

ВСЕСОЮЗНЫЙ  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ  
В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ  
ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

*Выпуск 156 (216)*





ВСЕСОЮЗНЫЙ  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

---

ИССЛЕДОВАНИЯ  
В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ  
ИЗМЕРЕНИЙ

Труды метрологических институтов СССР

Выпуск 156 (216)

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



ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ  
Москва 1974

м/6295

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

В. О. Арутюнов (председатель), Н. Н. Александрова (секретарь), С. В. Горбачевич, А. Н. Гордов, Е. Ф. Долинский, Л. К. Каяк, Д. К. Коллеров, Е. Д. Колтик, И. Н. Кротков, В. Л. Лассан, Г. М. Малышев, Б. Н. Олейник, Ю. В. Тарбеев, Д. Ф. Тартаковский, А. М. Федоров, Е. Н. Чечурина, К. П. Широков, М. Ф. Юдин.

Ответственный редактор

докт. техн. наук проф. В. О. АРУТЮНОВ

Т  $\frac{30104}{085(02)-74}$

© Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, 1974

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Директивы XXIV съезда КПСС указывают на необходимость расширения промышленного производства современных приборов, аппаратов и лабораторного оборудования для проведения научно-исследовательских работ и увеличения производства приборов в два раза.

Таким образом, решения съезда поставили новые задачи перед отечественным приборостроением и метрологическим обслуживанием народного хозяйства.

Решению этих задач будет способствовать публикация настоящего сборника, который посвящен созданию новой измерительной аппаратуры, внедрению новых методов измерений и поверки приборов, предназначенных для метрологического обслуживания.

Сборник освещает результаты исследований по измерению давления, силы, твердости и параметров движения. В нем содержатся описание созданного эталона-копии, исследования в области глубокого вакуума и переменных во времени давлений. Кроме того, описаны поверочные установки и методика поверки моментометров. Две статьи посвящены точным измерениям твердости и одна — измерению механических характеристик полимеров.

В статьях, посвященных измерению параметров движения, даются сведения по градуировке акселерометров, а также по измерению очень малых угловых скоростей и исследованию характеристик динамических преобразователей.

Сборник будет полезен для всех специалистов, работающих в области измерительной техники по упомянутым видам измерений.

*Редактор*

*Е. Ф. ДОЛИНСКИЙ, Г. И. ЛОСКУТОВ,  
Г. И. ПОЛУХИН*  
ВНИИМ

## ЭТАЛОН-КОПИЯ ПЕРВИЧНОГО ГРУППОВОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ДАВЛЕНИЯ

За последнее время значительно возросло количество приборов, представляющих рабочие эталоны единицы давления с верхними пределами измерения:  $6 \cdot 10^5$ ;  $60 \cdot 10^5$ ;  $600 \cdot 10^5$  Па.

Первичный групповой эталон единицы давления, состоящий из пяти грузопоршневых манометров, был создан в 1954 г. и применялся для исследования и аттестации всех рабочих эталонов [1].

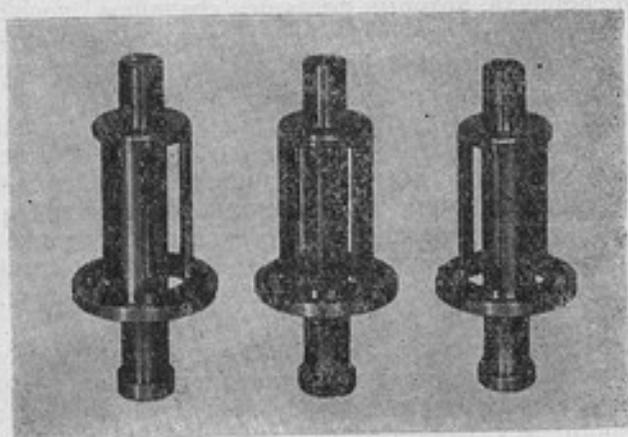


Рис. 1. Грузопоршневые манометры эталона-копии единицы давления

В результате 15-летней эксплуатации, особенно интенсивной в 1967—1969 гг., возникла опасность быстрого износа приборов первичного эталона. Поэтому для его сохранности необходимо было создать эталон-копию, который в случае износа восстано-

вить и заново аттестовать по первичному эталону значительно легче, чем весь первичный эталон.

Анализ ранее проведенных исследований и технологии изготовления поршневых пар, а также опыт эксплуатации первичного эталона, позволили установить основные характеристики и разработать новую конструкцию поршневых манометров, предназначенных для включения в состав эталонной копии.

Три грузопоршневых манометра, составившие эталонную копию, представлены на рис. 1, а их принципиальная схема на рис. 2.

Поршень 1 изготовлен из стали 38ХМЮА, и его рабочая поверхность азотирована и доведена до шероховатости порядка класса 12. Грузоприемная тарелка 2 выполнена в виде колокола с целью понижения центра тяжести подвижной части при наложенных грузах, что уменьшает боковые составляющие сил, возникающих вследствие невертикального положения поршня и статической неуравновешенности поршневой системы.

Кожух 3 герметизирован с помощью резиновых уплотнений 4 и служит для термостатирования. Последнее осуществляется с помощью стандартного водяного термостата, позволяющего поддерживать температуру прибора в пределах  $20^{\circ} \pm 0,1^{\circ} \text{C}$ .

Цилиндры двух приборов также изготовлены из стали 38ХМЮА с азотированными рабочими поверхностями. Цилиндр третьего прибора выполнен из бериллиевой бронзы. Необходимость применения бронзового цилиндра вызвана наличием бронзовых цилиндров у некоторых приборов, служащих рабочими эталонами, и дает возможность исключения поправок, обусловленных различием коэффициентов температурного расширения при сличениях.

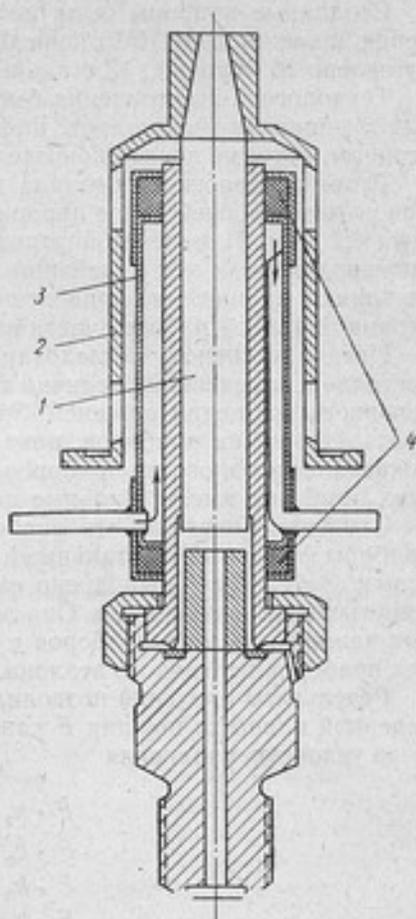


Рис. 2. Принципиальная схема грузопоршневого манометра эталонной копии

Созданные приборы были исследованы в лаборатории измерения давления ВНИИМ имени Д. И. Менделеева. Всего было изготовлено 16 поршней, 13 стальных и 3 бронзовых цилиндра.

Технологией изготовления были предусмотрены припуски по длине поршней и цилиндров, равные трем диаметрам с каждой стороны, которые после окончательной доводки отрезались.

Такая технология позволила достигнуть постоянства диаметров по всей рабочей длине поршней с отклонением, не превышающим 0,2 мкм. Измерение внутренних диаметров цилиндров не производили, так как колебания величины диаметров цилиндров не влияют на значение приведенных площадей манометров с постоянной длиной рабочей части поршня.

Предварительное исследование 16 изготовленных приборов состояло в определении величин скорости опускания и продолжительности вращения поршней. Это исследование позволило отобрать 11 лучших приборов, показания которых были сличены с показаниями одного из приборов первичного эталона. Девять из этих приборов имели стальные цилиндры и два — бронзовые.

Сличения показали, что наиболее точные результаты дали приборы № 12 и 15 со стальными цилиндрами и № 13 — с бронзовым. Затем было выполнено окончательное исследование упомянутых трех манометров. Оно заключалось в сличении показаний каждого из этих приборов с показаниями каждого из четырех приборов первичного эталона.

Результаты сличений позволили составить для искомой приведенной площади поршня  $F$  каждого исследуемого прибора четыре условных уравнения

$$\left. \begin{aligned} F \cdot k_1 &= F_1, \\ F \cdot k_2 &= F_2, \\ F \cdot k_3 &= F_3, \\ F \cdot k_4 &= F_4, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $F_1, F_2, F_3, F_4$  — приведенные площади поршней приборов первичного эталона и  $k_1, k_2, k_3, k_4$  — отношения масс подвижных частей поршневых систем приборов первичного эталона и испытуемого, соответственно.

Решение системы (1) дает значения  $F$ , а также оценки ее дисперсии и среднего квадратического отклонения:

$$\begin{aligned} F &= \frac{[kF]}{[k^2]}, \\ D(F) &= \frac{S^2}{[k^2]}, \\ S(F) &= \sqrt{\frac{S^2}{[k^2]}}. \end{aligned}$$

Таким образом, были определены приведенные площади поршней  $F_{12}$ ;  $F_{13}$ ;  $F_{15}$  приборов №№ 12, 15 и 13, включенных в состав эталона-копии.

Численные результаты, составляющие основную часть аттестационных данных, следующие.

Для прибора № 12 значение приведенной площади составило  $2,01067_6$ , для прибора № 13 —  $2,01066_3$ , для прибора № 15 —  $2,01075_4$ . Среднее относительное квадратическое отклонение значения приведенной площади для всех трех приборов равно  $4,10 \cdot 10^{-4}\%$ .

Введение в действие эталона-копии привело к соответствующему изменению поверочной схемы по измерению давления [2]. Эталон-копия будет применяться для исследования и аттестации рабочих эталонов единицы давления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский Е. Ф., Индик Н. В. Эталон давления. — В сб.: «Исследования в области механических измерений». Труды институтов Комитета, вып. 50(110), М.-Л., Стандартгиз, 1961, с. 88—102.
2. Долинский Е. Ф., Лоскутов Г. И., Полухин Г. И. Государственный первичный эталон единицы давления — паскаля. «Измерительная техника», 1972, № 7, с. 6—8.

Поступила в редакцию  
15/VIII 1973 г.

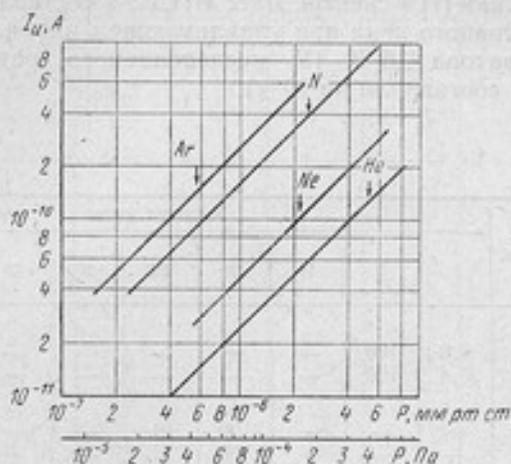
### ОМЕГАТРОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРЦИАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ ТИПА ИПДО-2

Одним из элементов создаваемого специального эталона давления и образцовой аппаратуры для вакуумных измерений является измеритель парциальных давлений. Его основное назначение — воспроизведение единицы давления в области низких парциальных давлений смесей газов, а также определение состава остаточных газов в вакуумной аппаратуре специального эталона низких давлений, необходимое для правильного воспроизведения единицы давления.

Для этой цели целесообразно использование выпускаемого промышленностью омегатронного измерителя парциальных давлений ИПДО-2 [1], имеющего улучшенные характеристики (более высокую разрешающую способность) по сравнению с ранее выпускавшимся прибором ИПДО-1 [2]. Во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева было проведено исследование метрологических характеристик и градуировки масс-спектрометра ИПДО-2 по чистым газам на вакуумной установке с форвакуумным насосом и двумя последовательными диффузионными парортутными насосами. Установка снабжена тремя ловушками, охлаждаемыми жидким азотом, и системой для напуска градуировочных газов особой чистоты.

Перед градуировкой всю вакуумную систему с омегатроном тщательно обезгаживали посредством прогрева при температуре 400°С. После обезгаживания остаточное давление в установке было  $\sim 10^{-7}$  Па. Градуировку производили при давлениях  $10^{-3}$  —  $10^{-5}$  Па. Давление измеряли с помощью ионизационного манометрического преобразователя типа ПМИ-2, предварительно проградуированного на образцовом компрессионном манометре по воздуху и чистым газам.

Были исследованы зависимости ионного тока омегатрона от давления и определена чувствительность для чистых газов: азота, аргона, гелия, неона. На рисунке приведены градуировочные кривые для вышеперечисленных газов. Значения абсолютных ( $K_i$ ) и относительных ( $\alpha_i$ ) (по отношению к азоту) чувствительностей приведены в табл. 1. Рассеивание значений чувствительностей, определенных при разных давлениях, характеризовалось



Градуировочные кривые омегатрона для чистых газов: аргона, азота, неона и гелия

относительными средними квадратическими отклонениями не более 3%.

Для сравнения в таблице приведены значения относительных чувствительностей для омегатрона, полученные другими авторами.

В табл. 2 представлены высоты пиков градуировочных спектров в процентах к основному пику. Высота основного пика принята за 100%. Эти значения не выходят за пределы разброса данных, приведенных в литературе различными авторами.

Таблица 1

Газ	M	$K_i, Па^{-1}$	$\alpha_i = \frac{K_i}{K_{N_2}}$	$\alpha_i$ (Бейли) [3]	$\alpha_i$ (Клоппер) [4]	$\alpha_i$ (Аверина) [5]
Гелий	4	0,0184	0,15	0,15	0,16	0,21
Неон	20	0,0362	0,29	0,26	—	0,30
Азот	28	0,123	1,0	1,0	1,0	1,0
Аргон	40	0,194	1,59	1,3	1,18	1,4

Было замечено, что относительная высота неосновного пика в спектре чистого газа зависит от давления газа. С уменьшением давления процентное содержание его увеличивается.

Из приведенных в литературе градуировочных спектров только в статье Аллена и Лэнга [6] указаны высоты пиков осколочных ионов для разных давлений, причем зависимость от давления весьма заметна.

Ложные пики [7] в спектре масс ИПДО-2 составляли не более 1—3% от основного пика при улавливающем напряжении на коробке анализатора 0,5 В. (У исследованного ранее прибора ИПДО-1 они составляли до 10%).

Таблица 2

Газ	Давление, Па	Массовое число								
		2	4	14	20	22	28	29	36	40
Гелий	$10^{-5}$	1,0	100	—	—	—	—	—	—	—
	$10^{-4}$	0,4	100	—	—	—	—	—	—	—
Неон	$10^{-5}$	—	—	—	100	21	—	—	—	—
	$10^{-4}$	—	—	—	100	11	—	—	—	—
Азот	$10^{-5}$	—	—	7,0	—	—	100	0,8	—	—
	$10^{-4}$	—	—	5,5	—	—	100	0,65	—	—
Аргон	$10^{-5}$	—	—	—	16,1	—	—	—	0,34	100
	$10^{-4}$	—	—	—	14,1	—	—	—	0,34	100

Измерения парциальных давлений ниже  $10^{-7}$  Па оказались практически невозможными из-за шумов электрометрического усилителя. Кроме того, снижение разрешающей способности с увеличением массового числа приводит к тому, что градуировка прибора по газам более тяжелым, чем аргон, оказывается весьма неточной. (Разрешающая способность ИПДО-2 около 40).

Анализ технических характеристик различных измерителей парциальных давлений, приведенных в литературе [8—13] (см. табл. 3) показывает, что для удовлетворения более высоких требований специального эталона (разрешающая способность не менее 100, минимальное обнаруживаемое парциальное давление  $\sim 10^{-12}$  Па) наиболее пригодными являются масс-спектрометры двух типов: секторный (60 или 90°) с магнитным отклонением и циклоидальный.

Таблица 3

Тип масс-спектрометра	Наименование прибора	Диапазон масс, а. е. м.	Диапазон давлений, Па	Разрешающая способность (на уровне 10%)	Чувствительность, А/Па	Минимальное рабочее парциальное давление, Па	Источник
Секторный с магнитным отклонением	GEС-АЕI MS-10	2-200	$10^{-2}$ - $5 \cdot 10^{-11}$	100	$4 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-11}$	[8]
Секторный с отклонением 90°	Vacuum Generators Micro-mass 6 GA-6	2-500	$10^{-2}$ - $10^{-12}$	150	—	$10^{-12}$	[8] [9]
		2-2000	$10^{-2}$ - $10^{-11}$	300	—	$10^{-12}$	
Секторный с отклонением 60°	Edwards E 60	1-350	$10^{-2}$ - $10^{-12}$	200	$6 \cdot 10^{-8}$	$10^{-12}$	[10]
		1-500	$10^{-2}$ - $10^{-10}$	160	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$10^{-10}$	[11]
Циклоidalный	Balzers CMS 80	1-100	$10^{-2}$ - $5 \cdot 10^{-10}$	100	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$10^{-11}$	[8]
		10-400	$10^{-2}$ - $5 \cdot 10^{-10}$	500	—	$10^{-12}$	[12]
Квадрупольный фильтр масс	20th Century Electronics Quad 250	1-500	$10^{-2}$ -CBB	400 (на уровне 50%)	—	$6 \cdot 10^{-10}$	[13]
		2-300	$5 \cdot 10^{-2}$ - $5 \cdot 10^{-10}$	—	—	—	

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тамаркин М. З. Измеритель парциальных давлений омегатронный. ПТЭ, 1970, № 4, с. 213.
2. Аверина А. П., Ливник Л. Н., Никитина Т. И. Масс-спектрометры для измерения парциальных давлений в вакуумных системах. ПТЭ, 1965, № 4, с. 5—13.
3. Bailey J. R. Residual Gas Spectra in High and Very High Vacuum Systems. «Suppl. Nuovo Cimento», 1963, v. 1, No. 2, pp. 494—519.
4. Klopfer A., Schmidt W. An Omegatron Mass-Spectrometer and its Characteristics. «Vacuum», 1960, v. 10, No. 5, pp. 363—372.
5. Аверина А. П. Омегатрон как измеритель парциальных давлений в высоковакуумных системах. ПТЭ, 1962, № 3, с. 123—125.
6. Allen P. G., Lang V. Measurement of Partial Pressures with a Simple Omegatron. «Vacuum», 1963, v. 13, No. 9, pp. 359—366.
7. Аверина А. П. Ложные пики в масс-спектре омегатрона. ПТЭ, 1965, № 5, с. 174—177.
8. Greaves C. Vacuum Mass Spectrometry. «Vacuum», 1970, v. 20, No. 12, pp. 65—73.
9. Leger P. Description d'un nouvel analyseur de gaz résiduels à secteur magnétique (masses 2 à 2000), type GA-6. «Le Vide», 1971, 26, N 151, pp. 19—21.
10. Fletcher B. Linéarité et reproductibilité d'un spectromètre de masse à champ sectionnel utilisant une source d'ions à choes d'électrons. «Le Vide», 1970, 25, N 148—149, pp. 187—191.
11. Huber W. K., Trendelenburg E. A. 8-th Vac. Symp. Trans, 1961, p. 592.
12. Каталог фирмы «20th Century Electronics, Ltd», Англия (№ 619—69).
13. Слободенюк Г. И. Теоретическое исследование предельных характеристик квадрупольного масс-спектрометра. ЖТФ, 1971, т. 41, № 5, с. 1016—1023.

Поступила в редакцию  
15/VIII 1973 г.

## РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РЕДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ВАКУУММЕТРОВ

Метод редукции давления нашел широкое применение для градуировки вакуумметров в области высокого и сверхвысокого вакуума [1—9]. Вакуумная система редукционной установки

представлена на рис. 1. Камера 2, непосредственно примыкающая к высоковакуумному насосу 1, соединена через диафрагму 3 известной проводимости  $U$  с градуировочной камерой 4, которая с другой стороны через диафрагму 5 также известной проводимости  $U_1$  соединена с камерой исходного давления 6. К камере 6 присоединены образцовый манометр 8 и натекатель 7. Градуируемые манометры (или манометрические преобразователи) 9 присоединяют к камере 4. После предварительной откачки системы в камере исходного давления с помощью натекателя устанавливают давление  $P_1$ , измеряемое образцовым манометром. При установившемся молекулярном течении газа и равенстве температур камер давление  $P$  в градуировочной камере, как показано в работах [5, 6], рассчитывается по формуле

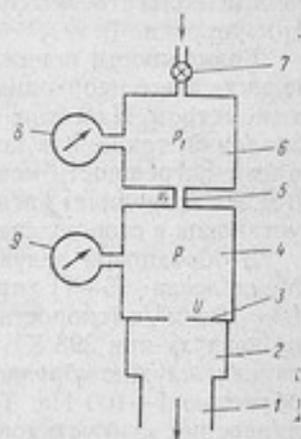


Рис. 1. Вакуумная система редукционной установки

$$P = \frac{U_1}{U} P_1 (1 + \Sigma \delta), \quad (1)$$

где  $\Sigma \delta$  — сумма поправок, учитывающих влияние побочных процессов.

Расчетные значения давления  $P$ , соответствующие измеренным значениям  $P_1$ , сопоставляют для каждой экспериментальной точки с сигналами градуированных манометров.

Уравнение (1) можно также записать

$$P = CP_1(1 + \Sigma\delta), \quad (1a)$$

где  $C = \frac{U_1}{U}$  — постоянная, значение которой зависит только от размеров и формы диафрагм и одинаково для всех газов.

Из уравнений (1) — (1a) видно, что для расширения области градуировки в сторону низких давлений необходимо уменьшать значения  $U_1$  и  $P_1$  и увеличивать значение  $U$ . Возможности увеличения проводимости  $U$  ограничены, так как для точного расчета давлений  $P$  требуется, чтобы эта проводимость была намного меньше скорости откачки высоковакуумного насоса. В свою очередь, повышение скорости откачки лимитируется соображениями практической целесообразности величиной  $\sim 10 \text{ м}^3/\text{с}$ . Проводимость  $U_1$  в принципе может быть весьма малой, например,  $10^{-10}$  —  $10^{-11} \text{ м}^3/\text{с}$  и менее. Однако с уменьшением проводимости возрастают трудности ее точного определения, в связи с чем нельзя полагаться только на этот способ расширения области градуировки.

Возможности понижения исходных давлений  $P_1$  обусловлены прежде всего необходимостью их точного измерения образцовым манометром. Известно, что образцовые приборы в области низких давлений, такие, как компрессионные и мембранные манометры, имеют погрешности менее 1% при давлениях не ниже 0,1—1 Па. Все это затрудняет расширение области измерений редуцированных установок в сторону сверхвысокого вакуума.

В образцовой редуцированной установке ВНИИМ им. Д. И. Менделеева [5—7] применены диафрагмы с проводимостями  $U = 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$  (скорость откачки насоса  $\sim 1 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $U_1 \approx 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$  по воздуху при 293 К). В качестве исходного прибора в этой установке служит образцовый компрессионный манометр с рабочей областью 1—100 Па. Таким образом, нижняя граница области измерений этой установки —  $10^{-6}$  Па. Чтобы сдвинуть эту границу в сторону более низких давлений, нужно, помимо технологических проблем, решить задачи, связанные с указанными выше трудностями.

Ниже изложены способы расширения области измерений редуцированных установок, сочетающие принципы редукиции давления с известным методом воспроизведения и расчета низких давлений во времени [10—11]. В работе [9] показано, что применение упомянутого метода для градуировки при сверхвысоком вакууме ненадежно из-за искажений, вносимых процессами сорбции и десорбции в манометрах и на стенках градуировочной камеры. Однако нет препятствий для использования этого метода при

низком и среднем вакууме (например, при давлениях выше  $10^{-2} - 10^{-3}$  Па) и при отсутствии ионизационных и магнитных манометров.

Вакуумная система установки с расширенной областью градуировки, представленная на рис. 2, отличается от обычной системы (рис. 1) тем, что к камере исходного давления  $P_1$  присоединен дополнительный высоковакуумный насос 10, снабженный клапаном 11 и диафрагмой 12 (известной проводимости  $U_0$ ). При закрытом клапане 11 система работает по обычному методу редукции давления. Если в некоторый момент времени закрыть натекаатель 7 и открыть клапан 11, то вследствие откачки газа через диафрагмы 5 и 12 давление в камере исходного давления будет непрерывно понижаться. Баланс газа в этой камере можно представить уравнением

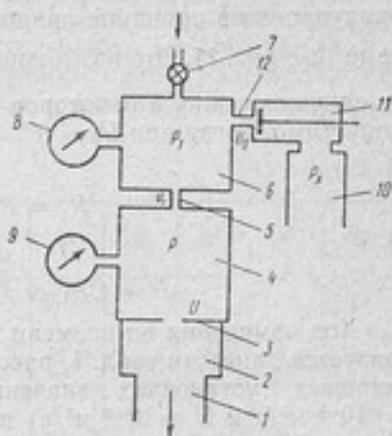


Рис. 2. Вакуумная система редукционной установки с расширенной областью измерений

$$U_1(P_1 - P) + U_0(P_1 - P_A) - q_1 = -V_1 \frac{dP_1}{dt}, \quad (2)$$

где  $V_1$  — известный объем камеры  $b$ ;  $q_1$  — суммарный поток натекания, сорбции и десорбции стенок камеры  $b$ ;  $P_A$  — давление у входа в насос 10;  $t$  — время.

Интегрирование формулы (2) при условии  $P, P_A \ll P_1$  дает

$$\ln \frac{(U_0 + U_1) P_{1,0} - q_1}{(U_0 + U_1) P_1 - q_1} = \frac{U_0 + U_1}{V_1} (t - t_0), \quad (3)$$

где  $P_{1,0}$  — давление в камере исходного давления в начальный момент времени  $t_0$ .

При  $q_1 \ll (U_0 + U_1) P_1$  формула (3) упрощается

$$P_1 = P_{1,0} e^{-\frac{U_0 + U_1}{V_1} (t - t_0)}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (1а), получим зависимость давления  $P$  в градуировочной камере от времени  $t$

$$P = C P_{1,0} e^{-\frac{U_0 + U_1}{V_1} (t - t_0)} (1 + \Sigma \delta). \quad (5)$$

Таким образом, измерив предварительно образцовым манометром сравнительно высокое давление  $P_{1,0}$ , можно через определенные

промежутки времени  $\Delta t = t - t_0$  воспроизвести и рассчитать весьма низкие давления  $P$ . Например, при  $U_0 + U_1 \approx 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с и  $V_1 = 10^{-2}$  м<sup>3</sup> давления в камерах через 30—40 мин после открытия клапана становятся в 100 раз ниже первоначальных.

Примечательно, что описанная комбинация двух методов градуировки в принципе приложима и к обычной вакуумной системе (см. рис. 1). Это возможно в том случае, если отношение  $\frac{U_1}{V_1}$  не слишком мало, а некоторое увеличение времени градуировки допустимо. Тогда при  $U_0 = 0$

$$P_1 = P_{1,0} e^{-\frac{U_1}{V_1}(t-t_0)} \quad (4a)$$

и

$$P = CP_{1,0} e^{-\frac{U_1}{V_1}(t-t_0)} (1 + \Sigma \delta). \quad (5a)$$

Ход изменения во времени давлений в этом случае характеризуется данными табл. 1, рассчитанными для типичных в редукционных установках значений постоянной  $C = 10^{-4}$  ( $U_1 = 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с и  $U = 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с) и объема  $V_1 = 10^{-3}$  м<sup>3</sup>. Принято также  $P_{1,0} = 1$  Па.

Таблица 1

$t, \text{ с}$	0	1	10	100	500
$P_1, \text{ Па}$	1	0,999	0,990	0,905	0,606
$P, \text{ Па}$	$10^{-4}$	$9,99 \cdot 10^{-5}$	$9,90 \cdot 10^{-5}$	$9,05 \cdot 10^{-5}$	$6,06 \cdot 10^{-5}$

Продолжение

$t, \text{ с}$	1000	2000	3000	4000
$P_1, \text{ Па}$	0,368	0,136	0,050	0,018
$P, \text{ Па}$	$3,68 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^{-5}$	$0,50 \cdot 10^{-5}$	$0,18 \cdot 10^{-5}$

Приведенные расчеты показывают, что применение описанного метода градуировки практически эквивалентно расширению нижнего предела измерений образцового исходного прибора, а, следовательно, и расширению области градуировки, на два порядка. Например, нижняя граница исходных давлений может быть сдвинута с  $10^{-1} - 1$  Па до  $10^{-3} - 10^{-2}$  Па. Возможно и более значительное расширение рабочей области установки, если допустимо продлить градуировку свыше 1,5—2 ч.

Предварительные испытания описанного метода были про-

ведены на образцовой редуционной установке ВНИИМ [9] с диафрагмой 5 проводимостью  $U_1 = 4,2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с. Камера исходного давления 6 (рис. 1) откачивалась только через эту диафрагму. К камере 6 был присоединен прецизионный электронно-механический манометр, сличенный предварительно с набором образцовых компрессионных манометров ВНИИМ. Давления в камере (в области 1—100 Па) рассчитывались по формуле (4а) и одновременно отсчитывали по выходному прибору электронно-механического манометра. Результаты одного из таких экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 2

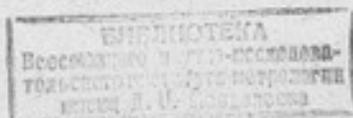
$t, c$	0	29	63	103	160	242	280	342
$P_1$ по уравнению (4а), Па	—	63,3	49,8	37,3	24,9	13,7	10,5	6,1
$P_1$ по показаниям манометра, Па	77,8	63,3	50,1	38,1	25,1	12,5	9,8	6,0

При анализе погрешности воспроизведения единицы давления  $\sigma(P)/P$  этим методом следует учесть, что помимо погрешностей величин  $U$ ,  $U_1$  и  $P_1$ , присущих и обычному методу редукиции давления [5, 6], здесь возникает погрешность расчета коэффициента  $e = \frac{U_0 + U_1}{V_1} (t - t_0)$ , т. е.

$$\frac{\sigma^2(P)}{P^2} = \frac{\sigma^2(C)}{C^2} + \frac{\sigma^2(P_1)}{P_1^2} + \sigma^2(\Sigma \delta) + \left( \ln \frac{P_{1,0}}{P_1} \right)^2 \left[ \frac{\sigma^2(t - t_0)}{(t - t_0)^2} + \frac{\sigma^2(V_1)}{V_1^2} + \frac{\sigma^2(U_0) + \sigma^2(U_1)}{(U_0 + U_1)^2} \right]. \quad (6)$$

Очевидно, погрешность  $\sigma(t - t_0)/t - t_0$ , обусловленная отсчетом промежутков времени  $t - t_0$  даже при  $\sigma(t - t_0) \approx 1$  с становится пренебрежимо малой через несколько минут после начала откачки. Таким образом, возникающая дополнительная погрешность сопряжена главным образом с ошибками при определении объема  $V_1$  и проводимостей диафрагм  $U_0$  и  $U_1$ . Эти погрешности  $\sigma(U)/U$  и  $\sigma(U_0)/U_0$ , как показано в [12], могут быть доведены до 1—1,5%, а погрешность  $\sigma(V_1)/V_1$  — до величины менее 1%. Тогда при расширении нижнего предела области градуировки на два порядка величины погрешности воспроизведения единицы давления не превысит 5—6%.

Что же касается правомерности пренебрежения суммарным потоком  $q_i$ , то это условие является вполне обычным для всех



способов градуировки, в том числе и редукции давления. Обеспечение этого условия при давлениях выше  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  Па практически не вызывает затруднений и не вносит заметной погрешности.

Та же цель — расширение области измерений редукционных установок достигается и обращением описанного метода. При этом к камере исходного давления  $b$  (см. рис. 2) присоединен насос, а резервуар  $10$  с газом, известное давление  $P_A$  которого поддерживается постоянным. Если в некоторый момент времени закрыть натекаТЕЛЬ  $7$  и открыть клапан  $11$ , то в результате напуска газа через диафрагму  $12$  и откачки его через диафрагму  $5$  давление будет изменяться по-разному в зависимости от параметров системы. Когда поток напускаемого газа превалирует над откачиваемым, давление  $P_1$  будет непрерывно повышаться. Баланс газа в камере исходного давления можно представить уравнением

$$U_1(P_1 - P) - U_0(P_A - P_1) - q_1 = -V_1 \frac{dP_1}{dt}. \quad (7)$$

Интегрирование уравнения (7) при условиях  $P \ll P_1$  и  $P_1 \ll P_A$  дает

$$\ln \frac{U_1 P_{1,0} - (U_0 P_A + q_1)}{U_1 P_1 - (U_0 P_A + q_1)} = \frac{U_1}{V_1} (t - t_0). \quad (8)$$

При  $q_1 \ll U_0 P_A$  и после преобразования и разложения в ряд Маклорена уравнение (8) примет вид

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_0 P_A} (P_1 - P_{1,0}) - \frac{1}{2} \left( \frac{U_1}{U_0 P_A} \right)^2 (P_1^2 - P_{1,0}^2) + \\ + \frac{1}{3} \left( \frac{U_1}{U_0 P_A} \right)^3 (P_1^3 - P_{1,0}^3) - \dots = \frac{U_1}{V_1} (t - t_0). \end{aligned} \quad (9)$$

Ограничиваясь (при  $U_1 P_1 \ll U_0 P_A$ ) в приведенном разложении первым членом, получим

$$P_1 = P_{1,0} + \frac{U_0 P_A}{V_1} (t - t_0). \quad (10)$$

Подставив уравнение (10) в (1, а), получим зависимость давления в градуировочной камере от времени  $t$

$$P = C \left[ P_{1,0} + \frac{U_0 P_A}{V_1} (t - t_0) \right] (1 + \Sigma \delta). \quad (11)$$

Таким образом, зная сравнительно высокое постоянное давление  $P_A$ , можно через определенные промежутки времени  $\Delta t = t - t_0$  воспроизвести и рассчитать весьма низкие давления  $P$ . Так, в течение 30—40 мин после начала напуска газа давления в камерах исходного давления и градуировочной должны возра-

сти не менее, чем в 100 раз. При этом давление в камере исходного давления достигнет значений, измеримых непосредственно образцовым манометром. Следовательно, применение этого способа градуировки практически означает расширение нижнего предела измерений образцового исходного прибора (например, от  $10^{-1}$ —1 Па до  $10^{-3}$ — $10^{-2}$  Па), а значит, и области градуировки на два-три порядка величины. При длительности градуировки свыше 1,5—2 ч возможен и более широкий охват давлений. Этот вариант способа также применим в определенных условиях к обычной вакуумной системе (см. рис. 1). Это возможно при соответствующем подборе параметров системы и известной проводимости натекателя, т. е. при использовании калиброванного натекателя.

Ход изменения во времени давлений при этом способе градуировки характеризуется данными табл. 3, рассчитанными для типичных в редуционных установках значений постоянной  $C = 10^{-6}$  ( $U_1 = 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/с и  $U = 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с) и объема  $V_1 = 10^{-3}$  м<sup>3</sup>, а также  $U_0 = 10^{-10}$  м<sup>3</sup>/с. Принято также  $P_{1,0} \ll P_1$  и  $P_A = 10^3$  Па.

Таблица 3

$t, c$	0	1	10	100	500	1000	2000	5000	10 000
$P_1, Pa$	$P_{1,0}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	1
$P, Pa$	$10^{-6} P_{1,0}$	$10^{-10}$	$10^{-9}$	$10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$10^{-6}$

Погрешность  $\sigma(P)/P$  рассчитанного по уравнению (11) значения давления  $P$  должна включать следующие составляющие (при  $P_{1,0} \ll P_1$ ):

$$\frac{\sigma^2(P)}{P^2} = \frac{\sigma^2(C)}{C^2} + \sigma^2(\Sigma \delta) + \frac{\sigma^2(P_A)}{P_A^2} + \frac{\sigma^2(U_0)}{U_0^2} + \frac{\sigma^2(V_1)}{V_1^2} + \frac{\sigma^2(t - t_0)}{(t - t_0)^2} \quad (12)$$

Выбор значений  $P_A$  и  $U_0$  производится, исходя из условия  $U_1 P_1 \ll U_0 P_A$  и необходимости соблюдения молекулярного режима течения и поддержания постоянства давления  $P_A$ . Приведенный выше пример показывает, что по этим причинам приходится использовать весьма малые проводимости  $U_0$  наряду со сравнительно высоким давлением  $P_A$ . Если измерения этого давления, как и других рассмотренных ранее величин, можно выполнить достаточно точно ( $\sigma(P_A)/P_A < 1\%$ ), то погрешности  $\sigma(U_0)/U_0$  определения проводимости  $U_0$  будут существенно больше. Эти погрешности и внесут основной вклад в дополнительную погреш-

ность, присущую последнему способу расширения области градуировки.

Заметное сокращение длительности градуировки и значительное расширение охватываемого диапазона давлений может быть в принципе достигнуто в таком варианте последнего способа, при котором давление  $P_A$  непостоянно, а само является какой-либо, в простейшем случае — линейной, функцией времени. Для этого резервуар  $10$  (известного объема  $V_A$ ) в свою очередь через диафрагму проводимостью  $U_A$  присоединяют к исходному резервуару с газом, известное еще более высокое давление  $P^*$  которого поддерживается постоянным. Тогда при допущениях, аналогичных ранее принятым, для давления  $P_A$  можно записать

$$P_A = P_{A,0} + \frac{U_A P^*}{V_A} (t - t_0). \quad (13)$$

Подстановка этого выражения в уравнение (7) дает следующий результат интегрирования:

$$P_1 = P_{1,0} + \frac{1}{2} \frac{U_A U_0}{V_A V_1} P^* (t - t_0)^2 + \frac{U_0 P_{A,0} + q_1}{V_1} (t - t_0), \quad (14)$$

или, пренебрегая последним членом,

$$P_1 = P_{1,0} + \frac{1}{2} \frac{U_A U_0}{V_A V_1} P^* (t - t_0)^2. \quad (14a)$$

Подставив уравнение (14а) в (1а), получим зависимость давления  $P$  в градуировочной камере от времени  $t$

$$P = C \left[ P_{1,0} + \frac{1}{2} \frac{U_A U_0}{V_A V_1} P^* (t - t_0)^2 \right] (1 + \Sigma \delta). \quad (15)$$

Таким образом, зная сравнительно-высокое постоянное давление  $P^*$ , можно в течение 1—3 ч охватить при градуировке не менее 5—6 порядков величины давления.

В работе [13] показано, что изложенный способ расчета давления можно распространить и на произвольное число камер динамической системы. Однако преимущества, обеспечиваемые этим вариантом способа (быстрота проведения градуировки и широта диапазона градуировочных давлений), не всегда могут компенсировать понижение точности, связанное с введением большого числа параметров в расчетные уравнения, а также усложнение вакуумной системы.

### Выводы

1. Расчет изменяющегося во времени исходного давления в заданное число раз обеспечивает расширение области измерений редуцированных установок в сторону высокого и сверхвысокого вакуума.

2. Практическое осуществление разработанных способов позволяет сместить нижний предел градуировки рабочих манометров в сторону низких давлений на два-три порядка величины. В результате отпадает необходимость располагать для высоковакуумной градуировки абсолютными манометрами, по крайней мере, в области давлений  $10^{-3}$  — 1 Па.

3. Градуировка вакуумметров происходит в процессе квазистационарного течения газа, явления сорбции и десорбции не искажают результаты измерений.

4. Предложенные способы просты и не требуют для осуществления сложной оснастки. При надлежащем выборе параметров системы они обеспечивают достаточную точность градуировки. Предварительные испытания, проведенные на образцовой аппаратуре ВНИИМ, показали правильность произведенных расчетов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ерюхин А. В. Новые методы градуировки манометров в области высокого вакуума (обзор). В сб.: «Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 85(145), Издательство стандартов, 1966, с. 70—82.

2. Brombacher W. G. A survey of ionization gauges and their performance characteristics. NBS Technical Note 298. US Department of commerce. Washington, 1967, Part III.

3. Hulek Z. Dynamická metoda cejchování vacuomeru. «Jemna mechanika a optika», 1969, 14, No. 5, s. 130—134.

4. Nakayama K. Calibration systems and standards for vacuum gauges. «Journal of Vacuum Society of Japan», 1970, v. 13, pp. 79—86.

5. Ерюхин А. В., Кузьмин В. В. Точность воспроизведения единицы давления в области высокого и сверхвысокого вакуума абсолютным методом редукции давления. «Измерительная техника», 1970, № 5, с. 41—44.

6. Goulliaev M. A., Erukline A. V., Kouzmine V. V. La précision des appareils étalons pour la calibration des jauges à vide par la méthode absolue de la réduction de pression. «Le Vide», 1970, 25, NN 148—149, pp. 192—197.

7. Ерюхин А. В., Кузьмин В. В. Об установлении стационарного режима в динамических вакуумных системах. «Измерительная техника», 1970, № 8, с. 53—54.

8. Гуляев М. А., Ерюхин А. В., Кузьмин В. В. Образцовая аппаратура ВНИИМ для градуировки вакуумметров абсолютным методом в области  $10^{-5}$ — $10^{-8}$  мм рт. ст. «Уникальные приборы», 1971, № 7, с. 23—26.

9. Кузьмин В. В., Рыжов В. А. Образцовая манометрическая установка с областью измерений  $10^{-4}$ — $10^{-7}$  мм рт. ст. «Уникальные приборы», 1971, № 13, с. 59—64.

10. Alpert D., Buritz R. S. Ultra-high vacuum. Limiting factors on the attainment of very low pressures. «Journal of applied physics», 1954, v. 25, No. 2, pp. 202—210.

11. Milleron N., Reinath F. S. Calibration of ionization manometers in situ by steady and e-folding flow methods in the range  $1 \cdot 10^{-4}$  torr. to  $1 \cdot 10^{-9}$  torr. «Vacuum», 1965, v. 15, No. 1, p. 21.

12. Ерюхин А. В., Кузьмин В. В. Экспериментальное определение вакуумной проводимости малых отверстий. «Измерительная техника», 1969, № 6, с. 23—26.

13. Гуляев М. А., Ерюхин А. В., Кузьмин В. В., Ломасов В. Н. Об измерении давлений в динамических вакуумных системах. «Метрология», 1972, № 11, с. 3—13.

Поступила в редакцию  
15/VIII 1973 г.

### ПОВЕРОЧНАЯ ВАКУУММЕТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С КАЛИБРОВАННЫМИ ОБЪЕМАМИ

В связи с большой трудоемкостью градуировочных и поверочных работ на наборах образцовых компрессионных манометров была предпринята попытка создать для проведения таких работ более простую и высокопроизводительную установку, не уступающую, однако, по своим параметрам компрессионным манометрам.

Принцип калиброванных объемов, известный еще со времен Кнудсена, основан на законе Бойля—Мариотта и заключается в расширении газа при поступлении его из малого объема  $V_1$ , где он находится под известным сравнительно высоким давлением  $P$ , в большой объем  $V_2$ , где устанавливается давление  $p$

$$p = \frac{V_1}{V_1 + V_2} P = \alpha (1 - \alpha) P, \quad (1)$$

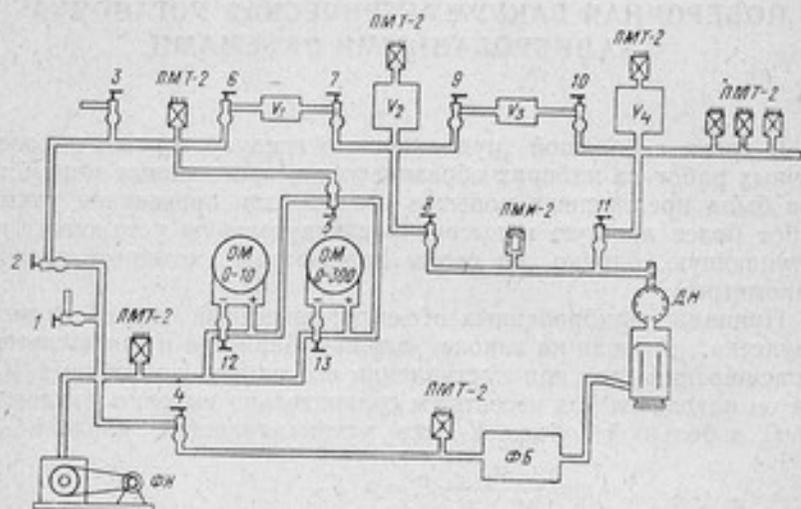
где

$$\alpha = \frac{V_1}{V_2},$$

Принципиальная вакуумная схема установки, разработанной во ВНИИМ, приведена на рисунке. Установка имеет две последовательные пары малых и больших калиброванных объемов  $V_1$  и  $V_2$ ,  $V_3$  и  $V_4$ , сообщающихся между собой через краны 7, 9 и 10, с системой предварительной откачки и напуска газа — через кран 6, с высоковакуумным диффузионным насосом ДН — через краны 8 и 11. Форвакуумный насос ФН обеспечивает предварительную откачку газа из калиброванных объемов через кран 2, сравнительных камер образцовых манометров типа ОМ через краны 12 и 13 и форвакуумного баллона ФБ диффузионного насоса — через кран 4.

Для напуска газа применен кран-натекатель 3, для измерения исходного высокого давления  $P$  — оптические деформаци-

онные манометры типа *ОМ* с пределами измерения 0—10 мм рт. ст. и 0—300 мм рт. ст. класса 0,5, соединяемые с системой напуска и объемом  $V_1$  через краны 5 и 6. Для ориентировочной оценки давлений, устанавливаемых в разных частях вакуумметрической преобразователей типа ПМТ-2 (ЛТ-2) и один ионизационный типа ПМИ-2 (ЛМ-2). Градуированные или поверяемые манометрические преобразователи присоединяют к специальной «ребенке» объемом  $V_4$ . Объем этих преобразователей, естественно, принимают во внимание при вычислении объема  $V_4$ .



Принципиальная схема вакуумметрической установки

Предельное давление, которое удается получать с помощью диффузионного паромасляного насоса *ДН* с охлаждаемой жидким азотом ловушкой,  $10^{-3} - 10^{-4}$  Па ( $\sim 10^{-5} - 10^{-6}$  мм рт. ст.).

Установка позволяет производить как одно-, так и двухступенчатое расширение газа. В последнем случае газ, находившийся в объеме  $V_1$ , под давлением  $P$ , расширяют сначала в предварительно откачанные объемы  $V_2$  и  $V_3$ , а затем из объема  $V_3$ , отделенного от  $V_2$ , — в объем  $V_4$ , так же предварительно откачанный до достаточно низкого давления  $p_0$ .

Уравнение измерения для давления  $p_1$ , устанавливающегося при постоянной температуре в объеме  $V_4$  после двухступенчатого расширения газа от исходного давления  $P$  в объеме  $V_1$ , имеет следующий вид:

$$p_1 = \alpha\gamma \left( 1 - \alpha - \beta - \gamma + \frac{\varepsilon_0}{\alpha\gamma} + \frac{\varepsilon_0}{\alpha} + \frac{\varepsilon}{\alpha} \right) P. \quad (2)$$

Здесь  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  — отношения объемов:

$$\alpha = \frac{V_1}{V_2}; \quad \beta = \frac{V_2}{V_2}; \quad \gamma = \frac{V_3}{V_4}; \quad (3)$$

$\varepsilon_0$  — поправочный член, учитывающий исходное давление  $p_0$  в объемах  $V_2$ ,  $V_3$  и  $V_4$

$$\varepsilon_0 = \frac{p_0}{P}, \quad (4)$$

$\varepsilon$  — поправочный член, учитывающий газоотделение  $\Delta Q$  крана  $10$  при соединении объемов  $V_3$  и  $V_4$

$$\varepsilon = \frac{\Delta Q}{PV_3}. \quad (5)$$

Анализ членов  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon$  показывает, что соответствующей предварительной откачкой и обезгаживанием установки всегда можно добиться того, чтобы поправки  $\frac{\varepsilon_0}{\alpha\gamma}$ ,  $\frac{\varepsilon_0}{\alpha}$  и  $\frac{\varepsilon}{\alpha}$  в уравнении (2) не принимать во внимание; однако, при недостаточной откачке поправка  $\frac{\varepsilon_0}{\alpha\gamma}$  становится сравнимой с отношениями объемов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и, следовательно, ее приходится учитывать.

После получения в объеме  $V_4$  давления  $p_1$  возможно ступенчатое повышение давления в этом объеме благодаря добавлению в него дозированных порций газа из объема  $V_2$  с помощью объема  $V_3$ . Элементарный расчет дает следующую зависимость между давлением  $p_2$ , устанавливающимся в объеме  $V_4$  после поступления в него второй порции газа, и первоначальным давлением  $p_1$

$$p_2 = \frac{2}{1} \left( 1 - \frac{\beta + \gamma}{2} - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0}{\alpha\gamma} + \frac{3}{6} \beta\gamma \right) p_1. \quad (6)$$

Для любой последующей порции газа

$$p_{i+1} = \frac{i+1}{i} \left( 1 - \frac{\beta + \gamma}{2} - \frac{1}{i(i+1)} \frac{\varepsilon_0}{\alpha\gamma} + \frac{2i+1}{6} \beta\gamma \right) p_i \quad (7)$$

Анализ уравнения (7) приводит к следующим выводам:

1. Наиболее существенную роль играет поправка  $\frac{\beta + \gamma}{2}$ , которую необходимо учитывать во всех случаях.
2. Поправка, пропорциональная  $\frac{\varepsilon_0}{\alpha\gamma}$  и принимаемая во внимание в уравнении (2), при последующих расширениях быстро уменьшается и стремится к нулю.
3. Поправка, пропорциональная  $\varepsilon$ , вообще не входит в уравнение.

