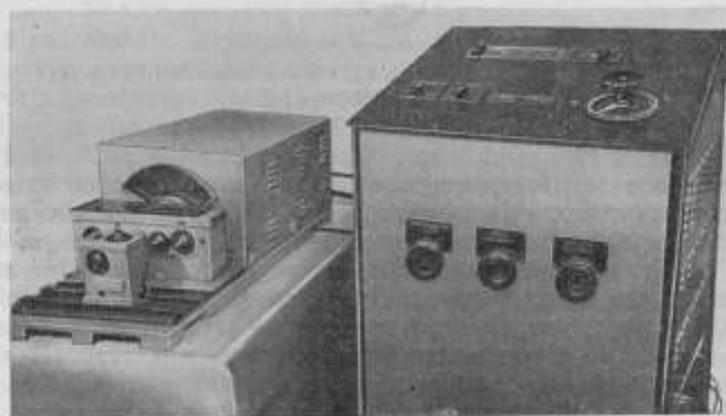


Рис. 5. Общий вид тахометрической установки.

ления установкой. Оба узла соединены кабелем. Заданная угловая скорость устанавливается без вспомогательного тахометра с помощью стробоскопического диска. Такой способ получения необходимых дискретных значений угловых скоростей надежен, так как при этом обеспечивается самоконтроль, избавляющий поверителя от ошибки. Стробоскопический диск разделен на 4 concentric окружности. На внутренней

первой окружности изображены 3 фигуры (К-3), на второй — 15 (К-15), на третьей — 30 (К-30) и на четвертой — 60 (К-60). При частоте вспышек неоновой лампы 50 гц первый ряд фигур К-3 останавливается через каждые 1000 об/мин, второй ряд фигур — через 200, третий — через 100 и четвертый — через 50 об/мин.

С помощью этого стробоскопического диска на основном валу могут быть заданы любые дискретные значения угловой скорости в пределах 100—3000 об/мин, кратные 50 об/мин. Любая скорость основного вала из указанных выше может быть засинхронизирована путем подачи на стабилизатор соответствующей частоты. Наличие магнитной муфты позволяет осуществить достаточно уверенную и жесткую стабилизацию скорости. Свидетельством наличия стабилизации является полная остановка соответствующего ряда фигур стробоскопического диска.

Экспериментальные исследования

При исследовании режима работы стабилизатора, управляемого мощным усилителем, было замечено интересное явление. Когда с конечного мощного каскада случайно было выключено анодное напряжение, синхронизатор продолжал работать так же уверенно, как и с подаваемым анодным напряжением. Исследование этого явления показало, что анод-

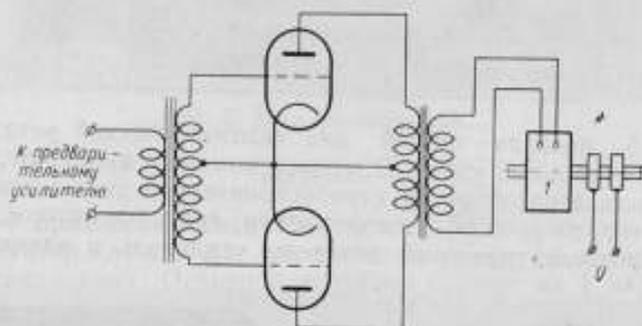


Рис. 6. Выходная часть схемы стабилизации угловой скорости.

I — стабилизатор оборотов.

ное напряжение постоянного тока выходного мощного каскада для работы синхронизатора является совершенно излишним и даже затрудняет синхронизацию скорости. Якорь стабилизатора образует многополюсную систему электромагнитов постоянного тока. При вращении якоря двигателем в статорной обмотке стабилизатора в момент стабилизации индуцируется переменный ток той же частоты, которая в данный момент подается с усилителя на синхронизатор. При выключенном анодном напряжении усилителя лампы конечного каскада выполняют роль переменного сопротивления, величина которого меняется с частотой, подаваемой на их сетки, при этом постоянное анодное напряжение заменяется переменным напряжением, генерируемым стабилизатором (рис. 6). Схема начинает работать, когда частота тока, подаваемого на аноды ламп от стабилизатора, делается равной частоте, подводимой к сеткам выходных ламп. Помимо получения уверенной работы стабилизатора, эта схема значительно упростила усилитель мощности, так как отпала необходимость в громоздком выпрямительном устройстве, питающем конечный каскад мощного усилителя.

Погрешности установки

Общая относительная погрешность создаваемых установкой дискретных значений угловых скоростей определяется совокупностью погрешностей, вносимых: 1) отклонением значения частоты образцового пьезокварцевого генератора от номинального значения, 2) нестабильностью частоты генератора, 3) непостоянством шага и зазорами между зубьями шестерен и 4) небольшими фазными колебаниями угловой скорости около среднего значения при работе стабилизатора. Эти погрешности могут быть разделены на систематические и случайные. К систематическим относятся погрешности, вызываемые отклонениями значения частоты пьезокварцевого генератора от его номинального значения. Все остальные упомянутые погрешности являются случайными или периодическими.

Суммарные значения среднеквадратичной относительной погрешности дискретных угловых скоростей можно выразить следующим уравнением:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\Delta N_g}{N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_c}{N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_d}{N}\right)^2},$$

где

$\frac{\Delta f}{f}$ — относительная погрешность плюс нестабильность частоты пьезокварцевого генератора;

$\Delta N_g = \frac{\Delta \varphi_g}{\Delta t_1}$ — погрешность периодического характера вследствие непостоянства шага зубьев шестерен;

$\Delta N_c = \frac{\Delta \varphi_c}{\Delta t_2}$ — погрешность вследствие наличия периодических фазовых изменений угловой скорости;

$\Delta N_d = \frac{\Delta \varphi_d}{\Delta t_3}$ — погрешность, возникающая вследствие наличия зазоров между зубьями шестерен.

Одной из главных погрешностей, имеющих как систематическую, так и случайную составляющие, является отклонение действительного значения частоты пьезокварцевого генератора от его номинального значения. Это отклонение частоты от номинального значения 10 000 гц и изменение его во времени не должны превышать заданные 0,01%. Подгонка действительного значения частоты пьезокварцевого генератора к номинальному значению осуществляется с помощью реактивного элемента схемы. Колебания частоты с течением времени происходят вследствие изменения температуры окружающей среды. Обычно температурный коэффициент частоты пьезокварцевого элемента составляет несколько единиц $\times 10^{-5}$.

Чтобы обеспечить неизменность частоты во времени, пьезокварцевый элемент помещен в термостат, уровень температуры которого поддерживается с помощью терморегулятора постоянным, в пределах 1°С. Таким образом частота генератора остается постоянной в пределах температурного коэффициента частоты кварцевой пластинки. Оценку погрешностей действительного значения частоты производили следующим образом. На одну из пар дефлекторных пластин катодного осциллографа был подан от пьезокварцевого генератора переменный ток частотой 1000 гц, а на другую — эталонная частота 1000 гц. В случае полного равенства этих двух частот на экране осциллографа должен быть виден неподвижно стоящий эллипс. Но так как действительные значения

частоты пьезокварцевого генератора несколько отличаются от его номинального значения 1000 гц (или, что то же, — от значения эталонной частоты), то этот эллипс при наблюдениях виден вращающимся. Один полный поворот эллипса соответствует отклонению действительного значения частоты генератора от его номинального значения на один период. Период поворота эллипса измеряли секундомером. Измерения производили через 15 мин после включения кварцевого генератора, спустя час измерения были повторены. Результаты измерений даны в табл. 3, где значения относительной погрешности частоты даны в $\times 10^{-5}$ ед., или

Таблица 3

Отчет через 1 мин	Период поворота эллипса, сек	Погрешность частоты через 15 мин после включения генератора	Период поворота эллипса, сек	Погрешность частоты через час после 1-го наблюдения
1	36,4	2,75	50,0	2,00
2	37,4	2,68	50,0	2,00
3	37,5	2,68	51,0	1,96
4	38,0	2,63	50,0	2,00
5	39,5	2,53	49,5	2,02
6	39,5	2,53	49,5	2,02
7	39,5	2,53	50,0	2,00
8	40,2	2,49	49,0	2,04
9	41,0	2,47	48,5	2,06
10	41,5	2,41	49,0	2,04

в $10^{-3}\%$. Из табл. 3 видно, что вначале относительная погрешность изменялась довольно быстро в пределах единицы шестого знака, что связано с установлением температурного режима термостата. По прошествии часа эти изменения наблюдались лишь в пределах единицы седьмого знака. Во всех случаях относительное отклонение значения частоты от номинального значения не превышало $2,8 \cdot 10^{-5}$, или $2,8 \cdot 10^{-3}\%$, т. е. относительная систематическая погрешность угловой скорости в 3,5 раза меньше заданного значения 0,01%. Случайная относительная погрешность значения частоты, т. е. величина, характеризующая нестабильность частоты пьезокварцевого генератора $\frac{\Delta f}{f}$, после прогрева генератора не превышает $0,4 \cdot 10^{-5}$, или $0,4 \cdot 10^{-3}\%$, т. е. $\frac{\Delta f}{f}$ не превосходит $3 \cdot 10^{-4}$ об/мин.

Погрешности, вносимые непостоянством шага зацепления шестерен, имеют периодический характер. При изготовлении зубьев шестерен по 2-му классу точности допускается неравномерность их шага порядка 0,01 мм. Если радиус шестерен принять равным 40 мм, то

$$\Delta \varphi_z = \frac{0,01}{2\pi \cdot 40} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ оборота,}$$

тогда

$$\Delta N_z = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{\Delta t_1} \text{ об/сек.}$$

В отдельных случаях эта погрешность может быть довольно значительной, однако вследствие периодичности она не влияет на среднее значение

ние угловой скорости. Кроме того, из-за кратковременности эта погрешность не повлияет и на показания поверяемого тахометра.

Рассмотрим погрешность

$$\Delta N_c = \frac{\Delta \varphi_c}{\Delta t_2},$$

т. е. погрешность, возникающую вследствие фазовых изменений угловых скоростей при работе стабилизатора оборотов. В момент стабилизации замечаются некоторые покачивания стробоскопической фигуры относительно ее среднего положения, затем это покачивание становится на глаз незаметным. Во всяком случае, при диаметре $d = 200$ мм величина фазовых качаний не превышает 0,1 мм. Если принять период этого колебания таким же, какой имеет место в момент синхронизации, то $\Delta t_2 = 1$ сек и

$$\Delta \varphi_c = \frac{0,1}{2 \cdot 100\pi} = 0,000167 \text{ оборота.}$$

Подставив значения ΔN и Δt_2 , получим

$$\Delta N_c = \frac{0,000167}{1} \text{ об/сек} = 0,000167 \cdot 60 \text{ об/мин} \approx 0,01 \text{ об/мин.}$$

Поэтому относительное изменение угловой скорости для наихудшего случая, т. е. для самой малой угловой скорости работы стабилизатора оборотов $N = 100$ об/мин, составит

$$\frac{\Delta N_c}{N} = \frac{0,01}{100} = 1 \cdot 10^{-4}, \text{ или } 0,01\%.$$

Погрешность, возникающая вследствие наличия зазоров между зубьями, в нашем случае не будет иметь влияния на измерение угловой скорости, так как нагрузка в виде подключаемых к установке тахометров будет постоянной, следовательно, «люфты» будут при этом выбираться.

Таким образом, случайная относительная погрешность дискретных значений угловых скоростей для худшего случая синхронизации при 100 об/мин будет иметь значение,

$$\frac{\Delta N}{N} = \sqrt{(1 \cdot 10^{-4})^2 + (3 \cdot 10^{-5})^2} \approx 1 \cdot 10^{-4},$$

т. е. составляет 0,01%.

Точный анализ мгновенных значений погрешностей может быть произведен лишь при наличии специального высокоточного тахографа, который мог бы записывать мгновенные значения угловой скорости, однако создание такого прибора является самостоятельной и достаточно трудной задачей.

Заключение

Созданная образцовая тахометрическая установка позволяет воспроизводить ряд дискретных значений угловых скоростей в пределах от 5 до 60 000 об/мин. Погрешность дискретных значений угловых скоростей в указанных пределах не превышает 0,01%.

Установка пригодна для проверки и градуировки почти всех существующих в обращении типов тахометров с вертикальным и горизонтальным расположением валов.

В. С. ШКАЛИКОВ
ВНИИМ

ОБРАЗЦОВАЯ ВИБРОУСТАНОВКА

В статье дано описание образцовой установки для поверки приборов, измеряющих механические вибрации в диапазоне частот $50 \div 10\,000$ гц. Виброплатформа работает на электродинамическом возбуждении колебательной системы.

Созданная образцовая виброустановка предназначена для поверки виброизмерительной аппаратуры на частотах от 50 до 10 000 гц при амплитудах от 1 до 5000 мк и ускорениях до 25g (рис. 1).

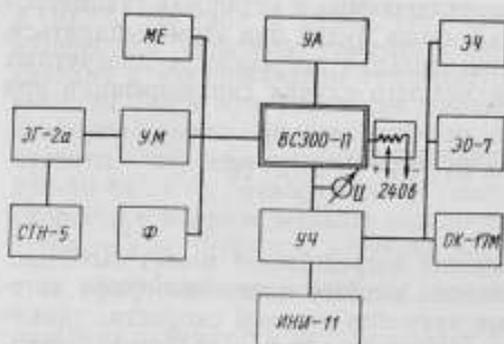


Рис. 1. Схема образцовой установки для поверки виброметров в диапазоне частот $50 \div 10\,000$ гц.

ЗГ-2а — звуковой генератор; СТН-5 — стабилизатор; МБ — магазин емкостей; УМ — усилитель мощности; Ф — фазовый; УА — устройство для измерения амплитуды; ВС300-П — виброплатформа; УЧ — устройство для измерения частоты; ИНИ-11 — измеритель искажений; ЭЧ — эталонная частота 10 000 гц; ЗТ-7 и ОК-17М — осциллографы.

со стержнем будут вибрировать в направлении вдоль стержня с той же частотой.

Расстояние 0,6 м между катушками и относительно малый зазор между полюсными наконечниками позволяют значительно уменьшить боковые составляющие колебаний.

Колебания платформы виброустановки вызывают взаимодействия двух электромагнитных полей. Этот принцип применен ввиду того, что он позволяет получить широкий диапазон частот при нагрузках от 3 до 5 кгс.

На рис. 2 дана схема и на рис. 3 — общий вид образцовой виброплатформы. Две катушки 3, размещенные друг от друга на расстоянии 0,6 м, связаны между собой жестким стержнем и подвешены на упругих сегментообразных плоских пружинах. Эти катушки находятся в поле постоянных электромагнитов. Если через катушки пропустить переменный электрический ток определенной частоты, то они вместе

Боковая составляющая определяется формулой

$$\Delta a = b \frac{L}{l} \operatorname{tg} \alpha,$$

где b — допуск на кольцевой зазор;
 L — общая длина штока;
 l — расстояние между катушками;
 α — угол наклона штока.

Подставив в эту формулу числовые данные, относящиеся к установке, получим значения боковых составляющих перемещения, не превосходящие $3 \cdot 10^{-6}$ мм.

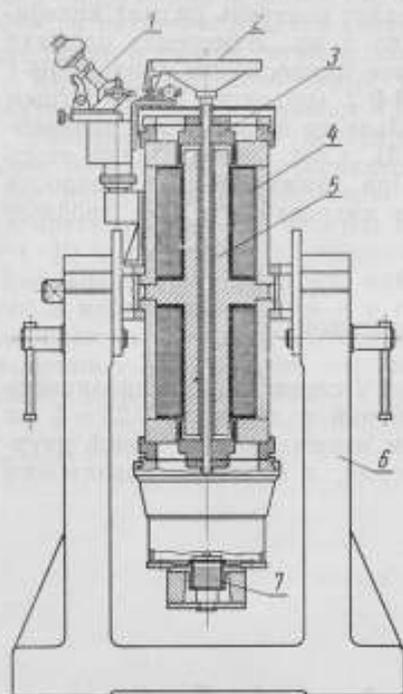


Рис. 2. Схема виброплатформы типа ВС300-П.

1 — оптическое устройство; 2 — вибростол;
 3 — нижняя катушка; 4 — катушка возбуждения; 5 — магнитопровод; 6 — станция;
 7 — датчик.

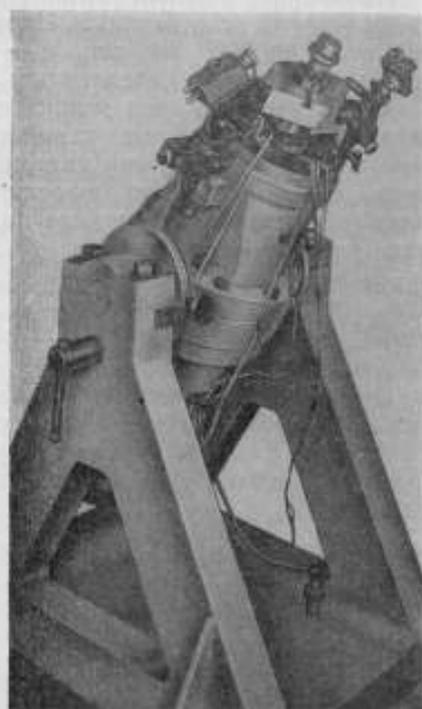


Рис. 3. Общий вид виброплатформы ВС300-П.

Установка создает колебания, амплитуды которых, зависящие от нагрузки, обратно пропорциональны частоте в пределах $50 \rightarrow 10\,000$ гц. В этом диапазоне плавное изменение амплитуды колебания может нарушаться резкими ее увеличениями только при определенных значениях частот, соответствующих резонансу отдельных частей колебательной системы.

В пределах частот $1000 \rightarrow 10\,000$ гц рассматриваемая система создает колебания лишь при определенных дискретных значениях частот, подаваемых на катушки. Эти частоты соответствуют основной и дополнительным кратным частотам собственных колебаний стержня.

При некоторых частотах наблюдается резкое уменьшение амплитуды колебаний платформы, что объясняется распространением упругих волн вдоль стержня, соединяющего катушки. В этих случаях увеличение

амплитуды колебаний достигается изменением направления тока в одной из катушек.

На чугуинной станине 6 вибростенда (рис. 2) укреплен магнитопровод 5. Магнитная цепь вибратора состоит из двух магнитопроводов с керном, изготовленных из одной поковки железа Армко, и двух фланцев. Ширина полюсного наконечника больше длины рабочей части катушки на 10 мм, и при малых амплитудах колебаний подвижные катушки не попадают в области полей рассеяния.

Равномерный кольцевой воздушный зазор значительно уменьшает осевую неоднородность магнитного поля.

Измерения двойной амплитуды колебаний платформы осуществляются двумя устройствами. Первое позволяет измерять размах колебаний от 1 до 5000 мк, второе — от 0,25 до 5 мк. Измерение размаха производят жестко укрепленным на корпусе микроскопом типа МПВ-1 с окулярным винтовым микрометром АМ-9-2 (объектив с 10-кратным увеличением). В первом устройстве зеркальце со щелью 8 мк прикреплено к столу подвижной системы (рис. 3). Свет, проходящий через щель, дает отчетливую полосу света. При движении стола полоска света движется вверх и вниз по шкале в микроскопе и дает двойную амплитуду колебаний стола

$$2A = 2A' - a,$$

где $2A'$ — размах колебаний по шкале микроскопа;
 a — ширина щели.

Второе устройство 1 изображено на рис. 2 слева. Оно предназначено для измерения двойной амплитуды колебаний в пределах 0,25–5 мк с помощью системы зеркал с двухкратным отражением от одной двухгранной призмы, укрепленной на платформе, и одного неподвижного зеркальца.

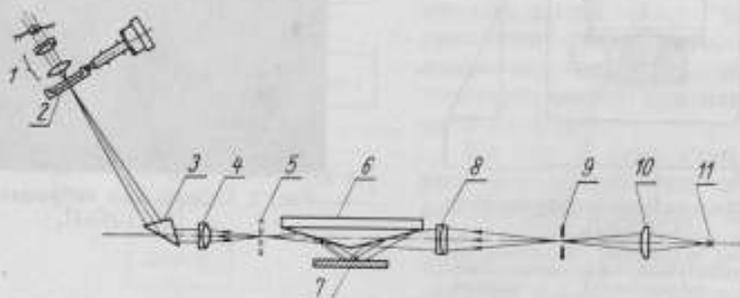


Рис. 4. Схема устройства для измерения амплитуды.

1 — окуляр микроскопа; 2 — сетка окулярного микрометра; 3 — призма микроскопа; 4 — объектив микроскопа; 5 — изображение щели; 6 — призма; 7 — зеркало; 8 — объектив; 9 — щель; 10 — конденсор; 11 — лампочка подсветки.

Принципиальная схема оптической системы измерительного устройства приведена на рис. 4. Щель 9, освещаемая лампочкой подсветки через конденсор 10, при помощи объектива 8 проектируется на призму 6 и зеркало 7 и через объектив 4 измеряется микроскопом МПВ-1. Объектив 8 имеет 4-кратное увеличение, объектив 4 — 10-кратное, что обеспечивает получение на экране четкого изображения щели.

Переменный ток, питающий катушки, подается от звукового генератора типа ЗГ-2А, значение частоты которого известно с погрешностью $\pm 1 + 2\%$. Для ряда работ такая точность достаточна.

Более точно измерять частоту можно методом сравнения частот звукового генератора с эталонной частотой с помощью фигур Лиссажу. Разность между эталонной и поверяемой частотами виброплатформы определяется путем измерения одного или нескольких периодов повторения фигуры Лиссажу на экране электронного осциллографа. При этом погрешность измерения не превышает $\pm 1 \cdot 10^{-7}$.

Дополнительный контроль колебаний вибростола осуществляется с помощью индукционного и пьезокварцевого датчиков.

Измерение нелинейных искажений производилось прибором типа ИНИ-11 с помощью пьезокварцевого датчика, который давал напряжения в пределах $10 \div 300$ мВ, но так как для работы ИНИ-11 требовалось напряжение не менее 1 в, был изготовлен усилитель с одной лампой 6Н9С и питанием от двух аккумуляторных батарей 6 и 90 в. Напряжение после усиления сигнала составляло 2—4 в.

Коэффициент нелинейных искажений на частотах $1000 \div 5000$ гц оказался не превосходящим 1,5%, а на более низких — 3%.

Экспериментальное исследование вибрационной установки позволило определить погрешности воспроизводимых частот и амплитуд. При измерениях посредством фигур Лиссажу погрешность измерения дискретных значений частоты в пределах $50 \div 10\,000$ гц не превышает $\pm 1 \cdot 10^{-7}$, погрешность измерения амплитуд не превышает ± 1 мк. Исследование показало, что виброплатформа дает устойчивые вибрации как в вертикальном, так и в горизонтальном положениях колебательной системы. Боковые составляющие не превышают 1% основного перемещения. Коэффициент нелинейных искажений на всем диапазоне частот не превышает 3%.

Поступила в редакцию
24/IX 1959 г.

В. С. ШКАЛИКОВ
ВНИИМ

ОБРАЗЦОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИЙ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 10+50 гц

В статье дано описание механической виброплатформы, работающей на принципе масса—пружина. Направленный вибратор осуществлен в виде двух барабанов со сменными стержнями. Диапазон рабочих частот 10 ÷ 50 гц.

Основной задачей ВНИИМ в области измерения вибраций является создание первичных образцовых мер, приборов и установок, основанных на абсолютных методах измерений. Установки должны представлять устройства как для воспроизведения механических колебаний, так и для измерения их параметров, главными из которых являются амплитуды и частоты.

Пределы измерений и допустимые погрешности этих установок определяются соответствующими параметрами рабочих приборов и, кроме того, поверочной схемой, указывающей промежуточные установки.

Анализ этих данных приводит к следующим параметрам основных образцовых установок:

частоты	10—10 000 гц
амплитуды	1000—10 мк
допустимая погрешность измерения амплитуд	2,5+10 ⁰ / ₀
то же, частот	0,1 ÷ ⁰ / ₀

Число виброплатформ, входящих в набор образцовой установки, определяется весом поверяемых приборов, значением амплитуды при заданной частоте и допускаемой погрешностью измерения амплитуды колебания. Максимальный вес виброизмерительной аппаратуры в диапазоне частот 10—50 гц может достигать 75 кг, что обусловило выбор механического метода создания вибраций в этом диапазоне частот. Для больших частот и малых весовых нагрузок применен электродинамический метод. При разработке виброплатформ образцовых установок с одной степенью свободы стремились создать колебательные движения, близкие к синусоидальным.

При нелинейных искажениях, помимо основных параметров измерения амплитуды и частоты, возникает необходимость количественной

оценки гармоник выше первой. В общем случае закон движения стола платформы будет нелинейным

$$f(x, t) = \sum_{i=1}^{i=n} [A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t].$$

Сумма гармоник n частот высшего порядка может достигать значительного размера, что при определении ускорений вносит существенные погрешности. Поэтому принимались особые меры к уменьшению коэффициента нелинейных искажений, который для механической платформы должен быть не выше 3%.

Следующим требованием к этим платформам является доведение до возможного минимума амплитуд боковых колебаний, которые не должны превышать 1% от амплитуды колебаний основного направления.

Кроме этого, при создании образцовых виброметрических установок необходимо, с одной стороны, исключить влияние колебаний грунта на работу приборов, а с другой, погасить колебания, вызываемые виброплатформами, чтобы исключить помехи при измерениях в соседних лабораториях.

Одним из видов таких защитных устройств являются виброгасящие фундаменты*, частоты собственных колебаний которых находятся вне пределов области как поверяемых частот, так и частот, являющихся помехами для других измерений. Изготовление этого фундамента явилось составной частью работы по созданию образцовых установок для поверки измерителей вибраций. Собственная частота виброгасящего фундамента равна 1,2 гц.

Образцовая установка для поверки измерителей параметров вибраций в диапазоне частот 10 ÷ 50 гц состоит из двух частей: устройства для создания механических вибраций и вспомогательных измерительных устройств. В комплект установки входят: виброплатформа В50, оптическое устройство для измерения амплитуды, устройство для измерения частоты, частотоизмерительная установка типа УЧ-2, катодный осциллограф.

Схема виброплатформы В50** без источника питания и агрегата двигателя дана на рис. 1. Эта схема позволяет свести к минимуму боковые колебания, определяемые статической Δ_1 и динамической Δ_2 неуравновешенностью системы.

Подсчет этой неуравновешенности производится по формулам

$$\Delta_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} m_i r_i \omega^2}{M}; \quad \Delta_2 = \frac{\omega^2 \int xy dm}{ml},$$

где m , M — массы вала и барабана;

l — расстояние между подшипниками;

ω — угловая скорость;

r_i — расстояние до центра тяжести массы.

Статическая балансировка осуществлялась на «призмах», динамическая балансировка вибратора проверялась вращением барабанов на установке.

Виброплатформа построена на принципе масса — пружина. Масса включает в себя вес платформы, штока, вибратора и испытуемого прибора.

* Шкаликов В. С., Виброгасящий фундамент для точных измерений, Труды ВНИИМ, вып. 37 (97), 1959.

** В разработке конструкции, кроме автора, принимал участие Г. Г. Жуков.

Основным звеном колебательной системы является вибратор. Для установки изготовлены направленные вибраторы двух типов, отличающихся друг от друга конструктивным устройством дебаланса вращающихся частей, значением максимальной амплитуды, коэффициентом нелинейных искажений и величиной боковых составляющих по отношению к основному перемещению.

В одном вибраторе дебаланс неуравновешенной массы эксцентриков достигается путем смещения секторов относительно друг друга, во втором — регулируется массой стержней, вкладываемых в отверстия барабанов.

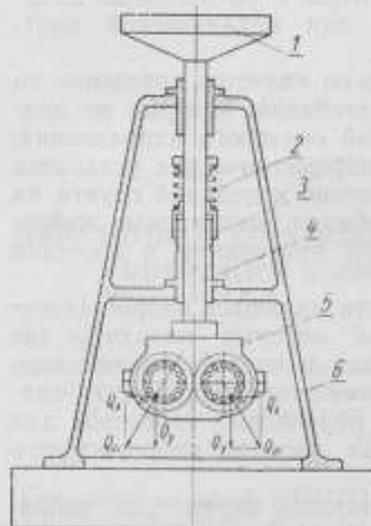


Рис. 1. Схема виброплатформы типа В50.

1 — стой; 2 — пружины; 3 — гайка;
4 — шток; 5 — вибратор; 6 — станина.

Механический вибратор с эксцентриками в виде секторов имеет следующие недостатки:

во-первых, отсутствует повторяемость амплитуды колебаний платформы вследствие малой точности совмещения подвижных секторов. Так, при цене деления 5 град/дел точность отсчета равна 1 град/дел , поэтому установка четырех секторов может привести к погрешности 4° , что недопустимо;

во-вторых, невозможно осуществить динамическую балансировку вращающихся частей вибратора вследствие того, что секторы расположены не в одной плоскости.

Важное значение имеют также колебания изгиба эксцентриков, вызываемые возмущающими силами аэродинамического характера. Эти силы возникают вследствие того, что секторы при вращении за каждый оборот проходят дважды друг против друга. Скорости же потока воздуха в непосредственной близости от секторов и на некотором удалении их друг от друга различны, а потому и аэродинамические силы, действующие на секторы, должны периодически изменяться дважды за каждый оборот вала. Эти обстоятельства и служат причиной возбуждения поперечных колебаний подвижной системы. При исследовании установки с вибратором фирмы «Лозенгаузен» оказалось, что боковые составляющие перемещения платформы достигают 3—5% от основного перемещения. Коэффициент нелинейных искажений составил 5—10%.

После исследования этого вибратора был разработан и изготовлен вибратор роторного типа со сменными стержнями, в котором были устранены перечисленные выше недостатки.

Для измерения кинетического момента в вибраторе роторного типа эксцентрики изготовлены в виде двух барабанов с отверстиями, равномерно расположенными по окружности и равноудаленными от оси вращения и друг от друга. В эти отверстия вставляются валики различного веса. В том случае, когда во все отверстия барабанов вставлены валики одинакового веса, ротор уравновешен, и боковые составляющие кинетического момента, а следовательно, и возмущающая сила вибратора равны нулю. Если удалить один или несколько валиков, барабаны становятся неуравновешенными и изменяется значение кинетического момента, а соответственно и возмущающая сила.

Для обеспечения большего количества дискретных значений возмущающей силы набор имеет 50 валиков массой 100, 150 и 200 г. Калибровка их производилась по контрольному валiku № 21 массой 200,000 г на образцовых весах 1-го разряда, грузоподъемностью до 1 кгс. Наибольшая погрешность массы любого из валиков не превышала 5 мг, или 0,0025%.

Отверстия для валиков в барабанах выполнены с угловым шагом $30^\circ \pm 5''$ на координатно-расточном станке, оснащенном специальным центрирующим приспособлением.

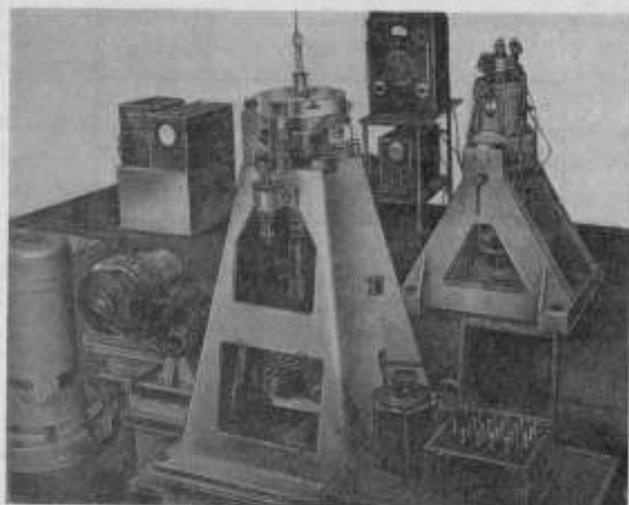


Рис. 2. Общий вид образцовой установки.

Конструкция коробки скоростей допускает шевронное зацепление, а также взаимное расположение каждой четырех отверстий барабанов, чтобы при вращении они периодически находились на одной горизонтали. Далее оказалось возможным применить для изготовления зубчатых колес дельта-древесину марки ДСП-Г в паре с металлическими колесами из стали марки 38ХМЮА. Это значительно снизило шум.

Тщательное изготовление деталей вибратора при симметричном распределении масс обеспечило необходимую динамическую уравновешенность его, которую проверяли вращением барабанов с угловой скоростью 3000 об/мин; при этом отверстия барабанов были в одном случае заполнены однотипными валиками, в другом — незаполнены. Отсутствие колебаний платформы с амплитудой, превышающей 1 мк, служило указанием на необходимую динамическую уравновешенность вибратора и всей колебательной системы.

Возмущающая сила создается неуравновешенными массами двух барабанов и при постоянной угловой скорости определяется по формуле

$$P = \sum_1^n 2m_i r_i \omega^2 \cos \varphi_i,$$

где m_i — масса валика.

Амплитуда колебаний платформы соответственно равна

$$A = \frac{P}{M(\lambda^2 - \omega^2)},$$

где λ — собственная частота колебательной системы.

При частоте колебаний свыше 15 гц можно пренебречь собственной частотой λ колебательной системы, которая составляет 2,7 гц, тогда амплитуда колебаний определится по формуле

$$A \cong 2 \frac{\sum_{i=1}^n r_i m_i}{M}.$$

Двойная амплитуда колебаний виброплатформы при частоте колебаний 50 гц в зависимости от порядка заполнения барабанов валиками 100, 150 и 200 г приведена в табл. 1.

Таблица 1

№ отверстий	Двойная амплитуда (мк) при весе валиков, г		
	100	150	200
1, 6	104	156	208
1 (1, 5)	202	303	405
1, 4	286	428	572
1, 3, 4	305	457	610
1, 3	350	525	700
1, 2	391	586	782
1, 3, 5	405	606	810
1, 2, 4	484	726	968
1, 2, 3	575	863	1150
1, 2, 3, 4	676	1012	1352
1, 2, 3, 4, 5	755	1130	1510
1, 2, 3, 4, 5, 6	780	1170	1560

Для определения частоты колебаний платформы и поверяемого прибора на виброустановке укреплено специальное устройство с индукционным датчиком.

Частота электрических колебаний датчика измеряется на электронном осциллографе путем сравнения с частотой измерительной установки типа УЧ-2 по фигурам Лиссажу. Погрешность измерения частоты этим способом не превышает $3 \cdot 10^{-3}\%$.

Для определения двойной амплитуды колебаний платформы на ней укреплена пластина со щелью. Двойной амплитуде соответствуют крайние положения щели, освещенной проходящим через нее светом лампы. Размах колебаний измеряется специальным устройством с помощью микроскопа типа МПВ-1 с окулярным винтовым микрометром АМ-9-2, имеющим отсчетный барабан с ценой деления в 1 мк при объективе с 10-кратным увеличением и ценой деления 2,5 мк при объективе с 4-кратным увеличением.

Опытное исследование показало, что средняя квадратичная погрешность измерения амплитуды не превышает ± 1 мк.