4. Поправка, пропорциональная  $\beta\gamma$ , медленно возрастает (на  $1/3$  после каждой порции газа), но при ограниченном числе порций ею можно пренебречь, так как произведение  $\beta\gamma$  представляет собой величину второго порядка малости по сравнению с  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

В рассматриваемой установке отношения калиброванных объемов были определены на основании точных измерений малых ( $\sim 40 \text{ см}^3$ ) и больших ( $\sim 3 \text{ дм}^3$ ) объемов весовым методом с погрешностями, не превышающими 0,1%. Значение остаточного давления  $p_0$  было пренебрежимо мало.

Диапазон измеряемых давлений составляет  $4 \cdot 10^4 - 10^{-1} \text{ Па}$  ( $\sim 300 - 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$ ). При градуировке на установке термодинамических манометрических преобразователей типа ПМТ-2 (ЛТ-2) случайный разброс точек относительно градуировочной кривой не превышал 5%, а сама градуировочная кривая, в пределах погрешностей измерений, совпадала с градуировочной кривой, полученной при градуировке тех же преобразователей на наборах образцовых компрессионных манометров.

Поступила в редакцию  
15/VIII 1973 г.

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ КОМПРЕССИОННЫЙ МАНОМЕТР

Применение компрессионного манометра связано с защитой вакуумной системы от ртутных паров при помощи охлаждаемых ловушек. Низкая температура ловушек вызывает поток ртутных паров из резервуара со ртутью к охлажденным поверхностям. В результате взаимодиффузии молекулы газа, находящиеся в измерительном объеме компрессионного манометра, увлекаются потоком тяжелых молекул ртути в направлении к охлажденным поверхностям ловушек, благодаря чему понижается давление в измерительном объеме манометра по сравнению с давлением в той части вакуумной системы, где его необходимо измерять. Систематические погрешности компрессионного манометра, обусловленные откачивающим действием паров ртути, определенные экспериментально (1), могут достигать 20%. Метод охлаждения всей вакуумной системы до температуры, близкой к 0°С, позволяет значительно уменьшить откачивающее действие паров ртути, однако он требует больших материальных затрат.

В работе [2] предложено вводить между резервуаром со ртутью и измерительным объемом манометра трубку с малой проводимостью, охлаждаемую до температуры, близкой к 0°С. Однако в этом случае на результаты измерения влияет продолжительность подъема ртути, и если она достигает более 7—10 с, то устранить откачивающее действие вообще не удастся.

Ниже предлагается усовершенствовать компрессионный манометр и методику измерения давления, позволяющие исключить откачивающее действие паров ртути. На рисунке представлена схема компрессионного манометра и устройства, предотвращающего откачивающее действие паров ртути. Резервуар 1 с ртутью посредством плавающего шлифа 2 соединен с измерительным объемом компрессионного манометра 3, в свою очередь соединенным через магнитный шлиф 4 с вакуумной системой

6 и 7, в которой необходимо произвести измерение давления, например, с коллектором для манометрических преобразователей. Перед измерением давления всю систему откачивают до давления  $10^{-7}$  мм рт. ст. ( $10^{-5}$  Па) и по манометрическому преобразователю 5 проверяют надежность притертых поверхностей плавающего шлифа 2, предотвращающего проникновение ртутных паров в вакуумную систему. Если поверхности шлифа 2 притерты недостаточно, то обычно не удается получить давление в системе ниже, чем  $10^{-4}$  мм рт. ст. ( $10^{-2}$  Па). Убедившись в надежности шлифа 2, в вакуумной системе создают рабочее давление, после чего закрывают магнитный шлиф 4 и производят подъем ртути из резервуара 1. Если давление измеряется с целью градуировки манометрических преобразователей, то запись выходного сигнала преобразователя должна быть произведена в момент закрытия шлифа 4.

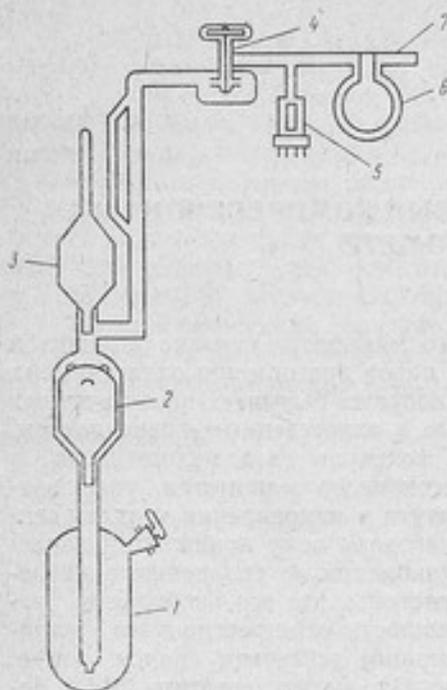


Схема компрессионного манометра

При подъеме ртути шлиф 2 всплывает, однако, ртутные пары к охлажденным ловушкам 6 не поступают, поскольку закрыт магнитный шлиф 4. После измерения давления ртуть опускают, при этом автоматически закрывается шлиф 2, после чего открывают шлиф 4.

При измерении давления следует учитывать компрессию газа, вызываемую уменьшением общего объема вследствие подъема ртути. Коэффициент компрессии для каждого компрессионного манометра может быть определен заранее. Для этого измеряют давление в вакуумной системе при неохлажденной ловушке 6 и открытом шлифе 4, затем при закрытом шлифе. В этом случае для количества газа, заключенного в объеме манометра до шлифа 4, справедливо выражение

$$PV = P_1(V - V_1),$$

где  $P$  — давление в системе манометра при открытом шлифе 4;  $P_1$  — давление в системе манометра при закрытом шлифе 4 по-

сле подъема ртути до линии отсечки измерительного объема манометра 3;  $V$  — объем соединительных трубок от поверхности ртути в резервуаре 1 до шлифа 4;  $V_1$  — объем соединительных трубок от поверхности ртути в резервуаре 1 до линии отсечки измерительного объема манометра. Таким образом, коэффициент компрессии  $j$  газа в вакуумной системе будет равен

$$j = \left( \frac{V - V_1}{V} \right) = \left( 1 - \frac{V_1}{V} \right),$$

и уравнение измерения компрессионного манометра примет вид

$$P = P_k \left( 1 - \frac{V_1}{V} \right) = P_k (1 - \alpha),$$

где  $P$  — давление в вакуумной системе;  $P_k$  — давление, определенное по показанию компрессионного манометра,  $\alpha$  — коэффициент, равный  $V_1/V$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжов В. А. Экспериментальное исследование погрешности компрессионного манометра, обусловленной откачивающим действием паров ртути. «Метрология», 1971, № 3, с. 41—43.
2. Ерюхин А. В. Учет откачивающего действия паров ртути при градуировке электроразрядных манометров по ртутному компрессионному манометру. «Измерительная техника», 1963, № 12, с. 20.

Поступила в редакцию  
15/VIII 1973 г.

ИОНИЗАЦИОННЫЕ МАНОМЕТРЫ  
С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Для измерения весьма низких давлений в области сверхвысокого вакуума нашли широкое применение ионизационные манометрические преобразователи с модуляторами, предложенные Рэдхедом [1]. На модулятор (проволочный электрод, расположенный в манометре типа Байарда—Альперта параллельно ионному коллектору) подаются поочередно потенциалы анода  $U_a$  и ионного коллектора  $U_n = 0$ . В первом случае ток в цепи ионного коллектора состоит из полного тока положительных ионов и фонового тока фотоэлектронов и ионов, десорбированных с поверхности анода, во втором — из доли  $\alpha$  тока положительных ионов (остальные ионы идут на модулятор) и того же фонового тока. Измеряя соответствующие суммарные токи в цепи коллектора и зная коэффициент  $\alpha$  (определяемый экспериментально при сравнительно высоких давлениях), можно вычислить значение тока положительных ионов, пропорциональное давлению (или концентрации молекул) в вакуумной системе. Применение указанного метода позволило достичь нижнего предела измеряемых давлений  $10^{-8} - 10^{-9}$  Па ( $\sim 10^{-10} - 10^{-11}$  мм рт. ст.).

Дальнейшее понижение нижнего предела измерения манометров с модуляторами осложнилось тем, что были обнаружены «взрывы давления» и модуляция фонового тока [2, 3, 4]. Первые обусловлены десорбцией ионов с поверхности модулятора под электронной бомбардировкой, вторая — главным образом, рентгеновским излучением модулятора. В связи с этим было предложено [4] уменьшать потенциал модулятора только на 20 В по сравнению с потенциалом анода, обеспечивая, таким образом, гораздо меньшее искажение распределения потенциалов в области ионизации и постоянную бомбардировку модулятора электронами, не позволяющую молекулам газа адсорбироваться на модуляторе и вызывать «взрывы давления» при подаче на модулятор потенциала анода. Этот метод удалось применить

на манометрических преобразователях с открытыми торцами анода для измерения давлений до  $6 \cdot 10^{-10}$  Па ( $\sim 4 \cdot 10^{-12}$  мм рт. ст.). Для преобразователей с закрытой конструкцией анода, имеющих более высокую чувствительность, такой метод оказался неприемлемым вследствие недостаточной модуляции.

Дальнейшим развитием рассматриваемого метода явились работы японских исследователей [5, 6], предложивших осуществлять модуляцию не положительным, а отрицательным потенциалом, подаваемым на модулятор. Изменение потенциала модулятора от 0 до  $-150$  В обеспечивало, как утверждают авторы, достаточную модуляцию тока в цепи ионного коллектора. Так как бомбардировка модулятора электронами в этом случае отсутствует, то и «взрывы давления», обусловленные изменениями десорбции молекул с модулятора, и модуляция тока фотоэлектронов полностью исключаются.

В настоящей работе дана элементарная теория и приведены результаты первых экспериментальных исследований ионизационных манометров с отрицательной модуляцией.

При подаче на модулятор нулевого потенциала ток ионного коллектора  $I_{и1}$  состоит из доли ( $\alpha$ ) ионного тока  $I_i$  и фонового тока  $I_\phi$ .

$$I_{и1} = \alpha I_i + I_\phi. \quad (1)$$

При отрицательном потенциале на модуляторе на ионный коллектор попадает еще меньшая доля ( $\beta$ ) ионного тока  $I_i$  и тот же фоновый ток  $I_\phi$ , так как электронная бомбардировка модулятора в обоих случаях отсутствует.

$$I_{и2} = \beta I_i + I_\phi. \quad (2)$$

Отсюда ионный ток

$$I_i = \frac{I_{и1} - I_{и2}}{\alpha - \beta}. \quad (3)$$

Для определения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  нужно сделать три стечения тока ионного коллектора при достаточно высоких давлениях, когда  $I_\phi$  пренебрежимо мало по сравнению с  $I_i$  и упомянутые выше явления можно не принимать во внимание

$$\left. \begin{array}{l} 1) U_m = U_a, I_{и1} = I_i \\ 2) U_m = 0, I_{и0} = \alpha I_i \\ 3) U_m = -U, I_{и-} = \beta I_i \end{array} \right\} \quad (4)$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{I_{и0}}{I_{и1}}, \quad \beta = \frac{I_{и-}}{I_{и1}}. \quad (5)$$

Подставляя (3) в уравнение измерения ионизационного манометра, получим

$$p = \frac{C_{и}}{(\alpha - \beta)} \frac{I_{и1} - I_{и2}}{I_0}, \quad (6)$$

где  $C_{и}$  — постоянная ионизационного манометрического преобразователя;  $I_0$  — ток эмиссии катода манометрического преобразователя.

Как известно [1], при обычной, положительной модуляции

$$p = \frac{C_{и}}{(1 - \alpha)} \frac{I_{и1} - I_{и2}}{I_0}, \quad (7)$$

Из сравнения (6) и (7) видно, что применение отрицательной модуляции вносит дополнительную погрешность, связанную с определением коэффициента  $\beta$ .

Электрический режим питания ионизационного манометрического преобразователя ПОИМ-10 [7] был выбран на основании исследованных зависимостей чувствительности от разностей потенциалов анод—катод и катод—коллектор и зависимости ионного тока от потенциала модулятора. Оптимальными значениями разностей потенциалов оказались: анода—катода  $U_{ак} = 210$  В, катода — ионного коллектора  $U_{ки} = 100$  В, отрицательный потенциал модулятора  $U_{м} = -150$  В.

С целью определения предельных возможностей метода отрицательной модуляции была проведена сравнительная оценка методов положительной и отрицательной модуляции. Для этого манометрический преобразователь типа ПОИМ-10 был применен для измерения давлений сухого воздуха обоими методами в сверхвысоковакуумной системе, откачиваемой парортутными диффузионными насосами с охлаждаемыми ловушками.

Постоянная  $C_{и}$  преобразователя была определена в диапазоне давлений  $\sim 10^{-5}$  Па абсолютным методом редукции давления [8], коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  — по уравнениям (5) в том же диапазоне давлений.

Значения «истинного» ионного тока  $I_i$  вычисляли методом отрицательной модуляции по уравнению (3) и методом положительной модуляции по известному [1] уравнению

$$I_i = \frac{I_{и2} - I_{и1}}{1 - \alpha}, \quad (8)$$

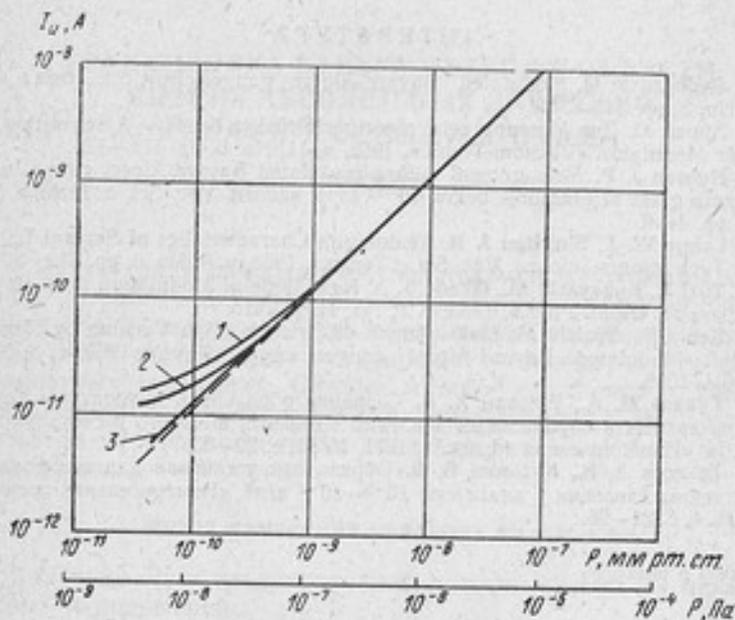
где  $I_{и2}$  и  $I_{и1}$  — токи ионного коллектора при  $U_{м} = U_a$  и  $U_{м} = 0$  соответственно. Давления выше  $10^{-6}$  Па вычисляли по обычному уравнению измерения ионизационного манометра, ниже  $10^{-6}$  Па — по уравнению метода отрицательной модуляции (6).

Полученные данные манометрического преобразователя ПОИМ-10 следующие:  $C_{и} = 5,6$  Па,  $\sigma_{C_{и}} = 20\%$ ,  $\alpha = 0,59$ ,  $\beta = 0,21$ ,  $\sigma_{(\alpha - \beta)}$  = 20%,  $\sigma_{\alpha} = 9\%$ ,  $\sigma_{\beta} = 30\%$ .

Здесь  $\sigma_{C_{и}}$ ,  $\sigma_{(\alpha - \beta)}$ ,  $\sigma_{\alpha}$  — относительные средние квадратические отклонения значений постоянной  $C_{и}$ , разности коэффициентов  $(\alpha - \beta)$  и коэффициента  $\alpha$ , полученных путем многократных

измерений,  $\sigma_{p0}$  — относительное среднее квадратическое отклонение результата измерения давления методом отрицательной модуляции.

Полученные зависимости полного тока в цепи ионного коллектора и «истинных» ионных токов, вычисленных методами положительной и отрицательной модуляции, от давления представлены на рисунке. Из графика видно, что точки, определенные методом положительной модуляции, существенно отклоняются от прямой линии при давлениях ниже  $10^{-8}$  Па.



Зависимость токов в цепи ионного коллектора и «истинных» ионных токов от давления:

1 — полный ионный ток; 2 — ионный ток, вычисленный методом положительной модуляции; 3 — ионный ток, вычисленный методом отрицательной модуляции.

Вычисление фонового тока  $I_{\phi}$  из системы уравнений (1) и (2) дает зависимость

$$I_{\phi} = \frac{\alpha I_{и2} - \beta I_{и1}}{\alpha - \beta} \quad (9)$$

Значение  $I_{\phi}$ , вычисленное по уравнению (9), оказалось  $\sim 10^{-12}$  А. Если считать возможным измерение давлений, соответствующих ионным токам  $I_i = 0,1 I_{\phi}$ , то наименьшие давления, которые можно измерять методом отрицательной модуляции, оказываются в диапазоне  $10^{-9} - 10^{-10}$  Па. Для измерения

более низких давлений необходимы преобразователи с меньшим фоновым током или большей чувствительностью.

Таким образом, метод отрицательной модуляции в ионизационных манометрах позволяет получать при малых давлениях значения ионного тока, более близкие к «истинным», однако его нижний предел ограничен давлениями  $10^{-9}$  —  $10^{-10}$  Па/ $\sim 10^{-11}$  —  $10^{-12}$  мм рт. ст. вследствие сравнительно большого фонового тока и недостаточно высокой чувствительности применяемых ионизационных манометров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Redhead P. Q. Modulated Bayard-Alpert gauge. «Rev. Sci. Instr.», 1960, v. 31, No. 3, pp. 343—344.
2. Appelt G. Zur Messung sehr niedriger Drücker bei B — A Ionisation Manometer Modulator. «Vacuum-Techn.», 1962, v. 11, No. 6, pp. 174—177.
3. Hobson J. P. Measurement with a modulated Bayard-Alpert gauge in aluminosilikate glass at pressures below  $10^{-12}$  torr. «Journ. Vac. Sci. & Techn.», 1964, No. 1, pp. 1—6.
4. Lange W. J., Singleton J. H. Modulation Characteristics of Several Bayard-Alpert Type gauges. «Journ. Vac. Sci. & Techn.», 1966, v. 3, No. 6, pp. 319—324.
5. Tuzi J., Kobayashi M., Okada S. A. New Mode of Modulation for a Bayard-Alpert gauge. «Appl. Phys.», 1968, v. 7, No. 11, p. 1415.
6. Kenia S., Akaishi M. Measurement of Extreme High Vacuum by Negative Potential Modulated Bayard-Alpert gauge. «Appl. Phys.», 1969, v. 8, No. 8, pp. 1061—1062.
7. Гуляев М. А., Ерюхин А. В. Создание образцовой аппаратуры для измерения полных и парциальных давлений в области высокого и сверхвысокого вакуума. «Измерительная техника», 1971, № 11, с. 29—33.
8. Ерюхин А. В., Кузьмин В. В. Образцовая установка для воспроизведения единицы давления в диапазоне  $10^{-3}$ — $10^{-6}$  н/м<sup>2</sup>. «Измерительная техника», 1969, № 4, с. 22—26.

Поступила в редакцию  
15/VIII 1973 г.

## ГРАДУИРОВКА ВАКУУММЕТРОВ В ОБЛАСТИ НИЗКИХ АБСОЛЮТНЫХ ДАВЛЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ (Обзор)

Развитие ряда важных отраслей техники и научных исследований потребовало повышения точности измерений высокого и сверхвысокого вакуума. Это обусловило появление большого числа работ по методам градуировки манометров при низких абсолютных давлениях. Особый интерес привлекли к себе динамические методы градуировки вакуумметров. В настоящей статье дан обзор последних работ по динамическим методам градуировки.

### Метод изменения давления во времени

Давление  $P_1$  в градуировочной камере объема  $V_1$  изменяют путем непрерывной откачки или напуска газа через элемент известной проводимости  $U_0$  или  $U_1$  (рис. 1). Искомые значения давлений определяются расчетным уравнением  $P_1 = f(t)$ . При прекращении откачки градуировочной камеры давление в ней начинает непрерывно возрастать. Для градуировочной камеры, присоединен-

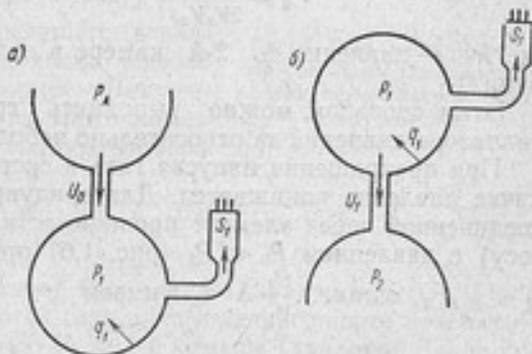


Рис. 1. Вакуумная система установки для градуировки вакуумметров по методу изменения давления во времени:

а — при напуске газа; б — при откачке газа

ной к объему с постоянным известным (и сравнительно высоким) давлением  $P_A = \text{const}$  (рис. 1, а), этот процесс выражается уравнением

$$P_1 = \frac{P_A U_0}{V_1} \Delta t + P_{1,0} \left( 1 - \frac{U_0}{V_1} \Delta t \right), \quad (1)$$

где  $P_{1,0}$  — давление в градуировочной камере в начальный момент времени  $t$ ;  $\Delta t = t - t_0$ .

Уравнение (1) справедливо для молекулярного режима течения газа при условиях

$$s_1 \ll U_0, \quad q_1 \ll P_A U_0.$$

Здесь  $s_1$  — скорость откачки (или газоотделения) градуируемого манометра,  $q_1$  — суммарный поток натекания, сорбции и десорбции газа на стенках градуировочной камеры.

При  $\frac{U_0}{V_1} \Delta t \ll 1$  уравнение (1) идентично приводимому в [1, 2]

$$P_1 = \frac{P_A U_0}{V_1} \Delta t + P_{1,0}. \quad (1a)$$

Известен [2, 4] также вариант метода с применением двух последовательно расположенных камер (с давлениями  $P_1$  и  $P_2$  соответственно), отделенных элементом проводимости  $U_1$ . Для случая, когда постоянно выполняется условие  $P_2 \ll P_1$ , и при допущениях, аналогичных ранее принятым, давление в 1-й камере выражается уравнением (1a), а давление  $P_2$  во 2-й камере (объем  $V_2$ ) при условиях  $P_{1,0}, \frac{q_2}{V_2} \ll P_1$  пропорционально квадрату промежутка времени  $\Delta t$

$$P_2 = \frac{U_1 U_1}{2V_1 V_2} P_A (\Delta t)^2 + P_{2,0}, \quad (2)$$

где  $P_{2,0}$  — давление во 2-й камере в начальный момент времени.

Этим способом можно выполнить градуировку в широком диапазоне давлений за относительно небольшое время.

При прекращении напуска газа в систему и непрерывной откачке давление понижается. Для градуировочной камеры, присоединенной через элемент проводимости  $U_1$  к камере (или насосу) с давлением  $P_2 \ll P_1$  (рис. 1, б) при условиях  $s_1 \ll U_1$ ,  $q_1 \ll U_1 P_1$ , а также  $\frac{U_1}{V_1} \Delta t \ll 1$  имеем

$$P_1 = P_{1,0} e^{-\frac{U_1}{V_1} \Delta t}, \quad (3)$$

что согласуется с [3].

Таким образом, измерив в начальный момент времени  $t_0$

сравнительно высокое давление  $P_{1,0}$  и зная параметры  $U_1$  и  $V_1$ , можно рассчитать давление  $P_1$  спустя любой промежуток времени после прекращения напуска.

Основные трудности, возникающие при осуществлении обоих вариантов метода изменения давления во времени, связаны со сделанными при выводе уравнений (1) — (3) допущениями, прежде всего,  $s_1 \ll U_0$  (или  $U_1$ ) и  $q_1 \ll U_0 P_A$  (или  $U_1 P_1$ ). Действительно, для того, чтобы охватить за приемлемый промежуток времени область наиболее низких давлений (ниже  $10^{-8}$  Па), необходимы весьма малые значения  $U_0$  или  $U_1$  (например,  $10^{-3}$  —  $10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с и менее). В то же время известно, что скорости откачки ионизационных и, особенно магнитных, электроразрядных манометров достигают  $10^{-5}$  —  $10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с и более. Чтобы, помимо этого, пренебречь остаточным газоотделением  $q_1$ , необходимо обеспечить достаточно большие потоки газа в камеру (или из нее).

Указанные трудности позволяют рассматривать описанный метод лишь как способ проверки линейности манометров. Таким подходом, естественно, не решается задача абсолютного воспроизведения единицы давления в области высокого вакуума. Однако, учитывая простоту метода, он представляется весьма удобным способом проверки характеристик манометров, особенно «на месте», т. е. в той вакуумной системе (по преимуществу, большого объема), где они применяются.

### Метод потоков

В отличие от предыдущего, в данном методе и в последующих течение газа в системе стационарное. Вакуумная система состоит из трех камер (рис. 2). Давление  $P_2$  в градуировочной камере равно

$$P_2 = \frac{Q_1}{U_2 + s_2} \left( 1 + \frac{U_2 P_3 + q_2}{Q_1} \right), \quad (4)$$

где  $P_3$  — давление в третьей (по течению газа) камере;

$Q_1$  — суммарный поток газа, поступающего через натекатель с проводимостью  $U_1$  из 1-й камеры (давление  $P_1$ ) во 2-ю

$$Q_1 = U_1 (P_1 - P_2). \quad (5)$$

Изменение потока  $Q_1$  достигается в общем случае изменением как проводимости натекателя  $U_1$ , так и давления  $P_1$ .

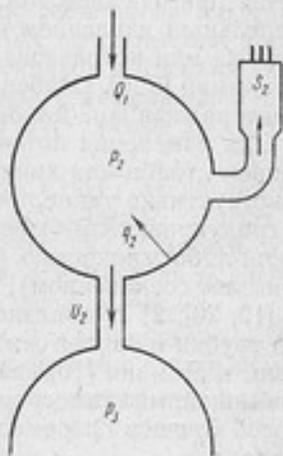


Рис. 2. Вакуумная система установки для градуировки вакуумметров по методу потоков

При  $s_2 \ll U_2$  и  $U_2 P_3, q_2 \ll Q_1$  уравнение (4) примет вид

$$P_2 = \frac{Q_1}{U_2}. \quad (4a)$$

Рабочую область давлений  $P_2$  воспроизводят изменением измеряемого потока  $Q_1$  газа, вводимого в градуировочную камеру (при известной проводимости  $U_2$ ).

Основные трудности, возникающие при использовании метода потоков [5—17], связаны с соблюдением принятых допущений и с выбором способа измерения потока  $Q_1$ . Условие  $s_2 \ll U_2$  требует, чтобы значение  $U_2$  было не менее  $(0,5-1) \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с (в этом случае соответствующая погрешность не превысит 1—2%). Условие  $U_2 P_3, q_2 \ll Q_1$  эквивалентно условию  $P_3, P_{2,0} \ll P_2$ . Из-за больших погрешностей измерения давлений  $P_3$  и  $P_{2,0}$  необходимо, чтобы отношения  $P_3/P_2$  и  $P_{2,0}/P_2$  были как можно меньше, что достигается применением высокопроизводительных насосов с низким предельным давлением и современной технологии сверхвысокого вакуума или использованием специальных приемов отсчета этих отношений [5, 6]. Особенно сложно решить эту задачу, если температура газа во 2-й и 3-й камерах различна [4].

Для измерения потоков  $Q_1$  применяют потокометры с перемещением столба или капли жидкости в трубке известного сечения. Конструктивно такие потокометры могут быть выполнены в виде: 1) градуированной бюретки (пипетки), опущенной в резервуар с какой-либо жидкостью (ртутью, водой, маслом или другим органическим соединением), находящейся под атмосферным давлением [12, 20]; 2) U-образного манометра [5, 7, 51]; 3) горизонтальной трубки с каплей жидкости, перемещающейся в ней [19]. Бенневиц и Домани [10] ввели более чувствительный, по сравнению с обычной миллиметровой шкалой, электрический (емкостный) способ отсчета перемещения столба ртути в U-образном манометре.

Несмотря на простоту конструкции и метода измерений эти потокометры имеют существенный недостаток, связанный с наличием рабочей жидкости, пары которой могут загрязнять градуировочный газ (их можно вымораживать специальными ловушками). При измерениях может изменяться не только объем, но и давление газа в потокометре, что затрудняет расчет потока и является источником погрешностей. Правда, от этих недостатков свободна конструкция потокометра, предложенная в [23].

В [6] показано, что минимальные потоки, измеряемые жидкостными потокометрами за умеренный промежуток времени (10—20 мин), составляют примерно  $10^{-6}$  Вт ( $\sim 10^{-5}$  л·мм рт. ст./с), что ограничивает рабочую область установок давлениями порядка  $10^{-4}$  Па ( $\sim 10^{-6}$  мм рт. ст.).

В дальнейшем был разработан [6] и исследован [6, 7, 11, 17] потокометр с переменным объемом и дифференциальным манометром. Объем газа в потокометре изменяется с такой скоростью,

чтобы непрерывно поддерживать нулевой отсчет дифференциального манометра (например, мембранного или интерференционного масляного). Одна из камер манометра соединена с переменным объемом (в форме сильфона или трубки с поршнем), а другая — с пространством, в котором поддерживается постоянным и точно измеряется абсолютным манометром сравнительно высокое давление. Согласно [6], таким потокомером можно измерить потоки до  $10^{-7}$  Вт ( $\sim 10^{-6}$  л. мм рт. ст./с) за 10 мин (погрешность  $\pm 5\%$ ). Потокомер этого типа в дальнейшем был усовершенствован [17] посредством авторегулирования движения элемента переменного объема.

В потокомере, примененном Шумовым и др. [22], поток рассчитывают по скорости падения давления в известном постоянном объеме. При этом абсолютное значение давления, будучи намного больше этого падения, фактически постоянно и не требует измерения. Падение давления измеряют дифференциальным манометром, одна из камер которого соединена с потокомером, а другая — с пространством, в котором поддерживается высокий вакуум. Потокомером такого типа с помощью интерференционного масляного манометра были измерены [22] потоки до  $10^{-8}$  Вт ( $\sim 10^{-7}$  л. мм рт. ст./с).

В рассмотренных методах род газа не влияет на расчет потока. В то же время проводимость  $U_2$  существенно зависит от рода газа. Поэтому постоянные соответствующих установок должны быть различными для разных газов, а измерение давления смеси газов неизвестного состава вообще невозможно.

Общими недостатками всех описанных потокомеров являются:

- 1) большая чувствительность к температурным отклонениям;
- 2) понижение точности и чрезмерное увеличение времени измерений с уменьшением потоков, связанное с трудностями отчета малых приращений объема или давления.

Если первый недостаток можно в значительной степени устранить термостатированием потокомера и камер [15, 17, 22], то для устранения второго недостатка необходимы другие решения.

Так, для измерения потока гелия и дейтерия можно применить масс-спектрометрический теческатель [8], считая его сигнал линейной функцией потока. Поскольку сам теческатель в этом случае градуируется по «калиброванным течам», то целесообразно [16] применить «калиброванные течи» непосредственно для воспроизведения потоков.

Ввиду того, что точное измерение малых потоков (менее  $10^{-8}$  Вт) затруднено из-за неудовлетворительной конструкции потокомера, нижний предел рабочей области установок, работающих по методу потоков, составляет только  $10^{-6}$  Па ( $\sim 10^{-8}$  мм рт. ст.).

### Метод переменной проводимости

Если напускаемый в градуировочную камеру поток  $Q_1$  постоянен, а проводимость  $U_2$  может принимать различные значения, то уравнение (4а) выражает линейную зависимость воспроизводимого давления  $P_2$  от сопротивления  $\frac{1}{U_2}$  элемента, разделяющего 2-ю и 3-ю камеры. Эта зависимость лежит в основе метода переменной проводимости [18—24].

С целью обеспечения наиболее точного теоретического расчета элемент проводимости  $U_2$  выполняют часто в виде тонкой пластины с отверстием круглой формы (с почти идеальным отверстием). Размер (диаметр) отверстия изменяют, например, с помощью «ирисовой» диафрагмы [23, 24] или поворотного набора пластин с круглыми отверстиями [18]. Нашли применение и элементы других форм: цилиндрическая труба [19], пластина с треугольным отверстием [21], кольцевой зазор между усеченным конусом и отверстием [22].

В большинстве упомянутых выше работ предлагается «графоаналитический» вариант метода переменной проводимости. Если в уравнении (4) отношение  $\frac{U_2 P_2}{Q_1}$  не пренебрежимо мало, то, заменив его отношением  $\frac{U_2}{S_3}$  ( $S_3$  — скорость откачки насосом 3-й камеры), можно при прочих указанных ранее допущениях написать

$$P = Q_1 \left( \frac{1}{U_2} + \frac{1}{S_3} \right) \quad (6)$$

или после подстановки вместо давлений  $P_2$  сигналов  $I_2$  градуировочного ионизационного манометра

$$I_2 = C_1 \frac{1}{U_2} + C_2, \quad (6a)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные (при  $Q_1$  и  $S_3 = \text{const}$ ). При этом заранее предполагается пропорциональность между током  $I_2$  и давлением  $P_2$ , т. е. линейность характеристики градуировочного манометра. Эта линейность может быть проверена ходом графика  $I_2 = f\left(\frac{1}{U_2}\right)$  (рис. 3), построенного по экспериментальным точкам. Систему уравнений вида (6а), составленных по экспериментальным данным  $I_2$  и  $\frac{1}{U_2}$ , можно решить и аналитически, методом наименьших квадратов. Полученное в результате значение  $C_1$  при известном потоке  $Q_1$  определит чувствительность градуировочного манометра. Так как  $\frac{C_1}{C_2} Q_1 = P_3$ , то имеется воз-

возможность проградуировать и манометр, присоединенный к 3-й камере [20, 24].

Описанный метод переменной проводимости не решает проблему измерения малых потоков газа. В связи с этим Шумов и др. указали [22] на возможность частичного решения проблемы путем «передачи потока». Один и тот же сигнал манометра, соответствующий на рис. 3 двум соседним прямым, относится к разным потокам  $Q_1'$  и  $Q_1''$  и проводимостям  $U_2'$  и  $U_2''$ , т. е.

$$I_2 = C \left( \frac{Q_1'}{U_2'} + \frac{Q_1''}{S_3} \right) = C \left( \frac{Q_1''}{U_2''} + \frac{Q_1''}{S_3} \right). \quad (7)$$

Тогда, зная, например, больший поток  $Q_1'$ , можно вычислить и меньший

$$Q_1'' = Q_1' \frac{U_2''}{U_2'} \cdot \frac{U_2' + S_3}{U_2'' + S_3}. \quad (8)$$

Линейность характеристики градуируемого манометра можно проверить по методу переменной проводимости и не зная значения  $Q_1$ . В [21] предложено заменить градуировку манометров при давлениях ниже той области, где можно это выполнить каким-либо абсолютным методом, проверкой линейности характеристик манометров. Ионизационные манометры вначале градуировали по интерференционному масляному манометру в области давлений  $10^{-4} - 10^{-3}$  Па ( $\sim 10^{-3} - 10^{-5}$  мм рт. ст.), а затем методом переменной проводимости проверяли линейность их характеристик во всей рабочей области, включая указанный диапазон предварительной градуировки.

К сожалению, область применения последних вариантов метода переменной проводимости распространяется только на манометры с линейными характеристиками. Метод непригоден для градуировки многочисленного класса магнитных электроразрядных манометров, часто имеющих нелинейные характеристики.

Осуществление метода переменной проводимости сопряжено с необходимостью передачи точных перемещений в вакуум, что может затруднить достижение сверхвысокого вакуума. Возможно, по этой причине авторы упомянутых выше работ ограничили область градуировки давлениями выше  $10^{-5} - 10^{-6}$  Па.

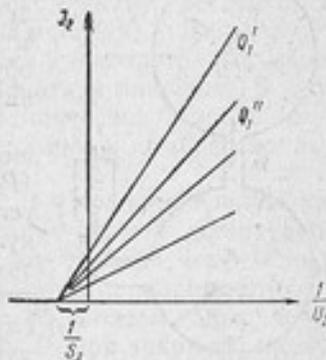


Рис. 3. Зависимость сигнала  $I_2$  градуируемого манометра от сопротивления  $1/U_2$  течению газа

### Метод редукции давления

Для давления  $P_2$  в градуировочной (2-й) камере динамической системы (рис. 4) можно записать

$$P_2 = \frac{U_1}{U_1 + U_2 + s_2} P_1 \left( 1 + \frac{U_2 P_2 + q_2}{U_1 P_1} \right). \quad (9)$$

Приняв  $s_2 \ll U_2$  и  $U_2 P_2, q_2 \ll U_1 P_1$ , получим

$$P_2 = \frac{U_1}{U_2 + U_1} P_1. \quad (9a)$$

Отсюда следует, что для вычисления значений  $P_2$  необходимо измерять устанавливаемые в 1-й камере давления  $P_1$  при известных значениях проводимостей  $U_1$  и  $U_2$ . Если обозначить

$$\frac{U_1}{U_2 + U_1} = C, \text{ то } P_2 = CP_1, \quad (96)$$

где  $C$  — постоянная, значение которой зависит только от размеров и формы элементов с проводимостями  $U_1$  и  $U_2$  и одинаково для всех газов.

Это важнейшее свойство метода редукции давления, позволяющее считать его безусловно абсолютным методом, обусловило его широкое распространение [25—47].

Из формулы (9a) видно, что для большого понижения (редукции) давления ( $P_2 \ll P_1$ ) требуется, чтобы выполнялось условие  $U_1 \ll U_2$  (при соблюдении молекулярного режима течения). Таким образом, необходимо осуществить конструктивно и точно определить (в большинстве случаев — экспериментально) весьма малую проводимость (практически  $10^{-6}$  —  $10^{-7}$  м<sup>3</sup>/с и менее).

В качестве элементов малой проводимости применяют, например, стеклянные и металлические капилляры [25, 27, 28] и пластины с отверстиями малых диаметров [26, 29, 35]. Вследствие трудности теоретического расчета проводимости этих элементов особое значение приобрели методы экспериментального определения малых проводимостей.

В связи с этим появился интерес к пористым материалам, способным благодаря малым размерам пор обеспечивать требуемые величины проводимости молекулярного течения газа даже при давлениях, в ряде случаев близких к атмосферному. Нашли при-

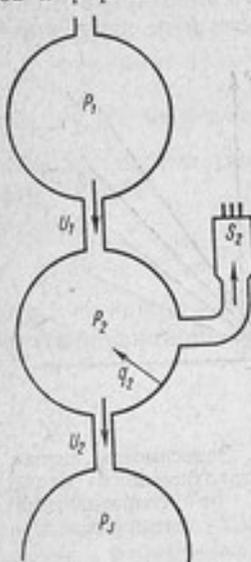


Рис. 4. Вакуумная установка для градуировки вакуумметров по методу редукции давления

менение карбид кремния [33], пористое стекло [31, 32], металло-керамика [32], фарфор [32]. Предлагались также материалы с селективной проницаемостью для ряда газов (например, палладий и никель — для водорода, серебро — для кислорода и т. д.), причем проводимость перегородок из проницаемых материалов регулировали изменением их температур.

Иногда предпочитают [28] пользоваться просто тонким натекателем, который тоже надо градуировать каждый раз, так как нельзя рассчитывать на воспроизводимость значений проводимости натекателей. Этот вариант особенно удобен тем, что можно менять значение  $U_1$  проводимости, что, в свою очередь, обеспечивает более широкую область градуировочных давлений.

Для экспериментального определения проводимости  $U_1$  (независимо от формы ее элемента) часто [31, 33, 34, 41] используют закон временной зависимости давления в известном объеме [уравнение (3)]

$$U_1 = \frac{V_1}{\Delta t} \ln \frac{P_{1,0}}{P_1}. \quad (10)$$

Газ, находящийся под сравнительно высоким давлением  $P_{1,0}$ , откачивали из известного объема  $V_1$  через элемент исследуемой проводимости (в молекулярном режиме течения). Для отсчета отношений  $P_{1,0}/P_1$  в работе [34] применен радионуклидный манометр, характеристику которого можно считать линейной. В других случаях [31, 33, 41] применяли механические (пружинные, мембранные, грузопоршневые),  $U$ -образные и компрессионные манометры.

В установке Флетчера и Уоттса [42, 43] градуировочную камеру можно было изолировать от соседних камер клапанами. Тогда, откачивая градуировочную камеру сначала через отверстие элемента проводимости  $U_2$  при закрытой проводимости  $U_1$  в определенном интервале давлений  $P_{2,0} - P_2$ , а затем только через отверстие элемента малой проводимости  $U_1$  при закрытой проводимости  $U_2$  в том же интервале давлений, будем иметь в результате два уравнения, подобных (10)

$$U_2 = \frac{V_2}{\Delta t'} \ln \frac{P_{2,0}}{P_2} \text{ и}$$

$$U_1 = \frac{V_2}{\Delta t''} \ln \frac{P_{2,0}}{P_2},$$

где  $\Delta t'$  и  $\Delta t''$  — соответствующие промежутки времени. Отношения  $P_{2,0}/P_2$  отсчитывали по показаниям ионизационных манометров. Отсюда

$$C = \frac{U_1}{U_2 + U_1} = \frac{\Delta t'}{\Delta t'' + \Delta t'}. \quad (11)$$

Таким образом, непосредственно в ходе экспериментов получается значение постоянной  $C$  установки.

В некоторых случаях [44] для определения проводимости применяют потокомеры, например жидкостные, и измеряют перепад давлений по обе стороны элемента проводимости [уравнение (5)]. Указанным методам присущи недостатки, связанные с выполнением измерений в замкнутом объеме (см. стр. 35—37) или измерений потока (стр. 37—39).

В ряде работ [26—28, 36] применен «метод калибровки проводимости» натекателя (или отверстия малых размеров). Вначале вместо натекателя устанавливали элемент с отверстием или капилляр сравнительно большой расчетной проводимости  $U_1'$ . В процессе установившегося течения газа давления в 1-й и 2-й камерах составляли  $P_1'$  (по компрессионному манометру) и  $P_2$  (по ионизационному манометру) соответственно. Затем после присоединения натекателя значительно меньшей проводимости  $U_1''$  давление в 1-й камере повышали до такого значения  $P_1''$ , когда давление в градуировочной камере, отсчитываемое тем же ионизационным манометром, вновь достигало значения  $P_2$ , т. е. (при  $U_1', U_1'' \ll U_2$ )

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= \frac{U_1'}{U_2} P_1' \\ P_2 &= \frac{U_1''}{U_2} P_1'' \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Отсюда

$$U_1'' = \frac{P_1'}{P_1''} U_1' \quad (13)$$

Преимуществом метода является то, что побочные процессы (откачка манометров, газоотделение стенок и др.) незначительно влияют на результат эксперимента. Однако, как и в методе Флетчера и Уоттса (см. выше), здесь появляется погрешность, связанная с присущими применяемому ионизационному манометрам отклонениями чувствительности.

Первый этап и соответствующее уравнение измерения двух методов определения малых проводимостей, описанных в работах [35—40], сходны с описанным выше и первым уравнением из системы (12). Затем через отверстие элемента искомой малой проводимости  $U_1''$  производили (в отсутствие откачки) напуск газа, находящегося под постоянным давлением  $P_1''$ , в объеме  $V_2$  градуировочной камеры. Давление в камере возрастало согласно уравнению (1а) и через некоторый промежуток времени  $\Delta t$  достигало вновь того же значения  $P_2$ , что и на первом этапе. Об идентичности давлений  $P_2$  судят, как и ранее, по сигналам ионизационных манометров. В результате при  $P_{2,0} \ll P_2$  получим

$$U_1'' = \frac{U_1'}{U_2} \cdot \frac{V_2}{\Delta t} \cdot \frac{P_1'}{P_1''} \quad (14)$$

В другом методе диафрагмы с отверстиями оставались те же, что и на первом этапе ( $U_1'$  и  $U_2$ ), но ионизационные манометры, ранее указывавшие давление  $P_2'$ , присоединялись к 1-й камере. Ко 2-й же камере присоединяли другие ионизационные манометры. Поток газа через систему регулировали так, чтобы в 1-й камере установилось давление  $P_2''$ , а во 2-й камере — некоторое давление  $P_2''$  (оба отсчета — по ионизационным манометрам). Наконец, устанавливали диафрагму с отверстием искомой малой проводимости  $U_1''$  (вместо  $U_1'$ ). При установившемся течении газа во 2-й камере вновь отсчитывали то же давление  $P_2''$ . Соответствующее давление  $P_1''$  в 1-й камере находилось, как и ранее, давление  $P_1'$ , в пределах рабочей области компрессионного манометра. Решение системы трех уравнений вида (9а) выражается формулой

$$U_1'' = \frac{(U_1')^2}{U_2} \cdot \frac{P_1'}{P_1''} \quad (15)$$

Во всех случаях результаты опытов относятся лишь к определенным газам. Однако, зная температуру и молекулярную массу газа, легко подсчитать геометрический параметр проводимости, общий для всех газов.

Метод редукции давления свободен от недостатков, указанных выше для других методов градуировки, и является наиболее перспективным как в отношении точности, так и в отношении расширения нижнего предела рабочей области. Именно методом редукции давления проведены известные абсолютные градуировки манометров при давлениях ниже  $10^{-8}$  Па [27, 28, 45].

### Специальные варианты метода редукции давления

При осуществлении метода редукции давления наиболее трудную задачу представляет определение малой проводимости. В связи с этим предпринимались попытки реализовать этот метод таким образом, чтобы избежать применения малых проводимостей.

Установка, описанная Саймонсом и др. [48—50], состоит из нескольких, соединенных последовательно и дифференциально откачиваемых камер (рис. 5). При течении газа через все камеры часть общего потока откачивается на каждой ступени. Градуированный манометр присоединяют, например, к 4-й камере, а образцовый манометр (или потокомер) — к 1-й. Введение дополнительных звеньев откачки может существенно увеличить перепад давлений  $P_1$  и  $P_4$ . Подбором значений проводимостей отверстий в работе [10] получали понижение (редукцию) давления  $P_4/P_1$  до  $10^{-6}$ .

Дифференциальная откачка позволяет работать со сравнительно высокими исходными давлениями  $P_1$  (или большими потоками  $Q_1$ ) газа, при этом отпадает нужда в малых проводимо-

стях. Однако установка должна быть в этом случае очень громоздкой, требует много высоковакуумного оборудования, в первую очередь насосов, обслуживать ее нелегко. При наличии нескольких ступеней дифференциальной откачки происходит накопление систематических погрешностей, связанных прежде всего с расчетом проводимостей.

Моррисон [51, 52] предложил использовать сочетание последовательных ступеней редукции давления во времени. В установке, работающей по этому принципу (рис. 6), специальный «ионизационный» манометр сравнения присоединяли вначале к 1-й камере, после получения устойчивого показания его присоединяли ко 2-й камере, причем вновь устанавливали повышенное давление газа то же показание манометра. Увеличенный поток

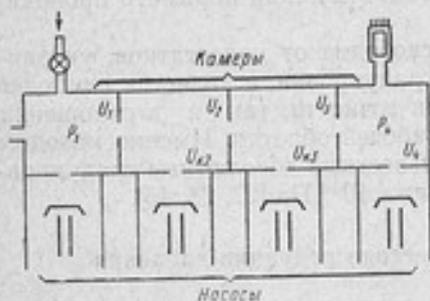


Рис. 5. Вакуумная система установки для градуировки вакуумметров по методу редукции давления с применением дифференциальной откачки

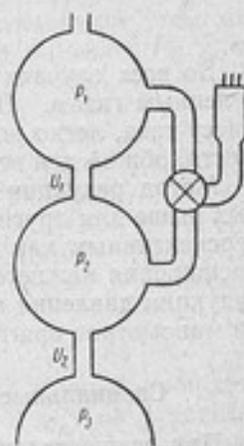


Рис. 6. Вакуумная система установки для градуировки вакуумметров по методу редукции давления с применением «передачи значения давления»

создает соответственно и более высокое давление в 1-й камере. Его вновь измеряют «манометром сравнения», переключенным снова на 1-ю камеру. Процесс последовательной передачи значения давления повторяют до тех пор, пока в камерах не достигнуто достаточно высокое давление, которое можно измерить абсолютным методом. По этому давлению как последнему члену геометрической прогрессии можно определить и предыдущие. Таким образом, путем передачи значения давления устраняется необходимость малых проводимостей без потери в степени редукции

давления. Однако при наличии нескольких ступеней передачи происходит накопление систематических ошибок, связанных с определением проводимостей и, что более важно, с погрешностями самого манометра сравнения. Анализ последних вариантов метода редукиции давления приводит к выводу, что отказ от применения малой проводимости не дает гарантий повышения точности.

В последние годы предложен [53] метод градуировки манометров «молекулярным лучом». Метод сочетает редукицию давления (при использовании пористой перегородки) с расчетом распределения молекулярного излучения из «почти идеального отверстия». Предпосылкой такого расчета является то, что стенки объема, в котором происходит молекулярное излучение, охлаждаются жидким гелием, благодаря чему, как предполагается, в объеме нет молекул, отраженных от стенок. Градулируемые манометры располагаются на пути молекулярного луча.