Измерения нелинейных искажений производились с помощью измерителя типа ИНИ-11, причем оказалось, что их можно осуществить лишь в том случае, если значение входного напряжения, полученного от датчика, будет не меньше 1 в. Встроенный в платформу индукционный дат-

чик имеет напряжение 2 в, что обеспечивает нормальные условия для работы прибором ИНИ-11.

Результаты измерений на установке с роторным вибратором показали, что значение коэффициента нелинейных искажений не превышает 3%.

Если в микроскоп МПВ-1 наблюдается движение не щели, а некоторой светящейся точки, связанной с виброплатформой, то по движению этой точки можно судить о наличии боковых колебаний виброплатформы. Если форма движения точки будет эллиптической, то имеют место боковые колебания той же частоты, что и основные. Измерив крайние положения точки по горизонтали, можно определить двойную амплитуду боковых колебаний и ее отношение к амплитуде основных колебаний.

Результаты измерения максимальных размахов колебаний в перпендикулярных направлениях при частоте 50 гц сведены в табл. 2.

Таблица 2

№ отверстий	Размах $2A$, мк	Горизонтальные смещения $2a$, мк	$\frac{a}{A} \cdot 100\%$
1, 6	206	2	0,97
1	404	2	0,50
1, 4	570	4	0,70
1, 3, 4	608	6	0,99
1, 3	700	6	0,86
1, 2	780	7	0,90
1, 3, 5	808	6	0,74
1, 2, 4	965	8	0,83
1, 2, 3	1150	6	0,52
1, 2, 3, 4	1350	5	0,37
1, 2, 3, 4, 5	1508	4	0,27
1, 2, 3, 4, 5, 6	1560	11,5	0,74

Из нее следует, что горизонтальная составляющая колебаний при частоте 50 гц не превышает 1% от основной вертикальной составляющей.

Таким образом, исследование данной образцовой установки показало, что она обладает высокими качествами, так как коэффициент нелинейных искажений и боковые колебания имеют гораздо меньшее значение, чем в других существующих установках подобного типа. Достигнуто это главным образом применением особого вибратора и точностью изготовления колебательного узла установки.

Поступила в редакцию
24/IX-1953 г.

И. А. СТУЛЬГИНСКАЯ

ВНИИМ

ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ МАСЕЛ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ОТ 0 ДО -60°C

Описаны образцовые вискозиметры для измерения вязкости при низких температурах и определены на них для десяти нефтепродуктов температуры, ниже которых теряются свойства ньютоновых жидкостей.

В последние годы во ВНИИМ ведутся работы, целью которых является обеспечение единства измерений вязкости при низких температурах.

Настоящая работа ставила две цели: создание образцовых вискозиметров для измерения вязкости масел при низких температурах и определение на них возможных пределов температур, при которых данные масла теряют свойства ньютоновых жидкостей.

Объектом испытания явился ряд нефтепродуктов, наиболее часто употребляемых при работах в условиях низких температур.

Для определения динамической вязкости жидкости были изготовлены: абсолютный капиллярный вискозиметр с двумя парами сменных капилляров и 22 прибора для относительных измерений вязкости с диаметрами капилляров $0,6 + 4,0$ мм. Помимо того, создано вспомогательное оборудование: автоматический криостат, ртутный манометр и платиновый термометр сопротивления.

Для каждого масла существует температура, при которой наблюдается аномалия вязкости. При этой и более низких температурах вязкость будет зависеть не только от температуры, но и от градиента скорости. Неучет этого обстоятельства приводит к тому, что приборы разных типов дают различные значения вязкости одной и той же жидкости. Анализируя экспериментальные данные ряда исследователей, М. П. Воларович [1] указывает, что с увеличением градиента скорости вязкость аномальной жидкости уменьшается вследствие разрушения ее структуры и достигает минимального значения, когда структура полностью разрушена. Структура вновь восстанавливается при переходе к малому градиенту скоростей. Такую переменную вязкость обычно называют структурной вязкостью. Поведение масел при низкой температуре сопровождается, кроме того, тиксотропией и тиксолабильностью. Явления тиксотропии заключаются в том, что при механическом воздействии (течение по капилляру, падение шарика, вращение цилиндра

и т. д.) структура жидкости разрушается, но в спокойном состоянии она восстанавливается. В отличие от тиксотропии явления тиксолабильности характерны тем, что после разрушения структуры вязкость или не восстанавливается вовсе, или же восстанавливается через очень большой промежуток времени.

Так, Д. С. Великовский и В. П. Варенцов [2] в своей работе отмечали, что при неоднократном пропускании ими минерального масла через капилляр при температуре -10°C были получены следующие значения вязкости: 10,1; 9,67; 9,42; 9,29 и 9,14 пуаз.

Г. И. Фукс и Е. А. Смолина [3], работая с автолами марки «10», обнаружили образование аномальной вязкости при температуре -25°C и отметили начало восстановления ее через $1\frac{1}{2}$ —2 ч после снятия деформирующего усилия, но так как и через 80 ч не было достигнуто первоначальное значение вязкости, они полагают, что здесь наблюдались явления не только тиксотропии, но и тиксолабильности. Явления тиксолабильности в минеральных маслах наблюдал также К. С. Рамаия [4].

Вязкость масла зависит как от длительности охлаждения, так и от температуры, до которой оно нагрето перед началом испытания. Измеренная Б. Г. Тычининым [5] вязкость парафинистой нефти при -10°C оказалась различной в зависимости от ее предварительного нагрева.

Д. С. Великовский и В. П. Варенцов [2] и М. Иордашеску [6] отмечали, что вблизи температуры застывания минеральные масла при низких температурах начинают давать аномальную или структурную вязкость. При этом возникают явления тиксотропии и тиксолабильности.

Ввиду сложности поведения масел при низких температурах ряд авторов предлагает ввести дополнительные характеристики жидкостей, например, «прокачиваемость» [7].

Можно полагать, что одной из существенных характеристик жидкостей могла бы служить температура, ниже которой их вязкость становится аномальной. Эта характеристика была бы полезна для уточнения всевозможных гидравлических расчетов и, кроме того, для установления границ применения ГОСТ 33—53 по определению вязкости нефтепродуктов.

Аппаратура

Капиллярный метод, применяемый при измерении вязкости масел, наиболее изучен, а вискозиметры, основанные на нем, являются простейшими, поэтому и измерения проводились этим методом.

Параметры использованных приборов допускали измерения вязкости от 1 до 1000 пуаз при времени истечения от 100 до 1000 сек.

Абсолютный вискозиметр (рис. 1) состоит из двух шаровидных сосудов 6 и 8, соединенных между собой сменным капилляром 7, широкой трубки 1 с двумя расширениями 2 и 3 и двумя измерительными шариками 4 и 5.

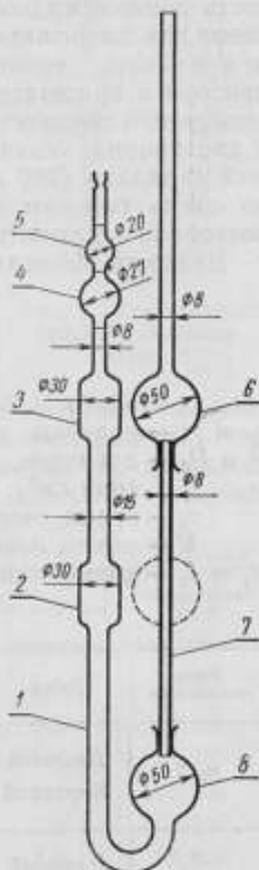


Рис. 1. Схема абсолютного вискозиметра.

Испытуемую жидкость (масло) наливают до середины сосуда 6. Поверх масла со стороны рабочих шариков 4 и 5 заливают спирт до середины шарика 4. Вискозиметр устанавливают в криостат так, чтобы рабочие шарики находились выше уровня жидкости криостата. Затем оба колена вискозиметра соединяют с источником постоянного давления (сжатый воздух). Источником сжатого воздуха служит металлический резервуар емкостью 200 л. Необходимое давление в резервуаре создается компрессором. Параллельно с вискозиметром для измерения давления включен U-образный ртутный манометр. Погрешность измеряемой разности уровней в манометре не превышает 0,1 мм рт. ст. Среднюю скорость течения жидкости по капилляру мы определяли по времени заполнения или опорожнения измерительного шарика 4 или 5. Это позволило не учитывать: возможное отклонение от вертикальности при установке прибора в криостате, дополнительное влияние высоты столба спирта и испытуемой жидкости в приборе. Измерение вязкости производили в два приема: сначала измеряли время течения жидкости через длинный капилляр (240 мм), затем его заменяли более коротким (100 мм), но очень близким по диаметру. Сопоставление полученных данных позволяло исключить так называемые «концевые эффекты».

Вязкость вычисляли по формуле:

$$\eta = \frac{\pi r_1}{8V} \cdot \frac{r_1^4 P_1 - r_2^4 P_2}{l_1 - l_2}, \quad (1)$$

где η — вязкость в пуазах ($г \cdot см^{-1} \cdot сек^{-1}$);
 r_1 и r_2 — радиусы длинного и короткого капилляров (см);
 P_1 и P_2 — давление, под которым течет жидкость по капиллярам ($дин/см^2$);
 τ_1 — время опыта при длинном капилляре (сек);
 V — объем измерительного шарика (см³);
 l_1 и l_2 — длины капилляров (см).

Таблица 1

Пары капилляров	Длина	σ %	S %
№ 2	Длинный	0,020	0,009
	Короткий	0,032	0,014
№ 3	Длинный	0,003	0,001
	Короткий	0,002	0,001

Наиболее ответственными частями вискозиметра являются измерительные шарики и капилляры; поэтому объемы измерительных шариков, ограниченных двумя кольцевыми рисками, и диаметры капилляров определены ртутью весовым методом. Многократные измерения дали значение объема большого шарика, равное 13,207 см³, и объема малого шарика —

5,506 см³. Средняя квадратичная погрешность измерения составила для большого шарика 0,0021 см³, для малого — 0,0022 см³.

Диаметры капилляров калибровали, заполняя их ртутью при $20 \pm 0,02^\circ С$. Массу ртути определяли на 20-граммовых микровесах. Средние квадратичные погрешности одного заполнения σ и результата S сведены в табл. 1.

Длина капилляров была измерена на компараторе с относительной погрешностью, не превышающей 0,001%. В результате калибровки капилляров получены значения, приведенные в табл. 2.

Относительный вискозиметр (рис. 2) системы Пинкевича по принципу действия сходен с абсолютным вискозиметром с той только разни-

цей, что он имеет впаянный капилляр длиной 90 мм. В вискозиметр ниже меток *в* и *г* заливают испытуемое масло. Выше метки *в* наливают спирт до середины шарика 2. Затем трубки 4 и 5 поочередно соединяют с источ-

Таблица 2

Пара ка- пилляров	Длина, мм		Диаметр, мм	
	длинный	короткий	длинный	короткий
№ 2	240,05 ₂	99,90 ₅	0,976 ₃	0,974 ₄
№ 3	240,04 ₇	99,90 ₅	2,067 ₃	2,054 ₄

ником постоянного давления и измеряют время истечения жидкости по капилляру вниз и вверх. Скорость течения жидкости по капилляру определяют по времени опорожнения или заполнения спиртом измерительного шарика 2. Электросекундомер включают при течении жидкости вверх по капилляру в момент прохождения спиртом метки *а* и останавливают у метки *б* и поступают наоборот при течении жидкости вниз по капилляру.

Вискозиметр устанавливают в криостат так, чтобы измерительные шарики 2 и 3 и трубка 1 до половины находились выше уровня жидкости криостата. Постоянные вискозиметры *K* отградуированы по жидкостям, вязкость которых определена на образцовых вискозиметрах ВНИИМ при 0° С. Расхождение в определении *K* на разных жидкостях оказалось в пределах 0,04–0,10%. Постоянные вискозиметры, которыми пользовались в настоящей работе, приведены в табл. 3.

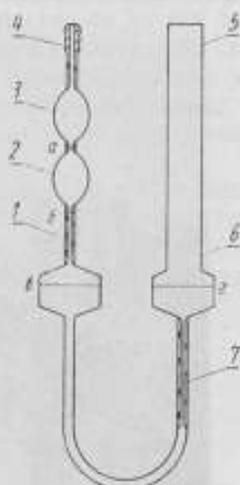


Рис. 2. Схема относительного вискозиметра.

Таблица 3

№ вискозиметра	Диаметр, мм	Постоянная* $K \cdot 10^6$	№ вискозиметра	Диаметр, мм	Постоянная* $K \cdot 10^6$
122	0,6	0,01395	101	2,0	1,184
123	0,8	0,03667	102	2,0	1,191
117	1,0	0,08851	103	2,0	1,235
117 ₇	1,0	0,09174	110	2,0	1,205
118	1,2	0,1814	111	2,0	1,326
119	1,2	0,1666	112	3,0	5,879
120	1,5	0,5059	113	3,0	5,255
121	1,5	0,5267	105	3,0	7,338
			105	3,0	7,017

* Безразмерная величина.

На относительном вискозиметре вязкость жидкости вычисляли по формуле

$$\eta = K\rho\tau. \quad (2)$$

Автоматический криостат типа КАТ-1, общий вид которого дан на рис. 3, сконструирован во ВНИИМ и изготовлен на заводе «Эталон». Криостат представляет собой два сосуда Дьюара: рабочий (рис. 4) и вспомогательный. В рабочем сосуде находятся: вискозиметр 2, змеевик

охлаждения 9, соединяющийся резиновыми шлангами со вспомогательным сосудом Дьюара, обогреватель 8, мешалка 1, медный термометр сопротивления 3, выводные концы которого 7 поданы на узел автомати-

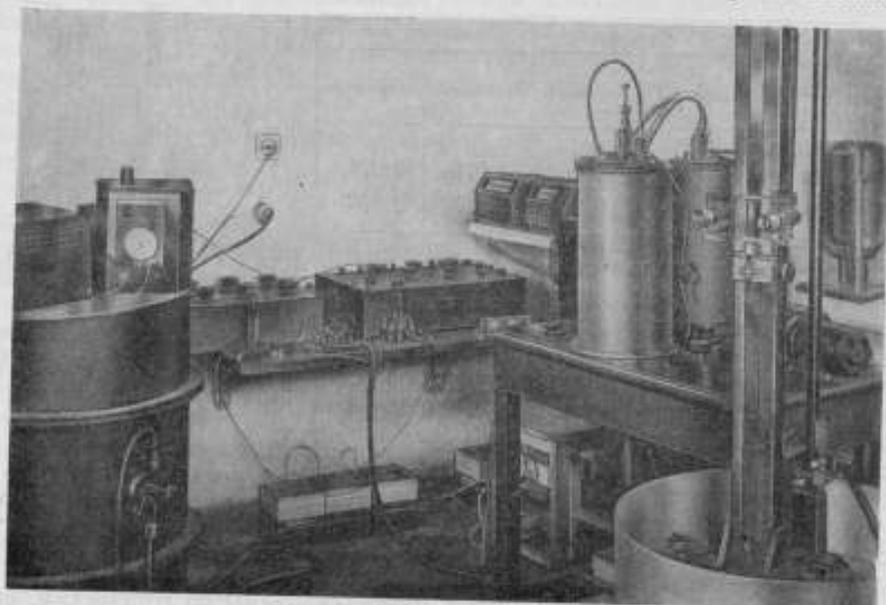


Рис. 3. Общий вид криостата.

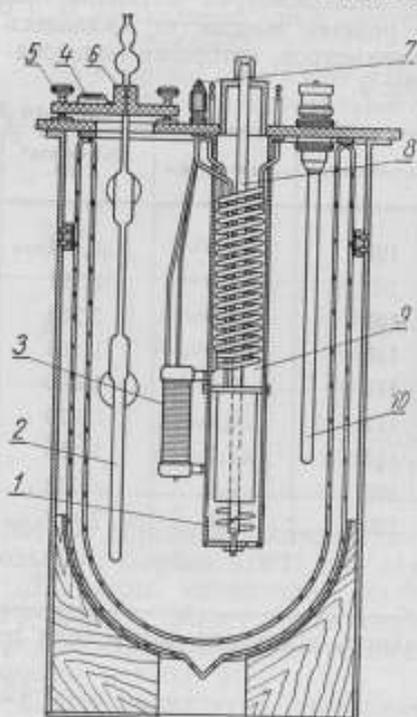


Рис. 4. Схема рабочего сосуда криостата.

ческой регулировки и платиновый термометр сопротивления 10 для измерения температуры среды, в которой проводят опыт. Вискозиметр закрепляется в съемной части крышки 6 рабочего сосуда. Вертикальность его положения контролируется по уровню 4 и выравнивается при помощи регулировочных винтов 5.

Вспомогательный сосуд Дьюара служит для понижения температуры охлаждаемого сухим льдом этилового спирта, который подается при помощи насоса по резиновым шлангам в змеевик рабочего сосуда. Постоянство температуры поддерживается при помощи электрического нагревателя, расположенного рядом со змеевиком охлаждения; нагреватель включается и отключается автоматически.

Методика измерения

Исследуемое масло, подогретое до 50°C , охлаждали до комнатной температуры и заливали в вискозиметр, который устанавливали в криостат, где выдерживали его в продолжение 30 мин при температуре испы-

тания. После этого производили измерение вязкости при трех различных давлениях воздуха, отличающихся одно от другого на 50 мм рт. ст.*. Затем понижали температуру криостата на 10° С, не вынимая вискозиметр, и снова проводили испытание. Температуру понижали до тех пор, пока изменение давления не приводило к изменению вязкости, что свидетельствовало о начале образования структурной вязкости. Если же менялось время истечения жидкости при одном и том же давлении, то это уже указывало на тиксотронные явления. Значение вязкости вычисляли по формулам (1) и (2).