Отличием этого довольно сложного метода является отсутствие максвелловского распределения скоростей молекул в градуировочной камере. Метод пригоден только для некоторых чистых газов, постоянная соответствующей установки зависит от рода газа и температуры. Кроме того, он еще недостаточно исследован, и степень соответствия теоретических представлений истинному распределению молекул в камере остается неясной. Однако, этот метод дает возможность максимально использовать сверхнизкие давления, обеспечиваемые крионасосами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Dushman S., Found C. G. Studies with the ionization gauges. *Physical Review*. 1920, v. 15, No. 2, pp. 133—134, 1921, v. 17, No. 1, pp. 7—19.
2. Alpert D., Buritz R. S. Ultra-high vacuum-limiting factors on the attainment of very low pressures. *Journal of applied physics*. 1954, v. 25, No. 2, pp. 202—210.
3. Milleron N., Reinath F. S. Calibration of ionization manometers in situ by steady and e-folding flow methods in the range  $1 \cdot 10^{-4}$  torr, to  $1 \cdot 10^{-9}$  torr. *Vacuum*. 1965, v. 15, No. 1, p. 21.
4. Lange W. J., Eriksen D. P. An improved gauge calibration technique. *Journal of Vacuum science and technology*. 1966, v. 3, No. 5, p. 303. *Vacuum*, 1967, v. 17, No. 3, p. 164.
5. Normand C. E. Use of a standard orifice in the calibration of vacuum gauges. Transactions of the 8-th National Vacuum Symposium combined with the 2-nd International Congress on Vacuum Science and Technology. Pergamon Press. Oxford. 1962, Part II, pp. 534—543.
6. Hayward W. H., Jepsen R. L. A simple high vacuum gauge calibration system. Transactions of the 9-th National Vacuum Symposium AVS. McMillan Ltd. New York. 1962, pp. 459—462.
7. Hoffmann V. E. Vacuum gauge calibration. *Research/Development*. 1963, v. 14, No. 4, pp. 62—65.
8. Bergsnov-Hansen B., Endow N., Pasternak R. A. Ion gauge calibration at low pressures using a leak detector. *Journal of vacuum science and technology*. 1964, v. 1, No. 1, pp. 7—9.
9. Narita S. An orifice system for vacuum gauge calibration. *Journal of vacuum Society of Japan*. 1964, v. 7, No. 9, pp. 331—333.

10. Bennewitz H. G., Dohmann H. D. Dynamische Druckbestimmung. *Vacuum-Technik*. 1965, v. 14, No. 1, S. 8—12.
11. Falor K. Vacuum gauge calibration. *«Instruments and control systems»*. 1966, v. 39, No. 2, pp. 93—97.
12. Шаревский Б. А. Сверхвысоковакуумная установка для градуировки и сличения ионизационных манометров. *«ПИЭ»*, 1967, № 4, с. 171—176.
13. Moore V. C. In-situ calibration of vacuum gauges. *«Design News»*. 1965, v. 20, No. 17, pp. 146, 149—153.
14. Das K. V. Absolute calibration of ionization gauges. *ISA Journal*. 1966, v. 13, No. 7, pp. 43—48.
15. Das K. V. Effect of trap temperature in orifice-type vacuum gauge calibration systems. *«Vacuum»*. 1967, v. 17, No. 11, pp. 587—592.
16. Bergquist L. E. Gauge-calibration facility for operation at extremely low pressures. *«Vacuum»*. 1968, v. 18, No. 3, p. 153. Proceedings of 4-th International Vacuum Congress. Institute of Physics and Physical Society. London. 1968. Part II, pp. 600—604.
17. Bannenberg J. G., Tip A. A calibration system for total-pressure gauges in the range  $10^{-2}$  —  $10^{-5}$  torr. *«Vacuum»*. 1968, v. 18, No. 3, pp. 153—154. Proceedings of 4-th International Vacuum Congress. Institute of Physics and Physical Society. London. 1968, Part II, pp. 609—612.
18. Henry R. P. Détermination absolue de la pression à l'aide de la jauge à ionisation. *Le Vide*. 1956, 11, N 62, pp. 54—63.
19. Florescu N. A. New method for vacuum measurements in the molecular range of pressures. Transactions of the 6-th National Vacuum Symposium of AVS. Pergamon Press. Oxford. 1959, pp. 75—81.
20. Roussel J. Principe et réalisation d'un appareil destiné à l'étalonnage des jauges à vide. *Le Vide*. 1965, 20, N 116, pp. 109—115.
21. Choumoff P. S., Aubry B. Etalonnage de jauge à ionisation par la méthode de la conductance variable. *Le Vide*. 1965, 20, N 117, pp. 177—185.
22. Choumoff P. S., Bernardet H., Mativet J., Sauneuf R. Etalonnage absolu ultravide par la méthode de la conductance réglable. *Le Vide*. 1970, 25, N 146, pp. 84—90. *«Journal of vacuum science and technology»*. 1970, v. 7, No. 1, pp. 270—273.
23. Gourjault J.—C. Contribution à la métrologie des basses pressions. Thèse. Rouen. 1971.
24. M-m Lefevre. Métrologie de l'ultra-vide: description d'un banc d'étalonnage et de ses composants de mesure. Bulletin d'information du Bureau National de Métrologie. 1971, 2, N 3, pp. 8—10; N 4, pp. 7—8.
25. Florescu N. A. Reproducible low pressures and their application to gauge calibration. Transactions of the 8-th National Vacuum Symposium combined with the 2-nd International Congress on Vacuum Science and Technology. Pergamon Press. Oxford. 1962, Part II, pp. 504—510.
26. Davis W. D. Gauge calibration in the ultra-high vacuum range. Transactions of the 10-th National Vacuum Symposium of AVS. McMillan Ltd. New York. 1963, pp. 253—256.
27. Davis W. D. Ultra-high vacuum gauge calibration. *«Journal of vacuum science and technology»*. 1967, v. 4, No. 5, p. 329. 1968, v. 5, No. 1, pp. 23—33.
28. Davis W. D. Calibration of vacuum gauges at pressures below  $10^{-10}$  torr. *«Vacuum»*. 1968, v. 18, No. 3, p. 153. Proceedings of the 4-th International Vacuum Congress. Institute of Physics and Physical Society. London. 1968. Part II, pp. 605—608.
29. Kreisman W. S. Calibrating vacuum gauges below  $10^{-9}$  torr. *«Research/Development»*. 1963, v. 14, No. 12, pp. 58—60.
30. Kreisman W. S. Ultra-high vacuum gauge calibration system. *«Research/Development»*. 1966, v. 17, No. 12, pp. 56—59.
31. Owens C. L. Ionisation gauge calibration system using a porous plug and orifice. *«Journal of vacuum science and technology»*. 1965, v. 2, No. 3, pp. 104—108.
32. Sherrell F. G., Mathews A. J. A high vacuum calibration system. *«Journal of spacecraft and rockets»*, 1965, v. 2, No. 5, pp. 799—801.

33. Christian R. J., Leck J. H. The use of a silicon carbide porous plug for the control of gas flow into a vacuum system down to 1  $\mu$ torr/sec. «Journal of scientific instruments». 1966, v. 43, No. 4, pp. 229—233.

34. Хавкин Л. П. Градуировка вакуумных манометров по газовым потокам. Приборы и техника эксперимента. 1966, № 5, с. 181—185.

35. Кузьмин В. В. Абсолютный метод динамического воспроизведения малых давлений. «Измерительная техника», 1967, № 1, с. 29—33.

36. Кузьмин В. В. Физика и техника сверхвысокого вакуума. Л., «Машиностроение», 1969, с. 177—183.

37. Ерюхин А. В., Кузьмин В. В. Образцовая установка для воспроизведения единицы давления в диапазоне  $10^{-2}$ — $10^{-6}$  н/м<sup>2</sup>. «Измерительная техника», 1969, № 4, с. 22—26.

38. Ерюхин А. В., Кузьмин В. В. Точность воспроизведения единицы давления в области высокого и сверхвысокого вакуума абсолютным методом редукции давления. «Измерительная техника», 1970, № 5, с. 41—44.

39. Goulliaev M. A., Eryukhin A. V., Kouzmine V. V. La précision des appareils étalons pour la calibration des jauges à vide par la méthode absolue de la réduction de pression. «Le Vide», 1970, 25, N 148—149, pp. 192—197.

40. Гуляев М. А., Ерюхин А. В., Кузьмин В. В. Образцовая аппаратура ВНИИМ для градуировки вакуумметров абсолютным методом в области  $10^{-5}$ — $10^{-8}$  мм рт. ст. «Уникальные приборы», 1971, № 7, с. 23—26.

41. Гуляев М. А., Ерюхин А. В., Кузьмин В. В., Ломасов В. Н. Об измерении давлений в динамических вакуумных системах. «Метрология», 1972, № 11, с. 3—13.

42. Кузьмин В. В., Рыжов В. А. Образцовая манометрическая установка с областью измерений  $10^{-4}$ — $10^{-7}$  мм рт. ст. «Уникальные приборы», 1973, № 13, с. 59—64.

43. Reich G., Meinke C. Comparison between static and dynamic calibration methods for ionization gauges. «Vacuum», 1967, v. 17, No. 3, p. 164. «Journal of vacuum science and technology», 1967, v. 4, No. 6, pp. 356—359.

44. Fletcher B., Watts J. F. The design and construction of an absolute precision gauge calibration system. «Vacuum», 1967, v. 17, No. 8, pp. 445—448. «Vakuum-Technik», 1968, 17, N 6, S. 145—149.

45. Fletcher B. A. dynamic pressure reduction system used for the calibration of a mass-spectrometer for argon. «Vacuum», 1970, v. 20, No. 9, p. 377.

46. Mittelstädt H. et al. Entwicklung und Aufbau einer nach den dynamischen Expansionsverfahren arbeitenden Anlage zum Einmessen von Vakuummetern im Druckbereich von  $10^{-2}$  torr. bis  $10^{-8}$  torr. «Experimentelle Technik der Physik», 1970, 18, N 1—2, S. 27—31.

47. Bernardet H., Choumoff P. S., Iapteff B. Banc de mesure et d'étalonnage de  $10^{-5}$  à  $10^{-12}$  torr. «Le Vide», 1970, 25, N 147, pp. 131—136.

48. Grosse G., Messer G. Experiences with cryopumps in calibration devices. «Vacuum», 1970, v. 20, No. 9, pp. 373—376.

49. Bláha A. Etalonaz vákuometrov. «Jemna mechanika a optika», 1971, 16, N 3, S. 68—71.

50. Roehrig J. R., Simons J. C. Accurate calibration of vacuum gauges to  $10^{-9}$  torr. Transactions of the 8-th National Vacuum Symposium combined with the 2-nd International Congress on Vacuum Science and Technology. Pergamon Press, Oxford, 1962, pp. 511—518. «Instruments and control systems», 1963, v. 36, No. 4, pp. 107—111.

51. Simons J. C. On uncertainties in calibration of vacuum gauges and the problem of traceability. Transactions of the 10-th National Vacuum Symposium of AVS. McMillan Ltd. New York, 1963, pp. 243—252.

52. Simons J. C., King R. E. Evaluation of uncertainties in vacuum gauge calibration. Transactions of the 3-rd International Vacuum Congress. Pergamon Press, Oxford, 1967. Part II, pp. 263—266.

53. Morrison C. F. Reference-transfer method of vacuum gauge calibration. «Vacuum», 1967, v. 17, No. 3, p. 164. «Journal of vacuum science and technology», 1967, v. 4, No. 5, pp. 246—251.

54. Morrison C. F. Partial-pressure calibration for residual gas analyzers. «Journal of vacuum science and technology», 1969, v. 6, No. 1, pp. 79—82.

55. Fowler P., Brock F. J. Accurate, wide range ultrahigh vacuum calibration system. «Journal of vacuum science and technology», 1970, v. 7, No. 5, pp. 507—516.

Поступила в редакцию  
15/VIII 1973 г.

*И. Н. ДОЛИЦКИЙ, В. И. МИХАЙЛОВ,  
Г. Н. СЕМЕНОВ, Т. А. ФЕДОРЕНКО*

ВНИИМ

## УСТАНОВКА ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПЕРЕПАДОВ И ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

Распространение импульсных процессов в промышленности и научных исследованиях выдвигает задачу повышения уровня метрологического обслуживания измерений величин импульсного характера (давления, перемещения, температуры и т. д.). Наиболее сложной задачей является анализ динамических свойств первичных измерительных преобразователей (ИП) и измерительных приборов в целом. В данной статье приводится описание установки для анализа динамических свойств ИП давления по переходной характеристике ИП при воздействии ступенчато изменяющегося давления.

Принцип действия установки состоит в возникновении перепада давления в камере ограниченного объема при поступлении в нее определенного количества газа. При этом имеется возможность измерять «амплитуду» перепада давления как разность между двумя установившимися значениями давления газа в камере с помощью обычных средств (манометров) и проводить градуировку ИП. Динамические свойства ИП определяются путем анализа кривой изменения сигнала на выходе ИП (формы участка нарастания давления), причем действительная кривая нарастания давления определяется расчетным путем, а также может контролироваться с помощью специального преобразователя.

Установка УВПД-2 состоит из трех основных частей: быстродействующего клапана, системы привода клапана и системы питания сжатым газом (рис. 1).

Основным узлом является быстродействующий клапан, состоящий из корпуса 1 с гильзой 3, в которой имеется 100 отверстий для перепуска газа в рабочую камеру, и штока 4 с манжетами 10, образующими щелевой зазор. Наружный максимальный диаметр манжет на 6—9 мкм превышает внутренний диаметр гильзы, тем самым создается натяг, обеспечивающий необходимое уплотнение в крайних положениях штока.

Система привода клапана состоит из маятника 6 с грузами 7 и копира 5. После подъема грузов на определенную высоту (примерно 60 см) с помощью червячной передачи, приводимой в движение вручную, маятник срывается, ударяя по копиру. Наклонные плоскости копира преобразуют направленную вертикально скорость маятника в горизонтальную скорость штока. При перемещении штока через щель между манжетами и отверстия в гильзе в рабочую камеру 2 поступает определенное количество газа, создавая требуемый перепад давления.

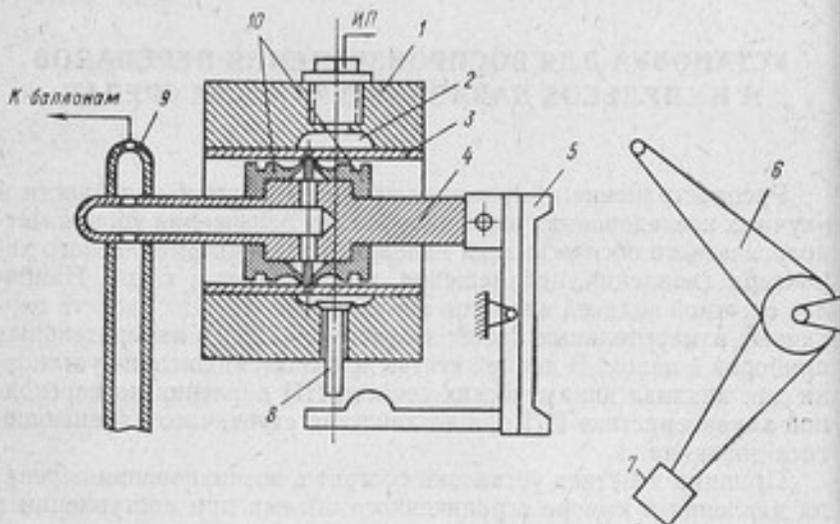


Рис. 1. Принципиальная схема установки

Система питания клапана сжатым газом состоит из стойки с баллонами, резервуара 9, находящегося в непосредственной близости к клапану, и трубопроводов. Поскольку один конец штока все время находится внутри резервуара, во внутренней полости штока поддерживается исходное давление газа.

В установке УВПД-2, кроме режима воспроизведения перепадов давления, предусмотрен режим воспроизведения одиночных остроконечных импульсов путем сброса газа из рабочей камеры сразу после достижения установившегося значения давления. Для этой цели служит дополнительный клапан 8, расположенный в нижней части корпуса быстродействующего клапана и приводимый в движение упоминавшимся выше копиром.

Поскольку основным режимом работы установки УВПД-2 является режим воспроизведения перепадов, обратимся прежде всего к расчету участка нарастания давления в рабочей камере.

Ход кривой изменения давления  $P_1(t)$  определяется расходом газа через сопло, которым служит совокупность отверстий в гильзе 3. В свою очередь, расход  $G$  зависит от параметров газа в резервуаре и рабочей камере и от площади сопла  $F$ .

Известно, что задача расчета процессов выравнивания давлений в резервуаре сжатого газа и камере ограниченного объема (т. е. камере с переменным противодействием) в общем виде не решается. Однако эту задачу можно решить методом ступенчатой аппроксимации кривых изменения давления в резервуаре и рабочей камере. При этом необходимо учесть следующие обстоятельства.

1. Изменение состояния газа в рабочей камере при поступлении в нее газа из резервуара является политропным, причем показатель политропы  $n$  изменяется по мере роста давления в камере. Однако кратковременность процесса нарастания давления в камере позволяет рассчитывать его как адиабатический с постоянным показателем адиабаты  $k$ . Допускаемая при этом погрешность невелика и не превышает погрешности от идеализации газа (пренебрежения наличием примесей).

2. Установка работает на сжатом азоте. Для этого газа критическое отношение давлений при адиабатическом процессе [1]

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \approx 0,5. \quad (1)$$

Следовательно, при исходном давлении (давлении в резервуаре)  $P_2 = 12-15$  МПа и  $P_{1\max} = 4-5$  МПа в установке имеет место сверхкритический режим истечения газа из резервуара. Секундный весовой расход газа через сопло с сечением  $F$  равен при этом

$$G_{\max} = \mu F \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2g}{R} \cdot \frac{k}{k+1} \cdot \frac{P_2}{T_2}}, \quad (2)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода, который для данной конструкции сопла равен  $\mu \leq 0,8$ .

3. Истечение газа в рабочую камеру происходит не непосредственно из резервуара, а через внутреннюю полость штока и манжет. Объем этой полости невелик, поэтому параметры газа в ней в ходе истечения изменяются. Однако необходимо учитывать и непрерывное поступление газа в эту полость по мере ее опорожнения. Расчет процесса поступления газа из резервуара в промежуточную полость ведется по формуле

$$G' = G_{\max} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}, \quad (3)$$

где  $G'_{\max}$  рассчитывается так же, как  $G_{\max}$  [формула (2)], но площадь сечения сопла для этого случая постоянна и в установке УВПД-2 составляет  $F' \approx 0,3$  см<sup>2</sup>.

Функция  $\Psi(t)$  может быть записана в виде

$$\Psi(t) = \Psi(x) \cdot x(t), \quad (4)$$

где  $\Psi(x)$  — зависимость площади сечения сопла (суммарной площади отверстий в гильзе клапана) от положения штока;  $x(t)$  — зависимость положения штока от времени.

Если обратиться к рис. 2, где в большом масштабе изображено одно из отверстий в гильзе, то нетрудно заметить, что площадь открытого сечения  $S$  равна площади сегмента с высотой  $x$ . Из известных формул для площади сегмента можно вывести равенство

$$S = 2r^2 \arctg \frac{x}{\sqrt{2rx - x^2}} - (r - x) \sqrt{2rx - x^2} \quad (5)$$

при  $x \leq 2r$ .

Очевидно, что  $F = 100S$ . Поскольку ширина щели  $L$  между манжетами больше диаметра отверстий ( $L \approx 0,9$  мм;  $2r = 0,6$  мм), после полного открытия отверстий сечение сопла будет некоторое время постоянным, а затем начнет убывать по закону, определяемому той же формулой (5).

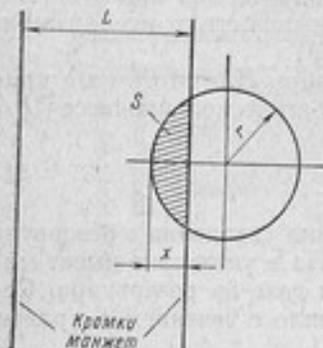


Рис. 2. Схема к расчету процесса перетекания газа

Перемещение штока происходит равноускоренно на начальном участке, равномерно со скоростью  $v$  в рабочей зоне и резко обрывается при достижении копіром одного из упоров. Экспериментально найдено, что  $v \approx 1,6$  м/с; следовательно,  $x = 1,6t$ .

Полученные выше формулы позволили выполнить окончательный расчет функции  $P_1(t)$ . В соответствии с принятым методом ступенчатой

аппроксимации значения всех параметров в пределах каждого шага  $\Delta t = 0,05$  мс считались постоянными. На рис. 3 приведена расчетная зависимость  $P_1(t)$ .

Расчет режима воспроизведения импульса давления (участка убывания давления) ведется по формуле (3) с той особенностью, что противодействие  $P_2$  постоянно (равно атмосферному), а исходное давление  $P_1$  непрерывно уменьшается. На рис. 4 показана форма импульса.

Достоверность проведенных расчетов может быть оценена следующим образом. Наиболее существенными составляющими погрешности расчета являются:

1. Погрешность дискретности  $\gamma_d$ , равная

$$\gamma_d = \frac{1}{2N} \approx 3\%,$$

где  $N = 19$  — число расчетных точек.

2. Погрешность от идеализации газа  $\gamma_{\text{и}}$ . Технический азот, применяемый в установке, представляет собой смесь азота с небольшим количеством (1—3%) других газов, входящих в состав воздуха, и парами воды. Следовательно, показатель адиабаты  $k$  рабочего газа не равен  $k_{\text{азота}} = 1,40$ . Однако, поскольку  $k_{\text{воздуха}} \approx 1,39$ —1,40, различие в реальной и расчетной величинах  $k$  не превышает 1%. Эта величина и может считаться значением погрешности  $\gamma_{\text{и}}$ .

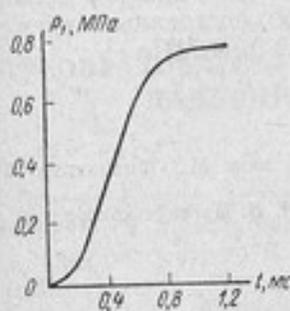


Рис. 3. Кривая нарастания давления в рабочей камере

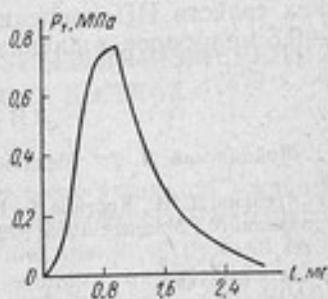


Рис. 4. Форма импульса давления в рабочей камере

3. Погрешность  $\gamma_{\text{гс}}$  от неточного учета гидравлических сопротивлений при истечении газа. Поскольку гидравлические сопротивления учитывались путем введения коэффициентов расхода  $\mu$ , то

$$\gamma_{\text{гс}} < \gamma_{\mu_1} + \gamma_{\mu_2},$$

где  $\gamma_{\mu_1} \approx 2\%$  — погрешность коэффициента расхода при истечении газа из резервуара во внутреннюю полость штока;  $\gamma_{\mu_2} \approx 2,5\%$  — погрешность коэффициента расхода при истечении газа в рабочую камеру. Следовательно,  $\gamma_{\text{гс}} \leq 4,5\%$ .

Максимальная погрешность расчета составит  $\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\text{л}} + \gamma_{\text{и}} + \gamma_{\text{гс}} = 8,5\%$ .

Экспериментальное исследование процессов изменения давления в рабочей камере проводилось с помощью пьезокварцевого ИП давления типа ПД-9000 [2]. Сигнал с контрольного ИП усиливался электрометрическим каскадом на лампе ЭМ-4 и наблюдался на экране осциллографа С1-4. По данным проведенных измерений, время нарастания давления между уровнями 10% и 90% амплитуды перепада составляет 0,5—0,6 мс, что близко совпадает с теоретическим значением. Ход кривой участка нара-

стания давления соответствует расчетному, что свидетельствует о правильности примененной методики расчета процесса.

Для измерения «амплитуды» перепада давления в установке УВПД-2 применен манометр МО-160-40 класса 0,4. Реальная «амплитуда» перепада находится в пределах 0,5—0,7 МПа, следовательно, для достижения  $(P_1)_{\max} = 4$  МПа необходимо сделать 6—8 циклов. Как следует из приведенного расчета и подтверждается экспериментом, временные параметры каждого цикла неизменны.

Установка УВПД-2 может применяться для анализа динамических свойств ИП давления, имеющих постоянные времени 0,3—0,5 мс и более, в диапазоне давлений 0—4 МПа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М., Физматгиз, 1959, 784 с.
2. Агейкин Д. И., Костина Б. Н., Кузнецова Н. Н. Датчики контроля и регулирования. М., Машгиз, 1965, 928 с.

Поступила в редакцию  
15/VIII 1973 г.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИЗ ТЕКСТУРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
ДАВЛЕНИЯ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

Для измерения давления ударных волн в газах и жидкостях применяются преимущественно пьезоэлектрические измерительные преобразователи. В литературе описаны конструкции ИП на основе кварца [1], турмалина [2, 3], пьезокерамики [4, 5] и сульфата лития [6]. В пьезоэлектрических ИП различного назначения наиболее широко применяется пьезокерамика различных составов.

При измерении гидростатических давлений существенными характеристиками пьезоматериала являются величина суммарного пьезомодуля  $d_{i\Sigma} = d_{i1} + d_{i2} + d_{i3}$  и отношение  $d_{i\Sigma}$  к наибольшему пьезомодулю из  $d_{ik}$  ( $i, k = 1, 2, 3$ ).

Конструктивные решения преобразователя в значительной мере определяются его назначением и свойствами пьезоматериалов. Для измерения давлений в ударных волнах в условиях безграничной среды обычно используются ИП на основе пьезоматериалов, имеющих  $\frac{d_{i\Sigma}}{(d_{ik})_{\max}} \approx 1$  и более (турмалин, сульфат лития).

Лучшей разрешающей способностью по времени в этом случае обладают конструкции ИП с пьезоэлементом, работающим на всестороннее сжатие [2, 3, 6]. Для измерения давлений ударных волн в газах и жидкостях на поверхности твердого тела (давление ударных волн на сооружение, на стенку ударной трубы и т. п.) наибольшее разрешение во времени дает конструкция ИП с пьезоэлементом, работающим на одностороннее сжатие и акустически согласованным с отводящим стержнем [4]. Длина последнего определяется длительностью измеряемого процесса.

Для измерения давления ударных волн в безграничных средах с помощью пьезоматериалов, имеющих  $\frac{d_{i\Sigma}}{(d_{ik})_{\max}} \ll 1$  (кварц, пьезокерамика), применяют конструкции ИП с защитой неко-

торых граней пьезоэлементов от давления [1] либо с пьезоэлементами специальной формы, в которых гидростатическое давление газа или жидкости вызывает напряженное состояние, наилучшим образом согласующееся со значениями пьезомодулей  $d_{ik}$ . Для пьезокерамики удобной является форма пьезоэлемента в виде цилиндрической или тонкостенной сферической оболочки с полостью, заполненной материалом с малой жесткостью и большой объемной сжимаемостью, по сравнению с оболочкой. В работе [5] сферическая оболочка из пьезокерамики содержит полость с воздухом. В этом случае гидростатическое давление среды  $p$  вызывает в оболочке с радиусом  $r$  и толщиной стенки  $\delta$  нормальные напряжения в направлениях, перпендикулярных радиусу оболочки

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pr^2}{2\pi r\delta} \quad p = \frac{r}{2\delta} p \quad (1)$$

и среднее нормальное напряжение по толщине оболочки

$$\sigma_3 = \frac{1}{2} p. \quad (2)$$

При этом для коэффициента преобразования ИП можно получить выражение

$$\begin{aligned} K_n &= \frac{Q}{p} = \frac{S_{\text{сф}}}{p} (d_{31}\sigma_1 + d_{32}\sigma_2 + d_{33}\sigma_3) = \\ &= \frac{S_{\text{сф}}}{2} \left[ (d_{31} + d_{32}) \frac{r}{\delta} + d_{33} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Для пьезоэлемента, работающего на всестороннее сжатие, коэффициент преобразования равен

$$K = S (d_{31} + d_{32} + d_{33}). \quad (4)$$

Для пьезокерамики большинства составов имеет место следующее соотношение пьезомодулей [7]:

$$d_{31} = d_{32} \approx -0,4d_{33}. \quad (5)$$

Легко видеть, что при  $S_{\text{сф}} = S$  можно получить  $K_n \gg K$ , если  $r/\delta \gg 1$ . Так, при  $r/\delta = 10$   $K_n \approx -17,5K$ . Возрастание коэффициента преобразования обусловлено значительным увеличением напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  по отношению к давлению  $p$  на сферическую оболочку. Кроме положительного эффекта при этом наблюдается снижение в  $r/2\delta$  раз верхнего предела измеряемых давлений вследствие нелинейности зависимости «заряд-давление». По этой причине ИП со сферической оболочкой, содержащей полость, применяется главным образом для давлений, не превышающих нескольких МПа. Такие давления имеют место в сформировавшихся воздушных ударных волнах.

Наиболее важным преимуществом применения сферической

оболочки является значительное снижение динамических погрешностей, по сравнению с погрешностями для сплошного пьезоэлемента. Динамические погрешности, обусловленные собственными колебаниями пьезоэлемента и деталей корпуса, пропорциональны отношениям каждого из слагаемых в (3) и (4) к их сумме. Для сплошного пьезоэлемента эти отношения составляют  $-2 \div 5$ , в то время как для сферической оболочки при  $r/\delta = 10$  они равны  $0,14 \div 0,57$ , т. е. почти в 10 раз меньше. Обтекаемость сферы также способствует уменьшению погрешностей.

Аналогичного эффекта — снижения динамических погрешностей от собственных колебаний пьезоэлемента и корпуса — можно достигнуть также путем применения сферической оболочки с полостью, заполненной материалом, который обладает большой жесткостью и малой сжимаемостью по сравнению с оболочкой (например, сталь). Если материал полости несжимаем, то гидростатическое давление среды  $p$  вызовет в тонкой оболочке пьезокерамики напряженное состояние [7]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{C_{12}}{C_{33}} p = (0,45 \div 0,68) p, \\ \sigma_3 = p. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Примем для количественных оценок  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,6p$ , тогда

$$K_0 = \frac{Q}{p} = S_{\text{эф}} [0,6 (d_{31} + d_{32}) + d_{33}]. \quad (7)$$

Сравнивая  $K_0$  с  $K$  при соотношениях (5) и  $S_{\text{эф}} = S$ , находим  $K_0 \approx 2,6K$ . Уменьшения верхнего предела измеряемых давлений при этом не происходит, а динамические погрешности снижаются приблизительно в 2,6 раза. При этом возможно измерение давлений в воде до значений, близких к пределу линейной зависимости «заряд-давление».

Практически затруднительно изготовление сферической оболочки с плотным заполнением жестким материалом. Поэтому была испытана конструкция ИП с оболочкой из пьезоэлектрической текстуры [8], нанесенной на стальной шарик. Конструкция текстурного ИП приведена на рис. 1. Центральный электрод 2 представляет собой стальной шарик диаметром 2—6 мм. На центральный электрод тонким слоем (0,5—1 мм) наносится пьезоэлектрическая текстура, которая после отвердевания и поляризации в радиальном направлении образует чувствительный элемент 1 пре-

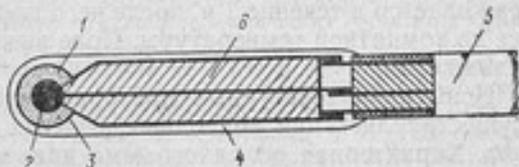


Рис. 1. Конструкция преобразователя из пьезотекстуры

образователя. Пьезотекстура изготавливается из смеси пьезокерамического порошка с эпоксидным компаундом. Весовое соотношение порошка и компаунда выбирается в пределах от 1:1 до 6:1. После отвердевания текстуры наносится внешний электрод 3 путем контактного осаждения серебра или с помощью проводящего клея. Междуэлектродный изолятор 6 выполняется из эпоксидного компаунда. Электроды преобразователя соединяются с электродами коаксиального antivибрационного кабеля 5. Для гидроизоляции и защиты от механических повреждений преобразователь покрывается предохранительным слоем 4.

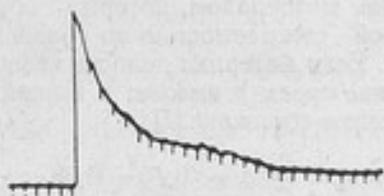


Рис. 2. Типичная оциллограмма давления подводной ударной волны. Между метками 5 мкс

Поляризация текстуры осуществляется постоянным электрическим полем напряженностью 0,5—1 МВ/м. При включенном поле текстура постепенно (в течение 1,5—2 ч) нагревается до 100°С. При этой температуре поляризуемый преобразователь выдерживается в течение 1 ч, после чего производится его охлаждение до комнатной температуры. Поле выключается после полного охлаждения.

Испытания текстурных преобразователей и их градуировка осуществлялись при подводных взрывах сферических зарядов тэна. Характерная оциллограмма давления ударной волны, записанная испытываемым преобразователем, приведена на рис. 2. Она указывает, что динамические погрешности малы. В опытах с плоскими пьезокерамическими пластинами паразитные колебания не позволяли различить форму ударной волны. Разброс значений коэффициента преобразования при градуировке не превышал 6%. Воспроизводимость записи давления удовлетворительна. Измерения показали, что амплитудная характеристика текстурных ИП линейна во всем исследованном интервале (от 10 до 22 МПа).

Коэффициент преобразования текстурных ИП зависит от содержания пьезокерамики в текстуре. В таблице показана эта зависимость для ИП, имеющего диаметр центрального электрода 5,0 мм и толщину чувствительного слоя 0,7—0,8 мм.

Весовое соотношение «пьеэкерамика- композит»	Коэффициент пре- образования, аКд/Па
3:1	5—10
4:1	15—20
5:1	40—50
6:1	95—100

В ходе испытаний преобразователь из текстуры показал себя надежным и механически прочным прибором, позволяющим регистрировать давление в ударных волнах в широких пределах длительностей. Простота технологии изготовления и доступность пьезоматериала позволяют рекомендовать преобразователь из текстуры для массовых измерений давлений ударных волн.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соколик А. И., Ставиловский А. И. Двухканальный пьезоэлектрический измеритель давлений ПИД-9. В сб.: «Передовой научно-технический и производственный опыт», ВИНТИ, М., 1957.
2. Коур Р. Подводные взрывы. ИЛ, 1950. 494 с.
3. Сивани И. Б. Из опыта конструирования пьезоэлектрических приборов для измерения вибраций. Л., «Знание», 1964, 36 с.
4. Зайцев С. Г. Об измерении быстроменяющихся давлений. «ПТЭ», 1958, № 6, с. 97—99.
5. Макушкин В. П., Мишуев А. В. Сферические титанатбариевые приемники давления воздушных ударных волн. «Акустический журнал», том 5, вып. 1, 1959, с. 64—69.
6. Плотников И. В. Особенности применения кристалла сульфата лития моногидрата в пьезоэлектрических измерительных преобразователях. В сб.: «Измерение параметров движения», Труды метрологических институтов СССР, вып. 139(199), Л., «Энергия», 1972, с. 165—171.
7. Берлинкур Д., Керран Д. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях. Физическая акустика, под ред. У. Мезона, том 1, часть А., «Мир», 1966, с. 204—326.
8. Шубников А. В., Желудев И. С., Константинова В. П., Сильвестрова И. М. Исследование пьезоэлектрических текстур. Изд. АН СССР, 1955, 192 с.

Поступила в редакцию  
15/III 1973 г.

И. В. ПЛОТНИКОВ, В. В. МОЧАЛОВ,  
Г. И. СМИРНОВА

ВНИИМ

### КВАЗИСТАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ГРАДУИРОВКИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

Для нахождения зависимости импульсных давлений от времени в газах и жидкостях широко применяют пьезоэлектрические измерительные преобразователи (ИП) давления. Одним из наиболее распространенных и простых методов градуировки таких преобразователей является квазистатический, который заключается в том, что чувствительный элемент ИП помещают в камеру гидравлического пресса и подвергают воздействию скачка давления. Генерируемый преобразователем электрический сигнал измеряют с помощью импульсного вольтметра или электронного осциллографа с электрометрическим усилителем и источником образцовых напряжений, а скачок давления определяют по разности давлений до и после скачка, измеренных с помощью образцового пружинного или поршневого манометра.

На рис. 1 приведена схема установки, работающей по указанному принципу.

В установку входит гидравлический пресс и разработанная В. Н. Павловым электронная регистрирующая аппаратура, состоящая из специального импульсного осциллографа и электрометрического усилителя. Применение осциллографа для измерения электрического сигнала от преобразователя позволяет также вести непрерывный контроль за правильностью временных соотношений при градуировке.

В камеру 7 пресса помещается чувствительный элемент 8 измерительного преобразователя давления, который подключается к входной цепи 9 электрометрического усилителя 10. Для градуировки всего измерительного канала по напряжению служит генератор 12 и измеритель 11 импульсов образцового напряжения прямоугольной формы.

Электрические сигналы от преобразователя и генератора записываются как функции времени с помощью электронной развертки осциллографа 14 и фотоприставки 15. Синхронизацию моментов пуска развертки осциллографа, подачи импульса образцового напряжения и сброса давления в рабочей камере осуществляют с помощью замыкателя 5 и блока синхронизации 13. Конструктивно узлы 9, 10, 12 и 13 выполнены в виде одного блока электрометрического усилителя.

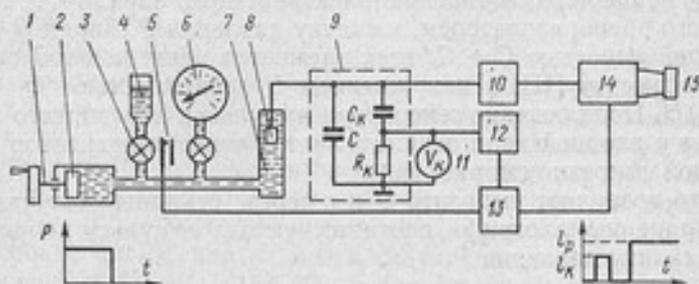


Рис. 1. Блок-схема градуировки:

1 — винтовое устройство; 2 — поршень; 3 — край сброса; 4 — воронка; 5 — синхрoкoнтaкты; 6 — образцовый манометр; 7 — рабочая камера; 8 — чувствительный элемент преобразователя; 9 — элементы входной цепи; 10 — электрометрический усилитель; 11 — измеритель напряжения импульсов; 12 — генератор импульсов; 13 — блок синхронизации; 14 — осциллограф; 15 — фотоприставка.

Технические возможности установки характеризуются следующими данными.

Гидравлический пресс позволяет получать скачки давления от некоторого предварительного установленного и измеренного давления до атмосферного в диапазоне от 0,1 до 60 МПа. Конструкция крана обеспечивает длительность скачка давления около 10 мс. Принцип работы на сброс давления является недостатком конструкции, однако иное решение усложняет конструкцию пресса. Электрометрический усилитель имеет входное сопротивление  $2 \cdot 10^{12}$  Ом, минимальную постоянную времени входной цепи около 100 с. В усилитель встроены переключатель конденсаторов с измеренными значениями емкостей от 60 до 100000 пФ. Время фронта переходной характеристики усилителя не превышает 30 мкс. Генератор импульсов образцового напряжения дает прямоугольные импульсы с регулируемой амплитудой от 0,1 до 1,3 В и длительностью от 10 мс до 2,5 с.

Осциллограф имеет электронную развертку длительностью 0,1—8 с, время фронта переходной характеристики 50 мкс, линейные отклонения лучей на экране  $\pm 55$  мм и коэффициент усиления, обеспечивающий отклонение луча на экране 1 мм при напряжении 4 мВ на входе электрометрического усилителя. После 45-минутного прогрева усилителя с осциллографом дрейф не превышает  $\pm 3$  мВ в час.

С помощью установки может быть произведена градуировка пьезоэлектрических преобразователей давления из кварца, турмалина, сульфата лития или пьезокерамики с размерами чувствительного элемента от 0,5 до 20 мм, имеющих коэффициент преобразования по заряду от  $10^{-18}$  до  $10^{-14}$  Кл/Па.

На рис. 2 приведен пример типичной осциллограммы импульса напряжения и скачка давления при градуировке. Градуировка ИП заключается в определении коэффициента преобразования  $r = Q/P$ , равного отношению электрического заряда  $Q$ , генерируемого преобразователем, к скачку давления  $P$ . Заряд  $Q$  связан с общей емкостью  $C + C_k$  всех элементов цепи, подключенных к пьезоэлементу ИП, и напряжением  $U$  зависимостью  $Q = (C + C_k)U$ . Подключение генератора импульсов образцового напряжения к входной цепи осуществляется через конденсатор  $C_k$  известной емкости (см. рис. 1).

Это позволяет выразить  $U$  и  $r$  через отклонения луча  $l_k$  и  $l_p$  на экране осциллографа, соответствующие импульсу напряжения  $U_k$  и скачку давления  $P$

$$U = U_k \frac{C_k}{C + C_k} \cdot \frac{l_p}{l_k},$$

$$r = \frac{C_k U_k}{P} \cdot \frac{l_p}{l_k}$$

В правой части все величины являются непосредственно измеримыми (см. рис. 1).

Обращает на себя внимание отсутствие в уравнении для  $r$  емкости собственно измерительного преобразователя и дополнительно подключенных к нему конденсаторов, что является следствием принятого способа подключения генератора импульсов при градуировке измерительного канала по напряжению. Это обстоятельство облегчает процесс градуировки преобразователя, так как исключается необходимость измерять емкость ИП, емкость дополнительных конденсаторов и емкость входной цепи электрометрического усилителя.

Укажем на основные источники погрешностей при градуировке.

Поскольку пьезоэлектрические преобразователи имеют определенный диапазон рабочих длительностей для импульсов давления, то длительность скачка давления при градуировке должна лежать в средней части этого диапазона.

Большая часть пьезоэлектрических ИП имеет нижний предел

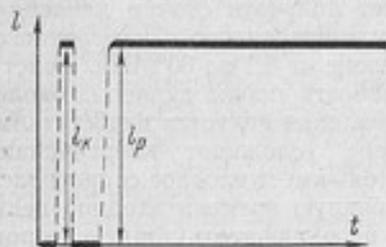


Рис. 2. Типичная осциллограмма импульса напряжения и скачка давления при градуировке

рабочего диапазона длительностей порядка времени распространения волны в рабочей среде вдоль чувствительного элемента, т. е. от 0,3 до 60 мкс в зависимости от размера пьезоэлемента (0,5÷20 мм) и рабочей среды (вода, воздух).

Верхний предел длительностей измеряемых импульсов давления обычно ограничивается постоянной времени цепи, образующей емкостью и сопротивлением изоляции в преобразователе или входным сопротивлением электрометрического усилителя. Практически легко реализуются постоянные времена от единиц до тысяч и более секунд.

Необходимо обратить внимание еще на один источник погрешностей в области больших длительностей. Это пьезоэлектрический эффект в пьезоэлементах, проявляющийся при теплообмене пьезоэлемента с окружающей средой. Как показывают расчеты и эксперименты [1], постоянная времени теплообмена пьезоэлементов (размерами 0,5÷20 мм) с воздухом и жидкостью составляет от 0,5 до 100 с. Для уменьшения указанных погрешностей при градуировке до 1% длительность скачка давления ( $\tau_c$ ) должна быть не более 10 мс. При такой длительности не проявляются также динамические погрешности от переходных процессов в преобразователе и камере давления.

Погрешности, связанные с временными соотношениями, возникают также при неудачном выборе типа конденсатора и значения емкости  $C_k$ .

Так, если постоянная времени  $\tau_k = C_k \cdot R_k$  превышает длительность скачка давления, то возможна погрешность измерения  $\tau$  порядка  $C_k/C$ . На практике несложно добиться  $\tau_k \ll 1$  мкс и полностью исключить эту погрешность.

Кроме того, некоторые типы конденсаторов (например, бумажные) обладают явлением диэлектрической абсорбции, что приводит к установлению поляризации в диэлектрике в течение некоторого времени (единицы и десятки секунд). Указанный эффект может быть описан в виде цепи последовательно соединенных эквивалентной абсорбционной емкости  $C_a$  и некоторого сопротивления  $R_a$ , поддающихся измерению [2]. Возникающая при этом погрешность порядка  $C_a/C_k$  может быть устранена путем выбора конденсатора, имеющего  $C_a \ll C_k$ , и выбором длительности скачка давления  $\tau_c \ll \tau_a = C_a R_a$ .

Другие источники погрешностей при градуировке связаны с величинами правой части уравнения (1). Погрешности измерения  $C_k$ ,  $U_k$  и  $P$  полностью определяются выбранными средствами измерения этих величин.

Выбор приборов класса 0,5 является достаточным для измерения  $C_k$ ,  $U_k$  и  $P$  в связи с большей погрешностью измерения величин  $I_p$  и  $I_k$ .

Погрешность измерения отклонений луча зависит от размера изображения и от толщины луча в электронно-лучевых трубках. Многократные измерения показывают, что абсолютная случайная

погрешность измерения отклонения луча составляет около  $1/4$  от толщины луча на экране или на пленке.

Для описанной установки погрешность градуировки определялась путем многократных (до 50) измерений коэффициентов преобразования нескольких ИП. В качестве средств для измерения  $C_k$ ,  $U_k$  и  $P$  применялись приборы класса 0,5, а в качестве регистратора величин  $I_p$  и  $I_k$  — специальный импульсный осциллограф с фотоприставкой, обеспечивающий толщину луча на экране не более 1 мм при отклонении более 10 мм. Измерения производились при различных значениях  $C_k$ ,  $U_k$  и  $P$ . Средняя квадратическая погрешность отдельного измерения при градуировке получена равной 1,2%.

Неисключенная систематическая погрешность, обусловленная влиянием пирозффекта, токов утечки и абсорбции, составила не более 1%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Плотников И. В. О влиянии пирозффекта на результаты измерений с помощью пьезоэлектрических измерительных преобразователей. В сб.: «Измерение параметров движения», Труды метрологических институтов СССР, вып. 139(199), 1972, с. 153—164.
2. Тарасов Ю. А. Методы измерения параметров диэлектрической абсорбции электрических конденсаторов. «Измерительная техника», 1969, № 11, с. 33—35.

Поступила в редакцию  
15/III 1973 г.

*Н. Г. ТОКАРЬ, Б. А. ВАНДЫШЕВ,  
Ф. С. САВИЦКИЙ, О. В. ИВАНОВСКИЙ*

Свердловский филиал ВНИИМ

## УСТАНОВКА ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ДО 20000 Н·м

На предприятиях страны эксплуатируется много машин для испытания металлических образцов на кручение. Значение крутящего момента, воспроизводимого этими машинами, находится в пределах от 60 до 22000 Н·м.

Проверка испытательных машин на кручение производится с помощью рычага и набора гирь. Несмотря на кажущуюся сравнительно высокую точность такого метода проверки, он имеет ряд весьма существенных недостатков. Так, например, процесс многократного нагружения и разгрузки является весьма трудоемким и занимает много времени. При таком методе проверки трудно поддерживать единство измерения крутящего момента, так как желаемая точность измерения длины рычага не везде может быть достигнута. Кроме того, возникают неопределимые силы, вызывающие трения в подшипниках поверяемой машины и обуславливающие систематическую погрешность, которая может достигать 1%.

Перечисленные недостатки рычажного метода привели к необходимости создания стационарной установки для воспроизведения крутящего момента и проверки переносных образцовых моментометров.

### Устройство и принцип действия

Основными узлами установки являются: станнина, равноплечий рычаг, механизм нагружения, механизм закручивания и пульт управления.

На рис. 1 приведена упрощенная кинематическая схема установки. Равноплечий рычаг 1 изготовлен из сварных балок двутаврового сечения. Рычаг имеет три призмы — центральную опорную 2 и две грузоприемных 4. Опорная призма вмонтирована в оправу, которая устанавливается в отверстие обоймы рычага.

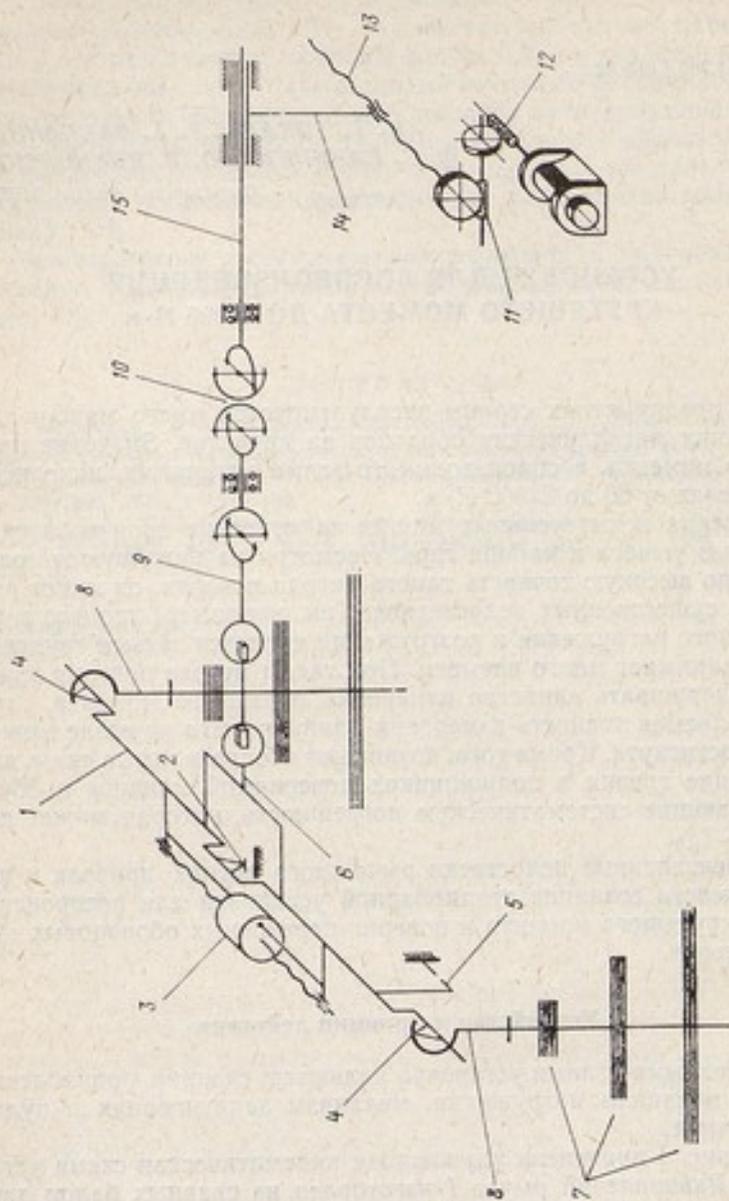


Рис. 1. Упрощенная климатическая схема установки

Грузоприемные призмы вместе с оправами укреплены на опорных рамах, прикрепленных к рычагу. Оправы с призмами могут перемещаться как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях. Острия трех призм расположены в одной плоскости, являющейся нейтральной плоскостью рычага.