Время истечения при измерении на длинном и коротком капиллярах предполагается одинаковым, но так как практически полного равенства при этом достичь невозможно, то давление P_2 , под которым вели измерение на коротком капилляре, приводили к давлению, соответствующему времени истечения жидкости по длинному капилляру, по формуле

$$P_2^i = P_2 \frac{\tau_2}{\tau_1}, \quad (3)$$

где P_2^i — давление, приведенное ко времени истечения τ_1 ;

P_2 — давление при времени истечения τ_2 ;

τ_1 и τ_2 — время истечения жидкости соответственно через длинный и короткий капилляры.

Давление P для длинного и короткого капилляров в формуле (1) и для относительных измерений в формуле (2) брали как среднее давление из двух измерений при течении жидкости по капилляру вниз и вверх. Среднее давление P вычисляли по формуле

$$P = gH_{cp} (\rho_p - \rho_{cp.воз}), \quad (4)$$

где H_{cp} — средняя высота столба ртути в манометре из двух измерений (вниз и вверх) (см);

$\rho_{cp.воз}$ — среднее значение плотности воздуха (между плотностью атмосферного воздуха и воздуха сжатого) в манометре (г/см³);

ρ_p — плотность ртути в манометре (г/см³).

Расчетные формулы (1) и (2) содержат среднее арифметическое давление. Поэтому необходимо было также ввести среднее время истечения жидкости вниз и вверх, которое вычисляли по формуле

$$\tau_{cp} = \frac{2\tau_1\tau_2}{\tau_1 + \tau_2}. \quad (5)$$

Результаты испытаний нефтепродуктов

Испытания охватили 10 минеральных масел в диапазоне температур от 0° до -60° С. Найдены температуры начала образования аномальной вязкости и явлений тиксотропии, т. е. были найдены температуры, при которых течение минеральных масел переставало подчиняться закону Ньютона. Характеристики масел, удовлетворяющих ГОСТ, даны в табл. 4. Масла МВП и АМГ-10 испытаны на абсолютном вискозиметре, а остальные восемь — на относительных.

Для определения структурной вязкости пользовались следующими положениями. Структурная вязкость не обнаружена, если из всего ряда измерений при трех давлениях максимальное и минимальное значения

* В соответствии с ГОСТ 1929—51.

	Характеристика масла, удовлетворяющих ГОСТ									
	приборное МВП	АМГ-10	трансфор- маторное	индустр- зачное „50“	веретен- ное АУ	аппаратное		солерное	осевое „3“	для высоко- скоростных механизмов
						МК-22	МС-20			
ГОСТ	1805—51	6794—53	982—56	1707—51	1642—50	1013—49	1013—49	1066—51	610—48	1840—51
Плотность (ρ , г/см ³):										
при 20°С	0,879	0,8347	0,886	0,903	0,889	0,898	0,888	0,892	0,913	0,859
0°С	0,8882	0,8494	—	—	—	—	—	—	—	—
—40°С	0,8989	0,9020	—	—	—	—	—	—	—	—
Температура (°С):										
застывания	—60	—70	—45	—20	—45	—14	—19	—20	—40	—25
вышки в открытом тигле	—	90	—	202	165	262	260	130	144	—
„ . . . закрытом	129	—	137	—	—	244	—	—	—	124
Вязкость:										
кинематическая (сст)										
при 50°С	7,9*	10,0	7,96	47,3	12,5	—	—	8,3	21,64	4,9
100°С	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
условная °ВУ										
при 20°С	—	—	3,49	—	—	—	—	—	—	—
50°С	1,65*	—	1,67	6,45	2,08	—	—	1,7	3,14	1,38
100°С	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Кислотное число КОН (мг)	0,023	0,033	0,02	0,13	0,0185	0,05	0,028	—	—	0,022
Зола, %	0,001	—	0,003	0,003	0,002	0,004	0,002	0,003	—	0,02

* При 60°.

Возрастование кислоты и щелочи, механические примеси и зола отсутствуют, за исключением осевого масла, в котором механических примесей 0,02%, и зола 0,02%.

вязкости не превышают 2%. Вторым критерием структурообразования являлось изменение вязкости при переходе от одного давления к другому.

Таблица 5

Температура, °С	Значение вязкости масел в зависимости от температуры (в пуазах)									
	приборное МВП	АМГ-10	трансформаторное	осеое •3*	индустриальное •50*	веретеное АУ	инвизионное		для высокоскоростных механизмов	сольфоновое
							МК-22	МК-20		
+5	—	—	—	—	—	—	64,95	42,41	—	—
0	0,5381	0,3384	0,7454	4,794	20,27	1,564	117,4	73,64	0,2793	—
-5	—	—	—	—	—	—	239,3	135,2	—	—
-10	1,117	0,5167	1,607	13,49	65,31	3,765	618,7	276,4	0,5238	1,961
-15	—	—	—	—	140,0	—	—	—	0,7477	3,844
-18	—	—	—	—	225,2	—	—	—	0,9381	—
-19	—	—	—	—	261,6	—	—	—	—	—
-20	2,698	0,8466	4,205	43,27	—	10,63	—	—	1,101	5,468
-23	—	—	—	—	—	—	—	—	1,608	7,9888
-24	—	—	—	—	—	—	—	—	1,898	8,606
-25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,18
-30	7,908	1,573	13,56	236,5	—	38,07	—	—	—	—
-33	—	—	73,21	404,8	—	—	—	—	—	—
-34	—	—	—	472,3	—	—	—	—	—	—
-40	31,21	3,266	—	—	—	198,2	—	—	—	—
-41	—	—	—	—	—	280,2	—	—	—	—
-50	161,4	8,404	—	—	—	—	—	—	—	—
-52	282,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
-60	—	24,70	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Цифры, набранные жирным шрифтом, указывают на начало возникновения аномалии вязкости (начало структурообразования).

Сводные значения вязкости масел в зависимости от температуры и образование аномалии вязкости видны из табл. 5 и даны на рис. 5 и 6. Одиночные точки на кривых рис. 5 и 6 соответствуют одному и тому же значению вязкости испытуемых масел при трех разных давлениях, т. е. когда масла еще являются нормальными жидкостями. Появление на кривых двух, а затем трех точек, соответствующих разным значениям вязкости в зависимости от изменения давления, указывает на образование структурной вязкости. Среднеквадратичная погрешность результата измерения составляет $0,1 \pm 0,3\%$.

По результатам всех опытов составлена табл. 6, из которой видно, что температура застывания, определенная по ГОСТ 1533—42, не совпадает с температурой структурообразования. М. П. Воларович [1], Д. С. Великовский [3], М. М. Кусаков [9] и др. указывают на несовершенство упомянутого метода определения температуры застывания. Визуальные измерения дают большое расхождение от наблюдателя к наблю-

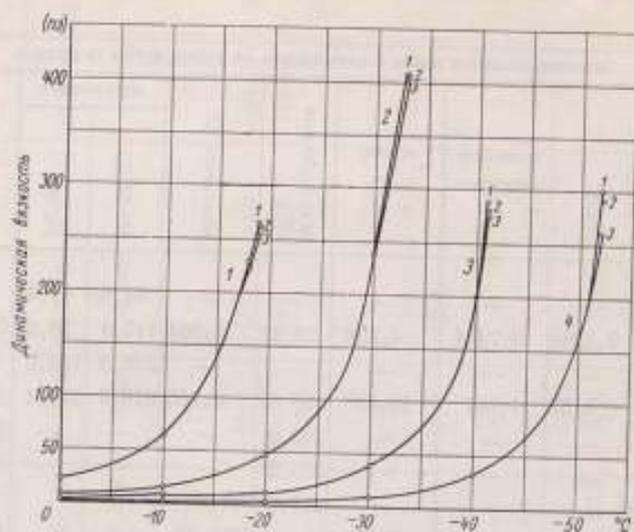


Рис. 5. Кривые вязкости масел в зависимости от температуры и момент образования аномальной (структурной) вязкости.

Точки на кривых — значение вязкости при трех разных давлениях.
 1 — масло промышленное „50“; 2 — осевое „3“; 3 — вертевной АУ;
 4 — приборное МВП.

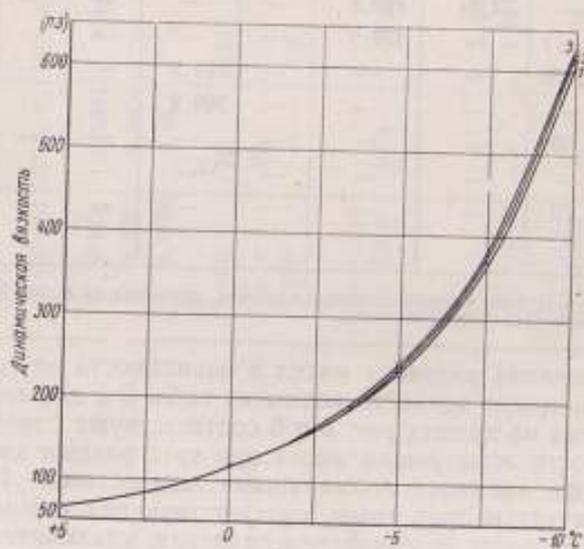


Рис. 6. Кривая вязкости авиационного масла МК-22 в зависимости от температуры и момент образования аномальной (структурной) вязкости.

дателю. А. Ф. Добрянский [10] отмечает, что масло имеет две температуры застывания: 1) определяемую по ГОСТ и 2) полученную при его движении. Структурная вязкость и явления тиксотронии получаются примерно при одной и той же температуре.

Таблица 6

Масло	Температура, °С		
	застывания	структурообразования	тиксотронии
Приборное МВП	-60	-52	-52
АМГ-10	-70	При -60° структура не образовалась	
Трансформаторное	-45	-33	-33
Индустриальное „50“	-20	-18	-19
Веретенное АУ	-45	-41	-41
Авиационное МК-22	-14	-5	-10
Авиационное МС-20	-19	-5	-10
Соляровое	-20	-23	-23
Осевое „3“	-40	-34	-34
Для высокоскоростных механизмов	-25	-23	-23

В настоящее время температура застывания является единственной характеристикой масел в условиях низких температур, что вызывает необходимость искать новые более совершенные методы, характеризующие масла в этих условиях. Выполненная работа показывает, что примененный метод является достаточно надежным для оценки критических температур нефтепродуктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воларович М. П., Вязкость смазочных масел при низких температурах, Изд. АН СССР, 1944.
2. Великовский Д. С. и Варенцов В. П., О вязкости минеральных масел при низких температурах, «Нефтяное хозяйство», № 4—5, 1937, стр. 71—75.
3. Фукс Г. И. и Смолина Е. А., Свойства минеральных масел при низких температурах и малых скоростях течения, «Труды Второй конференции по трению и износу в машинах», вып. II, 1948, стр. 499.
4. Рамайя К. С., Влияние присадок на температурную зависимость вязкости смазочных масел при низких температурах, «Совещание по вязкости жидкостей и коллоидных растворов», т. II, 1944, стр. 178; Понижение точки застывания смазочных масел коллоидным методом, «Нефтяное хозяйство», № 4, 1934, стр. 40.
5. Тычинин Б. Г., О структуре и некоторых свойствах грозненских парафинистых нефтей и мазутов, «Нефтяное и сланцевое хозяйство», № 11—12, 1923 и № 5—6, 1924.
6. Yordachescu M., Ann. Comb. Liquides, № 3, стр. 511 и № 4 стр. 739, 1937.
7. Лимар В. К. и Сидоров В. Г., Вязкость и прокачиваемость масел при низких температурах, «Совещание по вязкости жидкостей», т. II, 1944, стр. 145—154.
8. Великовский Д. С., Параметры, характеризующие механические свойства смазочных масел при низких температурах, «Всесоюзная конференция по трению и износу в машинах», т. I, 1939, стр. 394.
9. Кусаков М. М., Методы определения физико-химических характеристик нефтепродуктов, ОНТИ, 1936.
10. Добрянский А. Ф., Сиверцев А. П. и Фридман И. Я., Определение вязкости масел при низких температурах, «Совещание по вязкости жидкостей и коллоидных растворов», ч. I, 1941, стр. 173—180.
11. Барр С. Г., Вискозиметрия, перевод с английского, ГОНТИ, 1938.

М. Д. ИППИЦ
ВНИИМ

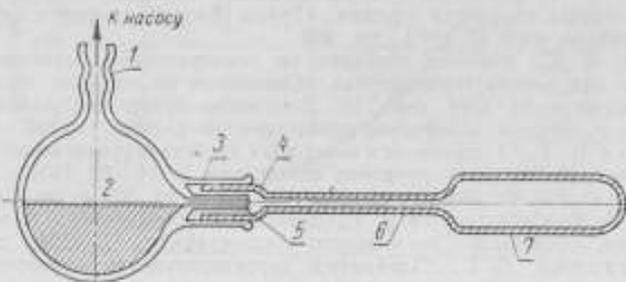
О ПЛОТНОСТИ РТУТИ

В статье кратко изложены результаты проведенной в 1954 г. во ВНИИМ работы по определению плотности ртути при температуре 20° С пикнометрическим методом с помощью специальных пикнометров с узкими капиллярами. Приводится их описание и методика работы, а также результаты исследования пикнометров и плотности ртути.

В 1954 г. впервые в метрологической практике во ВНИИМ была произведена работа по определению плотности ртути при температуре 20° С, являющейся в настоящее время нормальной температурой для подавляющего большинства измерений.

Определение плотности выполнялось с помощью специальных пикнометров, в основу конструирования которых были положены два условия: 1) небольшой объем пикнометра и 2) удобство наполнения его жидкостью.

Для настоящей работы были изготовлены два пикнометра (№ 6 и 13) объемом около 10,5 см³ из термометрического стекла ГОСТ 1224—41. Общий вид такого пикнометра изображен на рисунке.



Для того чтобы пикнометры обладали достаточной чувствительностью к изменениям температуры исследуемой жидкости, пришлось значительно уменьшить внутренний диаметр капиллярной трубки (до 0,38 мм). При указанных размерах пикнометров изменение температуры наполняющей их жидкости на 0,005° С, соответствующее изменению плотности ртути на $1 \cdot 10^{-5}$ г/см³, вызывает смещение уровня

жидкости в капилляре пикнометра приблизительно на 0,07 мм, т. е. на величину, которую можно учесть.

Пикнометр представляет собой стеклянный сосуд 7 цилиндрической формы со сферическим основанием. В верхней части этого сосуда припаяна капиллярная трубка 6, расширяющийся верхний конец которой 4 запирается притертой пробкой. Снаружи это расширение также имеет притертую поверхность, на которую надевается стеклянный шар 2, служащий для наполнения пикнометра жидкостью при пониженном атмосферном давлении. К шару припаяны две трубки: широкая 3 и узкая, капиллярная, 5, впаянная внутри широкой. С их помощью шар надевается на пикнометр. Шар имеет еще трубку 1 для присоединения его к насосу. Объем шара рассчитан таким образом, чтобы емкость половины шара несколько превышала емкость самого пикнометра.

Наполнение пикнометра жидкостью производилось следующим образом: в шар 2, присоединенный к пикнометру, при горизонтальном положении последнего через трубку 1 наливали служащую для наполнения пикнометра жидкость в таком количестве, чтобы ее уровень в шаре не закрывал отверстия капиллярной трубки 5 шара. Шар соединяли с насосом и, после освобождения пикнометра и жидкости от воздуха, пикнометр ставили вертикально, и жидкость вливалась в пикнометр.

Такое устройство пикнометра оказалось весьма удобным как для наполнения и опораживания пикнометра, так и для промывания и просушивания его. Вместе с тем оно давало возможность наполнять пикнометр жидкостью, освобожденной от растворенного в ней воздуха, и позволяло применять пикнометры с узкими капиллярами.

Помимо того, что устройство пикнометра с расширением над капилляром облегчало его наполнение, оно позволяло взвешивать пикнометр с жидкостью при температуре помещения выше той, при которой производилось измерение уровня жидкости.

На капиллярной трубке каждого пикнометра была нанесена миллиметровая шкала длиной 10 мм, по которой определялась емкость пикнометра, в качестве основной метки этой шкалы служил средний штрих.

Исследование пикнометров началось с калибровки их капиллярных трубок. Калибровка была выполнена еще до изготовления пикнометров и имела целью определить емкость единицы длины канала капилляра. Дальнейшее исследование пикнометров состояло в определении их массы и емкости до среднего штриха шкалы на капиллярах.

Определение массы пикнометров производилось многократно в течение всей работы, как при исследовании емкости пикнометров, так и при определении плотности ртути, так что каждому новому наполнению пикнометров жидкостью предшествовало определение их массы. Тщательное наблюдение за состоянием массы пикнометров позволяло вовремя обнаружить те изменения ее, которые могли произойти в процессе работы вследствие нарушения состояния стекла пикнометров, и своевременно учесть их.

Определение емкости пикнометров производилось также в процессе всего исследования плотности ртути.

Вода, применявшаяся для определения емкости, подвергалась двукратной перегонке; удельная электрическая проводимость этой воды не превышала $1,4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1} \text{ см}^{-1}$.

Уровень воды в капилляре пикнометра предварительно устанавливали таким образом, чтобы при температуре 20°C он не выходил за пределы шкалы, нанесенной на капилляре.

Пикнометры помещали в термостат погруженными в стеклянные стаканы, наполненные дистиллированной водой. Стаканы имели назна-

чение задерживать передачу колебаний температуры термостата жидкости в пикнометрах.

Измерения высоты уровня жидкости производились с помощью катетометра при температуре 20° С или весьма близкой к ней. В последнем случае отклонение от этой температуры всегда учитывалось.