Для уравнивания рычаг снабжен тарировочным грузом — рейтером 3; положение равновесия фиксируется указателем 5. В обойме рычага укреплен пассивный захват 6 с цанговым патроном, ось которого совпадает с линией, проходящей через острие опорной призмы.

Механизм нагружения состоит из двух магазинов грузов 7, установленных на штангах 8, подвешиваемых на грузоприемных призмах рычага.

Грузы каждого магазина состоят из трех комплектов: первый комплект из пяти грузов по 196,324 Н каждый, четыре груза по 981,62 Н и три груза по 4908,1 Н. Каждый комплект грузов размещается на траверсах, последние могут перемещаться вверх и вниз от индивидуальных электроприводов. При перемещении траверс грузы могут последовательно навешиваться на шлицы штанг. Таким образом, можно на плече рычага создать нагрузку от 196,324 Н до 19632,4 Н, что соответствует моменту силы при длине рычага в один метр от 196,324 до 19632,4 Нм. Для создания моментов менее 196,324 Нм на штанги навешиваются (вручную) грузы в 49,081 Н.

Механизм закручивания имеет активный захват 9, установленный на подвижной каретке. Каретка перемещается по двум направляющим при помощи механизма перемещения, который имеет два привода, ручной и от электромотора. Электромотор приводит в движение каретку с помощью червячного редуктора и винта с гайкой. Для устранения возможных перекосов поверяемых моментомеров при их установке в захваты, а также из-за неточности изготовления и возможного отклонения оси вала закручивания от оси пассивного захвата, имеется промежуточная муфта карданного типа 10. Деформирование упругого тела поверяемого моментомера, установленного в захватах, осуществляется механическим приводом, размещенным на задней стойке. Механический привод, закручивающий упругое тело моментомера, состоит из редуктора с двумя червячными парами 11 и 12, винта 13 с гайкой, нагрузочного рычага 14 и вала закручивания 15. Закручивание может осуществляться как от электромотора, так и вручную.

Вал закручивания соединен шпонкой с втулкой, которая установлена в двух подшипниках скольжения. На втулку насажен нагрузочный рычаг, который соединяется с фланцем втулки при помощи штыря. Нагрузочный рычаг может поворачиваться на угол в 60°, что соответствует углу закручивания. Для создания больших углов закручивания предусмотрена возможность пере-

хвата рычага при стопорении втулки специальным стопорным штырем.

Электрическое управление размещено в главном и вспомогательном пультах. В состав электросхемы входит девять электродвигателей, из них четыре — типа АОЛ-32-6 мощностью в 1 кВт, а остальные типа АОЛ-31-4 мощностью 0,6 кВт. Электродвигатели типа АОЛ-32-6 приводят в движение механизм закручивания, осуществляют перемещение каретки с активным захватом и опускание или подъем траверс с грузами в 4908,1 Н на левом и правом магазинах грузов.

Электродвигатели типа АОЛ-31-4 предназначены для опускания или подъема траверс с грузами весом в 196,324 Н и в 981,62 Н на левом и правом магазинах грузов и для работы арретира измерительного рычага.

### Определение массы грузов

Для создания правого и левого моментов кручения установка снабжена наборами постоянных грузов, которые скомплектованы в двух магазинах. Каждый магазин грузов состоит из трех комплектов. Первый комплект состоит из пяти грузов весом по 196,32 Н; второй из четырех грузов по 981,62 Н и третий из трех грузов по 4908,1 Н.

Масса грузов первого комплекта определялась на образцовых весах II-го разряда грузоподъемностью 20 кг сравнением с образцовыми гириями II-го разряда.

Масса грузов второго комплекта определялась на измерительном рычаге установки сравнением с массой грузов первого комплекта.

Сравнение производилось на одном плече рычага. Каждый груз из второго комплекта левого магазина сравнивался с массой пяти грузов первого комплекта, размещенных также на левом плече рычага.

Масса каждого груза второго комплекта, размещенного в правом магазине, сравнивалась с массой пяти грузов первого комплекта, размещенных в правом магазине.

Масса грузов третьего комплекта определялась сравнением с массой грузов первого и второго комплектов аналогично определению масс грузов второго комплекта в левом и правом магазинах установки.

Случайная погрешность, возникшая при взвешивании, равна тысячным долям процента и в дальнейшем не учитывается. Систематическая погрешность — отклонения действительного значения веса грузов от их номинального значения — не превышает 0,04 %.

## Измерение длин плеч рычага

Для определения длины левого и правого плеч рычага были произведены измерения расстояния между грузоприемными призмами. Измерение этого расстояния производилось при помощи линейной диаметральной скобы и штангенциркуля с пределами измерения 2000 мм. На кронштейны линейной скобы были установлены специальные наконечники, несущие на торцах пластины из отожженной меди. Скоба устанавливалась медными пластинами на острие грузоприемных призм. При легком одновременном нажатии на кронштейны скобы на пластинах из меди оставались следы в виде тонких рисок от острия призм. Скоба после этого снималась, и при помощи штангенциркуля с разметочными наконечниками измерялось расстояние между рисками. При измерении штангенциркуль поддерживался в точках Эри. Перед измерениями скоба и штангенциркуль выдерживались в помещении, в котором производились измерения в течение 15—18 ч. Температура помещения в течение трех дней была 16—20° С.

Измерение производилось одним наблюдателем при трехкратном отсчете одного снятого размера. Такие измерения произведены при снятии размера как между средними точками грузоприемных призм, так и между крайними точками.

Данные измерения расстояния между грузоприемными призмами показали, что его среднее значение составляет 2000,03 мм, если учесть, что разница в длинах плеч равна 0,15 мм, то длина левого плеча рычага составит 1000,09 мм, а длина правого плеча 999,94 мм. Таким образом, отклонение плеч рычага от их номинальных значений (1 м) составляет 0,009%.

Вследствие непараллельности острия грузоприемных призм, расстояние между их вершинами изменялось на 0,71 мм по длине 50 мм.

Для того чтобы определить, как расположены грузоприемные призмы по отношению к опорной призме, были выполнены следующие опыты. К грузоприемным призмам специальными крючками были подвешены на левое и правое плечи рычага образцовые гири массой 20 кг. Устанавливая крючок в разных точках грузоприемных призм, наблюдали за нарушением равновесия рычага. На правом плече рычага перемещение точки приложения груза по всей длине острия призмы не вызывало нарушения равновесия, а на левом плече перемещение груза по длине призмы 50 мм вызывало нарушение равновесия рычага. В последнем случае для восстановления равновесия рычага необходима разность в массе подвешенного груза 10—15 г.

Этот результат дает основание утверждать, что верхняя линия ребра вершины правой грузоприемной призмы параллельна вершине опорной призмы, а вершина левой грузоприемной призмы является непараллельной. Величину непараллельности не-

трудно определить также из условия равенства моментов веса грузов на левом плече рычага при его равновесии до и после перемещения точки приложения груза по длине призмы, т. е.

$$mgl = (m + \Delta m) g (l - \Delta l),$$

откуда

$$\Delta l = \frac{l}{m} \Delta m.$$

Учитывая, что  $m = 20$  кг,  $l = 1$  м,  $\Delta m = 10 \div 15$  г, получим непараллельность  $\Delta l = (0,5 \div 0,75)$  мм. Найденная весовым способом непараллельность достаточно хорошо согласуется с величиной, полученной линейными измерениями. Непараллельность может привести к непостоянству плеч. Вследствие этого возможная максимальная случайная погрешность составит 0,035%. Погрешность при установлении длин плеч составила 0,05%. Таким образом, общая максимальная случайная погрешность при измерении длин плеч рычага не превысит 0,06%.

### Определение неравноплечности измерительного рычага

Для определения неравноплечности измерительного рычага к уравновешенному (без нагрузки) рычагу на грузоприемные призмы навешивались грузы левого и правого магазина. После навешивания грузов рычаг вновь приводился в состояние равновесия.

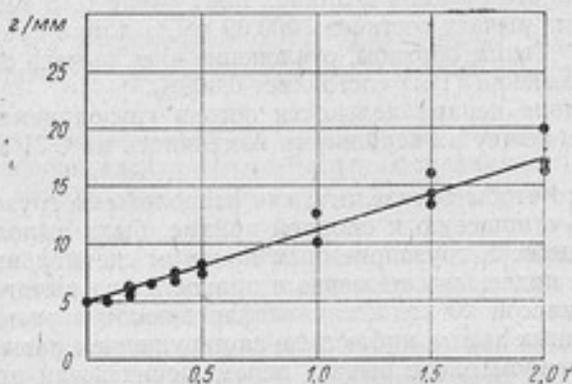


Рис. 2. Зависимость отношения плеч рычага от массы грузов

По данным измерения построен график, изображенный на рис. 2. По наибольшему значению отношения масс грузов на плечах рычага вычислялось отклонение от номинального значения длины плеча 1 м.

Из отношения  $\frac{l+x}{l-x} = 1,00015$  (где  $l$  — расстояние между грузоприемными призмами,  $l-x$  — разница в длинах плеч рычага) получается, что максимальная разница в длинах плеч равна 0,15 мм.

### Оценка чувствительности измерительного рычага

Определение чувствительности измерительного рычага производилось в ненагруженном состоянии и при различных значениях нагрузок. Чувствительность характеризуется отношением смещения «гуськов» указателя равновесия относительно друг друга к массе грузика, вызывающего нарушение равновесия рычага. Результаты, указывающие на изменение обратной чувствительности с изменением нагрузки на измерительном рычаге, даны графически на рис. 3. Как видно, чувствительность установки весьма высокая и ее погрешностью можно пренебречь.

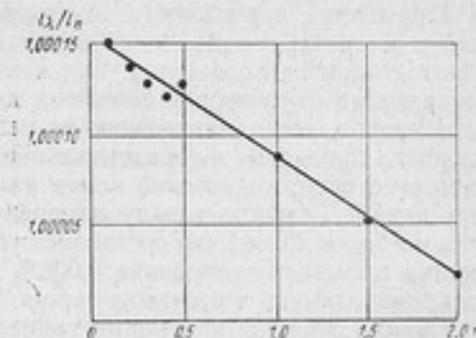


Рис. 3. Зависимость порога чувствительности от массы грузов

### Оценка прочих факторов, влияющих на момент кручения

Момент кручения, воспринимаемый упругим телом, поверяемых моментометров, установленных в захваты стационарного динамометра кручения, может отличаться от задаваемого момента кручения, если имеет место непараллельность оси упругого тела и оси, относительно которой поворачивается измерительный рычаг. Осью вращения измерительного рычага является вершина грузоприемной призмы.

Для оценки погрешности в передаче момента кручения были произведены измерения по определению перекоса указанных выше осей. Для этого был изготовлен специальный валик диаметром 40 мм с установочной риской, расположенной в плоскости, проходящей через ось валика. Положение установочной риски по отношению к оси валика было проконтролировано на универсальном микроскопе. Перекос составил  $3 \cdot 10^{-4}$  рад, что соответствует практически точности измерения.

Далее были произведены измерения по определению перекоса оси упругого тела и оси поворота измерительного рычага. Рычаг устанавливался опорной призмой на валик так, чтобы острие вер-

шины призмы находилось в гнезде риски валика. Расположение валика измерялось относительно отверстия цангового патрона, в котором зажимается хвостик упругого тела моментомеров. Результаты измерения свидетельствуют о том, что ось валика дает перекося по отношению к оси отверстия цангового патрона до 0,3 мм на длине 0,5 м или  $6 \cdot 10^{-4}$  рад. Учитывая точность установления риски по отношению к оси валика, можно говорить, что угол перекося не превышает  $1 \cdot 10^{-3}$  радиана. Этот перекося вызывает ничтожно малое искажение момента кручения, воспринимаемого упругим телом от создаваемого измерительным рычагом момента кручения.

При оценке погрешности, вызванной отклонением на некоторый угол линии, соединяющей вершины грузоприемных призм, от горизонтального положения, над измерительным рычагом была установлена двутавровая балка на двух опорах. Балка с помощью уровня, устанавливаемого на ней посередине между опорами, была приведена в горизонтальное положение. Затем измерялись расстояния от нижней полки балки до вершин грузоприемных призм. Разность между измеренными расстояниями оказалась не более 20 мм, что составляет угол 0,01 рад. Последняя величина вызывает отклонение 0,006% от номинального значения воспроизводимого момента кручения.

Оценим влияние изменения температуры помещения на момент кручения. Полагаем, что при поверке или градуировке переносных моментомеров на стационарной установке кручения нормальной температурой будет  $20^\circ\text{C}$  с допускаемыми отклонениями  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Тогда погрешность от температуры составит  $\pm 0,007\%$ .

Влияние упругой деформации рычага на изменение длины плеча ничтожно мало.

### Анализ погрешностей

Значения случайных погрешностей, возникающих при взвешивании грузов вследствие неравноплечности рычага, чувствительности установки и ряда других причин, на порядок меньше значений основных погрешностей. Поэтому указанные погрешности можно не учитывать.

Случайная погрешность обусловлена непараллельностью призм. Средняя квадратическая погрешность, как указывалось, не превышает 0,035%, т. е. предельная погрешность

$$\Delta = tS = 2,5 \cdot 0,035 \approx 0,9\%.$$

Максимальная систематическая погрешность представится как

$$\delta_0 = |\delta_{01}| + |\delta_{02}| = \pm | + 0,04\% + 0,05\% | = \pm 0,09\%.$$

где  $\delta_{01}$  — систематическая погрешность, возникающая вследствие

отклонения действительного веса грузов от их номинального значения;  $\delta_{\text{сг}}$  — систематическая погрешность, возникающая вследствие отклонения действительного значения длин плеч рычага от их номинального значения.

Систематические погрешности можно устранить путем подгонки массы грузов и длин плеч рычага. Однако для рассматриваемой установки систематическая погрешность почти в два раза меньше допускаемой погрешности для установок 2-го разряда, поэтому дополнительная подгонка не требуется.

Созданная установка для воспроизведения и измерения крутящего момента до 20000 Н·м по своим метрологическим данным удовлетворяет требованиям, предъявляемым к исходной установке для передачи единицы крутящего момента к рабочим машинам.

Установка аттестована и успешно применяется при государственных поверках образцовых переносных моментометров, рабочих торсионных динамометров и динамографов.

Поступила в редакцию  
15/III 1973 г.

Б. А. ВАНДЫШЕВ, В. К. КОЛТАКОВ,  
Ф. С. САВИЦКИЙ, Н. А. ПРОНИН,  
А. С. ШАПИРО, В. Б. БАЛАКШИН

Свердловский филиал ВНИИМ

## МЕТОДИКА АТТЕСТАЦИИ БАЛАНСИРНЫХ МОМЕНТОМЕРОВ

Объектом исследования являлись балансирные моментомеры [1], применяемые для испытания насосов. Схема балансирного моментомера представлена на рисунке. Балансирная рама 2, на которой устанавливается электродвигатель с мультипликатором, подвешивается на четырех упругих подвесках 3 к двум неподвижным стойкам 1. В каждой опорной стойке закреплено по

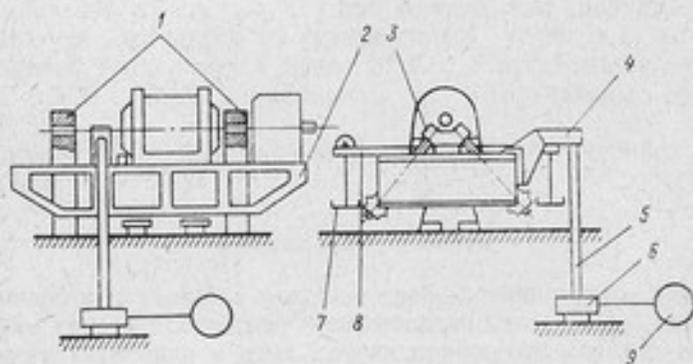


Схема балансирного моментомера

две подвески под углами  $30-45^\circ$  к вертикали. Подвески утоньшаются по концам рабочей части, что обеспечивает ей гибкость в направлении действия вращающего момента. К балансирной раме прикреплен рычаг 4, передающий через тягу 5 усилие силоизмерительному устройству 6 с регистратором 9. В качестве силоизмерительного устройства используется вибрационно-частотный динамометр типа ДВКМ [2] с регистрирующей аппаратурой типа КЛ [3,4] или весовой рейторный элемент типа ВЭ [1,5].

На балансирной раме размещен один или два контрольных рычага 8 с грузодержателями 7. Контрольные рычаги являются неотъемлемой частью моментомера.

#### Методика исследования

В качестве образцовых средств для воспроизведения значений крутящего момента при исследовании балансирного моментомера использовались контрольные рычаги с набором грузов. Значения крутящего момента при его воспроизведении с помощью контрольных рычагов определялись по формуле

$$M = G \cdot l,$$

где  $G = mg_m[H]$  или  $G = \frac{mg_m}{9,80665}$ , кгс;  $m$  — значение массы грузов, кг;  $g_m$  — местное ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $l$  — длина плеча контрольного рычага, м.

В качестве наборов грузов применялись гири общего назначения класса 4 по ГОСТ 7328—65\* и гири образцовые 4-го разряда по ГОСТ 12656—67. Кроме того, использовались специально изготовленные гири круглой или прямоугольной формы, снабженные посадочными конусами и прорезями по радиусу для наложения их стопкой, удовлетворяющие по допускам гилям общего назначения 4-го класса. Перед применением указанные гири проверялись в соответствии с ГОСТ 13703—68.

Значение длин плеч контрольных рычагов определялось по результатам многократного уравнивания рычага с балансирной рамой по нулевому методу. Результаты проведенных опытов позволили вычислить значения длин плеч каждого контрольного рычага путем решения двух уравнений

$$G_1 l_1 + G_2 l_2 = 0,$$

$$l_1 + l_2 = L,$$

где  $G_1$  и  $G_2$  — вес гирь, положенных на гиредержатели контрольного рычага, на соответствующих плечах рычага  $l_1$  и  $l_2$ ;  $L$  — расстояние между грузоприемными призмами контрольного рычага.

Расстояние  $L$  измеряли с помощью штриховых или концевых мер длины. Штриховые меры длины были представлены металлическими измерительными линейками (ГОСТ 427—56). Использовались также измерительные металлические рулетки (ГОСТ 7502—69) с ценой деления 1 мм. Применяемые концевые меры длины относились к 5-му разряду и классу 5 (ГОСТ 9038—59). Концевые меры собирались в блоки, с помощью которых измерялось расстояние между специальными цилиндрами, размещенными на грузоприемных призмах контрольного рычага. Цилиндры изготовили так, чтобы при размещении их на призмах обеспечи-

\* С 01.01 1975 г. взамен ГОСТ 7328—65 вводится в действие ГОСТ 7328—73, взамен ГОСТ 9038—59 вводится в действие ГОСТ 9038—73.

валось совпадение оси цилиндра с острием вершины призмы с отклонением не более 0,15 мм.

Погрешность при воспроизведении значений крутящего момента с помощью контрольных рычагов и гирь определялась как сумма двух частных погрешностей по формуле

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2,$$

где  $\varepsilon_0$  — относительная погрешность воспроизведения значений крутящего момента с помощью контрольных рычагов и набора грузов;  $\varepsilon_1$  — относительная погрешность, обусловленная чувствительностью балансирующего моментомера при определении длин контрольного рычага;  $\varepsilon_2$  — относительная погрешность измерения расстояния между грузоприемными призмами контрольного рычага.

Погрешность  $\varepsilon_1$  определялась по результатам оценки чувствительности балансирующей рамы с силоизмерительным устройством по формуле

$$\varepsilon_1 = \frac{2 \cdot \Delta G}{z_{\Delta} \cdot G} \cdot 100,$$

где  $G$  — вес гирь на одном из плеч контрольного рычага при определении длин плеч;  $\Delta G$  — вес добавочной гири при определении чувствительности;  $z_{\Delta}$  — изменение показаний по шкале регистратора силоизмерительного устройства при наложении добавочной гири весом  $\Delta G$ .

Погрешность  $\varepsilon_2$  принималась равной  $\pm 0,02\%$  при измерении расстояния  $L$  с помощью блоков концевых мер длины [6] и  $\pm 1$  мм — при измерении расстояния посредством штриховых мер длины.

Исследование балансирующих моментомеров заключалось в градуировке шкалы регистратора силоизмерительного устройства путем последовательного нагружения крутящим моментом с помощью образцовых средств — контрольных рычагов и набора грузов, создающих нагрузку, воспринимаемую балансирующим моментомером. Результаты подвергались статистической обработке.

Градуировка балансирующего моментомера производилась при неработающем и при работающем на холостом режиме двигателя с установившимися значениями угловой скорости вращения вала. Принятые значения угловой скорости были соответственно равны  $1/3$ ,  $2/3$  и 1 от максимально создаваемой на моментомере угловой скорости.

Нагружение крутящим моментом проводилось ступенями от нулевой до максимальной нагрузки (прямой ход) с последующим ступенчатым разгрузением от максимальной нагрузки до нуля (обратный ход). Такой цикл ступенчатого нагружения и разгрузения проводился не менее трех раз, причем в каждом цикле было не менее 10 ступеней нагрузок, равномерно распределенных по всему диапазону измеряемых значений крутящего момента.

Отсчеты показаний по шкале регистраторов на каждой ступе-

ни нагрузки производились вначале до включения двигателя, но при работающей системе его охлаждения и смазки, а затем после увеличения и уменьшения заданного установившегося значения угловой скорости вала двигателя. Результаты, полученные при увеличении заданного установившегося режима вращения вала, принимались за показания прямого хода для данной ступени нагружения, а отсчеты, полученные при снижении заданного установившегося режима вращения вала принимались за показания обратного хода на той же ступени нагружения.

За показания по шкале балансирного моментомера с весовым рейтерным элементом ВЭ принималось среднее значение показаний колеблющегося указателя. Для балансирного моментомера с вибрационно-частотным динамометром ДВКМ за показания по шкале регистратора КЛ на линейном режиме его работы принималась частота струны динамометра за время измерения ее в течение 10 с.

Следует отметить, что методика расчета наборного поля блока линеаризации была произведена до начала аттестации в соответствии с указаниями, приведенными в паспорте на регистратор КЛ.

При градуировке балансирного моментомера с вибрационно-частотным динамометром одновременно со снятием отсчетов по шкале регистратора КЛ производилась запись изменения показаний на какой-либо ступени в одном из циклов нагружения на всех установившихся скоростях вращения вала двигателя. Изменение показаний производилось с помощью шлейфового осциллографа, подключаемого параллельно регистратору КЛ к вибрационно-частотному динамометру через регистрирующий прибор КН-2М. Осциллограммы позволяли получить значение частоты струны динамометра в каждые 0,02—0,03 с за время не менее 3 с. На основании обработки осциллограмм устанавливался размах колебаний крутящего момента при аттестации.

Обработка первичных данных, полученных при градуировке, производилась в следующей последовательности.

По показаниям указателя шкалы, соответствующим нулевому значению крутящего момента, вычислялось среднее арифметическое из отсчетов прямого и обратного ходов для каждого цикла нагружения, которое принималось за условный нуль цикла нагружения.

Из показаний шкалы на каждой ступени нагружения как при прямом, так и при обратном ходе вычитались значения показаний шкалы, соответствующие условному нулю.

Полученные значения приращений показаний по шкале для прямого и обратного ходов на каждой ступени нагружения для всех циклов арифметически усреднялись.

Для каждой ступени нагружения рассчитывалось среднее квадратическое отклонение  $\Delta z_{ij}$  от среднего арифметического значения  $\bar{\Delta z}_i$  по формуле

$$\sigma_{\Delta z} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\Delta z_{ij} - \Delta z_i)^2}{m-1}}$$

Опыты показали, что величина  $\sigma_{\Delta z}$  для исследуемых балансируемых моментомеров практически является постоянной, не зависящей от значения крутящего момента. Это позволило считать результаты измерений при градуировке моментомеров равноточными.

Принимая зависимость между  $\Delta z$  и  $M$  в виде уравнения прямой

$$\Delta z = a \cdot M,$$

и используя способ наименьших квадратов [7] по результатам измерений  $\Delta z_i$  и  $M_i$ , получали приближенное значение  $a_0$  величины  $a$  и оценивали погрешности величины  $a$  и функции  $\Delta z$ . Расчетными формулами являлись:

1) при определении значения  $a_0$

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n M_i M_i};$$

2) при оценке относительной погрешности значения  $a_0$

$$\delta(a) = \frac{t_{1-\alpha}}{a_0 \sum_{i=1}^n M_i M_i} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta z_i - a_0 M_i)^2}{n-1}},$$

где  $t_{1-\alpha}$  — коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности  $p = 0,99$  при количестве условных уравнений  $n$ ;

3) при оценке относительной погрешности функции  $\Delta z$

$$\delta(\Delta z) = \sqrt{\delta^2(a_0) + \varepsilon_0^2},$$

где  $\varepsilon_0$  — относительная погрешность образцовых средств при измерении крутящего момента.

Практически на балансируемых моментомерах приходится находить значение  $M$  по измеренному значению  $\Delta z$ , т. е. по формуле

$$M = \frac{1}{a_0} \Delta z = k_0 \cdot \Delta z,$$

поэтому относительная средняя квадратическая погрешность однократного измерения балансируемым моментомером определяется формулой

$$\frac{S_m}{m} = \sqrt{\frac{D(a_0)}{a_0^2} + \frac{D(\Delta z)}{\Delta z^2}}$$

Вследствие отличия условного нуля при градуировке балансирующего моментомера от принимаемого в условиях технологических испытаний изделий, на балансирующем моментомере определялось смещение нуля по формуле

$$\delta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{z}_0 - \bar{z}_\omega)}{n},$$

где  $\bar{z}$  — среднее арифметическое значение показаний по шкале для одной ступени нагружения при неработающем двигателе, т. е. при  $\omega = 0$ ;  $\bar{z}_\omega$  — среднее арифметическое значение показаний по шкале для той же ступени нагружения при работающем двигателе с установившейся скоростью вращения вала  $\omega = \omega_i$  об/мин.

### Результаты исследования

По описанной выше методике были исследованы пять балансирующих моментомеров. Ниже приведены результаты исследования двух из них: № 1 с вибрационно-частотным динамометром ДВКМ и № 2 с весовым рейтерным элементом ВЭ. На балансирующей раме моментомера № 2 были установлены два электродвигателя.

Результаты исследования образцовых средств, с помощью которых проводились исследования балансирующих моментомеров, показали, что их относительная погрешность  $\epsilon_0$  составляет 0,14% и 0,20% для моментомеров № 1 и № 2 соответственно.

Следует отметить, что результаты обработки данных градуировки моментомеров с работающим двигателем имели несколько увеличенные значения составляющих погрешностей. Значительно, в 5—7 раз, увеличилась случайная погрешность у моментомера с вибрационно-частотным динамометром ДВКМ, обусловленная увеличением возмущений, вызывающих колебание балансирующей рамы при работающем двигателе.

При установившихся скоростях вращения вала двигателя, равных  $1/3\omega_{\max}$ ,  $2/3\omega_{\max}$  и  $1\omega_{\max}$ , на отдельных ступенях нагрузок с помощью шлейфового осциллографа были получены данные об изменении нагрузки на динамометр ДВКМ. Значения нагрузки на динамометр получали за каждые 0,025 с в течение времени, за которое производится снятие основного отсчета по шкале регистратора КЛ.

Результаты расшифровки осциллограмм свидетельствовали о том, что нагрузка на динамометре ДВКМ при снятии основного отсчета по шкале регистратора КЛ изменяется. Изменение нагрузки происходило с частотой, соответствующей частоте колебания балансирующей рамы, с наложением высокочастотной составляющей, определяемой угловой скоростью вала двигателя.

Максимальный размах изменения нагрузки на динамометр по величине крутящего момента составлял не более  $50 \div 70$  Н·м при угловых скоростях до  $2/3\omega_{\max}$ .

Этот размах доходил до значений  $110 \div 230$  Н·м при угловой скорости  $\omega = \omega_{\max}$ .

Следует отметить, что у моментомера, имеющего верхний предел измерения крутящего момента 340 Н·м возмущения, вызывающие размах колебаний до 230 Н·м привели к смещению показаний при градуировке моментомера и увеличили случайную погрешность. Совершенно очевидно, что подобные колебания нагрузки недопустимы и их необходимо устранить. В результате были разработаны рекомендации по эксплуатации моментомеров.

Смещение нуля у исследуемых моментомеров практически пропорционально угловой скорости и не зависит от типа исследуемых моментомеров. При угловой скорости  $2/3\omega_{\max}$  оно составило величину, равную  $-0,06$  Н·м и  $+0,06$  Н·м соответственно для левого и правого вращения вала. У моментомера № 2 с электродвигателем, работающим без мультипликатора, смещения нуля не наблюдалось. В связи с последним обстоятельством можно предполагать, что смещение нуля вызывается трением, возникающим в мультипликаторе.

Относительная случайная погрешность однократного измерения балансирными моментомерами изменяется у моментомера № 1 от 6 до 0,63% и от 9 до 0,95% соответственно для левого и правого вращения вала двигателя.

У моментомера № 2 изменение погрешности происходит от 2,5 до 0,33% и от 3,4 до 0,41% также соответственно для левого и правого вращения вала двигателя.

Указанное изменение погрешности дано для диапазона  $0,1 \div 1,0$  от верхнего предела измерения моментомера. Уменьшение погрешности происходит с увеличением значения крутящего момента. Доминирующей составляющей погрешности измерения малых значений крутящего момента является случайная погрешность из-за непостоянства показаний по шкале регистратора силоизмерительного устройства. Непостоянство показаний обусловливается значительным возмущением, вызывающим колебание балансирной рамы при работающем двигателе. Если колебания рамы при технологических испытаниях насосов не будут превышать значений, полученных при аттестации, то погрешность однократного измерения балансирными динамометрами не превысит значений, полученных в работе. С целью уменьшения колебаний балансирной рамы может быть рекомендовано ее демпфирование или демпфирование силоизмерительного устройства.

### Выводы

1. Разработанная методика определения погрешности измерения крутящего момента балансирным моментомером позволяет

достаточно точно оценить степень надежности измеряемой величины и разработать стандарт на поверку балансирных моментометров.

2. Результаты исследования балансирных моментометров свидетельствуют о том, что моментометр с весовым рейтерным элементом ВЭ имеет в два-три раза меньшую погрешность измерения, чем моментометр с вибрационно-частотным динамометром ДВКМ.

3. Погрешность измерения крутящего момента зависит от направления вращения вала двигателя балансирного моментометра.

4. Измерения крутящего момента на исследованных балансирных моментометрах обеспечиваются с погрешностью 0,3—1% от верхнего предела измерения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кац С. М. Балансирные динамометры для измерения вращающего момента. Госэнергоиздат, 1962.
2. Эткин Л. Г. Вибрационные динамометры. «Приборостроение», № 8, 1962.
3. Дортиев Д. Д., Плискин Ю. С., Рамм Д. В., Сучков Ю. С., Хризолизов А. А. Методы линеаризации характеристик вибрационно-частотных датчиков. В сб.: «Регистрирующая аппаратура для вибрационно-частотных датчиков». Ч. 1. Под ред. Ю. С. Плискина, М., ОНТИприбор, 1967.
4. Дементьев А. М., Плискин Ю. С., Ракаев А. П., Сучков Ю. С. Преобразователь КЛ-6 для ввода данных с вибрационно-частотных датчиков в специализированную вычислительную машину. В сб.: «Вибрационно-частотные преобразователи», ч. 2, под ред. Ю. С. Плискина, М., «Энергия», 1970.
5. Горлак С. М., Слезингер И. И. Аэромеханические измерения. Методы и приборы. М., «Наука», 1964.
6. Марков Н. Н., Кайнер Г. Б., Сацердотов П. А. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях. М., «Машиностроение», 1967.
7. Долинский Е. Ф. Обработка результатов измерений по способу наименьших квадратов. М., Изд-во стандартов, 1971.

Поступила в редакцию  
15/VIII 1973 г.

В. К. КОЛТАКОВ, Б. А. ВАНДЫШЕВ,  
Ф. С. САВИЦКИЙ

Свердловский филиал ВНИИМ

## КОМПЛЕКС УСТАНОВОК ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

Основным параметром, характеризующим тензорезистор, является коэффициент тензочувствительности, определяемый по формуле

$$S = \frac{\Delta R}{R_0} \cdot \varepsilon^{-1}, \quad (1)$$

где  $R_0$  — начальное сопротивление прикрепленного тензорезистора;  $\Delta R$  — приращение сопротивления тензорезистора от деформации;  $\varepsilon$  — относительная деформация.

Для определения коэффициента тензочувствительности тензорезистор прикрепляют к упругому элементу, которому задают известную величину деформации. При этом используется зависимость между деформацией и изгибающим моментом, либо между деформацией и прогибом. Эти зависимости для чистого изгиба определяются по формуле

$$\varepsilon = \frac{Mh}{2EJ} = \frac{h}{2\rho} = \frac{4hy}{l^2 + 4y^2}, \quad (2)$$

где  $l$  — расстояние между опорами;  $y$  — величина прогиба балки;  $M$  — изгибающий момент;  $h$  — толщина упругого элемента (балки);  $E$  — модуль упругости;  $J$  — момент инерции;  $\rho$  — радиус кривизны.

При использовании зависимости между деформацией и изгибающим моментом необходимо знать модуль упругости, определение которого вносит дополнительные погрешности в задание величины деформации.

Применяя вторую зависимость, можно значительно увеличить точность задания величины деформации за счет выбора оптимальных размеров балки, а также повышения точности измерения прогиба упругого элемента.

В рассматриваемом комплексе установок для градуировки

тензорезисторов принята зависимость между деформацией и прогибом.

Комплекс состоит из следующих устройств:

- 1) устройства для градуировки тензорезисторов в статическом режиме в интервале температур от 20 до 500°С (УГТВ-1);
- 2) устройства для градуировки тензорезисторов в статическом режиме в интервале температур от 20 до -196°С (УГТН-1);
- 3) устройства для определения усталостных характеристик в нормальных условиях при частотах 15, 25, 35, 50 Гц (УД-1).

Величина задаваемой относительной деформации градуировочной балки из стали 27Х2Н2МВФ при статических режимах в интервале температур от -196 до +500°С, изменяется от  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$ , в динамическом режиме — от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$ .

Погрешность задания величины относительной деформации составляет  $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ .

Для обеспечения указанной погрешности в статических режимах установки снабжены специальным масштабным устройством, позволяющим измерять величину прогиба балки многооборотным индикатором часового типа с ценой деления 0,001 мм, ступенями через 1 мм, без накопления погрешности индикатора.

Для измерения величины прогиба в динамическом режиме установки снабжены специальным прибором, позволяющим измерять амплитуду колебания балки. Погрешность прогиба не превышает погрешности используемого индикатора часового типа.

Выбор оптимальных размеров балки, обеспечивающих необходимую точность при задании величины деформации, производился на основании анализа частных производных уравнения (2) и расчета собственных поперечных колебаний балки.

Расчет частоты собственных поперечных колебаний балки производился по формуле

$$f = \frac{4,3}{\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m_6}} \quad (3)$$

где  $l$  — длина балки между опорами;  $m_6$  — масса балки;  $E$  — модуль упругости;  $J$  — момент инерции.

Установки снабжены балкой равного сопротивления, в конструкции которой учтены результаты анализа погрешностей задания деформации и расчета собственной частоты поперечных колебаний. Балка имеет следующие геометрические размеры: длина балки между опорами 350 мм, толщина балки 10 мм.

Балка крепится на двух призмных опорах, одна из которых подвижная. Система нагружения балки, выполненная по кинематической схеме, обеспечивающей задание как статической, так и динамической деформаций, позволяет провести градуировку наклепанных тензорезисторов в интервале температур от -196 до +500°С путем переноса балки из одной установки в другую, а также снять характеристики ползучести и усталости.

Величина относительной деформации  $\varepsilon$  балки, закрепленной на двух опорах, определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{4h}{l^2 + 4y^2} y. \quad (4)$$

Однако величина деформации, найденная по прогибу, содержит погрешность, вызываемую:

1) смещением нуля при нагрузке градуировочной балки за счет деформации призм и конструкций, а также отклонения призм от вертикальной оси;

2) уменьшением опорной длины балки вследствие ее прогиба;

3) изменением длины балки при низких и высоких температурах.

Для исключения этой систематической погрешности установки снабжены приспособлениями для крепления двух дополнительных индикаторов часового типа. Дополнительные индикаторы устанавливаются на расстоянии 125 мм от центра градуировочной балки.

Установлено, что отсчет по среднему индикатору в пределах погрешностей измерения всегда равен полусумме показаний крайних индикаторов:

$$y_{\text{ср}} = \frac{y_1 + y_2}{2}, \quad (5)$$

где  $y_{\text{ср}}$  — показания среднего индикатора;  $y_1$  и  $y_2$  — показания дополнительных индикаторов.

Это обстоятельство позволило в дальнейшем применять только один средний индикатор.

Соответственно расчет величины относительной деформации производится по формуле

$$\varepsilon = \frac{4h}{l^2 + 4(y_{\text{ср}})^2} y_{\text{ср}}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  — относительная деформация, определенная по трем индикаторам;  $l$  — расстояние между опорными призмами.

Таким образом, основная погрешность установок при задании статической деформации будет состоять из погрешностей измерения прогиба и погрешностей измерения геометрических размеров балки.

Погрешность деформации при определении усталостных характеристик тензорезисторов при частотах 15, 25, 35, 50 Гц складывается из погрешностей самой установки и погрешностей прибора для измерения амплитуды колебаний балки. Систематическая погрешность данной установки аналогична погрешностям установок для задания статической деформации.

Для определения и учета систематической погрешности установка имеет устройство для крепления двух дополнительных приборов для измерения величины амплитуды колебания балки.

Приборы устанавливаются сверху балки, причем один в центре балки, а два на расстоянии 125 мм от центра.

Точно так же, как и в статических условиях, определяется поправочный коэффициент  $R$  и вводится в расчетную формулу (4).

С помощью установки УГТВ-1 можно производить испытания по оценке скорости ползучести приклеенных тензорезисторов. Оценка скорости ползучести производится в следующей последовательности.

Градуировочная балка с подготовленной поверхностью для нанесения подложки устанавливается в УГТВ-1. Балке сообщается необходимая деформация и производится приклейка, а затем термообработка тензорезисторов.

После термообработки тензорезисторов прогиб балки снимается полностью. Изменяя  $\Delta R$  тензорезистора через равные промежутки времени, определяют скорость ползучести. Такой способ оценки скорости ползучести исключает влияние ползучести балки на ползучесть приклеенного тензорезистора.

### Выводы

1. Созданные установки позволяют определить тензочувствительность приклеиваемых тензорезисторов в интервале температур от  $-196$  до  $+500^\circ\text{C}$  в статическом режиме и в динамическом режиме при частотах 15, 25, 35, 50 Гц при нормальной температуре.

2. Особенностью установок является то, что они позволяют учесть систематическую погрешность и тем самым значительно повысить точность оценки коэффициента тензочувствительности.

3. Наличие взаимозаменяемой градуировочной балки позволяет провести испытание наклеенного тензорезистора одновременно на трех установках.

Поступила в редакцию  
15/III 1973 г.

### ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕЙ ТВЕРДОСТИ ОДНОВРЕМЕННО ДВУМЯ НАКОНЕЧНИКАМИ

В лаборатории механических измерений ВНИИМ испытан предложенный Всесоюзным научно-исследовательским институтом электромеханики (ВНИИЭМ) способ измерения твердости посредством одновременного внедрения двух наконечников с противоположных сторон образца, позволяющий сразу получать среднюю величину твердости этих поверхностей. Способ предложен с целью повышения производительности при измерении твердости образцов из мягких неоднородных материалов, в частности для разбраковки по твердости заготовок щеток для электрических машин [1].

Исследования проводились на приборах Роквелла типа ТК-2 и Супер—Роквелла типа ТКС-1 с применением специального приспособления, разработанного ВНИИЭМ [2], которое укреплялось на приборе вместо опорного столика (рис. 1). Основными частями приспособления являются: наконечник 7, укрепленный рабочим концом вверх на основании 8, и подвижный столик 6, подпираемый снизу спиральной

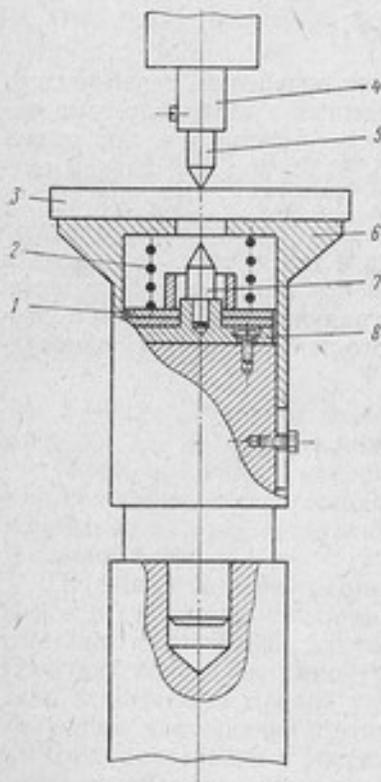


Рис. 1. Схема установки приспособления на приборе твердости

пружиной 2, на которой укладывается испытуемый образец 3.

Во время измерений столик удерживает образец в горизонтальном положении и одновременно может, скользя по направляющей основания, перемещаться вдоль его оси.

При подъеме приспособления поворотом рукоятки подъемного винта испытуемый образец упирается в вершину верхнего наконечника 5, закрепленного в шпинделе 4 прибора твердости, и останавливается, а нижний наконечник продолжает подниматься до соприкосновения с нижней поверхностью образца. Затем оба наконечника одновременно внедряются в образец до тех пор, пока не будет создана предварительная нагрузка. Дальнейший процесс нагружения ведется автоматически обычным способом, причем по индикатору определяется сумма глубин внедрения наконечников.

Для прибора ТКС-1 как с шариковыми, так и с конусными наконечниками, а также для прибора ТК-2 с конусными наконечниками сумма глубин внедрения наконечников равна

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 100 - A,$$

где  $\alpha_1$  — глубина внедрения верхнего наконечника в деления шкалы;  $\alpha_2$  — то же, нижнего наконечника;  $A$  — показания индикатора в делениях шкалы прибора.

Для прибора ТК-2 с шариковыми наконечниками

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 130 - A.$$

Твердость  $H$ , соответствующая полусумме глубин внедрения наконечников  $\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$ , условно названа средней твердостью. При измерении данным способом на приборе ТКС-1 с шариковыми и конусными наконечниками, а также на приборе ТК-2 с конусными наконечниками средняя твердость вычисляется по формуле

$$H = 100 - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2};$$

при измерении на приборе ТК-2 с шариковыми наконечниками

$$H = 130 - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}.$$

Существенное значение при измерении способом двух наконечников имеет усилие пружины, поджимающей столик, и эксцентриситет наконечников. Усилие пружины в приспособлении регулировалось подбором прокладных шайб 1 с таким расчетом, чтобы в момент прикосновения нижнего наконечника нагрузка на образец со стороны столика была численно равна допустимой погрешности предварительных нагрузок (0,075 кгс для прибора ТКС-1 согласно ГОСТ 12165—66 и 0,2 кгс для прибора ТК-2 согласно ГОСТ 13407—67 [3]).

Эксцентриситет устранялся смещением нижнего наконечника в приспособлении.

Программа исследований включала проверку способа измерения средней твердости одновременно двумя наконечниками на образцовых мерах твердости второго разряда, исследование влияния эксцентриситета наконечников на точность показаний прибора и выяснение дополнительных погрешностей, свойственных этому способу измерения.

Исследования были начаты с проверки правильности работы нижнего наконечника в приспособлении, для чего производились измерения твердости образцовых мер отдельно верхним и нижним наконечниками в одинаковых условиях, а именно, при неподвижной опоре. Измерение верхним наконечником производилось обычным способом на опорном столике прибора. Для измерения нижним наконечником верхний наконечник снимался и торцовая поверхность шпинделя прибора служила неподвижной опорой испытуемой меры (рис. 2, а).

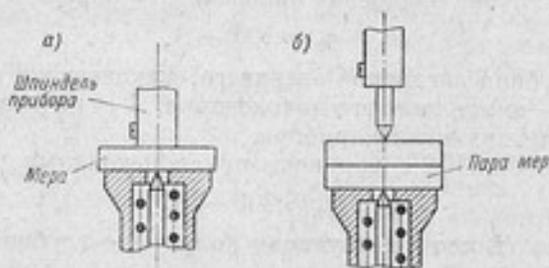


Рис. 2. Схема установки при измерении твердости: нижним наконечником (а); одновременно двумя наконечниками (б)

Такие измерения проводились на обоих приборах при различных нагрузках конусными и шариковыми наконечниками. На приборе ТК-1 испытано 18 образцовых мер твердостью HR 15N ~ 90, HR 30N ~ 80, HR 30N ~ 45, HR 30T ~ 75, на приборе ТК-2 — 20 образцовых мер твердостью HR B ~ 90 и HR A ~ 75.

На каждой мере, как верхним, так и нижним наконечником производилось по 10 измерений, из которых вычислялись средние значения твердости. В табл. 1 приведены максимальные отклонения твердостей, измеренных верхним и нижним наконечниками при неподвижной опоре на приборах ТК-1 и ТК-2.

Как видно, максимальные отклонения не превышали 1 ед. тв. Разброс также во всех случаях не выходил за пределы допуска для мер 2-го разряда по ГОСТ 9031—63 [4]. Таким образом, измерение твердости нижним наконечником дает практически такой же результат, как и верхним.

Таблица 1

Тип прибора	Тип наконечника	Максимальное отклонение, ед. тв.
ТКС-1	Шариковый	От -0,4 до +0,4
	Конусный	От -0,2 до +0,8
ТК-2	Шариковый	От -0,1 до +0,4
	Конусный	От -0,2 до +0,4

### Исследование способа двух наконечников

Для проверки способа измерения средней твердости одновременно двумя наконечниками испытания производились не на отдельных мерах, а на парах мер, т. е. на двух образцовых мерах, соприкасающихся опорными поверхностями (рис. 2, б). Пары мер применялись для того, чтобы иметь возможность раздельно определять твердость верхней и нижней поверхностей.

Работа производилась в следующем порядке. Сначала измерялась твердость верхней меры верхним наконечником на обычном опорном столике, затем — нижней меры нижним наконечником при неподвижной опоре (торец шпинделя) и вычислялось среднее значение твердости. Затем измерялась средняя твердость пары мер одновременно двумя наконечниками и полученные результаты сравнивались. Измерения производились при отсутствии эксцентриситета. Были испытаны 48 пар мер различной твердости при разных нагрузках. Из них на приборе ТКС-1 — 6 пар с шариковыми наконечниками и 17 пар с конусными; на приборе ТК-2 — 15 пар с шариковыми и 10 пар с конусными наконечниками.

Результаты испытаний, часть которых приведена в табл. 2, показали следующее.

При всех измерениях на приборе ТКС-1 как с шариковыми, так и с конусными наконечниками максимальные отклонения средней твердости, измеренной двумя наконечниками одновременно, от средней твердости, вычисленной из обычных измерений, не превышают 1 ед. тв. (в большинстве случаев они составляют 0,2—0,4 ед. тв.), и разброс значений твердости находится в допустимых пределах по ГОСТ 9031—63.

При измерениях на приборе ТК-2 конусными наконечниками максимальные отклонения средней твердости были не более 0,4 ед. тв., но разброс превышал допуск, доходя до 1,7 ед. НРА.

При измерении же на приборе ТК-2 шариковыми наконечниками максимальные отклонения средней твердости доходили до 2,7 ед. НRB, а разброс — до 3,2 ед. НRB.

Таблица 2

№ мер в паре	Шкала твер- дости	На- грузка, кгс	Твердость, измерен- ная обычным спо- собом		Средняя твердость, измерен- ная одно- временно двумя на- конечни- ками	Отклоне- ние между величина- ми граф 5 и 6, ед. тв.	Раз- брос, ед. тв.		
			верхней меры	нижней меры				средняя	
Прибор ТКС-1. Наконечники конусные									
<u>299</u>	HR 30N	30	44,6	46,0	46,6	+0,6	1,0		
<u>229</u>			47,5						
<u>1</u>		30	79,9	80,2	80,4	+0,2	0,8		
<u>36</u>			80,5						
<u>43</u>		15	92,5	91,8	90,8	-1,0	0,4		
<u>96</u>			91,2						
Прибор ТКС-1. Наконечники шариковые									
<u>38</u>	HR 30T	30	67,7	68,4	68,8	+0,4	1,3		
<u>97</u>			69,2						
<u>101</u>		30	72,9	75,5	75,6	+0,1	1,8		
<u>108</u>			78,1						
<u>126</u>		30	40,1	44,5	45,6	+1,0	1,5		
<u>127</u>			48,8						
Прибор ТК-2. Наконечники конусные									
<u>31</u>	HRA	60	72,7	75,4	75,7	+0,3	0,5		
<u>54</u>			78,2						
<u>172</u>			78,8	78,0	78,4	+0,4	1,7		
<u>196</u>			77,1						
Прибор ТК-2. Наконечники шариковые									
<u>89</u>			HRB	100	83,9	86,4	89,1	+2,7	0,5
<u>239</u>	88,9								
<u>268</u>	84,1	89,9			91,9	+2,0	3,2		
<u>207</u>	95,8								

Ухудшение результатов измерений на приборе ТК-2 объясняется приложением значительно больших, чем на приборе ТКС-1, нагрузок (60 и 100 кгс вместо 15 и 30 кгс). При испытаниях на приборе ТК-2, в отличие от ТКС-1, в момент приложения основной нагрузки нередко происходил резкий наклон образцов, сопровождающийся ударом, причем шпindelь прибора с верхним наконечником быстро смещался в сторону в пределах зазора. После снятия основной нагрузки наклоненный образец в большинстве случаев возвращался в горизонтальное положение, причем показания индикатора снова становились правильными.

## Влияние эксцентриситета наконечников друг относительно друга

Влияние эксцентриситета наконечников на точность измерения выяснилось сравнением значений средних твердостей образцов, измеренных при различных значениях эксцентриситета. Требуемый эксцентриситет достигался смещением нижнего наконечника в приспособлении на заданное расстояние. Для оценки фактического эксцентриситета положение вершин наконечников фиксировалось одновременно с обеих сторон на тонкой (толщиной 1 мм) прозрачной пластинке. Расстояние между полученными отпечатками измерялось с помощью микроскопа.

Исследования проводились на 39 парах образцовых мер с установкой различных эксцентриситетов. На приборе ТКС-1 с применением конусных наконечников при нагрузке 30 кгс испытано четыре пары образцов твердостью HRN ~ 45 и две пары твердостью HRN ~ 80; при нагрузке 15 кгс — четыре пары твердостью HRN ~ 90; с применением шариковых наконечников при нагрузке 30 кгс испытано семь пар твердостью HRT ~ 70; на приборе ТК-2 испытано с применением конусных наконечников при нагрузке 60 кгс 10 пар твердостью HRA ~ 75, с применением шариковых наконечников при нагрузке 100 кгс — 12 пар твердостью HRB ~ 90. На каждой паре при различных эксцентриситетах производилось по 10 измерений средней твердости, среднее арифметическое из которых принималось за твердость данной пары. Затем были вычислены величины отклонений средней твердости, измеренной при наличии эксцентриситета, от средней твердости, измеренной при отсутствии эксцентриситета ( $e = 0$ ), и разброс значений твердостей.

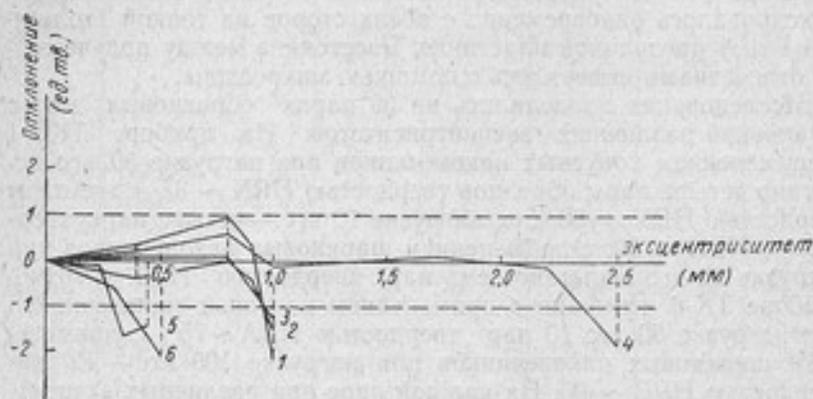
Результаты исследований представлены на рис. 3 в виде графика зависимости отклонений средней твердости от эксцентриситета, для построения которого взяты средние отклонения отдельных групп образцов, имеющих примерно одинаковую твердость, и испытанных при одинаковой нагрузке. На графике можно видеть, что влияние эксцентриситета при измерении на приборах ТКС-1 и ТК-2 сказывалось в различной степени, в зависимости от типа применявшегося наконечника и нагрузки. На приборе ТКС-1 оно начинает существенно сказываться для конусных наконечников только при  $e = 1,0$  мм, а для шариковых даже при  $e = 2,5$  мм.

При таких величинах эксцентриситета значения средних твердостей резко падают, а разброс растет, выходя далеко за пределы допуска по ГОСТ 9031—63, причем, чем меньше твердость мер, тем больше сказывается влияние эксцентриситета как на отклонение твердости, так и на разброс.

Во время испытаний было замечено, что при подходе к критическому значению эксцентриситета происходит наклон образца, причем опускается тот его конец, в который упирается верх-

ний наконечник. Верхний наконечник проходит несколько больший путь, что и влечет за собой изменение результата измерения в сторону уменьшения твердости.

На приборе ТК-2 при измерении как конусными, так и шариковыми наконечниками, влияние эксцентриситета начинает сказываться значительно раньше, уже при  $e = 0,3$  мм. Значения средней твердости также резко падают, а разброс растет, выходя за пределы допуска по ГОСТ 9031—63.



№ кривых	Прибор	Наконечник	Твердость образца	Нагрузка кгс
1	ТКС-1	Конусный	ННН~45	30
2	—	—	ННН~80	30
3	—	—	ННН~90	15
4	—	Шариковый	ННТ~75	30
5	ТК-2	Конусный	ННА~75	60
6	ТК-2	Шариковый	ННВ~90	100

Рис. 3. Влияние эксцентриситета наконечников на точность измерения

На основании проведенных исследований можно считать, что при измерении средней твердости на приборе ТКС-1 (нагрузка 15 и 30 кгс) допустим эксцентриситет конусных наконечников до  $0,5 \div 0,7$  мм и шариковых — до 1 мм. При измерении же на приборе ТК-2 эксцентриситет наконечников вообще не допустим.

#### Погрешности способа двух наконечников

При оценке погрешностей способа двух наконечников были проанализированы все результаты измерения, выполненные этим

способом при отсутствии эксцентриситета наконечников, и произведено сравнение с результатами, полученными при измерении обычным способом и принятые за истинные. Результаты обработки измерений представлены в табл. 3. Предельные погрешности (случайные) результатов измерений способом двух наконечников определялись по формуле

$$\delta = \pm 3\sigma = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum \sigma_i^2}{(n-1)}}$$

Таблица 3

Тип прибора	Средняя твердость образца	Нагрузка, кгс	Предельная погрешность $\delta = 3\sigma$ при измерениях		Максимальные отклонения твердости мер, измеренных методом двух наконечников и обычным способом, ед. тв.	Максимальный разброс, ед. тв.			
			способом двух наконечников	обычным способом					
ТКС-1		Конусные наконечники							
		HRN ~ 45	30	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$			+0,8	1,1
		HRN ~ 60	30	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$			-0,4	1,0
		HRN ~ 80	30	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$			+0,2	0,8
		HRN ~ 90	15	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$			-1,0	1,1
ТКС-2		Шариковые наконечники							
		HRT ~ 45	30	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$			+1,0	1,5
		HRT ~ 75	30	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$			+0,5	1,8
		Конусные наконечники							
		HRA ~ 75	60	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$				
		Шариковые наконечники							
HRB ~ 90	100	$\pm 0,4$	$\pm 0,1$	+2,7	3,2				

а погрешности результатов измерений, выполненных обычным способом, по формуле

$$\delta = \pm 3 \sqrt{\frac{\sigma_n^2 + \sigma_{\text{н}}^2}{2}}$$

где  $\sigma_n$  — средняя квадратическая погрешность измерения твердости верхней меры;  $\sigma_{\text{н}}$  — то же, нижней меры.

Из приведенных данных можно видеть, что при всех измерениях способом двух наконечников предельные (случайные) погрешности были небольшими по величине (не более  $\pm 0,5$  ед. тв.), хотя в большинстве случаев превышали предельные погрешности измерений обычным способом. Систематические же погрешности, оценивавшиеся по отклонению твердости от измеренных

обычным способом величин, как правило, превышали предельные погрешности, но не выходили за пределы 1 ед. тв., за исключением измерений на приборе ТК-2 с шариковыми наконечниками, где они достигали 2,7 ед. тв.

Систематическая погрешность, как видно, является преобладающей составляющей дополнительной погрешности, присущей рассматриваемому способу, поэтому дополнительная погрешность может быть оценена наибольшей систематической погрешностью.

### Заключение

Способ двух наконечников обеспечивает получение средней твердости испытуемого образца с достаточной точностью, если специальное приспособление, на столик которого укладывается образец, исключает возможность его перекоса во время приложения основной нагрузки.

При упомянутом условии измерение средней твердости способом двух наконечников на приборе ТКС-1 при нагрузке до 30 кгс производится с точностью того же порядка как при обычном способе.

Недостатком способа измерений твердости двумя наконечниками является невозможность получения данных о твердости отдельно в каждом месте нанесения отпечатка, поэтому разброс твердости остается неизвестным.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Анкудинов А. Т., Буряков Г. А. Автомат ТРА-1 для разбраковки электродов по твердости. «Электротехническая промышленность». Научно-технический сборник ВНИИЭМ, вып. 295, 1967, с. 15—17.
2. Буряков Г. А., Анкудинов А. Т., Баевский П. Я. Автомат для многопредельной разбраковки по твердости заготовок щеток для электрических машин. Авт. свид. № 181856 «Бюлл. изобр.», 1966, № 10.

Поступила в редакцию  
15/VIII 1973 г.

### ПОВЕРКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТАНДАРТНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ ТИПА НК

В соответствии с требованиями стандарта на алмазные наконечники к приборам твердости рабочая часть наконечников типа НК для измерения твердости по Роквеллу должна выполняться в форме конуса, сопряженного со сферой, являющейся вершиной алмаза. Угол конуса должен быть равным

$$\alpha = 120^\circ \pm 30' \quad (1)$$

Разность углов между образующими конуса, измеренными в двух взаимно перпендикулярных плоскостях осевых сечений, не должна превышать

$$\Delta\alpha \leq 30' \quad (2)$$

Радиус сферы должен быть равным

$$R = 0,200 \pm 0,005 \text{ мм} \quad (3)$$

Разность между радиусами сферы, измеренными в двух взаимно перпендикулярных плоскостях осевых сечений, не должна превышать

$$\Delta R \leq 0,010 \text{ мм}^* \quad (4)$$

Поверхность конуса должна переходить в поверхность сферы плавно по касательной. Класс чистоты рабочей поверхности алмаза должен быть не ниже 13-го.

Методы поверки геометрических параметров наконечников типа НК установлены инструкцией и были освещены в литературе [1]. Рассмотрим некоторые рекомендации по практическому применению этих методов, вытекающие из многолетнего опыта по исследованию и поверке алмазных наконечников.

\* Для наконечников супер-Роквелла должно быть соответственно  $\alpha = 120^\circ \pm 30'$ ,  $\Delta\alpha \leq 30'$ ,  $R = 0,200 \pm 0,002 \text{ мм}$ ,  $\Delta R \leq 0,004 \text{ мм}$ .

## Измерение угла при вершине

Измерение угла при вершине алмазного конуса выполняется с помощью инструментального микроскопа, имеющего окулярную угломерную головку с ценой деления, не превышающей  $1'$ . При измерении угла возможны два источника систематических погрешностей: 1) эксцентриситет штрихов угломерной шкалы, 2) отклонение угла между осью наконечника и оптической осью микроскопа от прямого. В дальнейшем, для краткости будем говорить о погрешности эксцентриситета и погрешности установки НК.

### Погрешность эксцентриситета

Происхождение погрешности эксцентриситета пояснено рис. 1, на котором центр вращения диска  $O$  не совпадает с  $O'$  — точкой пересечения визирных линий  $AB$  и  $B\Gamma$ . Обозначим через  $\alpha_1$  искомым угол контура наконечника  $A_{\text{л}}DEA_{\text{н}}$ . Он может быть найден как разность отсчетов, соответствующих образующим контура  $A_{\text{л}}D$  и  $EA_{\text{н}}$ . Пусть неподвижной точке отсчета  $M$  соответствует угол  $\varphi$  (нарастание углов идет по часовой стрелке), дуге  $MA_{\text{н}}$  соответствует угол  $\delta$ . В этом положении точке  $A_{\text{н}}$  при касании визира  $AB$  образующей  $EA_{\text{н}}$  концом  $A$ , соответствует угол  $\varphi + \delta$ . Вращением отсчетного диска вокруг точки  $O$  и параллельным перемещением объекта (наконечника) концом  $A$ , совмещаем визир  $AB$  с образующей  $A_{\text{л}}D$ , отсчет в точке  $A_{\text{л}}$  соответствует углу  $\varphi_1 + \delta_1$ . Таким образом, измеряемый угол

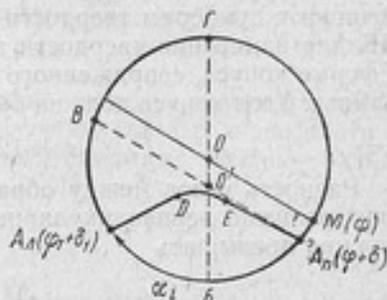


Рис. 1. Эксцентриситет штрихов угломерной шкалы

$$\alpha_1 = A_{\text{н}} - A_{\text{л}} = (\varphi_1 + \delta_1) - (\varphi + \delta) = \varphi_1 - \varphi + (\delta_1 - \delta).$$

Очевидно, что при измерении этого же угла другим концом визира  $AB$  погрешности вследствие эксцентриситета будут отличаться только по знаку, следовательно

$$\alpha_2 = B_{\text{н}} - B_{\text{л}} = (\varphi_1 - \delta_1) - (\varphi - \delta) = \varphi_1 - \varphi - (\delta_1 - \delta).$$

Среднее арифметическое этих измерений  $\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \varphi_1 - \varphi$  свободно от погрешности эксцентриситета. Следовательно, для исключения погрешности эксцентриситета при измерении углов необходимо пользоваться концами одной и той же визирной линии. При одинаковом числе отсчетов, выполненных с помощью

каждого из концов, среднее арифметическое отсчетов будет свободно от погрешности эксцентриситета.

В опыте автора средняя квадратическая погрешность (из 10 отсчетов) наведения визирной линии на сторону контура наконечника составляла  $s_{\text{н}} = 1,0'$ . Средняя квадратическая погрешность результата измерений угла, как полусуммы разностей двух отсчетов, при 10 измерениях составляла  $s_{\gamma} = 1,6'$ .

### Погрешность установки

Возможность появления погрешности установки наконечника пояснено рис. 2, изображающим две проекции наконечника: проекцию, проходящую через его ось  $OC$  и оптическую ось микроскопа  $NN'$  (рис. 2, а), и проекцию на плоскость, перпендикулярную оптической оси микроскопа (рис. 2, б). Для наглядности, поскольку речь идет об измерении угла, контур наконечника изображен без сферического закругления. Ось наконечника составляет угол  $\beta$  с плоскостью, перпендикулярной оптической оси микроскопа; он характеризует отклонение оси наконечника от правильной установки. В случае  $\beta = 0$ ,  $\gamma = \alpha$ . Угол  $FDE = \gamma$  является измеряемым. Для вычисления погрешности установки наконечника

$$\Delta\alpha = \gamma - \alpha \quad (5)$$

выберем в качестве основных размеров высоту конуса  $H = OC$ , угол при вершине  $\alpha = \angle BCA$ . Радиус основания конуса, как это следует из рассмотрения прямоугольного треугольника  $BOC$ , равен  $a = OB$

$$a = H \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (6)$$

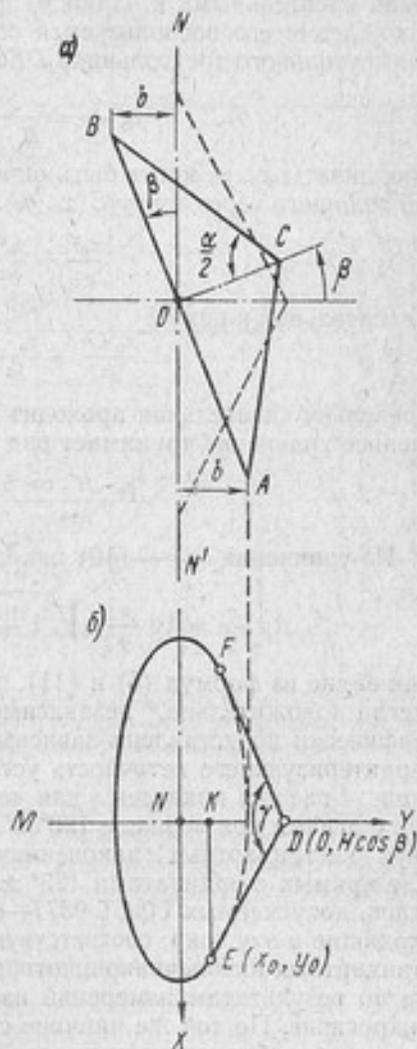


Рис. 2. Действительный (а) и измеряемый (б) контуры углов при вершине конуса

Проекция основания конуса на плоскость, перпендикулярную оптической оси, есть эллипс, большая ось которого равна  $a$ , малая ось равна  $b$

$$b = a \cdot \sin \beta. \quad (7)$$

Главные оси эллипса выберем за оси координат (рис. 2, б). Вершина конуса проектируется в точку  $D(O, H \cdot \cos \beta)$ . Измеряемый угол  $\gamma$  является проекцией конуса на плоскость  $XNY$ . Он образован касательными к эллипсу, проведенными из точки  $D$ . Для нахождения его воспользуемся соотношениями сторон и углов прямоугольного треугольника  $DKE$

$$\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = \frac{x}{H \cdot \cos \beta - y_0}. \quad (8)$$

Координаты  $x_0, y_0$  могут быть определены из уравнений эллипса, проходящего через точку  $E(x_0, y_0)$ :

$$\frac{x_0^2}{a^2} + \frac{y_0^2}{b^2} = 1 \quad (9)$$

и касательной к нему

$$\frac{x_0 \cdot x}{a^2} + \frac{y_0 \cdot y}{b^2} = 1.$$

Поскольку касательная проходит через точку  $D(O, H \cdot \cos \beta)$ , последнее уравнение принимает вид

$$\frac{y_0 \cdot H \cdot \cos \beta}{b^2} = 1. \quad (10)$$

Из уравнений (8) — (10) находим

$$\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} : \sqrt{1 - \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \sin^2 \beta}. \quad (11)$$

Как видно из формул (5) и (11), погрешность измерения угла  $\Delta\alpha$  всегда положительна, независимо от знака угла  $\beta$ . На рис. 3 графически представлена зависимость измеряемого угла  $\gamma$  от  $\beta$ , характеризующего неточность установки наконечника на микроскопе. Графики приведены для четырех стандартных наконечников с углами при вершине  $120^\circ 30'$ ,  $120^\circ 20'$ ,  $120^\circ 00'$  и  $119^\circ 30'$  и для двух нестандартных наконечников с углами  $119^\circ 25'$  и  $119^\circ 20'$ . Две прямых с ординатами  $120^\circ \pm 30'$  выделяют зону значений углов, допускаемых ГОСТ 9377—63\*. Штрихпунктирные линии, входящие в эту зону, соответствуют результатам измерений нестандартных наконечников, которые могут быть признаны годными по результатам измерений из-за неточной установки их на микроскопе. По той же причине стандартные наконечники могут оказаться забракованными, эти случаи на графике выделены пунктирными линиями. Как видно из рисунка, в наиболее неблагоприятных случаях погрешность измерения угла  $\Delta\alpha$  может достигать 10%.

\* С 01.01 1975 г. взамен ГОСТ 9377—63 вводится в действие ГОСТ 9377—74.

гоприятном положении находится наконечник с углом при вершине  $120^{\circ}30'$ , он может оказаться забракованным при малейшем отклонении  $\beta$  от нуля. Вот почему при измерении углов не рекомендуется устанавливать наконечники в поворотных подставках.

Погрешность установки может быть практически исключена, если пользоваться специальными установочными приспособлениями, выполненными в форме прямой призмы квадратного сечения с цилиндрическим отверстием по оси симметрии, предназначенным для крепления хвостовика наконечника. Такая призма поворотом на  $90^{\circ}$  обеспечивает измерение угла наконечника в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, без дополнительной фокусировки микроскопа. Непараллельность оси цилиндрического отверстия по отношению к опорным поверхностям допускается не более  $0,05$  мм при высоте призмы  $30$  мм.

При массовых поверках, когда достаточно констатировать, что наконечник удовлетворяет требованиям стандарта, целесообразно пользоваться шаблонами предельно допустимых контуров, приспособленных к конкретному микроскопу или микропроектору.

#### Измерение радиуса при вершине

Измерение радиусов закруглений можно выполнить с помощью микропроектора с  $300\times$  увеличением. Более надежные результаты могут быть получены при работе на микропроекторе с  $500\times$  увеличением, выпускаемом фирмой «Rodestock».

При измерениях наконечник устанавливают на столик про-

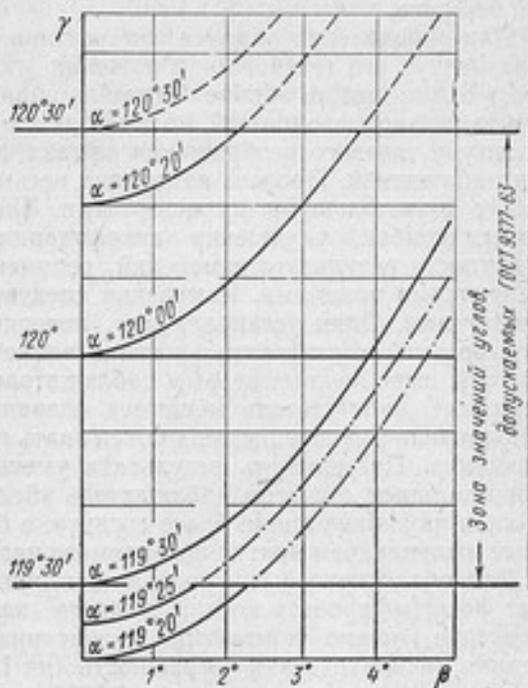


Рис. 3. Графики изменений величины измеряемых углов  $\gamma$  в зависимости от величины угла  $\beta$  между осями микроскопа и наконечника

ектора так, чтобы его ось была перпендикулярна оптической оси света. Теневое изображение конуса проектируется на подвижный экран, где в соответствующем масштабе вычерчены профили закруглений с радиусами в пределах 0,150—0,250 мм через каждые 0,005 мм. По теневому изображению контура алмаза проверяются плавность сопряжения сферы с конусом и измеряются радиусы закругления в плоскостях, в которых были измерены углы при вершине.

Для определения радиуса закругления поверяемого наконечника контур его теневого изображения последовательно совмещают с линиями на экране. Значение радиуса закругления, указанное на экране с линией, которая лучше остальных прилегает к контуру теневого изображения алмаза, записывается в протокол наблюдений. Процесс измерения весьма затруднен и сопряжен со значительными погрешностями. Для уменьшения субъективных ошибок, улучшения аккомодации глаза и повышения надежности результата измерений рекомендуется пользоваться следующими приемами. Измерения следует выполнять двум наблюдателям. Один устанавливает поверяемые наконечники в произвольной последовательности и записывает результаты измерений, выполненные вторым наблюдателем. Затем, закончив измерение, наблюдатели меняются операциями. Наблюдатель, выполняющий измерение, не должен знать номер поверяемого наконечника. Погрешность результата уменьшится, если перед окончательным отсчетом наблюдатель убедится, что ближайшая верхняя на экране линия более вогнута, а ближайшая нижняя — более выпукла, чем контур поверяемого наконечника.

Для объективного контроля за состоянием наконечника следует фотографировать контур теневого изображения на микропроекторе (можно контактным печатанием). По опыту автора, средняя квадратическая погрешность (из 10 измерений) при измерении радиусов не превышает 0,0025 мм в случае правильной сферической вершины алмаза. К наконечникам, предназначенным для измерения твердости свыше 86 ед. НРС и по супер-Роквеллу, требования к форме вершины алмаза повышаются в связи с тем, что при этих твердостях конус соприкасается с испытуемым материалом только своей сферической частью. Шаг радиусов закруглений на экране должен быть не более 0,002 мм.

На заводе-изготовителе при массовом контроле продукции целесообразно пользоваться шаблонами предельно допустимых контуров закругления.

### Применение единого шаблона допусков

Часто предлагают пользоваться шаблоном, одновременно включающим допуски и на угол, и на радиус закругления стандартного наконечника. Правая половина такого шаблона изображена на рис. 4. Верхняя линия  $D_{1e1}G_1$  соответствует максимально

допустимым размерам:  $\alpha_1 = 120^\circ 30'$ ,  $R_1 = 0,205$  мм, нижняя линия  $D_2e_2G_2$  соответствует минимально допустимым размерам:  $\alpha_2 = 119^\circ 30'$ ,  $R_2 = 0,195$  мм. Дуги закруглений обеих линий имеют общий центр  $O$  и расстояния  $D_1D_2$  и  $F_1F_2$  между контурами шаблона по вертикали соответствуют наибольшему допуску на расхождение между результатами измерения радиусов закруглений в двух взаимно перпендикулярных положениях;  $R_1 - R_2 = 0,010$  мм. Точки  $F_1$  и  $F_2$  лежат на середине основания конуса, удовлетворяя требованию, что высота рабочей части алмаза  $D_1F_1 = D_2F_2 = 0,300$  мм. Полагают, что наконечник, теневой контур которого вписывается между линиями  $D_1e_1G_1$  и  $D_2e_2G_2$ , должен удовлетворять требованиям стандарта.

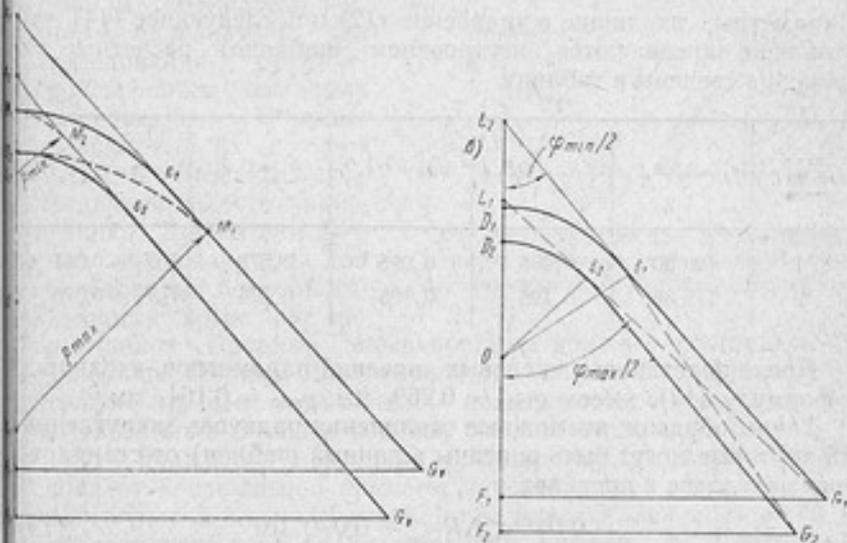


Рис. 4. Шаблон (правая половина) одновременно включающий допуски на радиус закругления (а) и угол при вершине (б) для наконечников НК

Покажем необоснованность такого допущения; с этой целью найдем экстремальные значения радиусов закруглений и углов при вершине, которые могут быть вписаны в этот шаблон. Очевидно, максимальный  $q_{\max} = L_1M_1 = L_1D_2$  (соответственно минимальный  $q_{\min} = L_2M_2 = L_2D_1$ ) радиус закругления сферической поверхности конуса, контур которой может быть вписан в изображенный шаблон, отвечает радиусу окружности с центром на прямой  $F_2A_1$ , проходящей через точку  $L_1$  (соответственно,  $L_2$ ) и касательной к прямой  $A_1G_1$  (соответственно  $A_2G_2$ ) (рис. 4, а). Максимальный угол при вершине (рис. 4, б) соответствует удвоенному значению угла  $\frac{\varphi_{\max}}{2} = \angle F_1L_1G_1$ , образованного прямой  $F_1L_1$  и касательной к окружности с радиусом  $R_2 = 0,195$  мм, про-

ходящей через точку  $G_1$ . Аналогично минимальный угол, который может быть вписан в шаблон, соответствует удвоенному значению угла  $\frac{\varphi_{\min}}{2} = \angle F_2 L_2 G_2$ .

Для нахождения экстремальных значений радиусов  $\rho_i$  (рис. 4, а) напишем следующее соотношение между сторонами и углом при вершине треугольника  $L_i M_i A_i$  ( $i = 1, 2$ )

$$\sin \alpha_i = \frac{\rho_i}{\rho_i + c_i} \quad (i = 1, 2),$$

откуда

$$\rho_i = \frac{c_i \cdot \sin \alpha_i}{1 - \sin \alpha_i} \quad (i = 1, 2). \quad (12)$$

Параметры, входящие в уравнение (12) и последующее (14) однозначно определяются построением шаблона; расчетные их значения сведены в таблицу.

Значение индекса	$a_i - L F_i A_i C_i$	$R_i - O E_i$	$a_i - O F_i$	$b_i - F_i G_i$	$c_i$
1	120°30'	0,205	0,095	0,579	$A_1 D_2 = 0,041$
2	119°30'	0,195	0,105	0,576	$A_2 D_1 = 0,026$

После подстановки числовых значений параметров, входящих в формулу (12), имеем  $\rho_{\max} = 0,269_8$  мм,  $\rho_{\min} = 0,164_4$  мм.

Таким образом, возможные отклонения радиусов закруглений  $\Delta R$  (которые могут быть вписаны в данный шаблон) от стандартного находятся в пределах

$$-0,036 \leq \Delta R \leq +0,070 \text{ мм} \quad (13)$$

и в семь раз превышают допустимые отклонения [см. формулы (3) и (4)].

Для нахождения экстремальных значений углов, которые могут быть вписаны в шаблон, (рис. 4 б), воспользуемся подобием треугольников  $O_{z_2} L_1 \sim L_1 F_1 G_1$  и  $O_{z_1} L_2 \sim L_2 F_2 G_2$  и напишем

$$\sin \frac{\varphi_i}{2} = \frac{R_i}{O L_i}; \quad \operatorname{tg} \frac{\varphi_i}{2} = \frac{b_i}{a_i + O L_i} \quad (i = 1, 2).$$

Совместное решение этих уравнений относительно  $\varphi$  дает

$$\sin \frac{\varphi_i}{2} = \frac{-a_i R_i \pm \sqrt{a_i^2 R_i^2 - (a_i^2 + b_i^2) \cdot (R_i^2 - b_i^2)}}{a_i^2 + b_i^2}. \quad (14)$$

После подстановки из таблицы входящих в него параметров получаем

$$\varphi_{\max} = 122^\circ 40', \quad \varphi_{\min} = 118^\circ 20'.$$

Итак, возможные отклонения углов (которые могут быть вписаны в этот шаблон) от стандартного находятся в пределах:  $-1^{\circ}40' \leq \Delta\alpha \leq 2^{\circ}40'$  и более чем в пять раз превышают допустимые отклонения [см. формулы (1) и (2)].

### Исследование качества поверхности

Качество рабочей поверхности алмазных наконечников проверяют, как известно, на интерференционном микроскопе. Большое увеличение, малое фокусное расстояние и криволинейность поверхности (шар,  $R = 0,200$  мм) алмаза, делают объект трудно фокусируемым. Для облегчения измерений были разработаны и изготовлены держатели

(рис. 5). Держатели 1-го типа предназначены для исследования сферической вершины алмазных наконечников. Опорные поверхности их должны быть отшлифованы и перпендикулярны оси наконечника. Держатели 2-го типа предназначены для исследования боковой поверхности алмазных наконечников. Опорные поверхности их должны составлять  $30^{\circ}$  с осью наконечника. Держатели этого типа снабжены поворотной втулкой, что дает возможность посредством ее вращения осуществить полный обзор боковой поверхности алмаза.

Эти держатели позволяют предохранить объектив микроскопа от повреждения алмазом наконечника, а главное, благодаря большой площади опорной поверхности, лежащей в той же плоскости, что и рабочая поверхность алмаза, существенно облегчить фокусировку микроскопа.

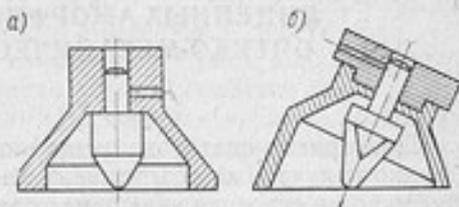


Рис. 5. Держатели для исследования качества поверхности наконечников: а) сферической, б) боковой поверхности

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пиливчук Б. И., Степанов С. С. Методы исследования алмазных наконечников к приборам твердости. В сб.: «Исследования в области механических измерений», Труды метрологических институтов СССР, вып. 50(110), М. — Л., Стандартгиз, 1961, с. 22—28.

Поступила в редакцию  
15/III 1973 г.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЛИНЕЙНЫХ АМОРФНЫХ ПОЛИМЕРОВ  
ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

При приемо-сдаточных испытаниях полимерных материалов трудно получить их объективные характеристики вследствие специфичности строения указанных материалов. Основным отличием полимерных материалов от традиционных монокристаллических является то, что на деформацию полимеров существенно влияет время воздействия внешнего силового поля. В настоящее время скорости нагружения образцов выбирают из соображений целесообразности продолжительности испытаний и принадлежности к определенному классу полимеров. Получаемые характеристики, служащие для сравнительной оценки свойств материалов, не являются объективными характеристиками, описывающими механические свойства, и не могут служить основанием для проектирования. Чтобы получить объективные характеристики, необходимо обосновать их с точки зрения молекулярной кинетики деформирования [1]. Таким образом, для разработки методики получения объективных механических характеристик необходимы параллельные исследования деформируемости материалов под нагрузкой и происходящих при этом структурных изменений.

Следует отметить, что разработка методов получения объективных характеристик материалов позволит, с одной стороны, обеспечить единство получаемых механических характеристик, с другой — контролировать качество и стабильность выпускаемых полимеров. Эти методы должны быть распространены не только на уже существующие полимеры, но и на вновь синтезируемые. В этом смысле метод предопределяет разделение любых материалов по признакам сплошности (у пористых материалов иные критерии прочности) и гомогенности.

Деформационные особенности полимера тесно связаны с конформационными изменениями, ведущими к ориентированию структуры полимера в направлении действия прилагаемого уси-

лия. Параллельное измерение ориентирования структуры и деформационных изменений дает возможность получить характеристики, описывающие одновременно механические свойства и изменения структуры, происходящие в деформируемом материале. Большинство структурно-чувствительных методов отличается сложностью получения и расшифровки результатов и, что самое главное, не позволяют исследовать структуру в процессе деформирования. Выгодно отличается в этом смысле метод двойного лучепреломления.

Своеобразное поведение полимера при механическом воздействии функционально связано с изменением двойного лучепреломления. При приложении внешней нагрузки к образцу линейного аморфного полимера первым эффектом действующего напряжения является мгновенное изменение разности хода.

При этом не происходит изменения в общем характере «упаковки»: несколько увеличивается или уменьшается лишь расстояние между соседними атомами. С течением времени вследствие вынужденных сегментальных перемещений происходит распутывание полимерных макромолекул, что вызывает рост анизотропии, а следовательно, изменение двойного лучепреломления. Интенсивность изменения разности хода обуславливается спектром времени запаздывания для данного материала.

Таким образом, полное двойное лучепреломление, возникающее в деформируемом материале под действием постоянной нагрузки, можно разделить на две части: мгновенную разность хода, и часть, связанную с вязкоупругой конформационной деформацией. При этом в полной разности хода доля, связанная с вязкоупругой деформацией (конформационный процесс), значительно больше начальной мгновенной разности хода. Сравнительно малая начальная разность хода позволяет считать, что двойное лучепреломление в среднем определяется ориентацией макроцепей полимера.

Для количественной оценки двойного лучепреломления определяют разность хода оптических фаз, выходящих из двулучепреломляемой среды.

$$\Delta = (n_1 - n_2) \frac{d}{\lambda_0}, \quad (1)$$

где  $n_1, n_2$  — показатели преломления оптически-анизотропной среды;  $d$  — толщина образца;  $\lambda_0$  — длина волны в вакууме монохроматического источника света.

Явление поляризации, сопровождающее деформационный процесс полимера, подразумевает разделение положительных и отрицательных зарядов, которое приводит к возникновению диполей и измеряется электрическим моментом, отнесенным к единице объема. Поляризация единичного объема, вызванная единичным полем, называется удельной поляризуемостью. Показатель пре-

ломления ( $n$ ) связан с удельной поляризуемостью ( $P$ ) зависимостью Лоренц-Лорентца

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4}{3} \pi P. \quad (2)$$

После дифференцирования

$$\frac{6n}{(n^2 + 2)^2} dn = \frac{4}{3} \pi dP.$$

Если главные показатели преломления мало отличаются друг от друга, дифференциалы можно заменить конечными разностями

$$n_1 - n_2 = \frac{2}{9} \pi \frac{(n^2 + 2)^2}{n} (P_1 - P_2), \quad (3)$$

где  $n$  характеризует среднее значение показателя преломления исследуемого полимера.

С другой стороны, разность хода оптических фаз характеризуется разностью коэффициентов преломления (1). Таким образом, оказывается возможным при помощи поляризационно-оптического метода определить изменение поляризуемости в направлении плоскостей преломления.

Если предположить, что поле структурного элемента является средним внутренним полем, описываемым (3), то разность удельных поляризуемостей ( $P_1 - P_2$ ) будет связана с анизотропией молекулы вдоль оси молекулы ( $b_1$ ) и перпендикулярно к ней ( $b_2$ ) зависимостью

$$P_1 - P_2 = N(b_1 - b_2) f, \quad (4)$$

где  $N$  — число молекул в объеме;  $f$  — функция ориентации оси молекулы.

Для сетчатых полимеров типа каучуков разработана теория двойного лучепреломления [3], основанная на статистической теории. Для изолированной длинноцепочной молекулы получено выражение для разности поляризуемостей в направлении векторного расстояния ( $r$ ) и в перпендикулярном к нему направлении

$$P_1 - P_2 = n(\alpha_1 - \alpha_2) \left[ \frac{3}{5} \left( \frac{r}{nl} \right)^2 + \frac{36}{175} \left( \frac{r}{nl} \right)^4 + \frac{108}{875} \left( \frac{r}{nl} \right)^6 + \dots \right], \quad (5)$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  — поляризуемости звеньев цепи соответственно параллельно и перпендикулярно направлению относительно звена;  $n$  — общее число звеньев;  $l$  — длина звена.

Зависимость (5) показывает, что при малых деформациях разность поляризуемостей пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между концами цепи. Для недеформированной цепи анизотропия характеризуется

$$P_1 - P_2 = \frac{3}{5} (\alpha_1 - \alpha_2), \quad (6)$$

т. е. средняя оптическая анизотропия беспорядочно запутанной цепи в отсутствие внешних влияний составляет 0,6 величины анизотропии отдельного звена цепи.

Для случая сетчатой структуры компоненты поляризуемостей ориентируются вдоль направления, параллельного ( $P_{\parallel}$ ) и перпендикулярного ( $P_{\perp}$ ) ориентированию, и определяются

$$P_{\parallel} = N \left[ \frac{n}{3} (x_1 + 2x_2) + \frac{2}{15} (x_1 - x_2) \frac{\bar{r}^2}{n^2} \left( L^2 - \frac{1}{L} \right) \right], \quad (7)$$

$$P_{\perp} = N \left[ \frac{n}{3} (x_1 + 2x_2) - \frac{1}{15} (x_1 - x_2) \frac{\bar{r}^2}{n^2} \left( L^2 - \frac{1}{L} \right) \right]$$

где  $N$  — число цепей в единице объема;  $L$  — относительное растяжение.

Используя зависимость (2), можно от зависимости (7) перейти к двойному лучепреломлению или разности главных показателей преломления ( $n_1 - n_2$ ). Если она мала, то удобно представить ее в виде

$$\frac{n_1^2 + 1}{n_1^2 + 2} - \frac{n_2^2 + 1}{n_2^2 + 2} = \frac{6\bar{n}}{(n^2 + 2)^2} (n_1 - n_2), \quad (8)$$

где  $\bar{n}$  — средний показатель преломления.

Если принять  $r^2 = n^2$ ,

$$n_1 - n_2 = \frac{2\pi}{45} \frac{(n^2 + 2)^2}{\bar{n}} N (x_1 - x_2) \left( L^2 - \frac{1}{L} \right). \quad (9)$$

Таким образом, двойное лучепреломление не зависит линейно от степени растяжения (за исключением малых деформаций), но пропорционально сумме анизотропий отдельных звеньев цепи и числу цепей в единице объема сетки. Описанные выше выводы относятся к случаям чистого растяжения. Существует очень тесная связь между двойным лучепреломлением и напряжением

$$n_1 - n_2 = G\sigma, \quad (10)$$

где  $\sigma$  — напряжение;  $G$  — механооптический коэффициент.

Теория показывает, что измеряемые величины разности хода в деформированном полимере конкретно указывают на определенные изменения структуры и, в частности, двойное лучепреломление определяет среднюю степень ориентации макроцепей полимера. Приведенные выше аналитические выражения получены из предположения об аффинности растяжения образца и макроцепей. В действительности аффинность нарушается, и степень растяжения образца в целом должна быть больше степени растяжения макроцепей. Здесь сказывается влияние релаксационных явлений, обусловленных выходом некоторых макроцепей из зацеплений, т. е. из напряженного состояния, влекущего к образованию равновесного клубка (глобулы), обрывом цепей [2—8]. Следова-

тельно, сопоставление результатов, полученных из механических испытаний и результатов по измерению двойного лучепреломления позволяет получить характеристики, описывающие одновременно механические свойства и изменения структуры, происходящие в деформируемом материале.

Описанная выше теория двойного лучепреломления разработана для сетчатых типов полимеров. Существует, однако, большое число аморфных полимеров, не имеющих химических сшивок между молекулами, но обладающих в принципе теми же высокоэластическими свойствами как и каучуки. Это указывает на то, что в линейных полимерах также имеются узлы и сшивки, которые хотя и не являются химическими связями, играют ту же роль что и химические сшивки в каучуках. На основе данного предположения можно использовать теорию двойного лучепреломления для аморфных полимеров.

Для экспериментального определения величин деформации и двойного лучепреломления во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева была сконструирована и изготовлена установка, позволяющая параллельно регистрировать изменение деформации и двойного лучепреломления. В установку входят релаксометр деформаций и поляризационно-оптическая приставка с качающейся плоскостью анализатора. В отличие от существующих релаксометров деформаций, предлагаемый прибор позволяет просвечивать деформируемый образец в плоскополяризованном пучке монохроматического света [9]. На приборе можно проводить испытания в режимах: релаксации деформаций (ползучести), разгрузки, деформирования с заданной скоростью.

В большинстве существующих установок подобного типа нагружение производится вручную. Такой способ нагружения не позволяет определить время установления заданного режима напряжений, а измеряемые при этом деформации не являются деформациями чистой ползучести (имеется в виду неучитываемый период нагружения). В изготовленном релаксометре нагружение производится с помощью электродвигателя и зубчатой передачи, что обеспечивает одинаковую скорость нагружения при испытаниях. Прибор снабжен съемной термокамерой, позволяющей создавать рабочие температуры от  $-70$  до  $+300^\circ\text{C}$ . При этом отклонения рабочей температуры колеблются в пределах  $\pm 0,5\%$  от номинала.

Для экспериментального определения двойного лучепреломления применяют поляризационно-оптические установки, принципиальная схема которых показана на рис. 1 [10]. Из серии зарубежных и отечественных установок для определения двойного лучепреломления в целях анализа структуры наиболее совершенным является прибор КСП-7, выпускаемый НИИММ ЛГУ им. А. А. Жданова, в котором компенсация возникающей разности хода производится методом Сенармона.

Разработанная и изготовленная во ВНИИМ поляризационно-

оптическая приставка, принципиальная схема которой не отличается от приведенной выше, позволила уменьшить погрешность измерений разности хода благодаря применению квантового генератора в качестве источника плоскополяризованного монохроматического источника света, качающегося анализатора и автоматической регистрации возникающей разности хода в деформируемом образце. Последняя исключает влияние субъективных качеств испытателя на получаемые результаты [11].

Приведенная выше комплексная установка позволяет получать кривые деформационного и оптического крипа. Испытания проводятся на образцах с размерами  $80 \times 10 \times t$  ( $t$  — толщина образца, мм). Во избежание краевых эффектов образцы выдерживают 3—4 суток для снятия напряжений, возникающих при вырубке материала. При выбранной длине образца база измерения деформации на приборе составит 50 мм, что согласно принципу Сен—Венана позволяет полагать деформирование образца равномерным по всей длине измеряемой базы.

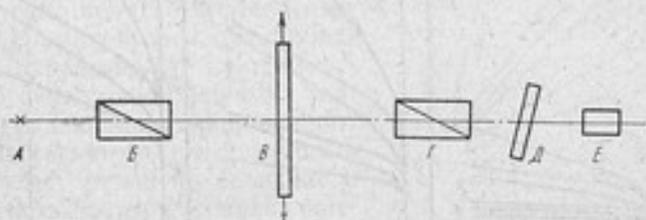


Рис. 1. Принципиальная схема поляризационно-оптических установок:

*A* — источник света; *B* — поляризатор; *B* — образец; *Г* — анализатор; *Д* — компенсатор; *Е* — регистрирующее устройство.

Так как наиболее интенсивно процесс ползучести у полимерных материалов протекает в начальный период времени, то резонно выбирать продолжительность испытаний в пределах 10—60 мин в зависимости от свойств испытуемого материала.

Соизмерение кривых роста деформации и изменения двойного лучепреломления при постоянном напряжении и температуре позволяют получить характеристики, описывающие механические свойства и изменение структуры. Рассмотрим их подробнее на примере целлулоида. Целлулоид состоит в основном из аморфной смеси нитроцеллюлозы с камфорой. Нитроцеллюлозу, в свою очередь, получают путем обработки хлопкового волокна смесью крепких азотной и серной кислот. Технология процесса изготовления регулируется таким образом, что получают невзрывчатый тип нитроцеллюлозы, которую затем смешивают с камфорой и этиловым спиртом до получения желеобразной массы. При нагревании целлулоид формуют в толстые плиты, которые затем

разрезают на листы. Следует отметить, что получаемые толстые плиты охлаждают в подвешенном состоянии. В вязком состоянии в целлулоиде под действием собственного веса может происходить частичная ориентация макроцепей. Это легко заметить, просвечивая листы, получаемые путем разрезки этой плиты поляризованным светом. Поэтому целлулоидные листы, из которых вырезались образцы, предварительно отжигались в водяной ванне и затем полировались.

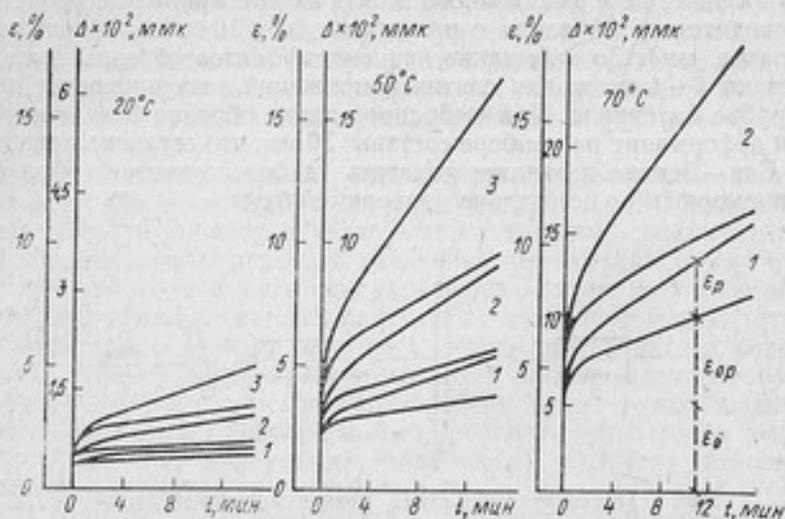


Рис. 2. Кривые развития деформации и величины оптической разности хода при постоянном усилии и температуре:  
1 — при напряжении 1,4 кгс/см<sup>2</sup>; 2 — при напряжении 1,8 кгс/см<sup>2</sup>; 3 — при напряжении 2,2 кгс/см<sup>2</sup>

Методика испытаний заключалась в следующем. Образец закрепляли в захватах, помещали в термокамеру и выдерживали при заданной температуре не менее часа. Затем образец нагружали и одновременно измеряли рост деформации ( $\epsilon$ ) и разность хода ( $\Delta$ ), которые при этом возникали. Продолжительность исследования ползучести составляла в среднем около часа. В результате испытаний получены данные по деформационной и оптической ползучести, представленные в виде графиков (см. рис. 2).

Первые достоверные результаты отсчетов снимались в среднем после нагружения. Для определения деформации и разности хода в моменты времени, близкие к нулю, экспериментальные кривые аппроксимировались двучленными эмпирическими зависимостями.