Для суждения о температуре жидкости в пикнометрах рядом с последними помещали стакан с водой, в котором находился термометр.

Пикнометры выдерживали в термостате до установления в них температурного равновесия. Измерения высоты уровня жидкости в капилляре пикнометра производили лишь после того, как показания термометра и положение мениска жидкости в капилляре пикнометра начинали, хотя и медленно, однако заметно колебаться как в одну, так и в другую сторону от некоторого среднего положения равновесия, следуя за колебаниями термостатной ванны.

Температуру наблюдали до и после измерения высоты уровня жидкости в пикнометре и из двух отсчетов выводили среднее значение, которому и приписывали наблюдаемое положение мениска. При каждом определении объема жидкости таких измерений производили несколько и из них находили средние значения температуры и высоты уровня жидкости в капилляре пикнометра.

Для нахождения емкости пикнометра до определенной метки учитывался как объем избыточного или недостающего столбика жидкости в капилляре пикнометра, так и объем мениска.

Средние значения емкости пикнометров при температуре 20° С до среднего штриха шкалы капилляра при первом и при повторном исследованиях оказались следующими ($см^3$):

пикнометр № 6: $10,512339 \pm 0,000017$ и $10,512313 \pm 0,000011$;

пикнометр № 13: $10,682332 \pm 0,000026$ и $10,682301 \pm 0,000017$.

Средние квадратичные погрешности результатов этих определений рассчитаны с учетом погрешностей измерения массы пикнометров.

Для исследования плотности служили несколько образцов очищенной ртути. Образцы № 1, 2 и 4—6 были получены в разное время от промышленных предприятий (завод «Светлана», завод «Точизмеритель» и др.) и представляли собою стандартную ртуть марки Р₁ (ГОСТ 4658—49), предназначенную для целей вакуумэлектротехники и приборостроения. Образец № 3 представлял собою чистую ртуть, полученную из ртути Р₂ путем ее тщательной очистки в лаборатории эталонов электрических единиц ВНИИМ. Эту ртуть последовательно промывали хромовой смесью, подвергали электролитической очистке, перегонке под уменьшенным давлением и перегонке в вакууме.

Объем ртути в пикнометрах измеряли при температуре 20° С. Пикнометры выдерживали в термостате погруженными в стаканы со ртутью для устранения возможной деформации стекла пикнометров под влиянием давления ртути изнутри. С этой же целью все остальное время, а также при взвешивании, пикнометры со ртутью сохраняли в горизонтальном положении.

При определении объема ртути учитывался объем избыточного или недостающего, относительно основного штриха шкалы, столбика ртути, а также и объем мениска, принимавшийся за объем шарового сегмента.

В результате обработки наблюдений были получены численные значения массы и объема ртути, выведенные для каждого образца из ряда определений. При выводе их окончательных значений были определены и учтены некоторые систематические погрешности: влияние отклонения атмосферного давления от нормального, наблюдавшегося во время исследований, и давления самой ртути в пикнометре и ее мениска.

После обработки наблюдений и учета всех необходимых поправок были получены средние значения плотности исследованных образцов ртути при температуре 20° С и их средние квадратичные погрешности (g/cm^3), приведенные в таблице.

Образец	Пикнометр № 6		Пикнометр № 13	
	плотность	погрешность	плотность	погрешность
1	13,545332	0,000023	—	—
2	—	—	13,545859	0,000032
3	13,545818	0,000024	13,545856	0,000035
4	—	—	13,545856	0,000033
5	13,545821	0,000015	13,545844	0,000022
6	13,545825	0,000014	13,545850	0,000021

Эти результаты показывают, что расхождения в значениях плотности разных образцов ртути, определенных одним и тем же пикнометром, оказались меньшими, нежели расхождения в значениях плотности одних и тех же образцов, исследованных разными пикнометрами. Отмеченное обстоятельство, равно как и средние квадратичные погрешности результатов определения плотности ртути, показывают, что погрешность в определении плотности ртути превышает то различие в значениях плотности, которые могут иметь различные образцы.

Непосредственное сравнение масс различных образцов ртути, взятых в равных объемах, показало, что плотности их совпадают с точностью до $1 \cdot 10^{-5} g/cm^3$. Поэтому значение плотности ртути можно установить, исходя из всех полученных нами результатов наблюдений.

Средние значения плотности, определенные пикнометрами № 6 и 13, следующие:

пикнометр № 6: 13,545825 g/cm^3 ; пикнометр № 13: 13,545853 g/cm^3 .

Окончательное значение плотности ртути при температуре 20° С, выведенное из двух последних средних значений, равно 13,545839 g/cm^3 . При определении нами плотности ртути имелись возражения по поводу того, что при этом не было учтено влияние изотопического состава ртути и его изменение в процессе очистки. Эти возражения основывались на работах Брэнстеда и Хевеси [1], которые получили различие в плотности фракций ртути путем многократной их дистилляции. Между тем эти авторы в своих опытах пытались изменить изотопический состав ртути и для этого производили специальную разгонку ртути с отделением легких фракций от тяжелых. Обычная же перегонка ртути при ее очистке, как это видно из работ Брэнстеда и Хевеси и других наблюдателей, не меняет плотности ртути в пределах погрешности определения. Брэнстед и Хевеси нашли также, что изотопический состав ртути, полученной из различных источников, не вызывает значительной разности в плотности.

При нашем исследовании мы пользовались ртутью, очищаемой обычными методами, не вызывающими заметного изменения в изотопическом составе. Произведенные при этих определениях относительные сравнения плотности различных образцов дали совпадение в значении плотности до $1 \cdot 10^{-5} g/cm^3$.

В 1957 г. было произведено определение плотности ртути при температуре 20°C в Национальной физической лаборатории в Англии. Результаты этой работы опубликованы в статье: «Точное определение плотности ртути абсолютным методом» [2].

Авторы указанной статьи, на основании своих экспериментальных исследований также пришли к выводу, что обычная перегонка ртути при ее очистке не меняет плотности и что природная ртуть по изотопическому составу довольно постоянна.

Работа в Национальной физической лаборатории производилась путем взвешивания в ртути куба, объемом около 700 см^3 , из карбида вольфрама с кобальтом, имеющего зеркальную поверхность. Во время взвешивания температуру ртути поддерживали постоянной до $0,001^{\circ}\text{C}$.

Для определения объема с максимальной точностью, от которой существенно зависит точность определения плотности ртути, куб подвергался тщательному всестороннему исследованию. Были измерены с большой точностью его масса и объем, исследованы поверхности граней и значения углов, определены возможные погрешности измерения.

Для исследования служили четыре образца специально очищенной ртути, причем был исследован в ряде лабораторий изотопический состав одного из образцов. На основании результатов масспектрографического анализа лабораторий авторы работы пришли к заключению о том, что нельзя обнаружить различия в изотопическом составе двух образцов, пока разность их плотности не будет равна $1 \cdot 10^{-4}\text{ г/см}^3$. Так как различие в плотности других трех образцов было значительно меньшим, то изотопический состав их и не определяли.

В результате этой работы было выведено среднее значение плотности ртути при 20°C , равное $13,5458924\text{ г/см}^3$, которое отличается на $5,3 \cdot 10^{-8}\text{ г/см}^3$ от полученного нами значения. Это расхождение могло быть вызвано различной методикой определения плотности ртути.

В настоящее время во ВНИИМ ведется работа по дальнейшему определению плотности ртути абсолютным методом в направлении повышения точности измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brönsted J. N. & von Hevesy G., Nature, 106, London, 1920, p. 144; 109, 1922, p. 780.
2. Coon A. H. & Stone W. B., Philosophical Transaction of the Royal Society of London, 1957.

Поступила в редакцию
27/ХII 1969 г.

П. А. НАЛИМОВ
ВНИИМ

ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТЕЙ ВОДНОСПИРТОВЫХ РАСТВОРОВ

В статье описывается опытное исследование плотности 19 водноспиртовых растворов пикнометрическим методом при температурах 25, 30, 35 и 40° С с наибольшей средней погрешностью в определении плотности, не превышающей $9 \cdot 10^{-6}$ г/мл. Сравниваются значения плотностей водноспиртовых растворов, полученные автором, со значениями, полученными Д. И. Менделеевым (1865 г.), Н. С. Осборном (США, 1913 г.), А. В. Фростом (СССР, 1930 г.).

Д. И. Менделеев [1, 2] подробно исследовал плотность чистого этилового спирта и его водных растворов в промежутке от 35 до 100% спирта при температурах 0, 10, 15, 20 и 30° С. После опытных исследований Д. И. Менделеева появились работы Крейтлинга (1892 г.), Берлинской поверочной комиссии, Юнга (1902 г.), Винклера (1905 г.), Классона и Норлинга (1906 г.), А. Г. Дорошевского ([3], 1911 г.), Осборна, Маккельви и Бирса ([4], 1913 г.), А. В. Фроста ([5], 1930 г.), М. С. Вревского и др. [6], которые занимались получением химически чистого безводного спирта и определением плотности спирта и его водных растворов при разных температурах.

В 1953—1956 гг. во ВНИИМ автором были проведены опытные исследования по определению плотности водноспиртовых растворов в промежутке температур 25—40° С, которые представляют расширение и уточнение работы Д. И. Менделеева 1865 г.

Из двух весовых способов определения плотности, гидростатического и пикнометрического, в результате предварительных испытаний был выбран второй, который, как выяснилось, оказался единственно возможным для выполнения поставленной задачи с намеченной точностью.

Экспериментальная часть

Были разработаны, изготовлены и исследованы специальные пикнометры, термостатные установки и приспособления, позволившие измерять плотности жидкостей при разных температурах с погрешностью не более $\pm 0,005^\circ \text{C}$.

В пикнометре емкостью 90 мл (рис. 1) объем жидкости определялся до верхнего среза (края) капилляра *I*, которым заканчивается пикно-

метр. Это исключает конденсацию паров испаряющейся жидкости, возможную в пикнометрах иной конструкции, и связанную с ней систематическую погрешность измерения объема жидкости. Такая погрешность особенно велика при определении плотности жидкости при температурах выше нормальной. Между тем специальный пикнометр обеспечивал определения плотности жидкости с погрешностью не более $1 \cdot 10^{-5}$ г/мл.

Действительно, он дает возможность установить уровень жидкости с отклонением $\pm 0,2$ мм, а это при диаметре капиллярной трубки в 1 мм вызовет систематическую погрешность в определении объема жидкости всего лишь на 0,00015 мл. Такая погрешность может повлиять на результат определения плотности исследуемой жидкости не более чем на $2 \cdot 10^{-6}$ г/мл, т. е. окажется за пределами намеченной точности определения.

С другой стороны, указанные пикнометры обладают достаточной чувствительностью, чтобы регистрировать изменение плотности при малых изменениях температуры. Так, например, изменение температуры крепкого спирта на $\pm 0,01^\circ$ C вызывает изменение его объема в пикнометре на 0,0009 мл, которое не может оказаться незамеченным, так как эта погрешность превышает максимальную погрешность определения объема жидкости в пикнометре в 6 раз.

Пикнометрический метод определения плотности жидких тел требует особенно тщательного определения постоянных каждого прибора, а именно: массы, емкости пикнометра и объема его стекла. Эти постоянные для каждого прибора определялись путем многократных измерений и время от времени в процессе работы проверялись дополнительно для контроля правильности определения и неизменности их.

Средние значения массы m пикнометра и объема V стеклянной оболочки и средние квадратичные погрешности S_m и S_V его были получены

на основании 12 определений и оказались равными:

для пикнометра № 2

$$m = 42,09517 \text{ г}, \quad S_m = 4 \cdot 10^{-5} \text{ г};$$

$$V = 16,95975 \text{ мл}, \quad S_V = 29 \cdot 10^{-5} \text{ мл};$$

для пикнометра № 4

$$m = 44,91930 \text{ г}, \quad S_m = 4 \cdot 10^{-5} \text{ г};$$

$$V = 18,09724 \text{ мл}, \quad S_V = 28 \cdot 10^{-5} \text{ мл}.$$

После определения массы пикнометра и объема его стеклянной оболочки были измерены емкости прибора при температурах 20 и 40° C. Средняя емкость каждого прибора, полученная из 15 определений при каждой температуре, имела следующие значения (мл):

для пикнометра № 2

$$V_{20^\circ} = 80,8802 \pm 0,0002, \quad V_{40^\circ} = 80,9212 \pm 0,0001;$$

для пикнометра № 4

$$V_{20^\circ} = 89,0062 \pm 0,0002, \quad V_{40^\circ} = 89,0508 \pm 0,0002.$$

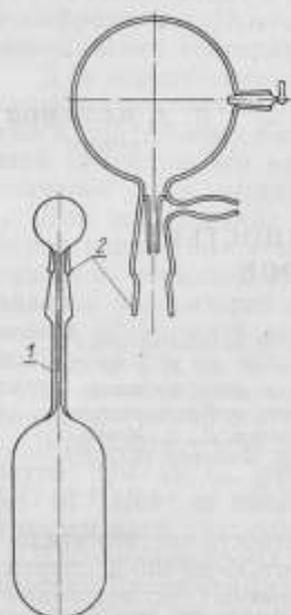


Рис. 1. Пикнометр и шар.

1 — капилляр равномерного сечения (внутренний диаметр около 1 мм, наружный диаметр 8,0 мм); 2 — стеклянный шланг.

Определения плотности водноспиртовых растворов, а также исследование новых эталонных наборов денсиметров повышенной точности потребовали создания термостатной установки, состоящей из термостата 2 типа ТС-15 и термостатной ванны 1, соединенных между собой резиновым шлангом и образующих, таким образом, замкнутую систему (рис. 2).

Термостатная ванна (рис. 3) представляет собой латунный цилиндр с двойными стенками, диаметром 300 мм, высотой 550 мм и емкостью около 29 л. Ванна герметически закрыта латунной крышкой, в которой имеются четыре отверстия.



Рис. 2. Термостатная установка.
1 — термостатная ванна; 2 — термостат.

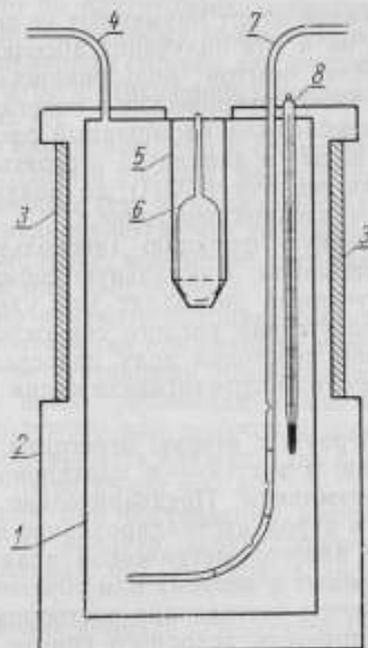


Рис. 3. Термостатная ванна.
1 и 2 — внутренняя и наружная стенки ванны; 3 — окна для наблюдения за температурой; 4 — латунная трубка, через которую вода перекачивается обратно в термостат; 5 — держатель пикнометра; 6 — пикнометр; 7 — латунная трубка, через которую вода поступает из термостата; 8 — термометр.

При исследовании плотности раствора пикнометрическим методом в самое большое отверстие (в центре) вставляют пикнометр с раствором. В другое отверстие вставлена изогнутая латунная трубка 7, идущая до дна ванны. Для лучшего перемешивания воды и обеспечения равномерной постоянной температуры в ванне на трубке сделаны 24 отверстия (по 3 отверстия в 8 разных местах). Через эту трубку поступает в ванну вода из термостата. В третье отверстие вставлен латунный отросток 4, через который вода переливается обратно в термостат, а в четвертое отверстие вставлен термометр 8 с ценой деления $0,01^{\circ}\text{C}$.

На боковой поверхности ванны имеются окна для наблюдения за температурой.

Дистиллированная вода, нагретая до требуемой температуры, перемешивается и перекачивается из термостата в термостатную ванну и из нее обратно в термостат благодаря чему в системе удается установить

в течение некоторого промежутка времени (около 30 мин) необходимую температуру раствора (10—40° С) и поддерживать ее в продолжение всего опыта с отклонениями, не превышающими $\pm 0,005^\circ \text{C}$.

В наших исследованиях этиловый спирт, подвергнутый двойной ректификации, имел следующие показатели:

альдегиды	не более 0,0005% по объему
сизушное масло	не более 0,0005 ⁰ / ₀ по объему
эфир (в пересчете на уксусноэтиловый эфир) в 1 л безводного спирта	не более 30 мг
фурфурол	0
крепость спирта	96,2 ⁰ / ₀ по объему

Такой спирт применяют не только для приготовления слабых растворов, но и для получения абсолютного алкоголя.

Для опытов пользовались водопроводной нежской водой. Она содержит органические и неорганические вещества, поэтому для очистки ее прибавляли насыщенный раствор перманганата калия (2—3 см³ на 1 л воды) и давали ей отстояться в течение суток. Затем к воде добавляли щелочи (KOH) до получения щелочной реакции и приступали к замедленной перегонке.

Первую фракцию (несколько миллиметров) перегоняемой воды отбрасывали, а остальную собирали в колбу из тугоплавкого стекла. Полученный дистиллят для удержания аммиака вторично перегоняли в присутствии кислого сернистого калия (1 г на 1 л воды). После второй перегонки воду подвергали дополнительной очистке, добавляя в нее следы перманганата калия и окиси бария, и перегоняли ее в третий раз.

Первую и вторую перегонки производили в колбе из тугоплавкого стекла, а третью — в платиновом кубе с платиновым холодильником и приемником. Предварительно холодильник и приемник промывали 2—3 ч паром дистиллированной воды.

В алколометрической практике состав водноспиртовых растворов выражают в весовых или объемных процентах. Нами был выбран весовой метод составления растворов как более точный.