Начальная деформация и разность хода строго линейно зависят (рис. 3). Как указано выше, разность хода характеризует ориентацию. Предполагая, что в момент нагружения конформационной ориентации не происходит, можно сказать, что начальная деформация обеспечивается межмолекулярной раздвижкой.

Сравнивая кривые разности хода и деформации для одних и тех же напряжений и температур, можно заметить, что скорость ползучести выше, чем скорость оптического крипа. Рассматривая двойное лучепреломление как меру ориентирования структуры, следует предположить, что процесс ползучести целлулоида обуславливается не только конформационным разворачиванием макромолекул.

Для количественного сравнения деформации, обусловленной конформационными изменениями, и всей деформации ползучести следует определить само понятие «ориентирование макромолекул». Если представить макромолекулу как геометрическую сумму, состоящую из векторов, совпадающих по направлению отдельных сегментов, то суммарный вектор будет равен по величине и направлению вектору, соединяющему концы макромолекул. Согласно зависимости (5), разность поляризуемостей пропорциональна (для малых деформаций) квадрату расстояния  $r$ . Целесообразно мерой ориентирования макромолекулы считать квадрат расстояния между концами макромолекулы.

Для количественного разделения деформации можно предложить следующее построение. На графике ползучести восстановим еще одну координатную ось, на которой будем откладывать величины разности хода. На основании линейной зависимости начальной деформации и разности хода (см. рис. 3) определяем масштаб на оси «разность хода». Для этого ординату, соответствующую начальной деформации, параллельно перенесем на новую ось. Полученная точка будет характеризовать соответствующую разности хода, которая берется из рис. 3. Таким образом, на оси «разность хода» уже имеются две точки — построенная и нулевая, что позволяет определить масштаб, в котором следует строить кривую оптического крипа. Если рассматривать построенную кривую в масштабе деформаций, то она, на основании выше сказанного, описывает рост деформации, обусловленной ростом ориентационного процесса. Разность ординат между кривыми характеризует деформацию, которая не сопровождается мо-

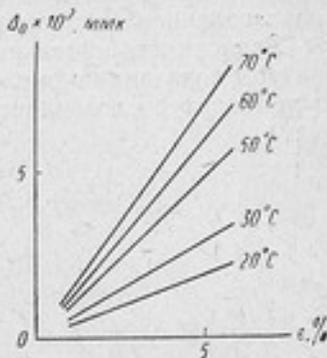


Рис. 3. Зависимость величины начальной разности хода от начальной деформации

лекулярной ориентацией, т. е. сопровождается актами разрушения, проскальзывания макромолекул по отношению друг к другу, и т. д. Описанные построения показаны на рис. 2.

Как видно, процесс деформирования — ползучести имеет смысл интерпретировать трехчленной зависимостью

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + \varepsilon_{ор} + \varepsilon_p, \quad (11)$$

где  $\varepsilon_t$  — деформация, развивающаяся к моменту времени  $t$ ;  $\varepsilon_0$  — начальная деформация, которая не сопровождается конформационными изменениями;  $\varepsilon_{ор}$  — деформация, обусловленная конформационными изменениями (рост ориентации);  $\varepsilon_p$  — деформация, обусловленная деструкцией макромолекулярной структуры.

Зависимость начальной деформации от напряжений и температуры показана на рис. 4. Линейная зависимость от напряжения и температуры позволяет представить:

$$\varepsilon_0 = K_1 \frac{T}{T_0} (\sigma - \sigma_0), \quad (12)$$

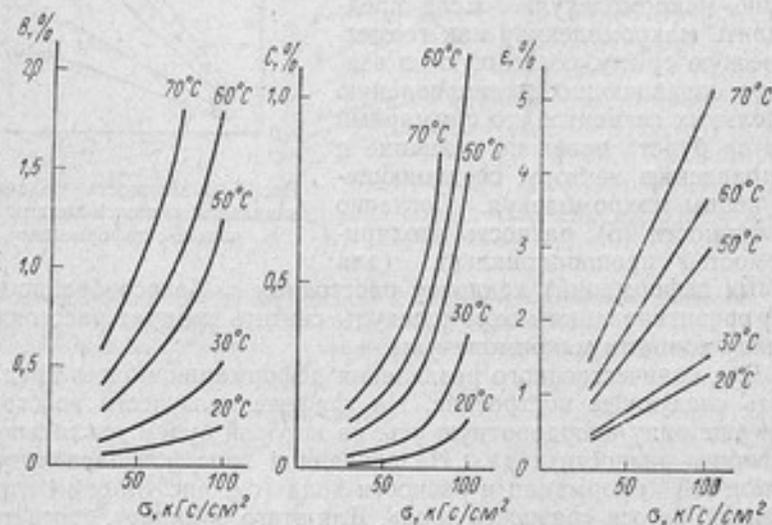


Рис. 4. Зависимость темпа роста деформации, обусловленной конформационным ориентированием структуры, разрушением структуры и начальной деформации от нагрузки и температуры

где  $T$  — температура, при которой происходит ползучесть целлюлозы;  $T_0$  — начальная температура (близкая к  $20^\circ\text{C}$ );  $\sigma$  — напряжения, вызывающие ползучесть;  $\sigma_0$  — начальные напряжения;  $K$  — коэффициент, численно равный начальной деформации при единичном напряжении при комнатной температуре.

Коэффициент  $K_1$  является величиной, обратной начальному модулю упругости

$$K_1 = \frac{1}{E_1}$$

Развитие деформации, сопровождающейся конформационным ориентированием структуры, аппроксимируется зависимостью

$$\varepsilon_{op} = Bt^{0.4}, \quad (13)$$

где  $B$  — темп роста деформации, обусловленной конформационным ориентированием макромолекул и надмолекулярных образований, которая в свою очередь зависит от напряжений и температуры (см. рис. 4). Эту зависимость можно аппроксимировать

$$B = K_2 \left( \frac{T}{T_0} \right)^2 (\sigma - \sigma_0),$$

где  $K_2$  — темп роста ориентационной деформации при единичном напряжении и комнатной температуре.

Величина, обратная коэффициенту  $K_2$ , характеризует модуль ориентационной деформации

$$K_2 = \frac{1}{E_2}$$

Развитие деформации, обусловленное разрушением макромолекулярной структуры, описывается следующей зависимостью:

$$\varepsilon_p = c \left( \frac{t}{t_0} \right)^{0.65}, \quad (14)$$

где  $c$  — темп роста деформации, обусловленный разрушением различных структурных элементов, при единичном напряжении и комнатной температуре.

По аналогии с вышесказанным коэффициент  $K_3$  является величиной, обратной «деструкционному» модулю

$$K_3 = \frac{1}{E_3}$$

С учетом вышесказанного зависимость (11) приобретает вид

$$\varepsilon_t = \left[ K_1 + K_2 \left( \frac{T}{T_0} \right) \left( \frac{t}{t_0} \right)^{0.4} + K_3 \left( \frac{T}{T_0} \right) \left( \frac{t}{t_0} \right)^{0.65} \right] \frac{T}{T_0} (\sigma - \sigma_0). \quad (15)$$

Процесс ползучести целлулозы достаточно полно описывается тремя характеристиками: начальным модулем упругости, модулем ориентационной деформации и модулем, связывающим напряжения и деформации при деструкционных процессах, развивающихся при ползучести.

Следовательно, в случае линейной вязкоупругости модуль первого рода можно рассматривать как сумму вышеупомянутых модулей. Его целесообразно определять из зависимости (15)

$$E_{(t)} = \frac{E_1 E_2 E_3}{E_2 E_3 + E_1 E_3 (t/t_0)^{0.4} + E_1 E_2 (t/t_0)^{0.65}} \quad (16)$$

Аналогичный подход при описании медленной части высокоэластической деформации показан в работах Бартенева. Подобное представление процесса ползучести дает возможность определять механические характеристики полимера, которые могут служить для оценки стабильности свойств данного полимера при приемосдаточных испытаниях, а также при расчете конструкций и прогнозировании их работы

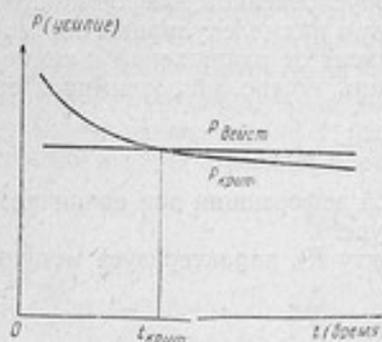


Рис. 5. Изменение критической силы во времени

во времени. В качестве иллюстрации приведенных соображений обратимся к расчету центрально сжатой стойки. Пренебрегая изменением длины и площади поперечного сечения стойки в процессе ползучести, можно видеть, что критическая сила будет падать во времени по закону изменения модуля  $E$  (рис. 5). Точка пересечения кривой критической силы ( $P_{кр}$ ) с линией, характеризующей действующую силу, указывает время, когда стойка теряет устойчивость.

Кроме того, зависимость (15) позволяет выбрать вид целлюлоида или уровень напряженного состояния при моделировании процессов упругости, ползучести или пластичности. Так, если коэффициенты  $K_2$  и  $K_3$  малы по сравнению с коэффициентом  $K_1$ , то материал может служить для моделирования явлений фотоупругости. Если коэффициент  $K_1$  мал по сравнению с двумя другими, то с помощью материала можно моделировать ползучесть (фотоползучесть). В общем случае, при коэффициентах одного порядка можно моделировать ползучесть с развитием пластических деформаций [12, 13]. Возможно применение одного материала для моделирования всех трех указанных видов напряженного состояния [12, 14]. Для этого следует подбирать определенную температуру, при которой соотношение характеристик  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  будет отвечать требованиям, указанным выше.

Определение механических характеристик полимерных материалов на основании исследования физики процесса деформирования позволяет утверждать, что получаемые величины объективно характеризуют механические свойства полимеров и дают возможность прогнозировать деформирование во времени при заданных параметрах внешнего силового поля. Получаемые характеристики являются объективными, так как в основу их положена молекулярная кинетика деформирования (15).

## Выводы

1. Указанный метод дает возможность количественно разделять деформацию на доли, обусловленные ориентационными и деструкционными процессами.

2. Три модуля, полученные по описанной выше методике, являются механическими характеристиками материала и одновременно отражают физический процесс деформирования на молекулярном уровне.

3. Эти же модули могут служить основанием при выборе материалов для моделирования плоского напряженного состояния в упругой стадии, упруго-пластической, чисто пластической и состояния ползучести.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Stein R. S. «Textile Research Journal», 1948, v. XVIII, No. 4.
2. Треолар Л. Физика упругих каучуков. «Наука», 1953.
3. Малагин М. Ф., Шишкин Н. И., Габараева А. Д. «Физика твердых тел», 1964, № 6.
4. Шишкин Н. И., Малагин М. Ф., Габараева А. Д. «Механика полимеров», 1966, № 3.
5. Лайус А. А., Кувшинский Е. В. «Физика твердых тел», 1963, № 5.
6. Тобольский А. В. Свойства и структура полимеров. «Наука», 1964.
7. Трубяков Ю. И., Орлов А. В., Эралих И. М., Рубинштейн Е. Л. «Каучук и резина», 1973, № 6.
8. Трубяков Ю. И., Бахмендо В. Б., Кроль В. А. и др. «Каучук и резина», 1971, № 9.
9. Трубяков Ю. И., Орлов А. В., Бахмендо В. Б. «Измерительная техника», 1973, № 7.
10. Трубяков Ю. И., Орлов А. В. «Измерительная техника», 1973, № 9.
11. Трубяков Ю. И., Налбандов Л. В., Бахмендо В. Б. «Измерительная техника», 1973, № 3.
12. Трубяков Ю. И. «Машиностроение», 1967, № 12.
13. Трубяков Ю. И. Установление механических характеристик целлюлозы на основании физики процесса ползучести. Депонировано. Свидетельство о депонировании № 3611—71 от 20/X 1971 г.
14. Островский Г. М., Трубяков Ю. И. «Измерительная техника», 1970, № 12.

Поступила в редакцию  
15/VI 1973 г.

## НАПРАВЛЕННЫЕ СВОЙСТВА И ГРАДУИРОВКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Отличительной особенностью акселерометров, как измерительных преобразователей (ИП) векторной величины — ускорения  $a$ , является наличие у них направленных свойств, исследование которых должно быть составной частью их поверки и градуировки.

Обычно при определении статической градуировочной характеристики и исследовании направленных свойств акселерометра вводится некоторая система осей, жестко связанная с корпусом прибора и его установочными элементами, которую условимся называть основной системой координат. Исчерпывающей характеристикой направленных свойств акселерометра в статике является его диаграмма направленности — зависимость выходного сигнала акселерометра (здесь и далее за нуль выходного сигнала принимаем его значение при отсутствии ускорения) от различной ориентации в основной системе координат заданного вектора ускорения с постоянным модулем  $|a|$ . В общем случае форма диаграммы направленности может зависеть от значения  $|a|$ .

Однако при практической работе с акселерометрами диаграмму направленности не снимают, а ограничиваются заданием измерительной оси (оси чувствительности) — направления, проекцию ускорения на которое измеряет акселерометр. Эта ось может быть определена, например, по направлению максимальной чувствительности, т. е. по тому направлению в основной системе, при совмещении с которым вектора ускорения заданного модуля  $|a|$ , выходной сигнал акселерометра максимален. Известен и другой способ определения измерительной оси, сводящийся к тому, что ее направление определяют как перпендикуляр к плоскости, являющейся геометрическим местом направлений  $a$ , для которых выходной сигнал акселерометра равен нулю. Такой способ менее чувствителен к случайным погрешностям ИП и средств градуировки. Оба способа, по существу, представляют собой обработку соответствующей части диаграммы направленности — первый в

области экстремальных значений выходного сигнала, второй в области нулевых. Данные по сравнительному анализу этих способов определения измерительной оси отсутствуют и необходимо проведение специального эксперимента.

После определения измерительной оси ее совмещают с каким-либо направлением, связанным с установочными элементами ИП, например, с перпендикуляром к установочной плоскости акселерометра. Затем определяется статическая градуировочная характеристика и исследуется влияние поперечных к измерительной оси ускорений.

Статическая градуировочная характеристика может быть определена двумя способами. В первом способе ускорение задается вдоль оси, принятой за измерительную, и изменяется его модуль, во втором — модуль задаваемого ускорения постоянен, а изменяется угол между  $\mathbf{a}$  и этой осью. Градуировка акселерометра вторым способом обладает тем недостатком, что получение малых значений проекции ускорения на измерительную ось сопровождается наличием относительно больших поперечных к ней составляющих ускорения, а это при неточном определении ее направления (осевая погрешность [1]) может привести к соответствующей погрешности градуировки.

Предлагаемая ниже методика градуировки двух основных типов линейных акселерометров (однокомпонентные осевой и маятниковый акселерометры [2]) позволяет повысить точность определения измерительной оси ИП, объединить рассмотренные этапы исследования, а также получить оценку точности работы акселерометра в статическом и квазистатическом режиме измерений. Для работы с линейным акселерометром необходимо знать: 1) направление, на которое осуществляется проектирование, — измерительную ось акселерометра, 2) зависимость между значениями проекции ускорения на эту ось и соответствующими значениями выходного сигнала акселерометра — статическую градуировочную характеристику. Исследование градуируемого акселерометра основывается при этом на изучении (анализе) реакции прибора на известные входные воздействия — на различные по модулю и направлению ускорения, задаваемые при градуировке.

Пусть в связанной с корпусом прибора основной системе координат направление измерительной оси акселерометра задается неизвестным нам единичным вектором  $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$ , а значение выходного сигнала  $u$  является функцией проекции  $\mathbf{a}$  на  $\mathbf{p}$

$$u = u(\mathbf{a} \cdot \mathbf{p}).$$

Однако в практической работе с акселерометрами удобнее обратная форма этой зависимости

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{p} = F(u),$$

которая позволяет по измеренным значениям выходного сигнала судить о проекции  $\mathbf{a}$  на  $\mathbf{p}$ . Эта форма записи получается

венным образом из условия статического равновесия чувствительного элемента (ЧЭ) акселерометра, согласно которому для равновесия ЧЭ необходимо равенство восстанавливающей силы  $F_n$  момента  $M_n$  и проекции инерционной силы  $F_n$  (момента  $M_n$  — для осевого и маятникового акселерометра соответственно) на ось, определяемую конструктивными элементами акселерометра — его направляющими. Для осевого акселерометра без случайной поехи условие статического равновесия

$$F_n = ma \cdot p, \quad a \cdot p = \frac{F_n}{m} = F(u) = \sum_{i=1}^n f_i u^i, \quad (1)$$

или в скалярной форме

$$a_x p_x + a_y p_y + a_z p_z = f_1 u + f_2 u^2 + f_3 u^3,$$

где  $f_i$  — коэффициент разложения в ряд Тейлора функции  $F(u)$ ,  $u^i$  —  $i$ -я степень выходного сигнала, отсчитываемого от значения  $u$  при  $a = 0$ ,  $n = 2 \div 3$ , поскольку  $F(u)$  обычно является достаточно гладкой функцией,  $a_x, a_y, a_z$  — составляющие векторов  $a$  и  $p$  в основной системе  $p_x, p_y, p_z$  координат.

В частном случае, когда  $p = (1, 0, 0)$ ,  $a_x = \sum_{i=1}^n f_i u^i$ .

Итак, по формуле (1) параметрами, подлежащими определению при градуировке, являются  $p_x, p_y$  и  $p_z$ , характеризующие направление измерительной оси в основной системе, и  $f_1, f_2$  и  $f_3$ , характеризующие связь между значениями проекции измеряемого ускорения и соответствующим значением выходного сигнала акселерометра. Задавая при градуировке акселерометра различные по модулю и направлению ускорения, и фиксируя соответствующие значения выходного сигнала, мы сведем задачу определения этих параметров к обработке результатов совместных измерений [3] для случая, когда непосредственно измеряемыми величинами являются  $a_j$  и  $u_j$  ( $j$  — номер опыта), а искомые параметры линейно входят в условное уравнение (1).

При этом согласно методу наименьших квадратов (МНК) [3,4] оптимальными будут значения искомых параметров, которые минимизируют сумму квадратов вида

$$D = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [p_x a_{xj} + p_y a_{yj} + p_z a_{zj} - f_1 u_j - f_2 u_j^2 - f_3 u_j^3]^2 \quad (2)$$

совместно с уравнением связи  $p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 = 1$ , поскольку, как было сказано выше, вектор  $p$  — единичный.

Таким образом, значения искомых параметров являются решением системы уравнений вида (в обозначениях Гаусса)

$$\left. \begin{aligned}
 & [a_x a_x] p_x + [a_x a_y] p_y + [a_x a_z] p_z - [a_x u] f_1 - [a_x u^2] f_2 - \\
 & \quad - [a_x u^3] f_3 + \lambda p_x = 0 \\
 & [a_y a_x] p_x + [a_y a_y] p_y + [a_y a_z] p_z - [a_y u] f_1 - [a_y u^2] f_2 - \\
 & \quad - [a_y u^3] f_3 + \lambda p_y = 0 \\
 & [a_z a_x] p_x + [a_z a_y] p_y + [a_z a_z] p_z - [a_z u] f_1 - [a_z u^2] f_2 - \\
 & \quad - [a_z u^3] f_3 + \lambda p_z = 0 \\
 & - [u a_x] p_x - [u a_y] p_y - [u a_z] p_z + [u u] f_1 + [u u^2] f_2 - \\
 & \quad - [u u^3] f_3 = 0 \\
 & - [u^2 a_x] p_x - [u^2 a_y] p_y - [u^2 a_z] p_z + [u^2 u] f_1 + [u^2 u^2] f_2 + \\
 & \quad + [u^2 u^3] f_3 = 0 \\
 & - [u^3 a_x] p_x - [u^3 a_y] p_y - [u^3 a_z] p_z + [u^3 u] f_1 + [u^3 u^2] f_2 + \\
 & \quad + [u^3 u^3] f_3 = 0 \\
 & p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - 1 = 0
 \end{aligned} \right\} (3)$$

где  $\lambda$  — множитель Лагранжа.

В случае, если окажется, что в результате предварительной настройки ИП, например,  $p_x \gg p_y$  и  $p_x$ , то при эксплуатации акселерометра можно применять приближенное уравнение

$$a_x \approx \frac{1}{p_x} \sum_{i=1}^n f_i u^i,$$

а  $p_y/p_x$  и  $p_z/p_x$  рассматривать как коэффициенты влияния поперечных к измерительной оси составляющих ускорения.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет осуществить градуировку акселерометра с одновременным определением направления измерительной оси или определением коэффициентов влияния поперечных ускорений. Кроме того, по значению  $D = D_{\min}$  можно оценить и точность аппроксимации акселерометра в статическом режиме измерений. В значение  $D_{\min}$  войдут как инструментальные погрешности самого ИП, так и погрешности средств градуировки. Если последние малы, то получаемое значение  $D_{\min}$  позволит дать оценку точности исследуемого ИП.

Несколько сложнее дело обстоит с маятниковым акселерометром, в котором осуществляется уравнивание проекции вектора момента инерционной силы, и для ЧЭ которого уравнение статического равновесия (с учетом однородности поля ускорения для поступательного движения) имеет вид

$$I \cdot [R \times ma] = M_n(u).$$

Это уравнение также может быть приведено к виду, внешне аналогичному (1)

$$M_n(u) = mRa[q \cos \varphi(u) - r \sin \varphi(u)]. \quad (4)$$

В частном случае, когда  $q = (1, 0, 0)$ ,  $r = (0, -1, 0)$ ,

$$M_n(u) = mR(a_x \cos \varphi(u) + a_y \sin \varphi(u)),$$

где  $q = [r \times l]$ ,  $r$  и  $l$  — образуют правую тройку ортов,  $l$  — орт оси вращения маятника,  $r$  — орт центра инерции маятника при  $a = 0$ ,  $R$  — радиус центра инерции маятника,  $\varphi$  — угол поворота маятника вокруг  $l$  под действием данного  $a$ .

Из (4) следует, что выходной сигнал маятникового акселерометра однозначно связан с проекцией измеряемого  $a$  на некоторое направление  $p(u) = q \cos \varphi(u) - r \sin \varphi(u)$ . Следовательно, согласно определению термина «измерительная ось» ее направление для маятникового акселерометра переменное, но всегда может быть определено по значению его выходного сигнала.

Определение и применение градуировочной характеристики в форме (4) может оказаться целесообразным в случаях, когда требования к точности измерения ускорения маятниковым акселерометром очень высоки. Например, при измерении  $a$  для целей навигации посредством системы трех акселерометров с некомпланарными измерительными осями. Использование (4) в этом случае позволяет найти три искомые компоненты  $a_k$  из системы трех линейных уравнений, коэффициенты которых суть известные функции выходных сигналов. Отыскание значений параметров, входящих в градуировочную характеристику (4) методом МНК также сводится к набору статистики по  $a_j$  и соответствующим  $u_j$  и обработке результатов совместных измерений. При этом минимизируется

$$D = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ q a_j - (r a_j) \sum_{i=1}^n \varphi_i u^i - \sum_{i=1}^n m_i u^i \right\}^2 \quad (5)$$

с уравнением связи  $q \cdot q = r \cdot r = 1$ ,  $q \cdot r = 0$   
или в скалярной форме

$$D = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \{ q_x a_{xj} + q_y a_{yj} + q_z a_{zj} - (r_x a_{xj} + r_y a_{yj} + r_z a_{zj}) \times \\ \times (\varphi_1 u_j + \varphi_2 u_j^2 + \varphi_3 u_j^3) - m_1 u_j - m_2 u_j^2 - m_3 u_j^3 \}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N q_j^2,$$

где  $q_k$ ,  $r_k$ ,  $a_k$  — компоненты  $q$ ,  $r$  и  $a$  в основной системе координат,  $\varphi_i$ ,  $m_i$  — коэффициенты разложения функций  $\text{tg } \varphi(u)$  и  $\frac{M_n(u)}{mR \cos \varphi(u)}$  в ряд Тейлора,  $u^i$  —  $i$ -я степень выходного сигнала,  $g_j$  — выражение в фигурных скобках из (5). Система уравнений для отыскания искомых параметров совместно с уравнением связи (метод Лагранжа) примет вид

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{N} \left[ g \frac{\partial g}{\partial p_x} \right] + \lambda p_x + \frac{1}{2} \nu r_x = 0 \\
 & \frac{1}{N} \left[ g \frac{\partial g}{\partial p_y} \right] + \lambda p_y + \frac{1}{2} \nu r_y = 0 \\
 & \frac{1}{N} \left[ g \frac{\partial g}{\partial p_z} \right] + \lambda p_z + \frac{1}{2} \nu r_z = 0 \\
 & \frac{1}{N} \left[ g \frac{\partial g}{\partial r_x} \right] + \mu r_x + \frac{1}{2} \nu p_x = 0 \\
 & \frac{1}{N} \left[ g \frac{\partial g}{\partial r_y} \right] + \mu r_y + \frac{1}{2} \nu p_y = 0 \\
 & \frac{1}{N} \left[ g \frac{\partial g}{\partial r_z} \right] + \mu r_z + \frac{1}{2} \nu p_z = 0 \\
 & \frac{1}{N} \left[ g \frac{\partial g}{\partial \tau_1} \right] = 0 \quad \frac{1}{N} \left[ g \frac{\partial g}{\partial \tau_2} \right] = 0 \quad \frac{1}{N} \left[ g \frac{\partial g}{\partial \tau_3} \right] = 0 \\
 & \frac{1}{N} \left[ g \frac{\partial g}{\partial m_1} \right] = 0 \quad \frac{1}{N} \left[ g \frac{\partial g}{\partial m_2} \right] = 0 \quad \frac{1}{N} \left[ g \frac{\partial g}{\partial m_3} \right] = 0 \\
 & p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 = 1 \quad r_x^2 + r_y^2 + r_z^2 = 1 \quad p_x r_x + p_y r_y + \\
 & \quad \quad \quad + p_z r_z = 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

где  $\lambda$ ,  $\mu$  и  $\nu$  — множители Лагранжа.

Если же и для маятникового акселерометра вводить неизменную по направлению измерительную ось (такой метод справедлив, например, для компенсационных маятниковых акселерометров, для которых  $\varphi \approx 0$  в диапазоне измерений), то ее определение по методу наименьших квадратов в форме (1, 3) становится необходимостью. Введение такой оси означает, по существу, аппроксимацию маятникового акселерометра осевым, а точность этой аппроксимации обеспечивается минимумом  $D$ . При осуществлении такой аппроксимации следует иметь в виду, что получаемые оценки параметров  $p_k$  и  $f_i$  в этом случае будут зависеть от выбранного диапазона и распределения внутри него задаваемых при градуировке ускорений. Получаемая при выборе неизменной оси простота работы с маятниковым акселерометром сопровождается некоторой потерей точности. Действительно, отградуированный таким образом маятниковый акселерометр будет измерять проекцию  $a$  на близкое, но не совпадающее с приписанной ему измерительной осью, направление, а это обстоятельство вызывает появление систематической погрешности измерений. Если же требования к точности измерения высоки, то градуировку маятникового акселерометра следует проводить по (5) и (6), что позволит по измеренному  $u$  определить как значение проекции, так и ее направление.

Таким образом, применение рассмотренной методики позволяет получать достаточно точные оценки параметров, характери-

зующих как направленные свойства акселерометра, так и свойства реакции подвеса его чувствительного элемента. Градуировка акселерометров этим методом, по сравнению с принятыми методами, приводит к уменьшению в два—три раза систематической погрешности измерений. Повышение точности определения направления измерительной оси достигается нахождением  $p$  по результатам измерений при любой ориентации  $a$  и любом ( $a$  не только экстремальном или нулевом) значении выходного сигнала. Получаемые значения параметров могут служить как для оценки погрешностей измерения, так и для введения, в случае необходимости, соответствующих поправок в результате измерения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Thomas J. L. and Evans R. H. Performance characteristics and Methods of Testing of Force-Feedback Accelerometers. Ministry of Technology Aeronautical Research Council. Reports and Memoranda. London, No. 3601, August 1967, p. 7.
2. Горенштейн И. А., Шульман И. А. Инерциальные навигационные системы. М., «Машиностроение», 1970.
3. Долинский Е. Ф. Обработка результатов измерений по способу наименьших квадратов. М., изд-во стандартов, 1972.
4. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М., Физматгиз, 1958.

Поступила в редакцию  
15/VI 1973 г.

Ю. Г. ЗАХАРЕНКО, Н. А. МЕЛЬНИКОВ,  
В. Е. ПРИВАЛОВ

ВНИИМ

### ВЛИЯНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ КОЛЬЦЕВОГО ОКГ НА ПАРАМЕТРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

В последние годы резко возросла потребность в средствах измерения мгновенных значений перемещений, скоростей и ускорений. В связи с этим актуальным становится вопрос создания точных быстродействующих образцовых средств измерения параметров движения. Максимальная точность при измерении угловых параметров движения может быть достигнута, если использовать измерительный преобразователь угловой скорости (ИПУС) на базе кольцевого газового ОКГ (КОКГ). Частота биений встречных волн КОКГ  $\Delta\nu$  содержит член, пропорциональный угловой скорости  $\Omega$

$$\Delta\nu = k\Omega + \sum_{n=1} \Omega^n \cdot k_n + \sum f_r \quad (1)$$

Второе и третье слагаемые в правой части уравнения характеризуют соответственно нелинейную зависимость от  $\Omega$  и невязности, которые не связаны с вращением КОКГ,  $k$  — функция параметров резонатора, активной среды и взаимодействия встречных волн. Устранив или скомпенсировав эти два слагаемых и получив высокую стабильность  $k$ , с помощью КОКГ измеряют угловую скорость с точностью порядка  $10^{-5}$ — $10^{-6}$ .

В настоящее время поставлена задача довести точность измерения скорости вращения до  $10^{-6}$ — $10^{-8}$ . Поскольку число периодов частоты биений определяет угол независимо от скорости вращения, КОКГ можно использовать и для измерения угла в динамике. Точность определения угла с помощью КОКГ составляет порядка угловой секунды. Предполагается повысить эту точность по крайней мере на порядок.

Повышение точности измерения угловых параметров движения связано с увеличением стабильности параметров КОКГ.

В связи с этим необходимо решить ряд задач. Одна из них — увеличение стабильности параметров плазмы КОКГ. Известны различные способы борьбы с нестабильностями разряда He — Ne ОКГ [1]. Большую роль играет также стабильность источника питания КОКГ.

Ток разряда определяет электронные концентрацию и температуру, температуру трубки и резонатора, пространственное и временное распределения инверсии населенностей. Изменение тока разряда приводит к изменению показателя преломления разряда, усиления среды. Это вызывает изменение частотных характеристик КОКГ и вносит вклад в сигнал ошибки ИПУС.

Оценим требования к источнику питания разряда КОКГ, возникающие благодаря эффекту Лэнгмюра. Расщепление частот встречных волн в этом случае можно записать следующим образом [2]:

$$\delta\nu = 0,34 \frac{\Delta\nu_L}{\Delta\nu_D} \cdot \frac{\nu}{c} \cdot G \cdot \nu, \quad (2)$$

где  $\Delta\nu_L$  — межмодовое расстояние;  $\Delta\nu_D$  — доплеровская ширина линии;  $\nu$  — частота излучения КОКГ;  $c$  — скорость света;  $G$  — усиление среды;  $\nu$  — скорость потока возбужденных атомов.

Последние два параметра в выражении (2) зависят от тока разряда. Во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева был изготовлен КОКГ со следующими параметрами: периметр около 90 см, трубка (с двумя анодами) длиной 200 мм и диаметром 2,7 мм, давление смеси 2,2 торр, рабочий ток в капилляре порядка 10 мА,  $\Delta\nu_D = 1700$  мГц,  $G = 0,02$ . При изменении тока на 1% получим из (2) дополнительную разность частот около 1 Гц. Измеряя скорости вращения, соответствующие частоте биений 100 кГц, получим ошибку ИПУС примерно  $10^{-5}$ . Для того чтобы повысить точность измерения до  $10^6 - 10^8$ , необходимо стабилизировать ток разряда с точностью  $10^3 - 10^5$ .

Изменения тока могут быть вызваны не только медленными уходами параметров (температуры, давления), но и быстрыми колебаниями: реактивными, локальными и стратами [1]. В этом случае указанная величина стабильности должна соблюдаться в диапазоне частот колебаний. Наиболее опасные — реактивные колебания в зоне генерации He — Ne ОКГ имеют частоты, определяемые выражением [3]

$$\nu_{p,x} = \frac{0,76}{d} \cdot \sqrt{\frac{I_p \cdot b \cdot U_l}{C \cdot p \cdot U_p}}, \quad (3)$$

где  $d$  — диаметр капилляра;  $I_p$  и  $U_p$  — ток и падение напряжения на капилляре;  $b$  — подвижность ионов при давлении 1 торр;  $p$  — давление газа;  $C$  — емкость разряда и цепи. Для рассматриваемого КОКГ частота реактивных колебаний несколько превосхо-

дит 100 кГц, что определяет полосу частот в цепи обратной связи источника питания.

Невзаимный эффект, порождаемый медленным изменением тока, можно учесть при обработке выходного сигнала, изменяя направление вращения или производя переключение «невзаимного» элемента. С ростом частоты нестабильности это труднее осуществить. Кроме того, понижается точность за счет уменьшения времени обработки информации. Поскольку изменения тока вносят вклад не только в невзаимность, но и в  $k$  [см. выражение (1)], компенсировать результаты их влияния на выходной сигнал ИПУС можно, лишь устраняя сами флуктуации тока разряда КОКГ. Реактивные колебания представляют опасность по следующим причинам: 1) большая амплитуда колебаний приводит к большому сигналу ошибки и даже приводит к тому, что полезный сигнал КОКГ будет оказывать меньшее влияние на выходные устройства, чем реактивные колебания; 2) амплитудная модуляция тока разряда приводит к девиации частоты КОКГ, что тоже порождает сигнал ошибки; 3) амплитудная модуляция тока разряда приводит к модуляции интенсивности излучения КОКГ, и следовательно к вкладу в сигнал ошибки за счет уширения линии разностной частоты [4] и т. д.

Одним из способов устранения реактивных колебаний является применение стабилизированного по току источника питания.

Наряду с точностью измерения угловых параметров, представляет интерес чувствительность ИПУС. Она ограничивается собственным дрейфом  $10^{-3}^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ , может быть достигнуто при стабильности частоты биений порядка  $10^8$ . Отсюда следует, что для достижения максимальной чувствительности ИПУС необходима стабильность по току порядка  $10^8$ .

В настоящее время в КОКГ применяют разрядные трубки с малым диаметром капилляра, что позволит обеспечить работу КОКГ при токах разряда 2—3 мА.

Падающий характер вольтамперной характеристики разрядной трубки He—Ne ОКГ вносит свою специфику в работу стабилизатора тока. Модуль динамического сопротивления разряда  $|R_d|$  в области рабочих токов составляет десятки килоом и увеличивается по мере уменьшения тока разряда, достигая сотен килоом при токах разряда менее 2—3 мА (диаметр капилляра 1,4 мм, длина 150 мм). Для компенсации отрицательного динамического сопротивления разряда применяют балластное сопротивление  $R_6$ , включаемое последовательно с разрядной трубкой. Если  $R_i$  — внутреннее сопротивление источника питания, то условие статической устойчивости разряда можно записать в виде

$$R_a + R_6 + R_i > 0. \quad (4)$$

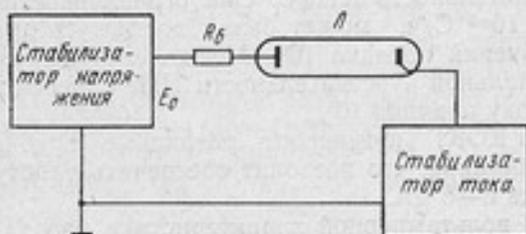
При использовании стабилизатора напряжения ( $R_i$  мало) для питания разряда нестабильность тока в области рабочих токов, где она слабо зависит от  $I_p$ , может быть представлена выражени-

$$\frac{\Delta I_p}{I_p} \approx \frac{\Delta U}{R_0 + R_a} \quad (5)$$

где  $\Delta U$  — нестабильность напряжения источника.

Для получения хорошей стабильности в этом случае необходимо применять большие значения  $R_0$ , что неудобно по нескольким причинам. Во-первых, это приводит к необходимости использовать источники питания с напряжением 10 кВт и более, при этом источник становится весьма громоздким и неэкономичным. Во-вторых, нестабильность разрядного тока оказывается прямо пропорциональной нестабильности напряжения источника питания. В-третьих, как показывает эксперимент, при слишком больших  $R_0$  разряд становится динамически неустойчивым (появляются реактивные колебания).

Представляется весьма перспективным метод двойной стабилизации разрядного тока — по току и по напряжению (см. рисунок). При этом  $R_0$  выбирается из условия статической устойчивости разряда, а большое динамическое сопротивление стабилизатора тока  $R_I$  обеспечивает динамическую устойчивость. Применение данного метода исключает необходимость в больших значениях питающего напряжения [ $E_0 \approx (1,5 \div 2) U_p$ ]. Кроме того, нетрудно показать, что нестабильность тока разряда в этом случае пропорциональна  $(K_{CTU} \cdot K_{CTI})^{-1}$ , где  $K_{CTU}$  и  $K_{CTI}$  — коэффициенты



Блок-схема двойной стабилизации разрядного тока He—Ne КОКГ:

$E_0$  — выходное напряжение стабилизатора напряжения;  $R_0$  — балластное сопротивление;  $L$  — разрядная трубка.

стабилизации стабилизатора напряжения и стабилизатора тока соответственно. Следует отметить, что стабильность  $I_p$  в данном случае обеспечивается динамическим сопротивлением стабилизатора тока и стабильностью его опорного напряжения, а стабилизация питающего напряжения  $E_0$  требуется

для обеспечения режима работы стабилизатора тока.

Пренебрегая внутренним сопротивлением источника напряжения, можно записать

$$\frac{\Delta I_p}{I_p} \approx \frac{R_0 - |R_a|}{R_I} \quad (6)$$

Для получения стабильности не хуже  $10^{-4}$  необходимо обеспечить условие

$$R_{I_{\min}} > 10^4 (R_0 - |R_a|) \quad (7)$$

Величину  $R_6$  следует выбирать из условия статической устойчивости разряда при минимальном рабочем токе, тогда для средних рабочих токов получим

$$R_{i_{\min}} \geq (2-3) \cdot 10^4 |R_d| \Big|_{I_p = I_{p_{\min}}} \quad (8)$$

В зависимости от геометрии и наполнения трубок ОКГ  $R_{i_{\min}}$  оказывается в пределах от 500 кОм до 1 МОм.

Второе требование к стабилизатору тока — малая инерционность. Это свойство необходимо для предотвращения развития колебательных процессов в разрядном промежутке.

Получение стабильности разрядного тока порядка  $10^4$  и выше выдвигает ряд специфических требований к выбору электронных элементов, особенно входящих в схему опорного напряжения и в схему сравнения. Очевидно, стабильность  $I_p$  не может быть лучше стабильности опорного напряжения  $U_{оп}$ , поэтому желательно иметь стабильность  $U_{оп}$  в 3—5 раз лучше требуемой стабильности  $I_p$ . Для узлов опорного напряжения и схемы сравнения следует применить элементы с малой зависимостью параметров от температуры, использовать термокомпенсацию и термостатирование наиболее ответственных элементов, обеспечивать рабочий режим элементов с мощностями рассеяния, много меньшими номинальными.

Предварительные эксперименты показали, что использование метода двойной стабилизации обеспечивает нестабильность разрядного тока He—Ne ОКГ не хуже  $1 \cdot 10^{-4}$ , что позволяет получить нестабильность выходного сигнала КОКГ около  $10^{-7}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Захаренко Ю. Г., Привалов В. Е. Колебания в разрядном промежутке лазера и их влияние на параметры излучения. «Оптика и спектроскопия», 1973, т. 35, с. 450—459.
2. Podgovsky T., Aranowitz F. Langmuir fluid effect in laser gyro. IEEE QE, 1968, v. 4, pp. 11—18.
3. Захаренко Ю. Г., Привалов В. Е. О начальной стадии реактивных колебаний в тлеющем разряде. ЖТФ, 1972, т. 42, с. 1899—1903.
4. Беленюв Э. М. Влияние амплитудных флуктуаций на стабильность частоты биевней бегущих волн кольцевого лазера. ЖТФ, 1969, т. 39, с. 133—138.

Поступила в редакцию  
15/III 1973 г.

В. И. ГУДОВ, А. И. ИЛЯСОВ,  
В. Л. ФЕДОРИН, В. С. ШКАЛИКОВ  
ВНИИМ

### ВЛИЯНИЕ ГАРМОНИК ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИЙ МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО ГАММА-РЕЗОНАНСА (ЯГР)

В настоящее время промышленность оснащена большим количеством виброизмерительных приборов. Широкое распространение получили приборы с пьезоэлектрическими и индукционными вибропреобразователями. Применяется также аппаратура с емкостными, индуктивными, компенсационными преобразователями [1]. Коэффициент преобразования этих преобразователей зависит от многих факторов: геометрии, материала, применяемой системы измерения и т. д. Существенным недостатком является сложная зависимость коэффициента преобразования от частоты из-за большой инерционности преобразователей. Поэтому в диапазоне частот 5—50 кГц для лучших отечественных и зарубежных приборов этого типа погрешность измерения амплитуды синусоидальных вибраций достигает 20% [2]. Приборы с подобными преобразователями нуждаются в градуировке и поверке.

За последнее время получили распространение методы измерения параметров движения, в которых применяются в качестве опорных константы, определяющиеся свойством молекул, атомов ядер. К таким методам можно отнести интерференционный, а также методы, основанные на эффекте Доплера с применением квантовых оптических систем.

Интерференционный метод с применением волн оптического диапазона ( $\lambda = 0,41 - 0,67$  мкм) позволяет измерять амплитуды вибраций до величины, соизмеримой или несколько меньшей, чем длина волны излучателя (практически до 0,1 мкм) [3]. Метод, использующий доплеровский сдвиг энергии квантов лазерного луча, дает возможность измерять скорости порядка десятков и сотен метров в секунду, что определяется характерными ширинами линий квантовых оптических излучателей.

В последнее время в виброметрии нашел применение метод ядерного резонансного поглощения без отдачи (эффект Мессбауэра или ЯГР — ядерный гамма-резонанс). Этот метод использует эффект Допплера для ядерных квантов с энергией порядка десятков килоэлектронвольт. В связи с тем, что энергетическая ширина ядерных уровней очень мала, возможно измерение скоростей от нескольких сантиметров в секунду до исключительно малых (в зависимости от энергии уровня и его ширины). Поэтому уже при частотах порядка 10 кГц и выше метод ЯГР позволяет измерять амплитуды значительно меньшие, чем с применением оптических интерферометров. К достоинствам метода ЯГР, кроме того, что рабочий диапазон частот практически не ограничен сверху, можно отнести и то, что измерения могут производиться для труднодоступных и даже закрытых механических объектов (если перегородка не очень сильно ослабляет интенсивность квантов с энергией в несколько десятков килоэлектронвольт). Радиоактивный источник может иметь малые размеры и массу (порядка микрограмма), что позволяет свести к минимуму его влияние на механические свойства микрообъектов и легких тел.

Аппаратурная ширина линии ЯГР зависит от многих факторов, в частности, от толщины источника и поглотителя, их химической структуры, внутренних механических напряжений. Однако для пары «источник — поглотитель» ширина аппаратурной линии является стабильной. Прежде чем приступить к измерениям скоростей движения, необходимо построить градуировочную кривую для рабочей пары «источник — поглотитель», которая может быть получена на установках, где скорость задана и измерена каким-либо другим методом с нужной точностью. Подобную градуировку можно произвести на инфразвуковой установке с синусоидальным законом движения, где амплитуды, обеспечивающие прохождение всей резонансной кривой, достаточно велики и могут быть измерены с помощью микроскопа. При такой градуировке можно обеспечить точность градуировочных измерений около 1%. Такой точности можно достигнуть и при измерениях параметров вибраций в ультразвуковом диапазоне частот при тех виброскоростях, для которых произведена градуировка. На инфразвуковых вибрационных установках градуировка производится при чистом гармоническом законе движения (нелинейные искажения не превышают 0,3%), а при измерениях параметров вибраций на рабочих объектах гармонический состав колебательного движения может существенно отличаться от такового. Поэтому очень важным является вопрос влияния гармоник на погрешность измерений в рабочих условиях.

Как известно [4, 5], при измерении амплитуды скорости синусоидальных колебаний с помощью эффекта Мессбауэра эффект резонансного поглощения определяется, в случае лоренцевой формы линии, по формуле

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{dx}{1 + 4\Delta_1^2 \sin^2 x}, \quad (1)$$

где  $\Delta_1$  — амплитуда скорости в единицах ширины резонансной линии. (Продолжительность измерения значительно больше периода колебаний).

Интегрирование дает

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\Delta_1^2}}. \quad (2)$$

В случае присутствия гармоник выражение (2) преобразуется следующим образом:

$$\bar{\varepsilon}_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{dx}{1 + 4 \left[ \sum_{n=1}^N \Delta_n \sin(n\alpha + \varphi_n) \right]^2}, \quad (3)$$

где  $\Delta_n$  — амплитуды скоростей гармоник;  $\varphi_n$  — сдвиг фаз между основной частотой и  $n$ -й гармоникой.

В работе [5] сделана попытка оценить вклад гармоник методом разложения подынтегральной функции (3) в ряд по степеням малых параметров  $\Delta_n/\Delta_1$ . Показано, что при  $\Delta_n/\Delta_1 \ll 1$  четные гармоники с точностью до члена второго порядка малости не дают вклад в  $\bar{\varepsilon}$ . Для нечетных гармоник в том же приближении были получены значения поправок к величине  $\bar{\varepsilon}$  в зависимости от  $\Delta_n$  и  $\Delta_1$ ; эти поправки могут быть представлены в виде

$$\bar{\varepsilon}_n^{-1} = \frac{\Delta_n}{\Delta_1} f_n(\Delta_1) \cos \varphi_n, \quad (4)$$

где  $f_n(\Delta_1)$  зависит только от  $\Delta_1$ . Из выражения (4) следует, что нечетные гармоники дают наибольший вклад в величину эффекта при  $\varphi = 0$ .

В настоящей работе были проведены вычисления интеграла для четных и нечетных гармоник до седьмого порядка с использованием ЭВМ М-222 и транслятора ТА-1М. Программа составлена на языке «Алгол-60» с использованием библиотеки стандартных программ М-222. Интегралы считались по методу Симпсона с погрешностью, меньшей  $10^{-3}$ . В расчетах задавалось  $\varphi_n = 0$ , чтобы получить максимальную поправку, согласно (4).

Полученные результаты приведены на рис. 1 и 2. По оси абсцисс отложена величина  $\Delta_1$ , а по оси ординат — относительная поправка, равная

$$\gamma_n = \frac{\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_n}{\bar{\varepsilon}}. \quad (5)$$

Как видно из графиков, поправки к резонансному эффекту для

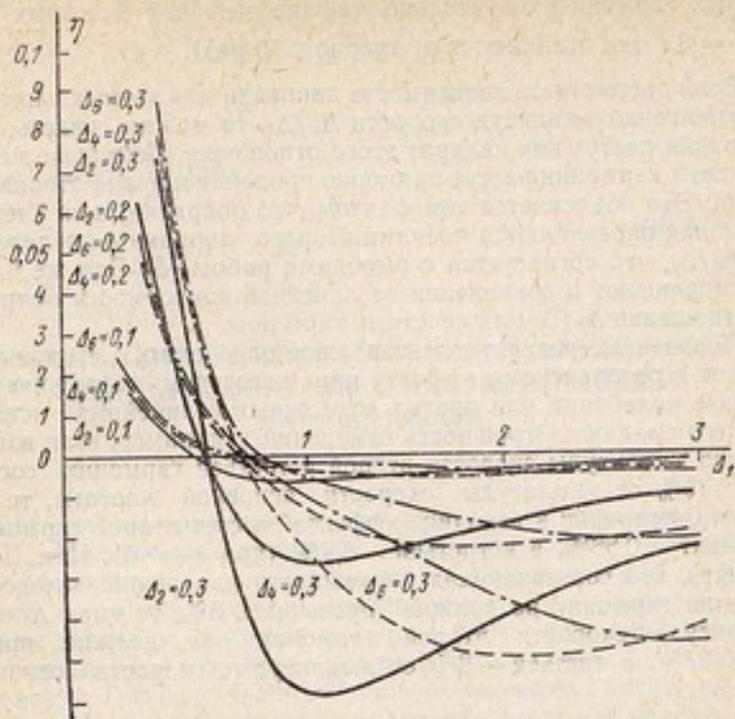


Рис. 1. Относительные поправки к резонансному эффекту для четных гармоник

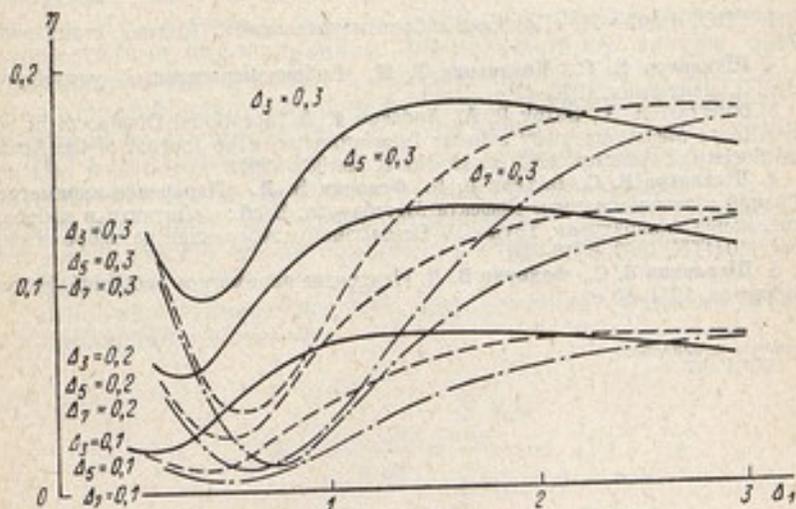


Рис. 2. Относительные поправки к резонансному эффекту для нечетных гармоник

четных гармоник значительно меньше, чем для нечетных (при  $\frac{\Delta_n}{\Delta_1} = 0,1$  они отличаются примерно в 10 раз).

Если рассмотреть зависимость поправки для четных гармоник от отношения амплитуд скорости  $\Delta_n/\Delta_1$ , то можно видеть, что поправки растут как квадрат этого отношения. Поправки же для нечетных гармоник растут примерно пропорционально отношению  $\Delta_n/\Delta_1$ . Это объясняется тем фактом, что поправки для четных гармоник определяются членами второго порядка в разложении по  $\Delta_n/\Delta_1$ , что согласуется с выводами работы [5]. Эти же члены обуславливают и отклонения от линейной зависимости поправок от отношения  $\Delta_n/\Delta_1$  для нечетных гармоник.

Полученные результаты позволяют определить значение поправок к резонансному эффекту при известном гармоническом составе колебаний или предел возможных нелинейных искажений, если задана погрешность измерений. Например, если известно, что амплитуды скорости второй и третьей гармоник составляют 10% от амплитуды скорости основной частоты, то при  $\Delta_1 = 1,0$  поправки к величине эффекта за счет второй гармоники составят — 0,86%, а к третьей — 6,7% (при  $\varphi_n = 0$ ). Или, если принять, что составляющая погрешности измерений вследствие влияния гармоник не должна превышать 5%, то при  $\Delta_1 = 1,0$  амплитуда скорости второй гармоники не должна превышать 27%, а третьей — 8% от амплитуды скорости основной частоты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 16819—71, «Приборы виброизмерительные», Изд-во стандартов, 1971.
2. Шкаликов В. С., Козлякова Т. М. Виброизмерительные устройства, ЛДНТП, Ленинград, 1970. 47 с.
3. Deferrari H. A., Darby R. A., Andrews F. A. Vibrational Displacement and Mode-Shape Measurement by a Laser Interferometer. «The Journal of the Acoustical Society of America», 1967, v. 42, No. 5, pp. 982—991.
4. Шкаликов В. С., Витман В. Д., Федорин В. Л. Измерение параметров вибраций с использованием эффекта Мессбауэра. В сб.: «Датчики и виброизмерительная аппаратура». Труды IV Всесоюзной конференции по виброметрии. Киев, КДНТП, 1969, с. 16—26.
5. Шкаликов В. С., Федорин В. Л. Измерение параметров вибраций, Изд-во стандартов, 1971. 60 с.

Поступила в редакцию  
15/III 1973 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С НЕСТАБИЛЬНЫМИ  
ПАРАМЕТРАМИ

Рассмотрим градуировку измерительного преобразователя (ИП), описываемого линейным дифференциальным уравнением с коэффициентами  $a_k$ , являющимися суммой постоянной  $a_k^0$  и случайной  $a_k$  составляющих. Предположим, что  $a_k$  — малые случайные величины или медленно меняющиеся случайные функции, постоянные в течение времени одного наблюдения  $T_l$ , но изменяющиеся от  $T_l$  к  $T_{l+1}$ . При этом условии индексом  $l$  будем обозначать значения соответствующих величин в  $l$ -м наблюдении. Например,  $a_{kl} = a_k^0 + a_{kl}$  — значение параметров  $a_k$  и  $a_k$  в  $l$ -м наблюдении. Для упрощения выкладок предположим дополнительно, что  $M\{a_{kl}a_{ll}\} = 0$  и  $M\{a_{kl}a_{kl}\} = 0$ , т. е. случайные изменения параметров не коррелированы между собой как внутри одного наблюдения, так и между наблюдениями. В такую схему легко укладывается, например, описание технологического разброса параметров по ансамблю ИП. В этом случае  $l$  — номер экземпляра ИП в выборке из генеральной совокупности. Методика оценки погрешности ИП в такой постановке рассмотрена в работе [1]. Целью настоящей работы является анализ точности определения его динамических характеристик с учетом погрешности средств градуировки.

Для рассматриваемого ИП передаточная функция  $H(p)$  в  $l$ -м наблюдении имеет вид

$$H(p) = \frac{y_l(p)}{x(p)} = \frac{\sum_{k=1}^m b_{kl} p^k}{\sum_{k=1}^n a_{kl} p^k}, \quad (1)$$

что с точностью до малых первого порядка дает

$$H_0(p) = \frac{\sum_{k=1}^m b_k^0 p^k}{\sum_{k=1}^n a_k^0 p^k}, \quad (2)$$

$$\Delta H(p) = \frac{\sum_{k=1}^m \beta_k p^k \sum_{k=1}^n a_k^0 p^k - \sum_{k=1}^m b_k^0 p^k \sum_{k=1}^n \alpha_k p^k}{\left( \sum_{k=1}^n a_k^0 p^k \right)^2},$$

где  $H_0(p)$  — среднее значение передаточной функции,  $\Delta H(p)$  — ее отклонение от своего среднего значения.

Отсюда следует, что с той же точностью среднее значение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) данного ИП есть

$$H_0(\omega) = |H_0(j\omega)| = \frac{\left| \sum_{k=1}^m b_k^0 (j\omega)^k \right|}{\left| \sum_{k=1}^n a_k^0 (j\omega)^k \right|}, \quad (2a)$$

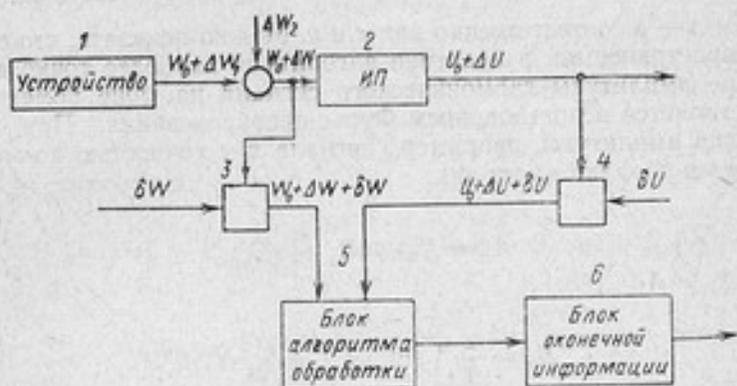
а отклонение АЧХ от своего среднего значения характеризуется ее дисперсией

$$\begin{aligned} \sigma_H^2 &= M \{ \Delta H(j\omega) \Delta H(-j\omega) \} = \\ &= \frac{\sum_{k=1}^m \sigma_{\beta_k \omega^{2k}} \left| \sum_{k=1}^n a_k^0 (j\omega)^k \right|^2 + \left| \sum_{k=1}^m b_k^0 (j\omega)^k \right|^2 \sum_{k=1}^n \sigma_{\alpha_k \omega^{2k}}}{\left| \sum_{k=1}^n a_k^0 (j\omega)^k \right|^4}. \end{aligned} \quad (3)$$

Естественно, что при градуировке ИП погрешности экспериментального определения его динамических характеристик будут зависеть как от погрешностей средств градуировки, так и от нестабильности параметров самого ИП. Типичная структурная схема градуировки ИП представлена на рисунке, где 1 — устройство для задания номинального тестового сигнала  $W_0$ ,  $W_0 + \Delta W_1$  — выходной сигнал устройства с учетом собственных погрешностей;  $\Delta W_2$  — погрешность передачи, возникающая в результате взаимодействия ИП и устройства 1;  $\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2$  — отклонение входного сигнала  $W$  от своего номинального значения  $W_0$ ; 2 — измерительный преобразователь, для которого находится градуировочная характеристика; 3 — средство измерения входного сигнала ИП (его собственная погрешность приводит к погрешности измерения входного сигнала, в результате чего на выходе 3 получаем  $W_0 + \Delta W + \delta W$ ); 4 — средство измерения выходного сигнала ИП:  $U_0 + \Delta U$  (его собственная погрешность приводит к тому, что на выходе 4 сигнал равен  $U_0 + U + \delta U$ ); 5 — блок алгоритма обработки результатов измерения входного и выходно-

го сигналов ИП для получения градуировочной характеристики; 6 — блок оценки точности градуировочной характеристики, получаемой в результате обработки сигналов с 3 и 4 алгоритмом 5.

Для конкретизации рассмотрения обратимся к случаю определения АЧХ — одной из важнейших динамических характеристик ИП, являющейся исчерпывающей для минимально-фазовых систем [2].



Структурная схема градуировки ИП

Как известно [2], экспериментальное определение АЧХ преобразователя сводится к подаче на его вход тестового гармонического сигнала и определению зависимости отношения амплитуд выходного  $y = A_y \sin(\omega t + \varphi - \Theta)$  и входного  $x = A_x \sin(\omega t + \varphi)$  сигналов от частоты  $\omega$ .

Таким образом, оценка значения АЧХ на заданной частоте

$$\hat{H}(\omega) = \frac{A_y}{A_x}. \quad (4)$$

Реализацию этой операции и осуществляет блок 5. Его задачей является определение оценки амплитуд  $A_x$  и  $\tilde{A}_y$  и значения  $\hat{H}(\omega)$  по результатам измерения сигналов  $x$  и  $y$ .

Рассмотрим точность определения АЧХ в предположении, что

$$\begin{aligned} x(t) &= W_0 + \Delta W + \delta W = A \sin(\omega t + \varphi) + \varepsilon [f_x^*(t) + h_x^*(t)] + \\ &\quad + \delta W = A \sin(\omega t + \varphi) + \varepsilon [f_x(t) + h_x(t)]; \\ y(t) &= U_0 + \Delta U + \delta U = A [H_0(\omega) + \Delta H_I(\omega)] \sin(\omega t + \varphi - \Theta) + \\ &\quad + \varepsilon [f_{yI}^*(t) + h_{yI}^*(t)] + \delta U = A [H_0(\omega) + \Delta H_I(\omega)] \sin(\omega t + \\ &\quad + \varphi - \Theta) + \varepsilon [f_{yI}(t) + h_{yI}(t)], \end{aligned}$$

т. е. входной и выходной сигналы представляют собой суммы гармонических сигналов плюс малые по величине (показатель малости — параметр  $\varepsilon$ ) детерминированные  $f_x^*(t)$ ,  $f_{y_l}^*(t)$  и центрированные случайные помехи  $n_x^*(t)$ ,  $n_{y_l}^*(t)$ , плюс погрешности измерения соответствующих сигналов. Здесь индекс  $l$ , как и было условлено, отражает зависимость выходного сигнала ИП от значения его параметров в  $l$ -м наблюдении,  $f(t)$  и  $n(t)$  обозначают периодическую с периодом  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega}$  и случайную составляющие сумм  $\Delta + \delta$  соответственно для  $x$  и  $y$ . Можно показать, что среди распространенных в практике алгоритмов наиболее точно выделение амплитуды гармонического сигнала на фоне помех осуществляется использованием Фурье-преобразования. При этом оценка амплитуды, например сигнала  $x$ , с точностью до малых второго порядка имеет вид

$$\hat{A}_x = X_0 + \varepsilon X_1 + \varepsilon^2 X_2, \quad (5)$$

где  $X_0 = A$ ;

$$X_1 = \frac{2}{T} \int_0^T \sin(\omega t + \varphi) n_x(t) dt;$$

$$X_2 = \frac{2}{AT^2} \int_0^T \int_0^T \cos(\omega t_1 + \varphi) \cos(\omega t_2 + \varphi) n_x(t_1) n_x(t_2) dt_1 dt_2.$$

Сигнал  $y$  имеет ту же структуру, что и  $x$ , и оценка  $\hat{A}_y$ , получаемая Фурье-преобразованием,  $l$ -го наблюдения  $y_l(t)$

$$\begin{aligned} \hat{A}_y = & A [H_0(\omega) + \Delta H_l(\omega)] + \varepsilon \frac{2}{T} \int_0^T \sin(\omega t + \varphi - \Theta) n_{y_l}(t) dt + \\ & + \varepsilon^2 \frac{2}{AT^2 [H_0(\omega) + \Delta H_l(\omega)]} \int_0^T \int_0^T \cos(\omega t_1 + \varphi - \Theta) \times \cos(\omega t_2 + \varphi - \\ & - \Theta) n_{y_l}(t_1) n_{y_l}(t_2) dt_1 dt_2. \end{aligned}$$

Подставляя (5) и (6) в (4) и воспользовавшись

$$\hat{H} = \frac{\hat{A}_y}{\hat{A}_x} = \frac{Y_0}{X_0} + \varepsilon \left( \frac{Y_1}{X_0} - \frac{Y_0 X_1}{X_0^2} \right) + \varepsilon^2 \left( \frac{Y_2}{X_0} - \frac{Y_1 X_1}{X_0^2} - \frac{Y_0 X_2}{X_0^2} + \frac{Y_0 X_1^2}{X_0^3} \right),$$

получим математическое ожидание  $\hat{H}_l$  при сделанных предположениях относительно  $l$  и  $n(t)$ :

$$M\{\hat{H}_t\} = H_0(\omega) + \varepsilon^2 \frac{1}{A^2 T^2} \left\{ \frac{2}{H_0} \int_0^T \int_0^T \cos(\omega t_1 + \varphi - \Theta) \cos(\omega t_2 + \varphi - \Theta) \times K_{\text{нуну}}(t_1 - t_2) dt_1 dt_2 - 4 \int_0^T \int_0^T \sin(\omega t_1 + \varphi - \Theta) \sin(\omega t_2 + \varphi - \Theta) \times K_{\text{нуну}}(t_1 - t_2) dt_1 dt_2 - 2H_0 \int_0^T \int_0^T \cos(\omega t_1 + \varphi) \times \cos(\omega t_2 + \varphi) K_{\text{нхнх}}(t_1 - t_2) dt_1 dt_2 + 4H_0 \int_0^T \int_0^T \sin(\omega t_1 + \varphi) \sin(\omega t_2 + \varphi) K_{\text{нхнх}}(t_1 - t_2) dt_1 dt_2 \right\},$$

и дисперсию оценки

$$D\{\hat{H}_t\} = \varepsilon^2 \sigma_H^2 + \varepsilon^2 \frac{4}{A^2 T^2} \left\{ \int_0^T \int_0^T \sin(\omega t_1 + \varphi - \Theta) \sin(\omega t_2 + \varphi - \Theta) \times K_{\text{нуну}}(t_1 - t_2) dt_1 dt_2 - 2H_0 \int_0^T \int_0^T \sin(\omega t_1 + \varphi - \Theta) \times \sin(\omega t_2 + \varphi) K_{\text{нуну}}(t_1 - t_2) dt_1 dt_2 + H_0^2 \int_0^T \int_0^T \sin(\omega t_1 + \varphi) \sin(\omega t_2 + \varphi) K_{\text{нхнх}}(t_1 - t_2) dt_1 dt_2 \right\}. \quad (8)$$

Как следует из выражений (7) и (8), нестабильность средств градуировки (устройств воспроизведения тестового сигнала и измерительных устройств входного и выходного сигнала ИП) приводит к смещенности оценок (7) и увеличению их разброса (8).

Обратимся теперь к вопросу о необходимости для заданной точности градуировки (в нашем случае — точности определения среднего значения АЧХ на частоте  $\omega$ ) соотношения между погрешностью средств градуировки и погрешностью ИП. Для выяснения сущности проблемы рассмотрим крайний случай — отсутствие погрешностей средств градуировки.

Тогда

$$M\{\hat{H}\} = H_0 \text{ и } D\{\hat{H}\} = \varepsilon^2 \sigma_H^2.$$

Найдем такую оценку  $\bar{H}$ , чтобы она с заданной вероятностью попадала в интервал  $[H_0 \pm \delta H]$ , где  $H_0$  — истинное среднее,  $\delta H$  — требуемая точность градуировки. Если за  $\bar{H}$  принять  $\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{H}_i$ , то  $\bar{H}$  будет асимптотически нормальной

случайной величиной с дисперсией  $D\{\bar{H}\} = \frac{D\{H\}}{N}$ . Отсюда, за-

даваясь уровнем доверительной вероятности, известными приемами легко определяется  $N$  — количество наблюдений, необходимое для получения при заданном  $D\{H\}$  оценки  $H_0$  с требуемой точностью. Таким образом, даже при отсутствии погрешностей средств градуировки фактический разброс значений АЧХ от наблюдения к наблюдению (или от одного экземпляра ИП к другому, см. выше) приводит к необходимости усреднения по  $N$  наблюдениям при оценивании генерального среднего  $H_0$ .

Другой крайний случай — отсутствие погрешности ИП, вызванной нестабильностью его параметров  $D\{H\}$ . Тогда получаемые

оценки  $\hat{H}$  смещены и их разброс определяется только погрешностями средств градуировки. Для аттестованных средств градуировки на основе (7) можно ввести поправку на смещенность оценок и далее решать задачу аналогично предыдущему случаю.

В общем случае при заданном допустимом количестве наблюдений  $N$  для получения  $\bar{H}$  вопрос о допустимом соотношении между погрешностями средств градуировки и градуируемого ИП решается по следующей схеме. Задаваясь законом распределения

$\hat{H}$  (изучая его экспериментально или, как часто делается, предполагая его нормальность), получают закон распределения

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{H}_i \quad (N \text{ — задано})$$
 и по заданному интервалу  $[H_0 \pm \delta H]$

и требуемому уровню доверительной вероятности находят допустимое значение  $D\{\bar{H}\}$ . Поскольку  $D\{\bar{H}\} = \frac{D\{\hat{H}\}}{N}$ , то из допу-

стимого  $D\{\hat{H}\} = ND\{\bar{H}\}$  и известного  $D\{H\}$  легко определяется допустимый уровень погрешностей средств градуировки, либо по известному уровню погрешностей средств градуировки и допустимой  $D\{\bar{H}\}$  определяется граничная  $D\{H\}$ , для которого при заданном  $N$  градуировка еще может быть проведена с требуемой точностью (при этом следует иметь в виду, что  $D\{\bar{H}\}$  может быть назначена разумно только с учетом величины  $D\{H\}$ ).

В полной постановке задача о необходимом соотношении погрешностей средств градуировки и градуируемого ИП перерастает рамки чисто технической. Необходимая точность градуировки ИП может быть достигнута как уменьшением погрешностей средств градуировки (что естественным образом влечет за собой удорожание этих средств), так и увеличением  $N$  — числа наблюдений для получения оценки, что также удорожает градуировку ИП. Каким путем обеспечивать требуемую точность градуировки (удорожанием устройства при неизменном  $N$ , либо увеличением  $N$  при неизменном устройстве), чтобы при этом мини-

мизировать стоимость градуировки — это уже вопрос экономического анализа конкретной ситуации.

Проведенный анализ и полученные формулы позволяют обоснованно подходить к выбору соотношения между погрешностями средств градуировки и погрешностью градуируемого ИП, вызванной нестабильностью его параметров при заданной точности определения его динамических характеристик. Приведенные выражения могут служить как для оценок погрешности градуировки, так и для внесения в случае необходимости соответствующих поправок при эксплуатации устройств для определения амплитудно-частотных характеристик измерительных преобразователей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пелливец В. С., Тихонов О. Н. Об оценке погрешности измерительных преобразователей от нестабильности параметров. «Измерительная техника», 1968, № 9, т. 30—32.
2. Основы автоматического управления. Под ред. В. С. Пугачева. «Наука», 1967, 680 с.

Поступила в редакцию  
15/III 1973 г.

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ГРАДУИРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НА ДВОЙНОЙ ЦЕНТРИФУГЕ

Двойная центрифуга (ДЦ), как средство воспроизведения низкочастотных (по гармоническому закону) линейных ускорений в диапазоне ускорений, больших  $1g$ , и частот от долей до десятков герц, является практически единственным средством динамической градуировки\* акселерометров [1—3]. В этом смысле ДЦ выгодно отличается от линейных вибростендов и, кроме того, превосходит их по точности [2]. В то же время ДЦ обладает особенностью, присущей центробежным методам воспроизведения линейных ускорений, — неоднородностью по радиусу поля ускорений. Это может привести к погрешности передачи ускорения градуируемому прибору из-за неопределенности положения центра инерции и перемещения его чувствительного элемента, и, в конечном счете, к погрешности градуировки [1, 4].

Ускорение, воспроизводимое ДЦ, описывается следующим образом [1—3]:

$$a(t) = (\omega + \Omega)^2 r + \Omega^2 R \cos \omega t, \quad (1)$$

где  $R, \Omega$  — радиус и угловая скорость ротора;  $\omega$  — угловая скорость поворотного стола;  $r$  — расстояние от оси поворотного стола до центра инерции чувствительного элемента акселерометра. В режиме работы ДЦ без постоянной составляющей расстояние  $r$  складывается обычно из двух частей

$$r = \Delta r + x(t);$$

где  $\Delta r$  — ошибка совмещения центра инерции чувствительного элемента с осью вращения поворотного стола;  $x(t)$  — переме-

\* Здесь под динамической градуировкой понимается экспериментальное определение амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик.

ние чувствительного элемента под действием приложенного ускорения. Таким образом, дополнительное ускорение

$$\Delta a(t) = (\omega + \Omega)^2 [\Delta r + x(t)] \quad (2)$$

можно отнести к погрешности передачи, которая зависит как от технических параметров ДЦ, так и от свойств градуируемого прибора. Для линейных приборов, для которых строго определены понятия АЧХ и ФЧХ, перемещение  $x(t)$  для акселерометра, установленного на ДЦ, можно представить в виде

$$x(t) = \overline{\Delta x} + A \cos(\omega t - \varphi), \quad (3)$$

где  $A, \varphi$  — амплитуда и фаза переменной составляющей перемещения;  $\overline{\Delta x}$  — постоянная составляющая перемещения.

Рассмотрим погрешности передачи по амплитуде  $\Delta a_0$ , фазе  $\Psi$  и постоянной составляющей  $\overline{\Delta a}$  ускорения. Используя (2) и (3), действующее ускорение (1) можно представить как

$$a(t) = \overline{\Delta a} + (\Omega^2 R + \Delta a_0) \cos(\omega t - \psi), \quad (4)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \overline{\Delta a} &= (\omega + \Omega)^2 (\Delta r + \overline{\Delta x}); \quad \operatorname{tg} \psi = \frac{(\omega + \Omega)^2 A \sin \varphi}{\Omega^2 R + (\omega + \Omega)^2 A \cos \varphi}, \\ \Omega^2 R + \Delta a_0 &= \sqrt{\Omega^4 R^2 + 2\Omega^2 R (\omega + \Omega)^2 A \cos \varphi + (\omega + \Omega)^4 A^2}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Таким образом, при использовании ДЦ для динамической градуировки акселерометров возникает необходимость:

1) оценить погрешность передачи и градуировки приборов на ДЦ;

2) очертить область применения ДЦ без учета систематических погрешностей, т. е. выяснить, какие приборы, с какими характеристиками могут быть отградуированы на ДЦ с требуемой точностью;

3) разработать методы исключения систематических погрешностей градуировки.

Для решения перечисленных задач (даже приближенно) не обойтись без привлечения определенных представлений о структуре (модели) градуируемого прибора, поскольку погрешность передачи зависит от свойств последнего.

Рассмотрим широкий класс акселерометров, представляющих собой линейные системы достаточно общего вида. Положим, что выходной сигнал акселерометра  $U$  пропорционален с коэффициентом  $k_0$  перемещению  $x(t)$ , а механическая часть прибора описывается линейным дифференциальным уравнением произвольного порядка  $n$  с постоянными коэффициентами  $c_k$

$$U = k_0 x; \quad \sum_{k=1}^n c_k \frac{d^k x(t)}{dt^k} = a(t), \quad (6)$$

Используя эту модель акселерометра, найдем сначала погрешность передачи постоянной составляющей ускорения. Уравнение (6) с учетом (5) в статике имеет вид

$$\omega_0^2 \overline{\Delta x} = \overline{\Delta a} = (\omega + \Omega)^2 (\Delta r + \overline{\Delta x}). \quad (7)$$

Следовательно,

$$\overline{\Delta x} = \frac{(\omega + \Omega)^2 \Delta r}{\omega_0^2 - (\omega + \Omega)^2}; \quad \overline{\Delta a} = \frac{\omega_0^2 (\omega + \Omega)^2 \Delta r}{\omega_0^2 - (\omega + \Omega)^2}, \quad (8)$$

где обозначено  $c_1 = \omega_0^2$ ;  $\omega_0$  — частота свободных колебаний. Из (8) видно, что  $\overline{\Delta a} = 0$  при  $\omega + \Omega = 0$ , т. е. при вращении ротора и поворотного стола в противоположные стороны с равными угловыми скоростями. Однако в этом случае амплитуда задаваемого ускорения становится жестко связанной с частотой, что ограничивает использование ДЦ. Из этих же соотношений вытекает и принципиальное ограничение применения ДЦ из-за потери устойчивости чувствительного элемента в области угловых скоростей  $\omega_0^2 \leq (\omega + \Omega)^2$ . Таким образом, область применения ДЦ ограничена частотным диапазоном

$$0 \leq \omega < \omega_0 \pm \Omega. \quad (9)$$

Для определения погрешности передачи по амплитуде и фазе найдем связь динамических характеристик акселерометра, полученных при градуировке на ДЦ без учета погрешностей передачи, с их фактическими характеристиками. Установившееся движение чувствительного элемента под действием ускорения может быть выражено через интеграл Дюамеля

$$x(t) = \int_0^t G(\tau) a(t - \tau) d\tau, \quad (10)$$

где  $G(\tau)$  — весовая функция механической части акселерометра. Если подставить в (10)  $a = (\omega + \Omega)^2 x(t) + \Omega^2 R e^{i\omega t}$  и искать решение в виде  $x(t) = \Omega^2 R W(i\omega) e^{i\omega t}$ , то получим

$$W(i\omega) = (\omega + \Omega)^2 W(i\omega) W_0(i\omega) + W_0(i\omega). \quad (11)$$

Здесь  $W(i\omega)$  — комплексная частотная характеристика (КЧХ) механической части акселерометра, определенная на ДЦ в предположении, что амплитуда ускорения есть  $\Omega^2 R$ ,  $W_0(i\omega) = \int_0^t G(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$  — фактическая КЧХ. Следовательно,

$$W(i\omega) = \frac{W_0(i\omega)}{1 - (\omega + \Omega)^2 W_0(i\omega)}. \quad (12)$$

Из (12) видно, что при  $\omega = -\Omega$ , т. е. при работе ДЦ в режиме вибростенда,  $W(i\omega) = W_0(i\omega)$  и динамические свойства прибора определяются без искажений.

Введем в рассмотрение приведенные КЧХ

$$\tilde{W}(i\omega) = \frac{W(i\omega)}{W(0)}; \tilde{W}_0(i\omega) = \frac{W_0(i\omega)}{W_0(0)}. \quad (13)$$

Для принятой модели акселерометра его приведенная КЧХ совпадает с приведенной КЧХ механической части. Используя (12), а также очевидное  $W_0(0) = \frac{1}{\omega_0^2}$  и  $W_0(i\omega) = W_0(0)\tilde{W}_0(i\omega)$ ,

для  $\tilde{W}(i\omega)$  имеем

$$\tilde{W}(i\omega) = \frac{\omega_0^2 - \Omega^2}{\omega_0^2} \cdot \frac{\tilde{W}_0(i\omega)}{1 - \frac{(\omega + \Omega)^2}{\omega_0^2} \tilde{W}_0(i\omega)}. \quad (14)$$

Из (14) находим связь измеренных ФЧХ ( $\varphi$ ) и приведенной АЧХ ( $\tilde{A}$ ) с фактическими ФЧХ ( $\varphi_0$ ) и приведенной АЧХ ( $\tilde{A}_0$ ) акселерометра

$$\left. \begin{aligned} \tilde{A}(\omega) &= \frac{\alpha_1 \tilde{A}_0(\omega)}{\sqrt{1 - 2\beta_1 \tilde{A}_0 \cos \varphi_0 + \beta_1^2 \tilde{A}_0^2}}; \\ \varphi(\omega) &= \arctg \left( \frac{\sin \varphi_0}{\cos \varphi_0 - \beta_1 \tilde{A}_0} \right), \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где обозначено  $\alpha_1 = \frac{\omega_0^2 - \Omega^2}{\omega_0^2}$ ;  $\beta_1 = \frac{(\omega + \Omega)^2}{\omega_0^2}$ .

При выводе (15) было использовано, что АЧХ есть модуль, а ФЧХ — аргумент КЧХ.

Для получения связи погрешности передачи с измеренными характеристиками акселерометра перейдем в (5) к приведенным величинам

$$\left. \begin{aligned} \delta_A(\omega) &= \frac{\Delta a_0}{\Omega^2 R} = \sqrt{1 + 2\gamma_1 \tilde{A} \cos \varphi + \gamma_1^2 \tilde{A}^2 - 1}; \\ \psi &= \arctg \left( \frac{\gamma_1 \tilde{A} \sin \varphi}{1 + \gamma_1 \tilde{A} \cos \varphi} \right), \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где обозначено  $\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\alpha_1} = \frac{(\omega + \Omega)^2}{\omega_0^2 - \Omega^2}$ ;  $\delta_A(\omega)$  — относительная по-

грешность передачи амплитуды и использовано  $\frac{A}{\Omega^2 R} = \frac{\tilde{A}}{\omega_0^2 - \Omega^2}$ .

Численные оценки погрешностей передачи по формулам (16) могут быть получены только после проведения соответствующих экспериментов. Однако не менее важно заранее иметь представление о величинах погрешности передачи, для чего следует вы-

разить их через фактические АЧХ и ФЧХ акселерометра. После подстановки (15) в (16) получим искомые соотношения

$$\left. \begin{aligned} \delta_A &= \frac{1}{\sqrt{1 - 2\beta_1 \tilde{A}_0 \cos \varphi_0 + \beta_1^2 \tilde{A}_0^2}} - 1; \\ \psi &= \operatorname{arctg} \left( \frac{\beta_1 \tilde{A}_0 \sin \varphi_0}{1 - \beta_1 \tilde{A}_0 \cos \varphi_0} \right). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Формулы (17) можно использовать для определения области применения ДЦ, где погрешность передачи не превосходит некоторого малого значения  $\delta_A \leq \varepsilon$  по амплитуде и  $\psi \leq \lambda$  по фазе (в радианах). Для этого  $\beta_1 = \frac{(\omega + \Omega)^2}{\omega_0^2}$  должно быть мало ( $\beta_1 \ll 1$ ) и в первом приближении области применения ДЦ можно определить как

$$\beta_1 < \frac{E}{\tilde{A}_0 \cos \varphi_0} \quad (\text{АЧХ}) \quad \beta_1 < \frac{\lambda}{\tilde{A}_0 \sin \varphi_0} \quad (\text{ФЧХ}). \quad (18)$$

Например, если погрешность передачи амплитуды не должна превосходить 1% ( $E = 0,01$ ), то, поскольку на начальном участке АЧХ  $\tilde{A}_0 \cos \varphi_0 \approx 1$ , а  $\Omega \ll \omega$ , условие принимает вид  $\omega < 0,1\omega_0$ , т. е. процентная точность градуировки может быть достигнута в диапазоне частот от 0 до  $0,1\omega_0$ .

Полученные выше соотношения можно использовать для исключения погрешностей градуировки, обусловленных систематическими погрешностями передачи и, следовательно, существенно расширить частотный диапазон динамической градуировки акселерометров на ДЦ. Для этого следует из (14) выразить  $\tilde{W}_0$  через  $\tilde{W}$

$$\tilde{W}_0(i\omega) = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \Omega^2} \cdot \frac{\tilde{W}}{1 + \frac{(\omega + \Omega)^2}{\omega_0^2 - \Omega^2} \tilde{W}}, \quad (19)$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} \tilde{A}_0(\omega) &= \frac{a_2 \tilde{A}}{\sqrt{1 + 2\beta_2 \tilde{A} \cos \varphi + \beta_2^2 \tilde{A}^2}}; \\ \varphi_0(\omega) &= \operatorname{arctg} \left( \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi + \beta_2 \tilde{A}} \right), \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где обозначено  $a_2 = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \Omega^2}$ ;  $\beta_2 = \frac{(\omega + \Omega)^2}{\omega_0^2 - \Omega^2}$ .

По формулам (18) можно перейти от измеренных приведенной АЧХ и ФЧХ к фактическим приведенной АЧХ и ФЧХ акселерометра.

Параметр акселерометра  $\omega_0^2$ , фигурирующий в целом ряде формул, может быть экспериментально определен следующим образом. В статике, при вращении только поворотного стола и установке акселерометра на некотором расстоянии  $r_0$  от оси вращения, постоянный выходной сигнал  $U_0$  акселерометра на угловой скорости  $\omega$  согласно (6) и (8) имеет вид

$$U_0 = k_0 \frac{\omega^2 r_0}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (21)$$

При двух различных угловых скоростях  $\omega = \omega_1$  и  $\omega = \omega_2$  выходные сигналы соответственно равны

$$U_{01} = k_0 \frac{\omega_1^2 r_0}{\omega_0^2 - \omega_1^2}; \quad U_{02} = k_0 \frac{\omega_2^2 r_0}{\omega_0^2 - \omega_2^2}. \quad (22)$$

Из системы (22) выражаем  $\omega_0^2$  через измеренные и заданные величины

$$\omega_0^2 = \frac{(U_{01} - U_{02}) \omega_1^2 \omega_2^2}{U_{01} \omega_2^2 - U_{02} \omega_1^2}. \quad (23)$$

В заключение отметим, что полученные формулы оценок погрешностей передачи параметров ускорения и алгоритм обработки экспериментальных данных могут быть использованы для расширения частотной области применения ДЦ и повышения точности динамической градуировки акселерометров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Smith R. O., Willis E. A., Hitter J. S. A dual centrifuge for generating low-frequency sinusoidal acceleration. «J. Res. Nat. Bur. Standards», 1962, No. 4, pp. 357—362.
2. Синеельников А. Е., Блантер Б. Э. Градуировка и проверка низкочастотных акселерометров. Серия: «Приборы и устройства радиоэлектронной техники и автоматики». Л., ЛДНТП, 1971. 28 с.
3. Лебедев В. И. Некоторые динамические погрешности при тарировке датчиков линейных ускорений на двойной центрифуге. В сб.: Труды ЛПИ, № 314, 1970. с. 112—114.
4. Синеельников А. Е. Вопросы проверки низкочастотных акселерометров. «Измерительная техника», № 5, 1968, с. 89—90.

Поступила в редакцию  
15/III 1973 г.

### ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ МЕТОДАМИ СРАВНЕНИЯ С УГЛОВОЙ СКОРОСТЬЮ ЗЕМЛИ

Разработанные методы измерения малых угловых скоростей стабилизированных платформ основаны на сравнении измеряемой величины с естественной мерой угловой скорости — с соответствующей проекцией скорости вращения Земли. Основные параметры данной меры: максимальное значение —  $7,3 \cdot 10^{-5}$  рад/с, относительная погрешность —  $10^{-6}\%$ , угловое отклонение от оси Мира, приводящее к изменению воспроизводимой мерой угловой скорости на  $5 \cdot 10^{-9}$  рад/с, —  $13,3''$ , линейное перемещение от экватора, соответствующее тому же изменению меры, — 425 м.

Рассмотрим вначале два метода измерения абсолютных скоростей платформ.

1. Устройство для измерения абсолютной угловой скорости одноосной стабилизированной платформы, реализующее первый метод (рис. 1), включает в себя горизонтальные направляющие 1, которые ориентированы по меридиану. Платформа 2, скорость которой измеряется, установлена на столе 4. Стол может перемещаться относительно направляющих. Величина линейного перемещения отсчитывается по шкале. При измерении абсолютной угловой скорости платформы 2 относительно вертикальной оси стол 4 с платформой 2 перемещается вдоль направляющих 1 до тех пор, пока вертикальная составляющая угловой скорости Земли не будет равна измеряемой скорости.

При равенстве скоростей показания автоколлиматора 3, который работает в режиме нуль-индикатора, остаются неизменными. В этом случае измеряемая угловая скорость находится из условия

$$\omega = \Omega \cdot \sin \varphi,$$

где  $\Omega$  — угловая скорость вращения Земли;  $\varphi$  — широта места установки платформы.

При вертикальной ориентации оси платформы измерение весьма малых  $\omega$  целесообразно производить в районе экватора. В этом случае с достаточной для практики точностью можно положить

$$\omega = \Omega \frac{l}{R},$$

где  $R$  — радиус Земли;  $l$  — линейное перемещение стола, отсчитываемого от экватора.

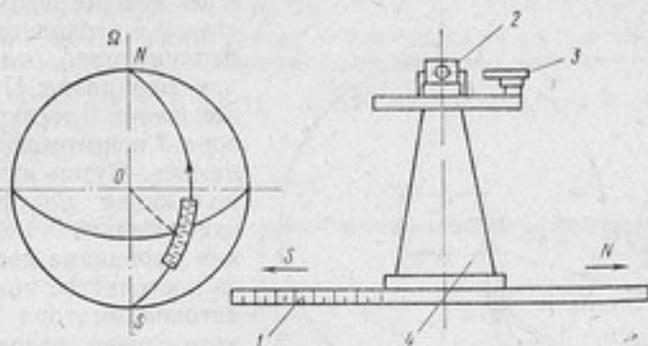


Рис. 1. Схема измерения абсолютной угловой скорости первым методом

Систематические погрешности данного метода связаны главным образом с погрешностями горизонтирования. При использовании имеющихся в настоящее время уровней, погрешность которых составляет  $0,5''$ , систематическая погрешность метода может быть уменьшена до  $4 \cdot 10^{-5}$  в 1 с. Случайные погрешности метода в основном определяются вибрацией фундамента и величиной порога чувствительности автоколлиматора. Если принять специальные меры защиты от вибраций и применить автоколлиматоры с порогом чувствительности  $0,001''$ , то среднеквадратическое значение случайной погрешности может быть уменьшено до  $3 \cdot 10^{-5}$  в 1 с.

Данный метод можно применить также и в средних широтах, если наклонить ось платформы на постоянный угол  $\varphi_0$  в меридиональной плоскости. Угол  $\varphi_0$  при этом равен широте точки, относительно которой измеряется перемещение платформы вдоль направляющих. Значение измеряемой угловой скорости для данного случая находится из выражения

$$\omega = \Omega \sin(\varphi - \varphi_0) = \Omega \left( \frac{l}{R} \cos \varphi_0 - \sin \varphi_0 \cos \varphi \right)$$

(здесь  $l$  отсчитывается от параллели  $\varphi = \varphi_0$ ).

2. Во втором методе компенсация величины  $\omega$  осуществляется посредством наклона оси одноосной платформы относительно вектора угловой скорости Земли. Устройство, реализующее данный метод (рис. 2), включает в себя образцовый исходный азимут, закрепленный мирами  $M_N$  и  $M_S$ , устройство привязки — автоколлимационный теодолит 1, прецизионное поворотное устройство — оптическую делительную головку 2, исследуемую платформу 4, автоколлиматор 3. В исходном положении ось ста-

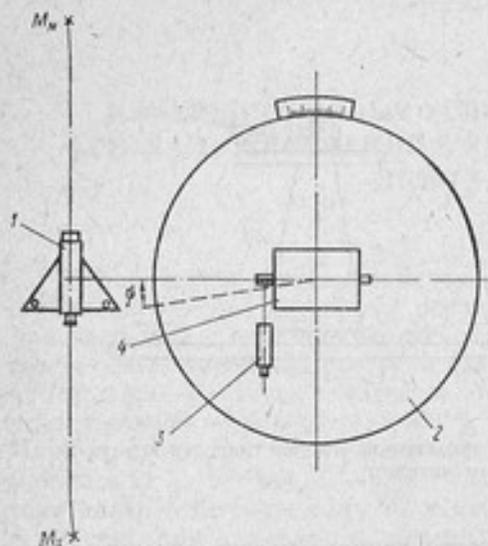


Рис. 2. Схема измерения абсолютной угловой скорости вторым методом

близации платформы 4 устанавливается с помощью поворотного устройства 2 и теодолита 1 перпендикулярно направлению меридиана. При этом показания автоколлиматора 3 непрерывно изменяются. Путем изменения положения платформы 4 относительно направления меридиана достигается постоянство показаний автоколлиматора 3. В этом случае угловая скорость находится из условия

$$\omega = \Omega \sin \psi,$$

где  $\psi$  — угол поворота платформы относительно плоскости первого вертикала.

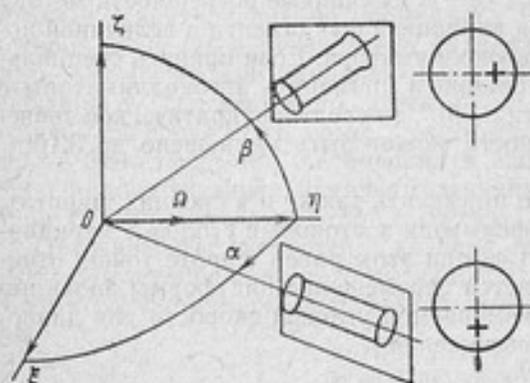


Рис. 3. Схема измерения угловой скорости третьим методом

Систематические погрешности данного метода определяются в основном ошибками определения и хранения исходного азимута. При достижимой в настоящее время времени погрешности 1–3" систематическая ошибка метода составит  $1-2 \cdot 10^{-4}''$  в 1 с. Случайные погрешности метода находятся на уровне случайных погрешностей предыдущего метода.

3. Третий метод позволяет измерять составляющие  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  малой угловой скорости трехосной платформы в двух любых взаимно перпендикулярных меридианальных плоскостях одновременно. Пусть оптическая ось автоколлиматора (рис. 3) ориентирована по оси Мира, а на платформе, перпендикулярно его оптической оси, установлено зеркало. В этом случае с помощью автоколлиматора можно измерить угол поворота платформы относительно инерциальной системы координат. Разность двух отсчетов, деленная на время, — абсолютная скорость платформы в одной из меридианальных плоскостей. Систематические погрешности измерения этой скорости, обусловленные погрешностями автоколлиматора, можно практически исключить поворотом автоколлиматора в плоскости, перпендикулярной к его плоскости измерений, на углы  $\alpha$  и  $\beta$ . В случае малых значений  $\delta_1$  при достижении равенства

$$\dot{\delta}_1 \approx (\Omega + \delta_3) \alpha$$

( $\delta_3$  — проекция угловой скорости платформы на ось Мира)

или

$$\alpha \approx \frac{\dot{\delta}_1}{\Omega + \delta_3} \approx \frac{\dot{\delta}_1}{\Omega}$$

показания автоколлиматора остаются неизменными. В этот момент угол поворота автоколлиматора, например  $\alpha$ , при малых его значениях пропорционален  $\delta_1$ . Постоянство коэффициента пропорциональности объясняется стабильностью угловой скорости Земли и малостью  $\delta_3$  по сравнению с ней. Аналогичным образом производятся измерения второй составляющей измеряемой скорости.

Систематические погрешности метода определяются в основном погрешностью ориентации оптических осей автоколлиматоров относительно оси Мира, а случайные — погрешностями автоколлиматоров и имеют один и тот же порядок с погрешностями второго метода.

#### Измерение угловой скорости с использованием двухкоординатного автоколлиматора

Выберем неподвижную относительно земных ориентиров прямоугольную систему координат  $O\xi\eta\zeta$ , оси которой направим следующим образом: ось  $O\xi$  по оси Мира, ось  $O\eta$  совместим с плоскостью горизонта с востока на запад. Оставаясь неподвижной относительно земных ориентиров, координатная система  $O\xi\eta\zeta$  будет участвовать во вращении Земли.