Плотность исходного спирта определяли при четырех температурах (15, 20, 25 и 30° С) и по полученным значениям находили процентное содержание спирта в исходном веществе по существующим таблицам, рассчитанным по данным Д. И. Менделеева.

Таблица 1

t, °C	Исходный спирт		Среднее значение концентрации, %
	плотность, г/мл	крепость раствора по весовым процентам	
15	0,810748	94,566	} 94,566
20	0,805424	94,566	
25	0,801054	94,564	
30	0,796616	94,568	

Восьмикратное определение плотности исходного спирта при одной и той же температуре и перевод средних значений плотностей в весовые проценты позволили весьма точно установить процентное содержание безводного спирта в исходном веществе (табл. 1).

Водноспиртовые растворы в зависимости от их концентрации можно составлять различно. Например, Д. И. Менделеев вливал в сосуд сначала воду, так как она менее летуча и более тяжела, чем спирт. Налив определенное количество воды, он взвешивал сосуд с водой, затем вливал поверх воды спирт струей, направленной на стенку сосуда. Сосуд с водою и спирт вновь взвешивал.

При таком способе вода занимала нижний слой и почти не смешивалась со спиртом, а это позволяло избежать нагревания смеси до взвешивания. После взвешивания Д. И. Менделеев осторожно перемешивал воду со спиртом.

А. В. Фрост применял в своей работе по приготовлению растворов два способа. Первый состоял в том, что к отвешенному количеству воды он прибавлял спирт и смесь взвешивал; во втором способе для растворов в промежутке концентрации от 25 до 99% он к отвешенному количеству спирта прибавлял воду и смесь взвешивал [5].

Способы А. В. Фроста не могут быть оправданы, ибо в определении массы второго компонента, входящего в данный раствор, могут возникнуть значительные погрешности, обусловленные тем, что при смешивании взаимно растворяющихся жидкостей увеличивается их диссоциация: образуется большее количество простых молекул, вследствие чего температура повышается и объем расширяется или сокращается.

Сообразно со сказанным, было решено изменить методику составления водноспиртового раствора. При приготовлении его сначала взвешивали требуемое количество воды с соответствующими поправками на потерю веса в воздухе и по количеству воды прибавляли отвешенное количество рассчитанного спирта, необходимого для получения желаемого раствора. Для отвешивания исходных веществ служили две колбы по 250 мл, а для составления раствора — одна колба 500 мл.

Для того чтобы при отвешивании или при составлении раствора исходное вещество не поглощало влагу из воздуха, соответствующую колбу продували сухим воздухом и наполняли без доступа влажного воздуха.

При составлении раствора в колбу вначале вливали отвешенное количество воды путем «продувания», потому что она более тяжела и менее летуча, чем спирт. Затем под нижний слой воды вливали в колбу спирт. При таком «продувании» спирта в воду происходило непрерывное естественное смешивание спирта с водою. Далее раствор дополнительно перемешивали, сперва вращая колбу в течение 2—3 мин вокруг оси, а потом просто взбалтывая раствор. При смешивании насыщенного воздухом спирта и воды всегда наблюдалось усиленное выделение пузырьков.

Для определения количества A воды, которое следует добавить к 1 кг исходного спирта крепости P , чтобы получить желаемый раствор крепости P_1 , пользовались формулой

$$A = \frac{P - P_1}{P_1},$$

причем принимали во внимание температуру, давление и среднюю влажность воздуха лаборатории.

Так были составлены 19 растворов. Для получения более достоверного значения процентного содержания спирта в каждом растворе, плотности их определяли при температурах 25 и 30° С. После этого дополнительно определяли процентное содержание спирта в каждом растворе по существующим таблицам, составленным на основании данных Д. И. Менделеева, из которых брали среднюю величину концентрации спирта.

Плотность водноспиртовых растворов определяли с помощью двух пикнометров, для чего их наполняли исследуемым раствором при пониженном давлении воздуха, выдерживали в термостате при определенной температуре и взвешивали. Затем пикнометр погружали в термостатную ванну так, чтобы верхний конец капиллярной трубки прибора, покрытый покровным стеклом, выступал над крышкой ванны не более чем на 5—6 мм. Обычно температура в ванне была всегда выше, чем температура раствора в пикнометре, и чтобы давление внутри пикнометра не увеличивалось вследствие расширения жидкости, время от времени приходилось приподнимать покровное стекло.

При определении плотности водноспиртового раствора строго следили за тем, чтобы под стеклянной крышкой в капиллярной трубке пикнометра не оставался пузырек воздуха. В противном случае, приподнимая крышку, вводили нужное количество раствора в капиллярную трубку и вновь закрывали ее.

Пикнометр выдерживали в термостатной ванне в течение 50 мин, чтобы он приобрел требуемую температуру. Далее, для сокращения времени, необходимого для того, чтобы пикнометр приобрел температуру воздуха витрины весов (стеклянный футляр), его погружали в термостат с циркулирующей водой, температуру которой поддерживали близкой к температуре витрины. Затем пикнометр вынимали из термостата, просушивали и помещали в витрину весов.

Принимая во внимание способность крепких спиртов поглощать влагу из воздуха, а также относительно большую скорость испарения их, было решено смазывать шлиф стеклянного колпачка пикнометра тонким слоем вазелина, что обеспечивало полную герметичность его в течение нескольких дней. Необходимо отметить, что смазанные вазелином колпачки почти не менялись в весе в течение нескольких дней (13—14). Точную массу вазелина на шлифе колпачка находили при каждом определении. Обычно она не превышала нескольких десятых долей миллиграмма и при вычислении плотности раствора ее вычитали из общего веса пикнометра со спиртом.

Взвешивание производили по способу Барда. При этом для введения необходимых поправок отмечали температуру воздуха и воды, атмосферное давление и влажность воздуха.

Плотность водноспиртовых растворов определяли при температурах 25, 30, 35 и 40° С, сначала в порядке возрастания, а затем в порядке убывания температур. Такой порядок был принят, чтобы проверить, не происходит ли при этих, довольно продолжительных операциях, какое-либо заметное изменение плотности растворов вследствие испарения из них спирта или поглощения спиртом влаги из окружающей среды. Опыт показал, что разности плотностей одного и того же раствора для одной и той же температуры при определениях в прямом и обратном порядке не превышают $8 \cdot 10^{-6}$ г/мл. Это позволяет сделать вывод, что определение плотностей водноспиртовых растворов производилось с погрешностью не большей, чем погрешности значений плотностей в существующих таблицах для температуры ниже 30° С.

После каждого ряда измерений из пикнометров выливали испытуемую жидкость, промывали их сначала дистиллированной водой, а затем крепким этиловым спиртом, высушивали, вновь наполняли водноспиртовым раствором и повторяли исследование плотности раствора при тех же температурах. В случае расхождения в полученных результатах более чем на две единицы пятого десятичного знака после запятой, определение повторяли в третий раз. Всего было исследовано 19 водноспиртовых растворов.

В качестве иллюстрации практически достижимой точности могут служить данные о воспроизводимости значения плотности (g/ml) 19 водноспиртовых растворов концентрации 4,906; 9,143 и 15,244% (табл. 2, [7]) и 20,510; 26,184 и 72,510% (табл. 3) пикнометрами № 2 и 4 при температурах 25, 30, 35 и 40° С.

Результаты исследования 19 растворов обнаруживают хорошую воспроизводимость значения плотности пикнометрическим методом. Средняя квадратичная погрешность определения плотности раствора даже при температуре 40° С не превышает $2 \cdot 10^{-5} g/ml$.

Таблица 2

T, °C	Наполнение пикнометра	Определение №	Раствор 4,906%, пикнометр		Раствор 9,143%, пикнометр		Раствор 15,244%, пикнометр		
			№ 2	№ 4	№ 2	№ 4	№ 2	№ 4	
25	1-е	1	0,988325	0,988329	0,981727	0,981730	0,973012	0,973000	
		2	0,988320	0,988324	0,981726	0,981730	0,973000	0,972998	
	2-е	1	0,988326	0,988318	0,981724	0,981718	0,973000	0,972998	
		2	0,988328	0,988319	0,981726	0,981716	0,972990	0,972990	
	Среднее значение плотности			0,988324 ± 0,000001		0,981725 ± 0,000001		0,972999 ± 0,000002	
	30	1-е	1	0,986857	0,986860	0,980099	0,980098	0,970954	0,971001
2			0,986860	0,986854	0,980089	0,980112	0,970989	0,970996	
2-е		1	0,986862	0,986864	0,980087	0,980111	0,970972	0,970998	
		2	0,986864	0,986858	0,980094	0,980110	0,970978	0,970994	
Среднее значение плотности			0,986860 ± 0,000001		0,980100 ± 0,000001		0,970985 ± 0,000006		
35		1-е	1	0,985169	0,985168	0,978274	0,978247	0,968768	0,968726
	2		0,985172	0,985164	0,978294	0,978291	0,968764	0,968747	
	2-е	1	0,985174	0,985176	0,978297	0,978276	0,968762	0,968774	
		2	0,985170	0,985164	0,978260	0,978262	0,968760	0,968780	
	Среднее значение плотности			0,985169 ± 0,000001		0,978275 ± 0,000006		0,968761 ± 0,000006	
	40	1-е	1	0,983272	0,983272	0,976186	0,976205	0,966476	0,966474
2			0,983270	0,983266	0,976245	0,976245	0,966484	0,966462	
2-е		1	0,983268	0,983266	0,976206	0,976200	0,966478	0,966480	
		2	0,983265	0,983274	0,976206	0,976180	0,966474	0,966460	
Среднее значение плотности			0,983269 ± 0,000001		0,976209 ± 0,000008		0,966474 ± 0,000003		

Чтобы по полученным значениям плотности при кратных температурах для растворов, крепость которых близка к 5, 10, ... 90 и 95% вес. найти плотность при таких же концентрациях, т. е. 5, 10, ..., 95% (табл. 4), автор произвел соответствующую математическую обработку экспериментальных данных.

Опытное исследование плотности растворов производилось при 25—40° С через 5° с предельной погрешностью не более $\pm 0,01^\circ$ С.

Математическая обработка произведена для каждой изотермы путем последовательных приближений и оценки конечных разностей изменения плотности спирта на 1% по способу наименьших квадратов.

Таблица 3

T, °C	Наименование пикнометра	Определение №	Раствор 20,510%, пикнометр		Раствор 26,184%, пикнометр		Раствор 72,510%, пикнометр	
			№ 2	№ 4	№ 2	№ 4	№ 2	№ 4
25	1-е	1	0,965640	0,965662	0,957096	0,957102	0,857334	0,857335
		2	0,965662	0,965664	0,957106	0,957108	0,857332	0,857334
	2-е	1	0,965658	0,965662	0,957102	0,957096	0,857336	0,857338
		2	0,965664	0,965660	0,957098	0,957098	0,857339	0,857332
	Среднее значение плотности		0,965659 \pm 0,000003		0,957100 \pm 0,000001		0,857335 \pm 0,000001	
30	1-е	1	0,963168	0,963196	0,954105	0,954125	0,852994	0,853000
		2	0,963149	0,963174	0,954114	0,954124	0,852990	0,853002
	2-е	1	0,963158	0,963184	0,954114	0,954118	0,853001	0,852998
		2	0,963154	0,963180	0,954110	0,954110	0,852996	0,853000
	Среднее значение плотности		0,963170 \pm 0,000006		0,954115 \pm 0,000002		0,852997 \pm 0,000002	
35	1-е	1	0,960423	0,960429	0,951035	0,951046	0,848641	0,848644
		2	0,960431	0,960424	0,951026	0,951020	0,848648	0,848640
	2-е	1	0,960428	0,960428	0,951024	0,951004	0,848638	0,848636
		2	0,960424	0,960424	0,951024	0,951018	0,848644	0,848642
	Среднее значение плотности		0,960426 \pm 0,000001		0,951025 \pm 0,000004		0,848642 \pm 0,000001	
40	1-е	1	0,957724	0,957724	0,947760	0,947794	0,844173	0,844219
		2	0,957714	0,957722	0,947788	0,947788	0,844164	0,844220
	2-е	1	0,957738	0,957720	0,947798	0,947762	0,844180	0,844180
		2	0,957712	0,957719	0,947772	0,947742	0,844174	0,844198
	Среднее значение плотности		0,957722 \pm 0,000003		0,947776 \pm 0,000007		0,844188 \pm 0,000020	

Математическое исследование показало, что средняя погрешность вычисления примерно в три раза меньше наибольшей погрешности опыта, поэтому в значениях плотности, приведенных в табл. 4, заключаются такие же погрешности, как и в полученных непосредственно из опыта.

Таблица 4

Концентрация раствора, % вес.	Плотность раствора при температуре			
	25° С	30° С	35° С	40° С
5	0,988169	0,986702	0,985009	0,983109
10	980437	978755	976823	974753
15	973337	971351	969111	966690
20	966396	963945	961340	958588
25	958951	956082	953074	949899
30	950680	947403	944094	940545
35	941464	937898	934332	930514
40	931420	927653	923857	919886
45	920841	916906	912875	908817
50	909808	905775	901718	897484
55	898457	894345	890150	885882
60	886913	882741	878458	874153
65	875191	870984	866636	862264
70	863381	859066	854708	850269
75	851351	846961	842546	838170
80		834658	830297	825797
85	826568	822037	817713	813229
90		809063	804738	800297
95	799816	795409	791038	786672

Сравнение экспериментальных данных ВНИИМ с данными других алколометрических таблиц

Полученные во ВНИИМ значения плотностей водноспиртовых растворов кратных концентраций были сравнены с аналогичными данными, приведенными в таблицах: а) Главной палаты мер и весов (СССР, 1929 г.), Осборна (США, 1913 г.) и Фроста (СССР, 1930 г.) (табл. 5).

Принятые для сравнения таблицы, составленные на основании опытных исследований Д. И. Менделеева, Осборна и М. В. Фроста, являются наиболее достоверными.

В табл. 5 приведены умноженные на 10^5 разности между значениями плотностей водноспиртовых растворов, полученными во ВНИИМ и приведенными в указанных выше таблицах.

Из табл. 5 видно хорошее совпадение значений плотностей при температурах 25 и 30° С, полученных во ВНИИМ и в Палате мер и весов; в большинстве случаев отклонения не превышают одну единицу в пятом десятичном знаке после запятой. Только в пяти случаях они достигают $2 \cdot 10^{-5}$ г/мл, из них три при 25° С и два при 30° С. В остальных случаях ни одно расхождение не превышает максимальной допустимой погрешности определения плотности водноспиртовых растворов $6-7 \cdot 10^{-5}$ г/мл.

При анализе табл. 5 автор получил средние квадратичные и наибольшие расхождения результатов измерений плотности водноспиртовых растворов при 25 и 30° С, приведенные в табл. 6.

Таблица 5

Крепость раствора, % вес.	Расхождение значений плотности водоспиртовых растворов (% вес.) ВНИИМ с таблицами							
	Палаты мер и весов		Фроста		Осборна			
	25° С	30° С	25° С	30° С	25° С	30° С	35° С	40° С
5	0	0	4	2	0	0	0	0
10	-1	0	3	4	1	1	-3	0
15	-1	2	3	2	0	2	0	-1
20	0	-1	1	-1	1	-1	0	3
25	-1	1	4	4	0	1	1	-1
30	1	-1	1	3	1	-1	6	-1
35	-1	-1	3	6	0	0	8	0
40	0	0	3	0	-6	-4	1	-3
45	1	1	-2	-1	-1	-1	-3	-2
50	0	1	1	2	-4	-2	4	-2
55	-1	-1	-3	1	-4	-3	-1	-1
60	0	1	-4	0	-8	-4	-5	-2
65	-2	-1	0	4	-8	-2	-3	-1
70	2	2	-1	0	-2	-1	1	2
75	2	-1	6	3	1	-2	8	8
80	—	-1	—	-1	—	-7	1	2
85	1	0	2	-7	-3	7	-3	1
90	—	1	—	-11	—	16	-4	2
95	-1	0	-5	-9	-9	-14	-7	-3

Таблица 6

Т, °С	Среднее квадратичное расхождение с данными			Наибольшее расхождение с данными		
	Палаты мер и весов	Фроста	Осборна	Палаты мер и весов	Фроста	Осборна
25	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$
30	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$11,0 \cdot 10^{-5}$	$16 \cdot 10^{-5}$

Рассматривая степень согласованности между данными ВНИИМ и приведенными в таблице Осборна, мы находим, что разности между значениями плотности ВНИИМ и Осборна более значительны. В ряде случаев они превышают 6—7 единиц в пятом десятичном знаке после запятой.

Такие расхождения при разных температурах объясняются не только точностью определения плотности раствора, но и, главным образом, методом составления их, о чем сказано выше. Примером может служить работа Фроста, в которой к отвешенному количеству воды (или спирта) прибавляли спирт (или воду) и смесь взвешивали. При такой методике возникают значительные погрешности при определении массы

второго компонента в составленном растворе вследствие неопределенности поправки на объем. При смешивании взаимно растворяющихся жидкостей диссоциация обеих увеличивается, образуется большое количество простых молекул, вследствие чего температура повышается, в зависимости от концентрации объем расширяется или сокращается и поэтому учесть его затруднительно.

Подводя итог сопоставлениям исследований ВНИИМ с работами других авторов, необходимо обратить внимание на то, что один и тот же раствор при одной и той же температуре нами исследован 8 раз и средняя плотность выведена из восьми определений. Всего с помощью пикнометра было произведено 570 определений.

В работе Национального бюро стандартов США при тех же изотермах, 25 и 30° С, мы находим исследование 20 водноспиртовых растворов в промежутке 0—100%.

Осборн и его сотрудники применяли различные методы при исследовании одного и того же раствора при разных изотермах. Ими дано предпочтение изотерме 25° С, при которой исследовано 20 растворов; из 60 определений значений плотности 48 были произведены при помощи пикнометра и 12 — методом гидростатического взвешивания. Во ВНИИМ при той же температуре исследовано 19 растворов и с одинаковой тщательностью произведено 136 определений.

Плотность 20 растворов при 30, 35 и 40° С исследована в Национальном бюро стандартов США методом гидростатического взвешивания. Каждый раствор был взвешен при одной и той же температуре только дважды (120 определений).

Во ВНИИМ плотность 19 растворов исследована пикнометрическим методом. Каждый раствор при одной и той же температуре исследован 8 раз, т. е. произведено 456 определений.

Результаты нашей работы представляют не только расширение и уточнение работы Д. И. Менделеева по установлению плотности этилового спирта и водных его растворов, но в то же время являются дополнительным материалом для установления международной спиртомерной шкалы по восьми изотермам. Изотермы 0, 10, 15, 20 и 30° С были изучены Д. И. Менделеевым, а изотермы 25, 30, 35 и 40° С — во ВНИИМ.

В других странах исследована только одна из изотерм, 15° или 25° С, а значения плотности при других температурах (0, 5, 10, 20° С, ...) получены на основании определения теплового расширения спирта, воды и их смесей, или же дано предпочтение одной основной изотерме (Национальное бюро стандартов США).

Заключение

1. Разработаны и исследованы специальные пикнометры и термостатные приспособления, позволяющие производить измерения плотности жидкостей при разных температурах с погрешностью не более $\pm 0,005^\circ$ С.
2. Из этилового спирта двойной ректификации и дистиллированной воды тройной перегонки приготовлено 19 растворов весовым методом. Процентное содержание безводного спирта в исходном спирте установлено путем восьмикратного определения плотности его при температурах 15, 20, 25 и 30° С, и по полученным значениям плотности найдено процентное содержание спирта в исходном веществе по существующим таблицам, рассчитанным по опытным данным Д. И. Менделеева.
3. Исследованы плотности 19 водноспиртовых растворов с содержанием от 0 до 95% спирта при температурах 25—40° С и получены исход-

ные значения для составления алколометрических и специальных таблиц для учета и контроля спирта.

4. Исследование плотности раствора произведено пикнометрическим методом при температурах 25, 30, 35 и 40° С. Один и тот же раствор при одной и той же температуре исследован 8 раз и средняя величина плотности выведена из восьми определений. Наибольшая средняя погрешность в определении плотности даже при температуре 40° не превышает $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ г/мл.

5. Проведенная работа показывает хорошее соответствие результатов между значениями концентраций растворов, составленных весовым методом и найденных по существующим таблицам на основании определения плотности растворов при температурах 25 и 30° С. Только для одного раствора разности в значениях концентрации спирта, полученные весовым методом и найденные по значениям плотности, расходятся на 0,013%. Такое расхождение соответствует изменению плотности на 0,000036 г/мл для 94% спирта, равной погрешности в определениях плотности водноспиртового раствора по данным Д. И. Менделеева при 30° С.

6. По полученным данным составлена таблица плотностей водноспиртовых растворов при четырех изотермах.

7. Полученные результаты:

а) при температурах 25 и 30° С дают хорошее совпадение (не выходящее за 2 единицы пятого знака) с результатами, помещенными в таблицах Главной палаты мер и весов;

б) при температурах 35 и 40° С дают также сравнительно хорошее совпадение (не выходящее за пределы пятого знака) с результатами Национального бюро стандартов США (1913 г.).

8. Критическая оценка литературного материала по экспериментальным исследованиям водноспиртовых растворов, проведенным после Д. И. Менделеева, и результаты сравнения опытных данных настоящей работы с результатами, полученными другими исследователями, позволяют считать, что данные Д. И. Менделеева остаются пока непревзойденными по точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Менделеев Д. И., О соединении спирта с водою, 1865.
2. Менделеев Д. И., Исследование водных растворов по удельному весу, 1887.
3. Дорошевский А. Г., Исследование в области водноспиртовых растворов, 1911.
4. Osborne N. S., McElvly E. C. and Bearce H. W., Bulletin of the Bureau of Standards, 1913, p. 327—479.
5. Фрост А. В., Исследования в области удельных весов смесей этилового спирта и воды, Труды Института чистых химических реактивов, вып. 9, 1930.
6. Вревский М. С., Георгиевский А. Н. и Коялович Б. М., Работы Главной палаты мер и весов по установлению удельных весов водноспиртовых растворов, 1929.
7. Ниялимов П. А., Алколометрические таблицы, Труды ВНИИМ, вып. 41 (101), 1959.

Поступила в редакцию
8/ХИ 1959 г.

М. В. ЛАВРОВ
ВНИИМ

ПОГРЕШНОСТИ ПУРКИ

В статье приведены результаты опытного исследования погрешностей измерения массы зерна пурками. Выводы содержат рекомендации по уточнению поверочной схемы и методике поверки пурок.

Целью работы являлось теоретическое и экспериментальное исследование погрешностей измерения массы зерна, зависящих от пурки как измерительного устройства. Изучение причин изменения массы зерна, приводящих к изменению его массы, не входило в задачу автора.

Общие соображения по измерению массы зерна

Оценка массы зерна производится по его массе N — массе зерна в некотором объеме, заполняемом определенным механизмом. Эта характеристика массы зерна является условной величиной, зависящей от объема V пурки, средней плотности ρ зерна и коэффициента заполнения f для данного объема:

$$N = f\rho V. \quad (1)$$

Коэффициент заполнения является функцией как формы зерен и их коэффициента трения, так и условий, при которых происходит засыпка зерна: скорости падения груза, открывания воронки, сотрясений при выдвижении ножа и т. п. Вот почему этот коэффициент следует считать случайной величиной.

Если бы плотность зерна и ряд других его характеристик (коэффициент трения, форма и т. д.) являлись постоянными, то в результате многократных испытаний можно было бы установить закон распределения данной случайной величины и его параметры. Тем самым при определенной доверительной вероятности представлялось бы возможным оценить предельную погрешность измерения массы зерна при помощи пурки.

Однако многочисленные опыты указывают на изменение характеристик зерна при испытаниях. Об этом свидетельствуют графики изменения массы зерна от порядкового номера k испытания, приводимые на рис. 1а, 1б и 2. Они построены для различных пурок как на основании

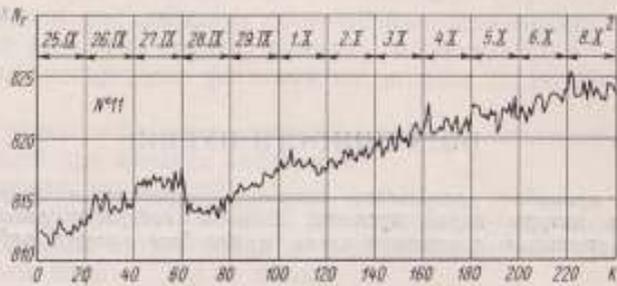
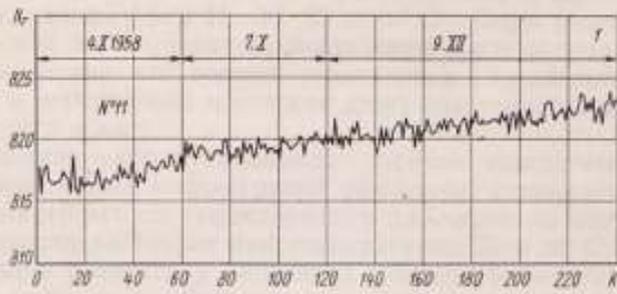


Рис. 1а.

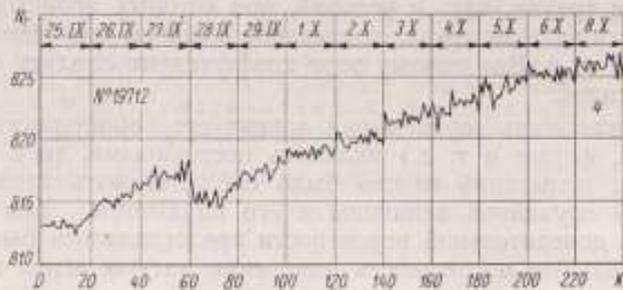
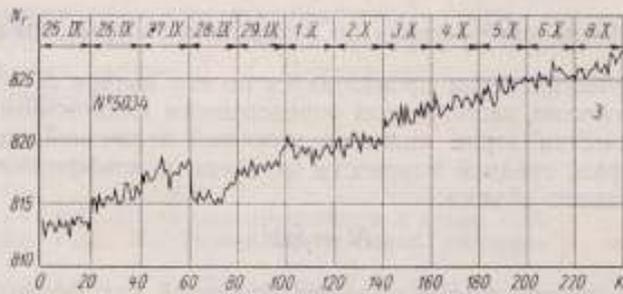


Рис. 1б.

материалов кругового сличения пурок 1-го разряда повышенной точности, произведенного в 1956 г. в лаборатории мер массы (графики 2, 3 и 4), так и материалов испытаний, выполненных в настоящей работе (графики 1, 5 и 6). В 1956 г. для каждой серии однодневных испытаний применялась новая порция зерна, взятая из одного и того же сравнительно небольшого запаса. Сличение пурок № 19689 и № 19712 (графики 5 и 6) производилось на одном и том же зерне (на протяжении одного дня). При испытаниях пурки № 11 (график 1) зерно также не менялось.

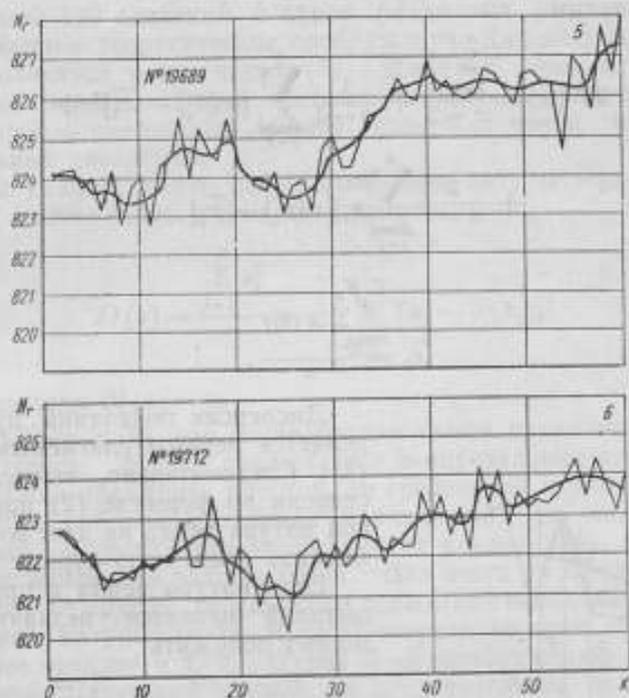


Рис. 2.

Погрешности измерения натуре зерна

Обычная обработка экспериментальных материалов, предполагающая постоянство натуре зерна, может привести к ошибочным результатам. Действительно, пусть натуре зерна — переменная величина, значение которой, указываемое определенной пуркой, меняется в зависимости от числа k измерений по некоторому закону

$$x = x(k).$$

При измерении натуре зерна пуркою получают ряд дискретных значений, отклоняющихся, вследствие неизбежных погрешностей, от действительного значения натуре зерна в момент измерения (рис. 3):

$$x_i = x(k_i) + \alpha_i,$$

где x_i — измеренное,

$x(k_i)$ — действительное значение натуре зерна, являющееся частным значением указанной функциональной зависимости;

α_i — погрешность i -го измерения.

Если воспользоваться обычным методом обработки, то на основании данных эксперимента можно найти только кажущуюся дисперсию:

$$D'(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (2)$$

Подставляя в формулу (2) значения x_i и $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$, после преобразований получим

$$D'(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2}{n-1} + \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x(k_i) - \bar{x}_0]^2 + \frac{2}{n-1} \sum_{i=1}^n \alpha_i [x(k_i) - \bar{x}_0], \quad (3)$$

где

$$\bar{x}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x(k_i)}{n}.$$

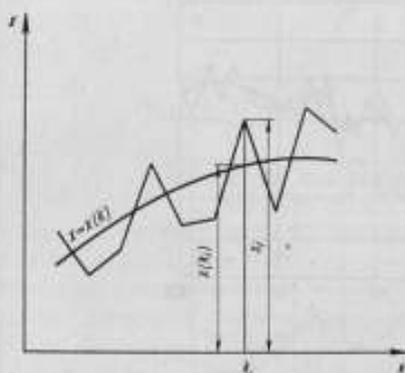


Рис. 3.

Дисперсия показаний пурки определяется первым слагаемым формулы (3). Следовательно, вычисление дисперсии по формуле (2) при переменной натуре зерна не дает возможности оценить дисперсию пурки.

Если натура зерна в процессе испытаний меняется незначительно и можно положить

$$x(k_i) = \bar{x}_0,$$

то

$$D'(x) = D(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2}{n-1}.$$

Пусть натура зерна, измеряемая двумя сличаемыми пурками, изменяется по одному и тому же закону, т. е.

$$x(k_i) - y(k_i) = C,$$

где постоянная C обусловлена различием объемов самих пурок.

Найдем кажущуюся дисперсию разностей показаний сличаемых пурок:

$$D'(y-x) = \frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - x_i) - (\bar{y} - \bar{x})]^2}{n-1}, \quad (4)$$

или

$$D'(y-x) = D'(y) + D'(x) - \frac{2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{n-1}. \quad (4')$$

Последнее слагаемое формулы (4') не равно нулю, в чем можно убедиться, полагая:

$$x_i = x(k_i) + \alpha_i; \quad y_i = x(k_i) + C + \beta_i,$$

тогда

$$D'(y-x) \neq D'(y) + D'(x). \quad (5)$$

Следовательно, даже кажущаяся дисперсия разностей показаний двух сличаемых пурок при одном и том же законе измерения природы зерна не равняется сумме кажущихся дисперсий этих пурок.

Результаты 120 сличений 5 пурок различных разрядов подтверждают изложенные теоретические соображения. Для всех сочетаний этих пурок выполняется неравенство (5). Для тех серий испытаний, где расхождение между обеими частями этого неравенства особенно велико, второй — смешанный момент содержит почти исключительно положительные слагаемые.

Если бы удалось найти закон изменения природы зерна, то дисперсию пурки можно было найти по формуле:

$$D(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_i - x(k_i)]^2, \quad (6)$$

так как при этом $M(\alpha) = 0$.

Вид функции $x(k)$ для исследования самой пурки не представляет особого интереса. Задача заключается в определении дисперсии $D(\alpha)$, для чего можно применить простой, не требующий громоздких вычислений способ обработки материала наблюдений. По опытным данным должна быть построена аппроксимирующая кривая $x(k)$, определяющая собой закон изменения природы зерна. Для этого по каждому двум, следующим друг за другом результатам испытаний необходимо найти среднее значение природы зерна. В свою очередь по этим средним можно найти новые средние и т. п. Путем 2—3 приближений определяются точки аппроксимирующей кривой, а следовательно, и сама кривая. На рис. 2 и 4 приводятся графики, построенные этим методом.

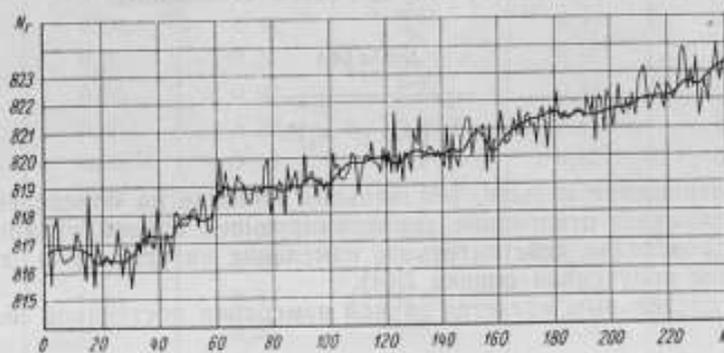


Рис. 4.

Таким образом можно найти значения $[x_i - x(k_i)]$ и, следовательно, рассчитать $D(\alpha)$ по формуле (6). Такой способ не может претендовать на строгость. Результат зависит от способа построения упомянутой кривой.

Для уменьшения погрешностей, зависящих от построения кривой, можно применять метод, основанный на вычислении разностей результатов двух соседних измерений.

Найденное из опыта значение x_i отличается от соответствующей ординаты $x(k_i)$ аппроксимирующей кривой на α_i :

$$x_i = x(k_i) + \alpha_i;$$

аналогично

$$x_{i+1} = x(k_{i+1}) + \alpha_{i+1},$$

тогда

$$x_{i+1} - x_i = x(k_{i+1}) - x(k_i) + \alpha_{i+1} - \alpha_i,$$

следовательно

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i)^2 &= \sum_{i=1}^n \alpha_{i+1}^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 + \sum_{i=1}^n \Delta^2 x(k_i) - 2 \sum_{i=1}^n \alpha_i \alpha_{i+1} + \\ &+ 2 \sum_{i=1}^n (\alpha_{i+1} - \alpha_i) \Delta x(k_i). \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\Delta x(k_i) = x(k_{i+1}) - x(k_i).$$

Последние две суммы формулы (7) содержат как положительные, так и отрицательные слагаемые. При достаточно большом n значение каждой из них близко к нулю. Поэтому

$$\sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i)^2 \approx 2 \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 + \sum_{i=1}^n \Delta^2 x(k_i).$$

Тогда дисперсия пурки

$$D(\alpha) \approx \frac{1}{2n} \left[\sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i)^2 - \sum_{i=1}^n \Delta^2 x(k_i) \right]. \quad (8)$$

Надежность оценки $D(\alpha)$ определяется отношением

$$\frac{\sum_{i=1}^n \Delta^2 x(k_i)}{\sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i)^2}. \quad (9)$$

Чем это отношение меньше, тем меньшее влияние на определение дисперсии оказывает отклонение аппроксимирующей кривой от кривой, по которой происходит действительное изменение природы зерна, т. е. тем достовернее полученная оценка $D(\alpha)$.