С зеркалом, установленным на платформе, свяжем координатную систему  $OXYZ$ , ее положение относительно системы коор-

динат  $O\xi\eta\zeta$  определим двумя углами  $\delta_1$  и  $\delta_2$  (рис. 4). Проекции  $\omega_\xi$ ,  $\omega_\eta$ ,  $\omega_\zeta$  угловой скорости зеркала на оси  $O\xi$ ,  $O\eta$  и  $O\zeta$  имеют вид

$$\omega_\xi = \dot{\delta}_2 \sin \delta_1, \quad \omega_\eta = \dot{\delta}_1, \quad \omega_\zeta = \dot{\delta}_2 \cos \delta_1. \quad (1)$$

С двухкоординатным автоколлиматором свяжем прямоугольную систему координат  $OX_1Y_1Z_1$  и определим ее положение относительно координат  $O\xi\eta\zeta$  тремя углами:  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  и  $\gamma_1$  (рис. 5). Тогда проекции  $q_1$  и  $r_1$  угловых скоростей  $\omega_\xi$ ,  $\omega_\eta$  и  $\omega_\zeta$  на измерительной оси автоколлиматора без учета часового угла определяются следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= [\omega_\eta \cos \beta_1 - (\omega_\xi + \Omega) \cos \alpha_1 - \omega_\xi \sin \alpha_1] \cdot \\ &\quad \cdot \sin \beta_1 \cos \gamma_1 + [\omega_\xi \cos \alpha_1 + (\omega_\xi + \Omega) \cdot \\ &\quad \cdot \sin \alpha_1] \cdot \sin \gamma_1 \\ r_1 &= [\omega_\xi \cos \alpha_1 + (\omega_\xi + \Omega) \cdot \sin \alpha_1] \cdot \cos \gamma_1 - \\ &\quad - [\omega_\eta \cos \beta_1 - (\omega_\xi + \Omega) \cdot \cos \alpha_1 - \omega_\xi \cdot \\ &\quad \cdot \sin \alpha_1] \cdot \sin \beta_1 \sin \gamma_1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Подставляя в (2) выражения (1), получим

$$\begin{aligned} q_1 &= \dot{\delta}_1 \cdot \cos \beta_1 \cdot \cos \gamma_1 + \dot{\delta}_2 (\cos \delta_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot \cos \gamma_1 + \\ &+ \cos \delta_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \gamma_1) + \dot{\delta}_2 \cdot \sin \delta_1 (-\cos \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot \cos \gamma_1 + \\ &+ \sin \alpha_1 \cdot \sin \gamma_1) + \Omega (\sin \alpha_1 \cdot \sin \gamma_1 - \cos \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot \cos \gamma_1); \\ r_1 &= -\dot{\delta}_1 \cdot \cos \beta_1 \cdot \sin \gamma_1 + \dot{\delta}_2 (\cos \delta_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \gamma_1 - \\ &- \cos \delta_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot \sin \gamma_1) + \dot{\delta}_2 \cdot \sin \delta_1 (\sin \alpha_1 \cdot \cos \gamma_1 + \\ &+ \cos \alpha_1 \sin \beta_1 \cdot \sin \gamma_1) + \Omega (\sin \alpha_1 \cdot \cos \gamma_1 + \cos \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot \sin \gamma_1). \end{aligned}$$

Принимая во внимание малость величин  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и обозначив

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \beta_1 \cdot \cos \gamma_1, \\ a_{12} &= \sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot \cos \gamma_1 + \cos \alpha_1 \cdot \sin \gamma_1, \\ b_1 &= (\sin \alpha_1 \cdot \sin \gamma_1 - \cos \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot \cos \gamma_1) \Omega, \\ a_{21} &= -\cos \beta_1 \cdot \sin \gamma_1, \\ a_{22} &= \cos \alpha_1 \cdot \cos \gamma_1 - \sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot \sin \gamma_1, \\ b_2 &= \Omega (\sin \alpha_1 \cdot \cos \gamma_1 + \cos \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot \sin \gamma_1), \end{aligned}$$

выражение (2) перепишем в виде

$$\begin{aligned} q_1 &= a_{11} \dot{\delta}_1 + a_{12} \dot{\delta}_2 + b_1, \\ r_1 &= a_{21} \dot{\delta}_1 + a_{22} \dot{\delta}_2 + b_2. \end{aligned}$$

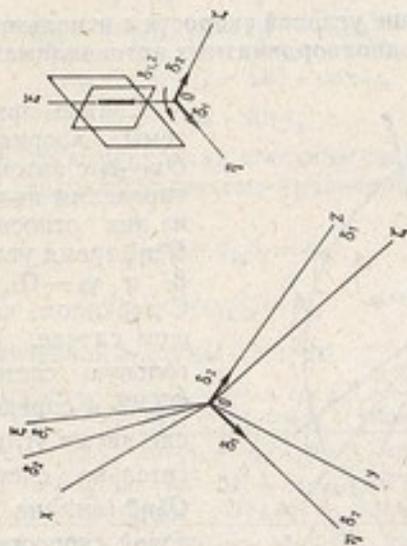


Рис. 4. Положение платформы относительно неподвижной системы координат при использовании одного двухкоординатного автоколлиматора

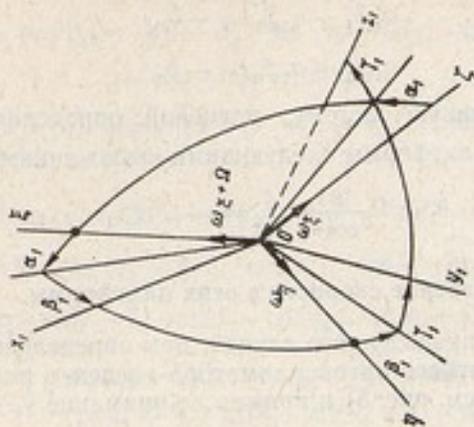


Рис. 5. Положение автоколлиматора относительно подвижной системы координат

При условии полной компенсации скорости трехосной платформы составляющей угловой скорости Земли  $g_1 = 0$  и  $r_1 = 0$   
Тогда

$$a_{11}\dot{\delta}_1 + a_{12}\dot{\delta}_2 = -b_1,$$

$$a_{12}\dot{\delta}_1 + a_{22}\dot{\delta}_2 = -b_2.$$

Решая полученную систему уравнений, определим значения скорости  $\dot{\delta}_1$  и  $\dot{\delta}_2$  платформы следующими выражениями:

$$\dot{\delta}_1 = \Omega \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\cos \alpha_1}; \quad \dot{\delta}_2 = -\Omega \operatorname{tg} \alpha_1.$$

### Измерение скорости в осях платформы

В отличие от предыдущего случая, при определении положения двухкоординатного автоколлиматора введем в рассмотрение часовой угол  $\Omega t$  (см. рис. 5) и примем во внимание  $\gamma_1$ . Тогда

$$\dot{\delta}_1 = \Omega \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\cos \alpha_1} \cos(\gamma_1 - \Omega t) + \Omega \operatorname{tg} \alpha_1 \sin(\gamma_1 - \Omega t),$$

$$\dot{\delta}_2 = \Omega \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\cos \alpha_1} \sin(\gamma_1 - \Omega t) - \Omega \operatorname{tg} \alpha_1 \cos(\gamma_1 - \Omega t).$$

### Измерение угловой скорости с использованием двух однокоординатных автоколлиматоров

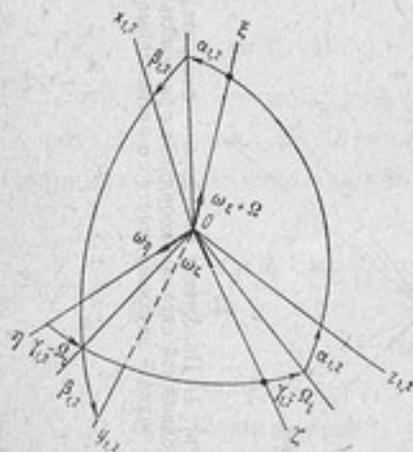


Рис. 6. Положение автоколлиматора относительно неподвижной системы координат при использовании двух однокоординатных автоколлиматоров

Свяжем прямоугольные системы координат  $Ox_1y_1z_1$  и  $Ox_2y_2z_2$  с автоколлиматорами и определим положение каждого из них относительно системы  $O\xi\eta\zeta$  тремя углами:  $\gamma_1 - \Omega t$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  и  $\gamma_2 - \Omega t$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$  (рис. 6). С зеркалом, как и в предыдущем случае, свяжем прямоугольную систему координат  $OXYZ$  и определим ее положение двумя углами  $\delta_1$  и  $\delta_2$  относительно системы координат  $O\xi\eta\zeta$  (см. рис. 4). Проекции угловой скорости  $\omega_x$ ,  $\omega_y$  и  $\omega_z$  на измерительные оси автоколлиматоров  $y_1$  и  $z_2$  определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= [\omega_\gamma \cos(\gamma_1 - \Omega t) + \omega_\xi \cdot \sin(\gamma_1 - \Omega t)] \cdot \cos \beta_1 - [(\omega + \Omega) \cdot \cos \alpha_1 - [\omega_\xi \cdot \cos(\gamma_1 - \Omega t) - \omega_\gamma \sin(\gamma_1 - \Omega t)] \cdot \sin \alpha_1] \cdot \sin \beta_1, \\ r_2 &= [\omega_\gamma \cos(\gamma_2 - \Omega t) - \omega_\gamma \cdot \sin(\gamma_2 - \Omega t)] \cdot \cos \alpha_2 + (\omega_\xi + \Omega) \cdot \sin \alpha_2. \end{aligned} \right\} (3)$$

Подставляя в (3) значения  $\omega_\xi$ ,  $\omega_\gamma$  и  $\omega_\zeta$ , определяемых системой уравнений (1), получим

$$\begin{aligned} q_1 &= \dot{\delta}_1 [\cos(\gamma_1 - \Omega t) \cdot \cos \beta_1 - \sin(\gamma_1 - \Omega t) \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1] + \\ &+ \dot{\delta}_2 \cos \delta_1 \cdot \sin(\gamma_1 - \Omega t) \cdot \cos \beta_1 + \cos \delta_1 \cdot \cos(\gamma_1 - \Omega t) \cdot \\ &\cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 - \dot{\delta}_2 \cdot \sin \delta_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 - \Omega \cos \alpha_1 \cdot \sin \beta_1, \\ r_2 &= -\dot{\delta}_1 \cdot \sin(\gamma_2 - \Omega t) \cdot \cos \alpha_2 + \dot{\delta}_2 \cdot \cos \delta_1 \cdot \cos(\gamma_2 - \Omega t) \cdot \\ &\cdot \cos \alpha_2 + \dot{\delta}_2 \cdot \sin \delta_1 \cdot \sin \alpha_2 + \Omega \cdot \sin \alpha_2. \end{aligned}$$

Учитывая малость величин  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_1 \cdot \delta_2$  и обозначив

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos(\gamma_1 - \Omega t) \cdot \cos \beta_1 - \sin(\gamma_1 - \Omega t) \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1, \\ a_{12} &= \sin(\gamma_1 - \Omega t) \cdot \cos \beta_1 + \cos(\gamma_1 - \Omega t) \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1, \\ b_1 &= \Omega \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \beta_1, \\ a_{21} &= -\sin(\gamma_2 - \Omega t) \cdot \cos \alpha_2, \\ a_{22} &= \cos(\gamma_2 - \Omega t) \cdot \cos \alpha_2, \\ b_2 &= -\Omega \cdot \sin \alpha_2, \end{aligned}$$

при условии полной компенсации скорости платформы ( $q_1 = 0$  и  $r_2 = 0$ ) получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} a_{11} \dot{\delta}_1 + a_{12} \dot{\delta}_2 &= b_1; \\ b_{21} \dot{\delta}_1 + a_{22} \dot{\delta}_2 &= b_2. \end{aligned}$$

Из решения полученной системы следует

$$\left. \begin{aligned} \dot{\delta}_1 &= \Omega \frac{\sin \beta_1 [\sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos(\gamma_1 - \Omega t) + \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \cos(\gamma_2 - \Omega t)] + \sin(\gamma_1 - \Omega t) \cos \beta_1 \times \sin \alpha_2}{\cos \alpha_2 [\sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot \sin(\gamma_2 - \gamma_1) + \cos \beta_1 \cdot \cos(\gamma_2 - \gamma_1)]}, \\ \dot{\delta}_2 &= \Omega \frac{\sin \beta_1 [\sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \sin(\gamma_1 - \Omega t) + \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin(\gamma_2 - \Omega t)] - \cos(\gamma_1 - \Omega t) \cdot \cos \beta_1 \cdot \sin \alpha_2}{\cos \alpha_2 [\sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot \sin(\gamma_2 - \gamma_1) + \cos \beta_1 \cdot \cos(\gamma_2 - \gamma_1)]}. \end{aligned} \right\} (4)$$

Выражения (4) существенно упрощаются, если выбрать углы  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  и  $\alpha_1$  таким образом, что в моменты измерений  $\alpha_1 = 0$ ;  $\gamma_1 - \Omega t = 0$ ;  $\gamma_2 - \Omega t = 0$ . Тогда

$$\dot{\delta}_1 = \Omega \operatorname{tg} \beta_1; \quad \dot{\delta}_2 = -\Omega \operatorname{tg} \alpha_2.$$

При малых отклонениях от нулевых значений углов, т. е. когда  $\alpha_1 = \Delta\alpha$ ,  $\gamma_1 - \Omega t = \Delta\gamma_1$ ,  $\gamma_2 - \Omega t = \Delta\gamma_2$ , после пренебрежения членами второго порядка малости имеем

$$\dot{\delta}_1 = \Omega \operatorname{tg} \beta_1 (1 + \Delta\alpha_1 \operatorname{tg} \alpha_2); \quad \dot{\delta}_2 = -\Omega \operatorname{tg} \alpha_2 \left(1 - \Delta\gamma_2 \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg} \alpha_2}\right).$$

Таким образом, если при измерении не учитывать малые отклонения  $\Delta\alpha_1$ ,  $\Delta\gamma_2$ , то получим методические погрешности, определяемые из выражений

$$\Delta\dot{\delta}_1 = \Omega\Delta\alpha_1 \operatorname{tg} \alpha_2; \quad \Delta\dot{\delta}_2 = \Omega\Delta\gamma_2 \operatorname{tg} \beta_1.$$

Значения этих погрешностей не превышают инструментальные. Например, при  $\Delta\alpha_1 = \Delta\gamma_2 = 1 \cdot 10^{-4}$ ,  $\alpha_2 = \beta_1 = 3,5 \cdot 10^{-2}$  имеем  $\Delta\dot{\delta}_1 = \Delta\dot{\delta}_2 = 5 \cdot 10^{-5}$  в 1 с.

Поступила в редакцию  
15/VIII 1973 г.

В. А. ИВАНОВ, А. С. ПОВАРЕНКОВ,  
Л. А. СОЛОВЬЕВА

ВНИИМ

## СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ИСХОДНОГО АЗИМУТА

Система определения и хранения исходного азимута предназначена для поверки гиротеодолитов, гироскопов, средств измерения малой угловой скорости и других приборов.

Система состоит из следующих основных элементов: пассажного инструмента, размещенного в астропавильоне, комплекта мир, предназначенных для хранения исходного азимута, автоколлимационного теодолита и комплекта прецизионных пузырьковых уровней и призм, предназначенных для передачи исходного азимута.

Определение направления исходного азимута производится по наблюдениям прохождения звезд в меридиане на пассажных инструментах «Бамберг» или АПМ-10.

Технические характеристики пассажных инструментов:

	АПМ-10	«Бамберг»
Диаметр объектива, мм	90	100
Фокусное расстояние объектива, мм	900	1000
Увеличение	100*	100*, 140*, 200*
Цена деления подвесного уровня	1"	1"
Точность отсчета установочных кругов	1'	1'
Масса в рабочем положении, кг	240	260

Программа наблюдений состояла в следующем. Горизонтальная ось инструмента ориентировалась с погрешностью  $0,5''$ , после чего плоскость вращения трубы пассажного инструмента устанавливалась, приблизительно, в плоскости меридиана. Затем производились наблюдения прохождения звезд относительно бесколлимационной линии пассажного инструмента.

В программу наблюдений включались только звезды каталога КСВ, составленного по наблюдениям служб времени СССР в период МГГ (1957—1961 гг.) с погрешностью 3—4 мс. Азимут бесколлимационной линии пассажного инструмента определялся, как правило, по результатам наблюдений 20 звезд. Каждая звез-

да наблюдалась наведением нити микрометра и сопровождением звезды в течение 1—2 мин до перекладки пассажного инструмента, а также после нее. Момент прохождения звезды через меридиан определялся как среднее из 20 моментов, полученных от замыкания контактов барабана микрометра, связанного с подвижной нитью и при наблюдении звезд до прохождения меридиана и после него. Отсчеты показаний уровня производились до и после перекладки инструмента. Погрешность измерения наклона оси не превосходила  $0,3''$ .

Для исследования стабильности положения инструмента были установлены две миры (рис. 1).

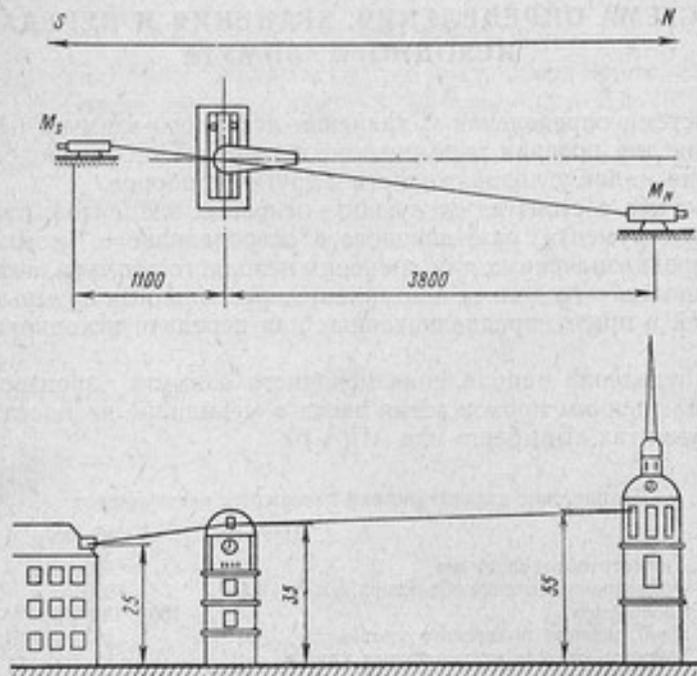


Рис. 1. Схема расположения элементов исходного азимута

Миры установлены на несущих элементах многоэтажных зданий: северная — на основании шпиля Петропавловской крепости, южная — на административном здании. Погрешность установки мир на проектную отметку не превышает  $\pm (0,7 \div 1)$ . Результаты исследования стабильности исходного азимута в течение одного года приведены в таблице. Погрешность хранения исходного азимута составила в среднем  $1''$ . Необходимо отметить, что увеличение погрешности хранения базового исходного азимута вызвано значительной высотой установки инструмента. Погрешность од-

нократного наведения на мир при спокойном ее изображении около  $0,4''$ . Один отсчет положения мира производился по четырем наведениям. Погрешность определения азимута мира, полученная по внутренней сходимости, оказалась равной  $0,8''$ , т. е. основные погрешности — погрешности определения азимута пассажного инструмента по наблюдениям звезд.

В графе 12 приведены поправки на колебание Полюса, а в графе 13 — значение азимута мира, приведенное к среднему положению Полюса.

Среднее значение азимута северной мира оказалось равным  $-6,4'' \pm 0,2''$  (мира восточнее меридиана).

В целях более полного определения и прокладки направления исходного азимута астрометодом разработаны два метода переноса базового направления в закрытое помещение. Для этого помещение необходимо оборудовать иллюминатором. На рис. 2 приведена схема переноса базового направления методом, основанном на использовании теодолита.

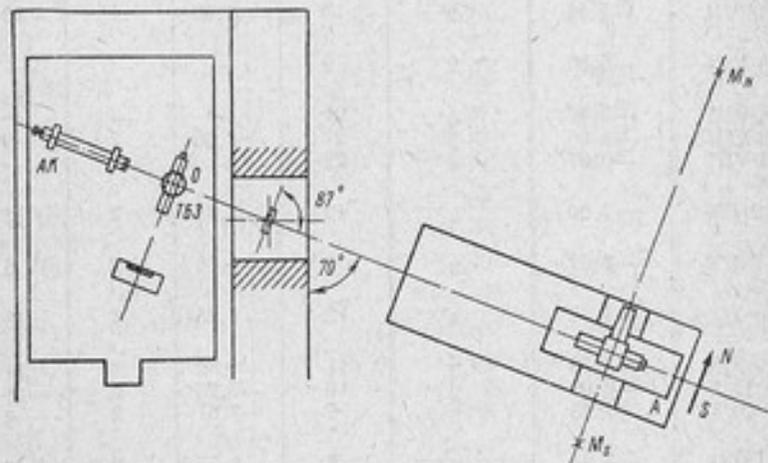


Рис. 2. Схема переноса базового направления с помощью теодолита

Метод состоит в следующем. Направление исходного азимута определяется пассажным инструментом  $A$  и закрепляется с помощью двух мир  $M_N$  и  $M_S$ . Затем с помощью теодолита, например ТБ-3, прокладывается нормаль к базовому направлению, которая закрепляется с помощью автоколлиматора, установленного в закрытом помещении. Путем установки теодолита в точку  $O$  производится прокладка и закрепление базового направления непосредственно в помещении. Наличие автоколлиматора  $AK$ , установленного по нормали к исходному азимуту, позволяет регуляр-

## Результаты определения азимута северной миры,

(в у

Дата наблюдения	$a_1$	$n_1$	$m_1$	$a_2$	$n_2$	$m_2$
1	2	3	4	5	6	7
25/V	-6,68	2	19	—	—	—
27/V	-7,32	1	22	—	—	—
1/VI	-6,75	6	19	—	—	—
3/VI	-6,50	3	7	-7,46	1	7
21/VI	-5,68	3	11	-6,63	2	12
22/VI	-6,65	5	17	—	—	—
3/VII	-5,71	2	5	-6,58	3	5
5/VII	-8,15	2	9	-6,82	3	12
7/VII	-6,44	3	8	-7,25	3	11
26/VII	-7,34	3	12	—	—	—
28/VII	-7,13	2	13	-6,50	1	10
6/VIII	-6,86	2	9	—	—	—
14/VIII	-7,47	4	21	—	—	—
16/VIII	-8,25	5	21	-8,30	2	9
20/VIII	-6,87	4	22	—	—	—
21/IX	-7,20	2	12	-7,49	2	13
29/IX	-7,67	2	5	-7,16	2	6
1/X	-7,37	4	12	-7,25	4	13
8/X	-7,36	3	11	-6,62	2	11
12/X	-6,99	2	10	-7,25	2	11
29/X	-7,75	2	7	-7,61	2	8
3/XI	-7,84	3	8	-6,77	2	7
13/XI	-6,78	3	11	-6,99	3	12
21/XI	-7,29	2	11	-7,68	3	10
14/XII	-7,09	2	6	—	—	—
20/XII	-6,78	2	5	—	—	—
20/XII	-6,08	2	11	-6,15	2	13
25/XII	-7,49	1	6	—	—	—

Примечания:  $a$  — азимут миры;  $n$  — число отсчетов миры;  $m$  — число положение Полюса;  $a + \Delta a_N$  — азимут миры, приведенный полученный в мае — декабре 1971 г.,  $a_N = -6,4'' \pm 0,2''$ .

 зв  
к

но контролировать положение базового направления внутри помещения, не прибегая к использованию астросредств. Погрешность передачи направления исходного азимута таким методом не превышает  $5 \div 10''$ .

На рис. 3 приведена схема переноса базового направления методом, основанным на применении пентапризмы.

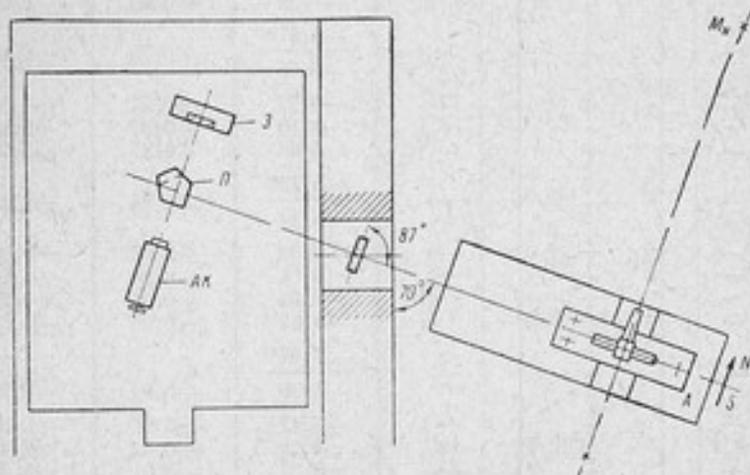


Рис. 3. Схема переноса базового направления с помощью пентапризмы

С помощью оптической системы, состоящей из автоколлиматора АК и призмы П, прокладывается нормаль к направлению исходного азимута, проходящая через оптическую ось пассажного инструмента А. При этом в автоколлиматоре наблюдают изображение миры  $M_N(\tilde{M}_S)$  и нить, установленную на противоположном конце оси пассажного инструмента. Затем с помощью зеркала З, положение которого контролируется автоколлиматором АК, производится прокладка базового направления в помещении. Автоколлиматор АК, выполняя функции миры, одновременно обеспечивает контроль стабильности положения базового направления в помещении. Погрешность передачи направления исходного азимута таким методом не превышает  $3''$ .

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Е. Ф. Долицкий, Г. И. Лоскутов, Г. И. Полухин. Эталон-копия первичного группового эталона единицы давления	4
М. А. Гуляев, А. В. Ерюхин, Р. С. Шапиро. Омегатронный измеритель парциальных давлений типа ИПДО-2	8
В. В. Кузьмин. Расширение области измерений редуцированных установок для градуировки вакуумметров	13
А. В. Ерюхин. Поверочная вакуумметрическая установка с калиброванными объемами	23
В. А. Рыжов. Усовершенствованный компрессионный манометр	27
С. М. Бородинская, А. В. Ерюхин. Ионизационные манометры с отрицательной модуляцией	30
А. В. Ерюхин, В. В. Кузьмин. Градуировка вакуумметров в области низких абсолютных давлений динамическим методом	35
И. Н. Долицкий, В. И. Михайлов, Г. Н. Семенов, Т. А. Федоренко. Установка для воспроизведения перепадов и импульсов давления в газовых средах	51
И. В. Плотников, В. П. Беляцкий. Преобразователь из текстуры для измерения давления в ударных волнах	57
И. В. Плотников, В. В. Мочалов, Г. И. Смирнова. Квазистатический метод градуировки пьезоэлектрических преобразователей давления	62
Н. Г. Токарь, Б. А. Вандышев, Ф. С. Савицкий, О. В. Ивановский. Установка для воспроизведения крутящего момента до 20000 Н·м	67
Б. А. Вандышев, В. К. Колтаков, Ф. С. Савицкий, Н. А. Пронин, А. С. Шапиро, В. Б. Балакшин. Методика аттестации балансовых моментометров	76
В. К. Колтаков, Б. А. Вандышев, Ф. С. Савицкий. Комплекс установок для испытания тензорезисторов	84
Е. Д. Родкевич. Измерение средней твердости одновременно двумя наконечниками	88
М. И. Коточигова. Поверка геометрических параметров стандартных наконечников типа НК	97
Ю. И. Трубняков, А. В. Орлов. Определение механических характеристик линейных аморфных полимеров оптико-механическим методом	106

И. Х. Ибрагимов. Направленные свойства и градуировка акселерометров . . . . .	118
Ю. Г. Захаренко, Н. А. Мельников, В. Е. Привалов. Влияние стабильности источника питания кольцевого ОКГ на параметры измерительного преобразователя угловой скорости . . . . .	125
В. И. Гудов, А. Н. Ильясов, В. Л. Федорин, В. С. Шкальников. Влияние гармоник при измерении параметров вибрации методом ядерного гамма-резонанса (ЯГР) . . . . .	130
И. Х. Ибрагимов. Определение динамических характеристик преобразователя с нестабильными параметрами . . . . .	135
А. Б. Курзнер. Особенности динамической градуировки акселерометров на двойной центрифуге . . . . .	142
В. А. Иванов, А. С. Поваренков, Н. С. Соловьева. Измерение малых угловых скоростей методами сравнения с угловой скоростью Земли . . . . .	148
В. А. Иванов, А. С. Поваренков, Л. А. Соловьева. Система определения, хранения и передачи исходного азимута . . . . .	157

## РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В СБОРНИКЕ

УДК 531.787.089.68

### ЭТАЛОН-КОПИЯ ПЕРВИЧНОГО ГРУППОВОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ДАВЛЕНИЯ

*Е. Ф. ДОЛИНСКИЙ, Г. И. ЛОСКУТОВ, Г. И. ПОЛУХИН*

«Исследования в области механических измерений», Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 4—7.

Дано краткое описание конструкции созданного во ВНИИМ эталона-копии единицы давления и приведены результаты его исследования.  
Илл. 2. Библ. 2.

УДК 531.787 : 533.273

### ОМЕГАТРОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРЦИАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЯ ТИПА ИПДО-2

*М. А. ГУЛЯЕВ, А. В. ЕРЮХИН, Р. С. ШАПИРО*

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 8—12.

Проведены исследования и градуировка омегатронного измерителя парциальных давлений ИПДО-2 по чистым газам: азоту, гелию, неону, аргону. Давление измеряли с помощью ионизационного манометрического преобразователя типа ПМИ-2, предварительно проградуированного по образцовому компрессионному манометру по воздуху и тем же чистым газом.

Сняты градуировочные спектры чистых газов азота, гелия, неона и аргона. Полученные значения не выходят за пределы разброса данных, приведенных в литературе различными авторами.

Табл. 3. Илл. 1. Библ. 13.

СОВЕТСКИЙ СОЮЗ  
НАУКА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
МОСКВА, 1987

С. А. КОЗЛОВСКИЙ, В. В. КОЗЛОВСКИЙ

ВВЕДЕНИЕ  
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ  
2. МЕТОДИКА  
3. РЕЗУЛЬТАТЫ  
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

И. А. КОЗЛОВСКИЙ, В. В. КОЗЛОВСКИЙ

ВВЕДЕНИЕ  
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ  
2. МЕТОДИКА  
3. РЕЗУЛЬТАТЫ  
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ РЕДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ВАКУУММЕТРОВ

**В. В. КУЗЬМИН**

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 13—22.

Предложены способы расширения области измерений редуccionных установок для градуировки вакуумметров, представляющие собой сочетание расчета изменяющегося во времени исходного давления и редуccion этого давления в область высокого и сверхвысокого вакуума. Предложенными способами обеспечивается расширение области градуировки в сторону низких давлений на два-три порядка величины, чем устраняется необходимость непосредственно измерения образцовыми манометрами давлений  $10^{-3}$ —1 Па. При надлежащем выборе параметров вакуумной системы обеспечивается достаточная точность градуировки.

Табл. 3. Илл. 2. Библ. 13.

## ПОВЕРОЧНАЯ ВАКУУММЕТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С КАЛИБРОВАННЫМИ ОБЪЕМАМИ

**А. В. ЕРЮХИН**

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 23—26.

Дано краткое описание принципиальной вакуумной схемы поверочной вакуумметрической установки, основанной на принципе калиброванных объемов, с пределами измерения низких абсолютных давлений  $4 \cdot 10^4$ — $10^{-1}$  Па ( $\sim 300$ — $10^{-3}$  мм рт. ст.). Анализ уравнений измерения установки показывает возможность получения дискретных значений давления, необходимых для градуировки и поверки манометрических преобразователей. Отношения калиброванных объемов были определены на основании точных измерений больших и малых объемов весовым методом с погрешностями, не превышающими 0,1%. При градуировке на установке термодинамических манометрических преобразователей типа ПМТ-2 (ЛТ-2) случайный разброс точек относительно градуировочной кривой не превышал 5%.

Илл. 1.



## УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ КОМПРЕССИОННЫЙ МАНОМЕТР

*В. А. РЫЖОВ*

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов, вып. 156 (216), 1974, с. 27—29.

Описаны метод измерения давления и устройство, позволяющие исключить систематические погрешности компрессионного манометра, обусловленные откачивающим действием паров ртути.

Илл. 1. Библ. 2.

## ИОНИЗАЦИОННЫЕ МАНОМЕТРЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

*С. М. БОРОДИЦКАЯ, А. В. ЕРЮХИН*

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (212), 1974, с. 30—34.

Проведена сравнительная оценка методов положительной и отрицательной модуляции в сверхвысоковакуумных ионизационных манометрах. Из полученных зависимостей видно, что точки на градуировочной кривой, полученные методом положительной модуляции, существенно отклоняются от прямой линии при давлениях ниже  $10^{-8}$  Па ( $\sim 10^{-10}$  мм рт. ст.). Оценка фонового тока манометрического преобразователя типа ПОИМ-10 дает значение  $\sim 10^{-12}$  А, что позволяет измерять методом отрицательной модуляции давления в диапазоне  $10^{-9}$ — $10^{-10}$  Па. Для измерения более низких давлений необходимы преобразователи с меньшими фоновыми токами и большими чувствительностями.

Табл. 1. Илл. 1. Библ. 8.

## ГРАДУИРОВКА ВАКУУММЕТРОВ В ОБЛАСТИ НИЗКИХ АБСОЛЮТНЫХ ДАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

*А. В. ЕРЮХИН, В. В. КУЗЬМИН*

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 35—50.

Дан обзор основных динамических методов градуировки вакуумметров, разработанных за последнее десятилетие: метода изменения давления во времени, метода потоков, метода переменной проводимости, метода редукции давления.

Рассмотрен также ряд специальных вариантов метода редукции давления. Указаны основные трудности, возникающие при осуществлении этих методов, дан анализ их точности и областей возможного применения. Показано, что метод редукции давления является наиболее перспективным в отношении точности и расширения нижнего предела рабочей области.

Илл. 6. Библ. 53.



## УСТАНОВКА ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПЕРЕПАДОВ И ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

*И. Н. ДОЛИЦКИЙ, В. И. МИХАЙЛОВ, Г. Н. СЕМЕНОВ,  
Т. А. ФЕДОРЕНКО*

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 51—56.

Описаны принцип действия и конструкция установки, предназначенной для анализа динамических свойств преобразователей давления по их переходным характеристикам. В рабочей камере установки создаются одиночные перепады или импульсы давления с амплитудой 0,5—0,7 МПа и временем нарастания 0,5—0,6 мс. Проведен расчет процесса нарастания и убывания давления в рабочей камере установки и оценены его погрешности.

Илл. 4. Библ. 2

УДК 621.317.087.92 : 531.787

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИЗ ТЕКСТУРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

*И. В. ПЛОТНИКОВ, В. П. БЕЛЯЦКИЙ*

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 57—61.

На основе анализа работы пьезоэлементов при измерении давления ударных волн показана целесообразность применения в преобразователе сферической оболочки с жестким заполнением. Описана конструкция измерительного преобразователя. Приведены краткие сведения о технологии его изготовления и результатах испытаний.

Табл. 1. Илл. 2. Библ. 8.

УДК 531.787.082.73.089.6

## КВАЗИСТАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ГРАДУИРОВКИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

*И. В. ПЛОТНИКОВ, В. В. МОЧАЛОВ, Г. И. СМИРНОВА*

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 62—66.

Приводится описание метода и установки для градуировки пьезоэлектрических преобразователей импульсных давлений. Даются оценки погрешностей измерения.

Илл. 2. Библ. 2.



### УСТАНОВКА ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ДО 20000 Н·м

**Н. Г. ТОКАРЬ, Б. А. ВАНДЫШЕВ, Ф. С. САВИЦКИЙ,  
О. В. ИВАНОВСКИЙ**

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 67—75.

Описана стационарная установка кручения до 20000 Н·м для градуировки переносных моментометров. Приведены данные по оценке чувствительности измерительного рычага, неравноплечности измерительного рычага, определению длин плеч рычага и других факторов, влияющих на величину крутящего момента. Максимальная суммарная погрешность установки не превосходит 0,12% от измеряемого значения крутящего момента.

Илл. 3.

### МЕТОДИКА АТТЕСТАЦИИ БАЛАНСИРНЫХ МОМЕНТОМЕТРОВ

**Б. А. ВАНДЫШЕВ, В. К. КОЛТАКОВ, Ф. С. САВИЦКИЙ,  
Н. А. ПРОНИН, А. С. ШАПИРО, В. Б. БАЛАКШИН**

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 76—83.

Излагается методика аттестации балансирных моментометров, у которых в качестве силоизмерительных устройств используется весовой рейтерный элемент или вибрационно-частотный динамометр.

Рассматриваются результаты исследования, выполненного по разработанной методике двух балансирных моментометров. Приводятся значения погрешности балансирных моментометров при измерении крутящего момента.

Илл. 1. Библ. 7.

### КОМПЛЕКС УСТАНОВОК ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

**В. К. КОЛТАКОВ, Б. А. ВАНДЫШЕВ, Ф. С. САВИЦКИЙ**

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 84—87.

Рассматривается комплекс установок для испытаний тензорезисторов при статических и динамических режимах в интервале температур от  $-196$  до  $500^{\circ}\text{C}$  с диапазоном задаваемых относительных деформаций от  $2 \cdot 10^{-5}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$  с погрешностью  $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ .

УД

ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК СССР  
СЕРИЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

М. С. ГОРБАТОВ, А. А. ЗАХАРОВ, А. С. КОЗЛОВ  
И. В. ПИКАР

О некоторых свойствах операторов, порожденных  
линейными дифференциальными уравнениями

В настоящей работе рассматриваются операторы, порожденные  
линейными дифференциальными уравнениями. Показано, что  
такие операторы являются операторами Гамильтона. В частности,  
показано, что операторы, порожденные уравнениями  
линейными дифференциальными уравнениями, являются операторами  
Гамильтона.

ОБЪЕКТЫ АНАЛИЗА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

М. С. ГОРБАТОВ, А. А. ЗАХАРОВ, А. С. КОЗЛОВ  
И. В. ПИКАР

О некоторых свойствах операторов, порожденных  
линейными дифференциальными уравнениями

В настоящей работе рассматриваются операторы, порожденные  
линейными дифференциальными уравнениями. Показано, что  
такие операторы являются операторами Гамильтона. В частности,  
показано, что операторы, порожденные уравнениями  
линейными дифференциальными уравнениями, являются операторами  
Гамильтона.

ОБЪЕКТЫ АНАЛИЗА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

М. С. ГОРБАТОВ, А. А. ЗАХАРОВ, А. С. КОЗЛОВ  
И. В. ПИКАР

О некоторых свойствах операторов, порожденных  
линейными дифференциальными уравнениями

В настоящей работе рассматриваются операторы, порожденные  
линейными дифференциальными уравнениями. Показано, что  
такие операторы являются операторами Гамильтона. В частности,  
показано, что операторы, порожденные уравнениями  
линейными дифференциальными уравнениями, являются операторами  
Гамильтона.

ини

врс  
поз

УД

ск

ст  
сп  
ст

ч

л

л  
д

У

с

в

л

л

с

## ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕЙ ТВЕРДОСТИ ОДНОВРЕМЕННО ДВУМЯ НАКОНЕЧНИКАМИ

*Е. Д. РОДКЕВИЧ*

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 88—96.

Описана программа исследований измерения твердости посредством одновременного внедрения двух наконечников с противоположных сторон образца, позволяющих сразу получить среднюю величину твердости этих поверхностей.  
Табл. 3. Илл. 3. Библ. 2.

## ПОВЕРКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТАНДАРТНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ ТИПА НК

*М. И. КОТОЧИГОВА*

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (206), 1974, с. 97—105.

Рассматриваются источники возникновения систематических погрешностей при пользовании измерительными микроскопами и вспомогательными приспособлениями, предназначенными для измерения геометрических параметров стандартных наконечников.

Даются анализ и оценка этих погрешностей. Указываются пути их исключения.

Доказывается недопустимость пользования шаблоном, включающим допуски одновременно на угол и радиус закругления наконечника.

Описываются специальные приспособления, облегчающие фокусировку при больших увеличениях и предохраняющие объектив микроскопа от повреждения алмазным наконечником.

Табл. 1. Илл. 5. Библ. 1.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ АМОРФНЫХ ПОЛИМЕРОВ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

*Ю. И. ТРУБНЯКОВ, А. В. ОРЛОВ*

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 106—117.

Приводятся основные теоретические положения, позволяющие устанавливать связь между изменениями в структуре материала, находящегося под нагрузкой, и механикой его деформирования. В качестве конкретного примера рассмотрена ползуность целлулоида, наиболее типичного гладкого аморфного полимера. Получены параметры, описывающие как механические характеристики, так и структурные изменения в материале.  
Илл. 5.

УД  
Н  
С  
ЯЗ  
Ш  
КО  
НА  
МЕ  
ТЕ

ИЗВЕЩАНИЕ КОМИТЕТА ПО ТЕОРИИ И МЕТОДАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

О РАБОТАХ КОМИТЕТА

В 1954 году Комитет по теории и методам математического анализа провел ряд работ, направленных на развитие теории и методов математического анализа.

В частности, были рассмотрены вопросы теории дифференциальных уравнений, теории интегральных уравнений, теории функционального анализа и теории операторов.

РАБОТЫ КОМИТЕТА ПО ТЕОРИИ И МЕТОДАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

О РАБОТАХ КОМИТЕТА

В 1954 году Комитет по теории и методам математического анализа провел ряд работ, направленных на развитие теории и методов математического анализа.

В частности, были рассмотрены вопросы теории дифференциальных уравнений, теории интегральных уравнений, теории функционального анализа и теории операторов.

В частности, были рассмотрены вопросы теории дифференциальных уравнений, теории интегральных уравнений, теории функционального анализа и теории операторов.

В частности, были рассмотрены вопросы теории дифференциальных уравнений, теории интегральных уравнений, теории функционального анализа и теории операторов.

В частности, были рассмотрены вопросы теории дифференциальных уравнений, теории интегральных уравнений, теории функционального анализа и теории операторов.

В частности, были рассмотрены вопросы теории дифференциальных уравнений, теории интегральных уравнений, теории функционального анализа и теории операторов.

В частности, были рассмотрены вопросы теории дифференциальных уравнений, теории интегральных уравнений, теории функционального анализа и теории операторов.

В частности, были рассмотрены вопросы теории дифференциальных уравнений, теории интегральных уравнений, теории функционального анализа и теории операторов.

У  
с  
Р  
о  
с  
С  
т  
и  
Р  
Г

## НАПРАВЛЕННЫЕ СВОЙСТВА И ГРАДУИРОВКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

И. Х. ИБРАГИМОВ

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 118—124.

Рассматриваются особенности градуировки акселерометров, связанные с наличием у них направленных свойств. Обсуждаются способы определения измерительной оси акселерометра. Предлагается методика градуировки, сводящаяся к определению методом наименьших квадратов параметров модели, в которой учтены как направленные свойства, так и слабая нелинейность восстанавливающих сил акселерометра. Предложенная методика позволяет одновременно определять измерительную ось и статическую градуировочную характеристику акселерометра и повысить точность их определения.

Библ. 4.

УДК 531.77 : (621.373.826 : 62—752.4)

ВЛИЯНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ  
КОЛЬЦЕВОГО ОКГ НА ПАРАМЕТРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Ю. Г. ЗАХАРЕНКО, Н. А. МЕЛЬНИКОВ, В. Е. ПРИВАЛОВ

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 125—129.

Современные кольцевые ОКГ (КОКГ) позволяют измерять угловую скорость и угол в динамике с точностью порядка  $10^{-5}$ — $10^{-6}$ . Для создания образцовых средств измерения угловых параметров движения необходима стабильность частоты биений встречных волн КОКГ порядка  $10^{-6}$ — $10^{-8}$ . Одним из факторов, определяющих эту стабильность, является стабильность тока разряда КОКГ. Анализируются требования к источнику питания КОКГ, используемого в измерительном преобразователе угловой скорости. Рассматривается схема двойной стабилизации. Проведена экспериментальная проверка работоспособности схемы.

Илл. 1. Библ. 4.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY

CHICAGO, ILLINOIS

1950

THE UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY  
1215 EAST 58TH STREET  
CHICAGO, ILLINOIS 60637

1950

THE UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY  
1215 EAST 58TH STREET  
CHICAGO, ILLINOIS 60637

THE UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY  
1215 EAST 58TH STREET  
CHICAGO, ILLINOIS 60637

THE UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY  
1215 EAST 58TH STREET  
CHICAGO, ILLINOIS 60637

THE UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY  
1215 EAST 58TH STREET  
CHICAGO, ILLINOIS 60637

THE UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY  
1215 EAST 58TH STREET  
CHICAGO, ILLINOIS 60637

THE UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY  
1215 EAST 58TH STREET  
CHICAGO, ILLINOIS 60637

THE UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY  
1215 EAST 58TH STREET  
CHICAGO, ILLINOIS 60637

УД  
ВЛ  
В. А  
ски  
леб  
ЭВ  
гар  
пор  
бан  
ств  
УД  
ск  
ге  
ни  
ча  
ср  
эс  
У  
О  
с  
и  
У  
Р  
Л  
а  
л  
Р

**ВЛИЯНИЕ ГАРМОНИК ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ  
МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО ГАММА-РЕЗОНАНСА (ЯГР)**

**В. И. ГУДОВ, А. Н. ИЛЯСОВ, В. Л. ФЕДОРИН, В. С. ШКАЛИКОВ**

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 130—134.

В работе исследовано влияние гармонического состава механических колебаний на результаты измерений параметров вибраций методом ЯГР. На ЭВМ М-22 выполнены расчеты величины резонансного эффекта при наличии гармоник до седьмого порядка. Полученные результаты позволяют определить поправки к резонансному эффекту при известном гармоническом составе колебаний или предел возможных нелинейных искажений при заданной погрешности измерений.

Илл. 2. Библ. 5.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С НЕСТАБИЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

**И. Х. ИБРАГИМОВ**

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 135—141.

Рассмотрена точность определения динамических характеристик измерительного преобразователя, описываемого линейным дифференциальным уравнением. Получены формулы, связывающие точность определения амплитудно-частотных характеристик измерительного преобразователя с погрешностями средств градуировки и нестабильностью параметров измерительного преобразователя.

Библ. 2. Илл. 1.

**ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ГРАДУИРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ  
НА ДВОЙНОЙ ЦЕНТРИФУГЕ**

**А. Б. КУРЗНЕР**

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 142—147.

Анализируются погрешности динамической градуировки акселерометров на двойной центрифуге, обусловленные неоднородностью по радиусу поля ускорений. Найдены ограничения использования двойной центрифуги для широкого класса приборов и выведены формулы для оценки погрешностей передачи по постоянной составляющей, амплитуде и фазе ускорения. Предложен алгоритм, позволяющий исключить упомянутые погрешности и расширить область применения двойной центрифуги для динамической градуировки акселерометров.

Библ. 4.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

PROFESSOR J. D. WATSON, JR. AND ASSISTANT PROFESSOR A. C. LITTLE

REPORT ON THE RESEARCH WORK OF THE DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
DURING THE YEAR 1954

The Department of Chemistry at the University of Chicago has been fortunate in having a very productive year in 1954. The research work of the department has been carried out in a number of fields, including the study of the properties of matter, the structure of molecules, and the kinetics of chemical reactions. The following is a summary of the work done during the year.

The first part of the report deals with the study of the properties of matter. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The second part of the report deals with the study of the structure of molecules. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The third part of the report deals with the study of the kinetics of chemical reactions. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The fourth part of the report deals with the study of the properties of matter. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The fifth part of the report deals with the study of the structure of molecules. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The sixth part of the report deals with the study of the kinetics of chemical reactions. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The seventh part of the report deals with the study of the properties of matter. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The eighth part of the report deals with the study of the structure of molecules. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The ninth part of the report deals with the study of the kinetics of chemical reactions. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The tenth part of the report deals with the study of the properties of matter. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The eleventh part of the report deals with the study of the structure of molecules. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The twelfth part of the report deals with the study of the kinetics of chemical reactions. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The thirteenth part of the report deals with the study of the properties of matter. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The fourteenth part of the report deals with the study of the structure of molecules. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The fifteenth part of the report deals with the study of the kinetics of chemical reactions. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The sixteenth part of the report deals with the study of the properties of matter. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The seventeenth part of the report deals with the study of the structure of molecules. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The eighteenth part of the report deals with the study of the kinetics of chemical reactions. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The nineteenth part of the report deals with the study of the properties of matter. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

The twentieth part of the report deals with the study of the structure of molecules. This work has been carried out by a number of members of the department, including J. D. Watson, Jr. and A. C. Little. The results of this work are discussed in the following sections.

## ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ МЕТОДАМИ СРАВНЕНИЯ С УГЛОВОЙ СКОРОСТЬЮ ЗЕМЛИ

**В. А. ИВАНОВ, А. С. ПОВАРЕНКОВ, Н. С. СОЛОВЬЕВА**

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 148—156.

Рассматриваются методы измерения малых угловых скоростей (уходов) стабилизированных платформ, основанные на сравнении с естественной мерой — суточным вращением Земли. Первый из рассматриваемых методов основан на компенсации уходов угловой скорости платформы соответствующей составляющей вращения Земли при поступательном перемещении одноосной стабилизированной платформы.

Во втором методе компенсация осуществляется посредством вращательного движения одноосной платформы.

В третьем методе платформа, число осей которой не менее двух, неподвижна, а компенсация угловой скорости платформы осуществляется при повороте оптических осей автоколлиматоров.

Для всех трех методов получены основные зависимости и произведена оценка погрешностей.

Илл. 6.

## СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ИСХОДНОГО АЗИМУТА

**В. А. ИВАНОВ, А. С. ПОВАРЕНКОВ, Л. А. СОЛОВЬЕВА**

«Исследования в области механических измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 157—162.

Рассматривается метрологическая система определения, хранения и передачи исходного азимута, предназначенная для проверки высокоточных гиро-теодолитов, гироскопов и других приборов подобного назначения. Основными элементами системы являются пассажирный инструмент (телескоп) и комплект световых реперов (мир), размещенных на пятикилометровой базе. Передача направления исходного азимута в закрытое помещение осуществляется с помощью автоколлимационного теодолита или пентапризмы. Средняя квадратическая погрешность определения исходного азимута  $< 1''$ , погрешность передачи —  $< 3''$ .

Табл. 1. Илл. 3.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
LIBRARY

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS  
54 EAST LAKE STREET  
CHICAGO, ILLINOIS 60607  
U.S.A.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS  
HONG KONG BRANCH

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS  
100 BROADWAY

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS  
NEW YORK, N.Y. 10006  
U.S.A.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИИ

Труды метрологических институтов СССР

Выпуск 156(216)

Редактор *Г. А. Митарчук*

Технический редактор *З. Г. Вагер*

Корректор *Е. И. Евтеева*

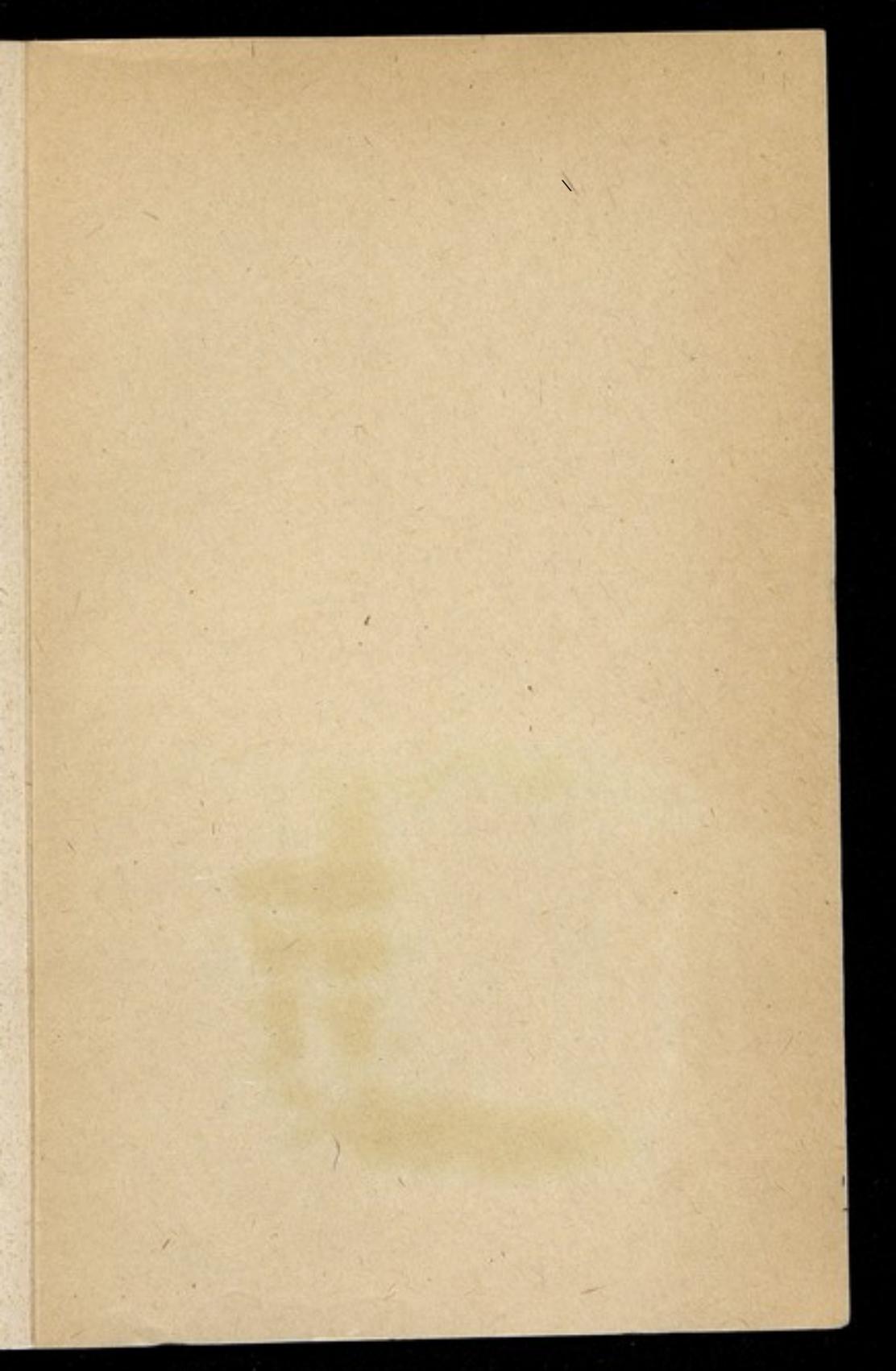
Т-13939      Сдано в набор 25.02.74      Подп. в печ. 16.09.74  
Формат бумаги 60×90<sup>1/16</sup>.      Бум. тип. № 1      Печ. л. 11,5  
Уч.-изд. л. 9,74      Тираж 2000 экз.  
Цена 97 коп.      Изд. № 3490/12

---

Издательство стандартов, Москва, Новопресненский пер. 3

---

Великолукская городская типография управления издательства,  
полиграфии и книжной торговли Псковского облисполкома,  
г. Великие Луки, Половская, 13. Заказ 4417



Цена 97 коп.