Здесь предельным является случай измерения постоянной величины, когда

$$\sum_{i=1}^n \Delta^2 x(k_i) \equiv 0.$$

В табл. 1 и 2 приведены значения $\frac{\sum \Delta^2 x(k_i)}{2n}$, позволяющие оценить порядок отношения (9).

Таблица 1

№ серий	Дисперсии пурки № 19712, Г ²				
	ф-ла (2)	ф-ла (6)	$\frac{\sum \Delta^2 x (k_i)}{2n}$	ф-ла (8)	ф-ла (8) с поправкой $\frac{\sum x_i^2 + 1}{n}$
1	0,12	0,07	0,02	0,08	0,07
2	0,40	0,07	0,01	0,03	0,02
3	0,38	0,38	0,01	0,39	0,38
4	0,40	0,20	0,02	0,34	0,29
5	0,34	0,28	0,01	0,22	0,26
6	0,13	0,10	0	0,15	0,12
7	0,17	0,13	0	0,12	0,16
8	0,28	0,29	0	0,18	0,18
9	0,56	0,42	0	0,40	0,37
10	0,56	0,48	0,01	0,35	0,42
11	0,23	0,23	0	0,24	0,20
12	0,35	0,35	0	0,38	0,34
240 испытаний 1956 г.	0,35	0,25	—	0,24	0,23

Таблица 2

№ серий	Дисперсии пурки № 11, Г ²				
	ф-ла (2)	ф-ла (6)	$\frac{\sum \Delta^2 x (k_i)}{2n}$	ф-ла (8)	ф-ла (8) с поправкой $\frac{\sum x_i^2 + 1}{n}$
1	0,26	0,14	0,02	0,16	0,14
2	0,50	0,43	0,05	0,39	0,35
3	0,27	0,27	0	0,35	0,23
4	0,36	0,30	0,03	0,34	0,33
5	0,30	0,20	0,01	0,13	0,18
6	0,25	0,23	0,02	0,17	0,17
7	0,32	0,18	0,01	0,20	0,18
8	0,66	0,37	0,02	0,37	0,32
9	0,55	0,49	0,03	0,47	0,48
10	0,34	0,34	0,03	0,36	0,34
11	0,71	0,50	0,01	0,54	0,49
12	0,52	0,41	0,03	0,36	0,38
240 испытаний 1956 г.	0,42	0,33	—	0,33	0,30
То же, 1959 г.	0,39	0,38	—	0,33	0,31

При небольшом числе испытаний (до 20) на значение $D(\alpha)$, вычисляемое по формуле (8), может повлиять второй смешанный момент.

В таких случаях поправка $\frac{\sum x_i^2 x_{i+1}}{n}$ оказывается достаточной, несмотря на приближенное построение кривой изменения измеряемой величины. Подобный случай имеет место в табл. 2 (3-я серия). Здесь изменение измеряемой величины практически не наблюдалось $\left(\frac{\sum \Delta^2 x(k_i)}{2n} \cong 0\right)$, а второй смешанный момент оказался довольно значительным.

Слагаемое $2 \sum_{i=1}^n \alpha_i x_{i+1}$ правой части формулы (7) может быть значимым только в случае резкого скачкообразного изменения самой измеряемой величины.

В табл. 1 и 2 приведены также дисперсии пурок, найденные на основании формул (2), (6) и (8) по материалам 12 серий испытаний пурок (по 20 в каждой) в 1956 г. Даны также значения дисперсий пурок, полученные по результатам всех 240 измерений. Кроме того, в табл. 2 приведены дисперсии, вычисленные на основании материала 240 испытаний 1959 г. Из данных таблиц следует, что наибольшие значения дисперсии дает обычный метод. Этому и следовало ожидать, так как в состав получаемой по нему оценки входит ряд неслучайных членов. Рекомендуемый и обычный методы приводят к близким результатам для тех серий испытаний, где центр распределения не меняется.

Дисперсии пурки № 11, найденные с помощью рекомендуемого метода по материалам 240 измерений, проведенных в 1956 и 1959 гг., не отличаются друг от друга (обычный метод дает расхождение на 8%).

Расчет по формуле (8) дает оценку дисперсии более надежную, чем по формуле (6), так как вторая оценка, как указывалось, больше зависит от построения аппроксимирующей кривой, чем первая.

Дисперсии, вычисленные обычным и рекомендуемым методами, могут отличаться весьма значительно. Так, для серии из 240 испытаний это различие доходит до 140%.

Дисперсии пурок, принадлежащих к верхнему звену поверочной схемы, определяемые по результатам 20 измерений, нельзя считать достаточно надежными. В связи с непрерывным изменением самой природы зерна возникает вопрос о том, результаты какого же числа испытаний можно относить к одной генеральной совокупности (20, 40 и т. д. измерений). Применение дисперсионного анализа для обработки материала свыше 900 испытаний показало, что результаты 20 измерений, выполненных в течение одного дня, могут быть объединены. Между тем результаты 40 испытаний, проведенных в течение даже одного дня, и тем более в течение двух соседних дней, уже нельзя объединить, говоря о большем объеме испытаний.

На основании сказанного представляется необходимым при проверке пурок 1-го разряда проводить, по крайней мере, по три серии испытаний, содержащие по 20 измерений в каждой. Обработка каждой серии должна производиться непременно отдельно по методике, базирующейся на формуле (8). Дисперсию пурки следует определять как среднее арифметическое дисперсий, найденных для каждой из серий.

Поверка пурок

Поверочная схема для пурок * состоит из четырех звеньев: 1) группы образцовых пурок 1-го разряда повышенной точности; 2) образцовых пурок 1-го разряда; 3) образцовых пурок 2-го разряда; 4) рабочих пурок.

Методика поверок регламентирована действующей инструкцией 59—57 по поверке рабочих литровых пурок, проектом инструкции по поверке 20-литровых рабочих пурок и проектом инструкции по поверке однолитровых образцовых пурок. Требования инструкций сведены в табл. 3.

Таблица 3

Пурки	Допустимые погрешности			показаний пурки, г	Число наблюдений	σ_p ряда определенной природы зерна, г
	измерения мерки					
	внутреннего диаметра, мм	глубины, мм	объема, см ³			
Образцовые:						
1-го разряда, повышенной точности	±0,04	±0,10	±1,0	±0,8	20	0,3÷0,6
1-го разряда	±0,05	±0,15	±1,5	±1,5	20	0,4÷0,7
2-го разряда	±0,05	±0,20	±2,0	±2,0	10	0,6÷0,9
Рабочие	—	—	—	±4,0	6	—

Примечания. 1. Для образцовых пурок 1-го и 2-го разрядов значения погрешностей измерения внутреннего диаметра, глубины и объема мерки определяются лишь при отборе мерок к пуркам указанных разрядов.
2. Средние квадратичные погрешности показаний образцовых пурок должны быть определены по формуле

$$\sigma_p = \frac{5}{4} \frac{\sum_{i=1}^n |V_i|}{n} \quad (10)$$

Существо поверок сводится к многократным измерениям одной и той же порции природы зерна образцовой и поверяемой пурками.

Качество поверок пурок может быть оценено по возможному браку поверок, т. е. по относительному количеству неправильно аттестованных приборов. К последним относятся пурки годные, но забракованные при поверке, или же, наоборот, негодные, но допущенные к применению.

Процент брака поверки ** может быть найден, если известны

$$\frac{\Delta_x}{\sigma_x} \quad \text{и} \quad \frac{\sigma_x}{\sigma_{(y+e)}}$$

где Δ_x — допустимая погрешность поверяемой меры;

σ_x — среднее квадратичное отклонение совокупности рабочих пурок от номинала;

$\sigma_{(y+e)}$ — среднее квадратичное отклонение, определяемое как погрешностями образцовых пурок, так и методом поверки рабочих пурок.

* Поверочные схемы, Стандартгиз, 1960.

** Долинский Е. Ф., Анализ результатов поверок мер и приборов, «Измерительная техника», № 3, 1958.

Основываясь на допуске на рабочую пурку, принимая его равным $3\sigma_x$, можно по данным табл. 3 приблизительно оценить $\sigma_x \approx 1,3 \Gamma$, затем $\Delta_x = 4 \Gamma$. Для отыскания $\sigma_{(y+\varepsilon)}$ необходимо иметь $D(y+\varepsilon)$, которая вычисляется по дисперсии $D(y)$ образцовой пурки 2-го разряда и дисперсии $D(\varepsilon)$ погрешностей метода поверки рабочей пурки по пурке 2-го разряда:

$$D(y+\varepsilon) = D(y) + D(\varepsilon).$$

Если для средних квадратичных отклонений пурок 1-го разряда повышенной точности, пурок 1-го и 2-го разрядов принять наибольшие значения, приводимые в табл. 3, соответственно равные 0,6; 0,7 и 0,9 Γ , то

$$D(y) = \frac{(0,6)^2 + (0,7)^2}{20} + \frac{(0,7)^2 + (0,9)^2}{10} = 0,17 \Gamma^2;$$

$$D(\varepsilon) = \frac{(0,9)^2 + (1,3)^2}{6} = 0,38 \Gamma^2,$$

следовательно,

$$D(y+\varepsilon) = 0,55 \Gamma^2, \quad \sigma_{(y+\varepsilon)} \approx 0,74 \Gamma,$$

тогда

$$\frac{\Delta_x}{\sigma_x} = 3, \quad \frac{\sigma_x}{\sigma_{(y+\varepsilon)}} \approx 2. \quad (11)$$

По данным цитируемой работы, при значениях (11) брак поверки рабочих пурок составит 0,6%.

Таким образом, существующая поверочная схема и действующие допуски на рабочие и образцовые пурки позволяют проводить рабочие измерения с погрешностями, находящимися в 99,4% случаев в пределах $(+4 \Gamma) + (-4 \Gamma)$. Что касается пурок с алюминиевой меркой, вновь изготовленных и выпускаемых из ремонта, для которых инструкция 59—57 устанавливает погрешности от 0 до (-4Γ) , то здесь при существующей методике поверок (6 измерений) число неправильно аттестованных или забракованных пурок может достигать нескольких процентов (до 5%).

Следует иметь в виду, что приведенные расчеты справедливы только при условии, что натура зерна при осуществлении поверки не меняется. Это условие, по-видимому, легко выполнить при поверке рабочих пурок (6 измерений), но при поверке образцовых пурок и особенно пурок 1-го разряда (20 измерений) могут возникнуть дополнительные погрешности, вызванные изменением натуры зерна, что должно привести к увеличению брака поверки.

Средние квадратичные отклонения пурок всех звеньев схемы, как это следует из табл. 3, а также из результатов выполненных измерений, имеют одинаковый порядок (0,6—0,9 Γ). Поэтому наиболее рациональной следовало бы считать поверочную схему, состоящую из двух звеньев. Однако при такой, логически наиболее совершенной, схеме возникнут затруднения с поверкой первого звена схемы. Это обстоятельство приводит к необходимости введения еще одного звена — пурки 1-го разряда. Но единство измерений требует, чтобы все пурки 1-го разряда поверялись совершенно одинаково, т. е. надлежит ввести еще эталонную группу. Следовательно, существующая поверочная схема должна быть сохранена.

Формула

$$\sigma_p = \frac{5}{4} \frac{\sum_{i=1}^n |V_i|}{n}. \quad (10)$$

рекомендуемая инструкцией для оценки среднего квадратичного отклонения, едва ли может быть оправдана. Известно, что эта оценка значительно менее эффективна, чем значение эмпирической дисперсии.

Выводы

1. Натура зерна — переменная величина, могущая значительно изменяться в течение длинной серии испытаний.

2. Дисперсии пурок, представляющих различные звенья поверочной схемы, имеют одинаковый порядок.

3. Обработка результатов измерений, выполненных обычным методом, основанным на формуле (2), даже на одной порции зерна может привести к ошибочным результатам вследствие систематического изменения натуры зерна.

Изложенные выводы, а также соображения, приведенные в отдельных частях работы, позволяют рекомендовать следующие мероприятия, относящиеся к поверке пурок:

1. Существующие поверочная схема и методика поверки рабочих и образцовых пурок 2-го разряда могут быть сохранены, за исключением применения оценки по формуле (10).

2. Методику поверки образцовых пурок 1-го разряда следует изменить, доведя число сличений до 60, а допустимое значение среднего квадратичного отклонения принять равным 0,6 Г.

3. Пурки повышенной точности следует подвергать круговым сличениям не реже одного раза в 2 года.

4. Обработку результатов поверки пурок 1-го разряда и пурок повышенной точности следует производить посериально (не более 20 испытаний в серии) по методике, основанной на формуле (8).

5. Представляется желательной разработка такого метода измерения непосредственно плотности зерна, который можно было бы рекомендовать для широкого применения.

Поступила в редакцию
26/XII 1960 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. Б. И. Филиппчук. Погрешности измерения твердости по Роквеллу . . .	5
2. Б. И. Филиппчук, С. С. Степанов. Методы исследования алмазных наконечников к приборам твердости	22
3. Е. А. Волкова, А. В. Смирнов. Неоднородность мер твердости из углеродистой стали и способы ее устранения	29
4. С. А. Смолч. Образцовый упругий прибор системы ВНИИМ для измерения твердости по Роквеллу	39
5. М. И. Коточилова. Образцовый динамометр 1-го разряда типа ВНИИМ	48
✓ 6. М. А. Гуляев, В. А. Рыжов. Обработка капилляров для образцовых компрессионных манометров	58
✓ 7. М. А. Гуляев, А. В. Ерюхин, В. А. Рыжов. Наборы образцовых компрессионных манометров ВНИИМ	62
✓ 8. А. В. Ерюхин. Проверка измерительных блоков ионизационных и термометрических вакуумметров	70
9. М. И. Дрига. Тепловой (термомолекулярный) манометр с вертикальным подвесом	76
✓ 10. Е. Ф. Долинский, П. В. Индрик. Эталон давлений	88
11. А. С. Дмитриев, А. А. Часовников. Образцовый микроманометр типа ММП-1 с пределами измерений $400 \div 4000 \text{ кгс/м}^2$	103
12. Н. Ф. Гонек. Анализ равномерности работы ротационных счетчиков газа	108
13. П. П. Кремлевский. Измерение расхода пульсирующих потоков . . .	117
14. В. Л. Лассан. Образцовая тахометрическая установка для измерения угловых скоростей в пределах $5 \div 60000 \text{ об/мин}$	143
15. В. С. Шкаликков. Образцовая виброустановка	156
16. В. С. Шкаликков. Образцовая установка для создания и измерения вибраций в диапазоне частот $10 \div 50 \text{ гц}$	160
17. И. А. Стальгинская. Измерение вязкости масел в диапазоне температур от 0 до -60°C	166
18. М. Д. Иппиц. О плотности ртути	176
19. П. А. Налимов. Опытное исследование плотностей водноспиртовых растворов	181
20. М. В. Лавров. Погрешности пурки	193

Главный редактор *Н. Н. Александрова*

Техред *Р. Г. Польская*

Корректор *Л. Н. Кириш*

Подписано к печати 19/1 1961 г.

Уч.-изд. л. 17,5.

Формат бумаги $70 \times 108 \frac{1}{16}$

Печ. л. 12 $\frac{3}{4}$.

М-05582.

Тираж 3000.

Заказ 1995

Картфабрика ВМФ

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
35	9-я сверху	шириной 4—5 мм	шириной 45 мм
56	10-я снизу (в формуле)	$\pm 0,00063$	$\pm 0,00003$
96	1-я снизу (3-я графа таблицы)	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
96	6-я снизу (3-я графа таблицы)	$21 \cdot 10^{-4}$	$11 \cdot 10^{-4}$
104	2-я снизу	электроделитель 16	электродвигатель 16
156	10-я сверху	от 1 до 5000 мк	от 1 до 500 мк
158	13-я .	от 1 до 5000 мк	от 1 до 500 мк

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

1. Б. И. Пилипчук.	Твердость по Роквеллу . . .	5
2. Б. И. Пилипчук,	наконечников	
3. Е. А. Волкова,	углеродистой	
4. С. А. Смолич.	С	
	рения твердо	
5. М. И. Коточиг		
√ 6. М. А. Гуляев,	компрессион	
√ 7. М. А. Гуляев,	компрессион	
√ 8. А. В. Ерюхин,	парных вак	
9. М. И. Дрига.	Т	
	подвесом	
√ 10. Е. Ф. Долинс		
11. А. С. Дмитри	типа МНП	
12. Н. Ф. Гонек,	газа . . .	
13. П. П. Кремле		
14. В. Л. Лассан	угловых	
15. В. С. Шкали		
16. В. С. Шкали	вибраций	
17. И. А. Стуль	ратур с	
18. М. Д. Иппиц.	О плотности р.у.	
19. П. А. Налимов.	Опытное исследование плотностей	
	растворов	100
20. М. В. Лавров.	Погрешности пурки	193

Главный редактор *Н. Н. Александрова*

Техред *Р. Г. Польская*

Корректор *Л. Н. Кири*

Подписано к печати 19/1 1961 г.

Уч.-изд. л. 17,5.

Формат бумаги 70×108¹/₁₆

Печ. л. 12³/₄.

М-05582.

Тираж 3000.

Заказ 1995

Картфабрика ВМФ

p.

111
18
95

Цена 1 р. 23 к.