

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

5/VI-78

**ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ МАССЫ**

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

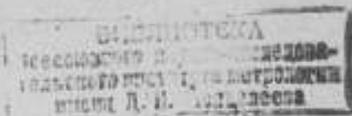
Выпуск 224(284)



80011111

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

45699/м



ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ МАССЫ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

Выпуск 224 (284)

Под редакцией канд. техн. наук *Н. А. Смирновой*



«ЭНЕРГИЯ»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1978

Настоящий сборник посвящается точным измерениям массы, которые играют важнейшую роль при химико-физических исследованиях, а также в электронной, полупроводниковой промышленности, в метрологической практике при аттестации эталонных и образцовых средств измерений массы и проведении эталонных работ в других областях измерений.

В сборнике публикуются работы по исследованию эталонов массы и усовершенствованию методов измерений. Одна из статей носит дискуссионный характер, в ней излагаются некоторые соображения, касающиеся естественного эталона массы.

Ряд статей посвящен вопросам определения плотности твердых тел, которые тесно связаны с измерением массы.

И $\frac{30306-059}{051(01)-78}$

© Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева (ВНИИМ), 1978.

И. А. СМЕРНОВА, В. С. СНЕГОВ, Р. Д. ЦАПНА
ВНИИМ

СЛИЧЕНИЯ ЭТАЛОНОВ-КОПИИ С ГОСУДАРСТВЕННЫМ ПЕРВИЧНЫМ ЭТАЛОНОМ ЕДИНИЦЫ МАССЫ

Эталон-копия сличается с государственным первичным эталоном единицы массы СССР один раз в 7—10 лет. В настоящее время применяются четыре эталона-копии, имеющие условные обозначения: $V \frac{ст}{г-кг}$ № 6, $H \frac{ст}{г-кг}$ № 8, $B \frac{ст}{г-кг}$ № 15 и $R \frac{ст}{г-кг}$. Исходным эталоном при сличениях эталон-копий в соответствии с поверочной схемой для гирь и весов является национальный прототип килограмма № 12, входящий в состав государственного первичного эталона единицы массы. По результатам последних сличений, проведенных в Международном бюро мер и весов (МБМВ) в 1948—1954 гг., масса прототипа килограмма № 12 равна $1 \text{ кг} + 0,085 \text{ мг}$.

Подготовка к сличениям

В состав государственного первичного эталона массы входят эталонные веса № 1 и 2; они находятся в исправном состоянии и по техническим и метрологическим характеристикам удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям ГОСТ 8.021—72.

В 1976 г. были изготовлены новые переносные площадки для эталонных весов, которые позволяли несколько снизить вариацию показаний весов из-за влияния электростатических сил и влажности воздуха. Для проведения сличений эталон-копий использовались эталонные веса № 1, у которых были подъюстированы подвески и механизм для переноса гирь с одной чашки на другую. Перед сличением были поверены все приборы, необходимые для определения плотности воздуха, а также откалибрована применяемый при взвешиваниях платиновый эталонный миллиграммовый набор гирь.

Все эталоны-копии подвергались очистке: поверхность стальных эталонов обрабатывалась обезжиренной замшей, смоченной в спирте, а поверхность платиноиридиевого эталона после обработки замшей, смоченной в спирте, подвергалась очистке струей пара дистиллированной воды. Поверхность прототипа № 12 не подвергалась очистке, так как она очищалась перед сличениями в 1969 г.

О необходимости промывки национальных первичных эталонов массы перед их применением нет единого мнения. Например, в Австралии, Бельгии, Канаде, Японии и др. странах платиноиридиевые национальные первичные эталоны перед применением не подвергаются очистке паром. В Англии такая очистка производится не регулярно, а в США—перед каждым применением. При этом после промывки паром эталон выдерживается в течение нескольких дней для стабилизации.

Методика и результаты сличений эталонов-копий

Начиная с 1959 г. сличения эталонов-копий производятся методом совокупных измерений [1]. По этому методу, в частности, проводились сличения в 1959 и 1969 гг. В 1976 г. сличения выполнялись по методике 1959 г. (все эталоны-копии сличались между собой во всех возможных комбинациях, а с исходным эталоном — только два). В работе [1] дается решение условных уравнений с учетом весов.

В 1976 г. В. С. Снеговым была предложена методика расчета, применимая для любого числа сличаемых эталонов. Для упрощения рассматривались условные уравнения с одинаковыми весами, т. е. для случая равноточных измерений со средним квадратическим отклонением результатов наблюдений σ .

Как показано в [1], для предохранения исходного эталона от износа оптимальной является схема выполненных попарных сличений, когда с исходным эталоном сличаются не все поверяемые эталоны.

Пусть число сличаемых эталонов равно n , тогда систему выполненных попарных сличений можно получить путем усечения полной системы на h уравнений за счет того, что с исходным эталоном сличаются не все эталоны. Параметр h , который можно назвать параметром усечения, будет влиять на точность искомых оценок.

Систему условных уравнений, соответствующую обобщенной методике неполных попарных сличений вторичных эталонов массой x_1, x_2, \dots, x_n с параметром усечения h , можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 m_0 - x_{h+1} + l_{0, h+1} &= v_{0, h+1} \\
 m_0 - x_{h+2} + l_{0, h+2} &= v_{0, h+2} \\
 &\dots \dots \dots \\
 m_0 - x_n + l_{0, n} &= v_{0, n} \\
 x_1 - x_2 + l_{1, 2} &= v_{1, 2} \\
 x_1 - x_3 + l_{1, 3} &= v_{1, 3} \\
 &\dots \dots \dots \\
 x_i - x_n + l_{i, n} &= v_{i, n} \\
 &\dots \dots \dots \\
 x_k - x_{k+1} + l_{k, k+1} &= v_{k, k+1} \\
 x_k - x_{k+2} + l_{k, k+2} &= v_{k, k+2} \\
 &\dots \dots \dots \\
 x_k - x_n + l_{k, n} &= v_{k, n} \\
 &\dots \dots \dots \\
 x_{n-1} - x_n + l_{n-1, n} &= v_{n-1, n}
 \end{aligned} \tag{1}$$

где m_0 — масса исходного эталона; $l_{i,j}$ — измеренная разность масс сличаемых эталонов; $v_{i,j}$ — остаточная погрешность.

Будем считать, что погрешности $v_{i,j}$ подчиняются совместному распределению с нулевым математическим ожиданием. Решаем систему (1) методом наименьших квадратов, т. е. минимизируем сумму квадратов остаточных погрешностей S^2 :

$$S^2 = \sum_{l=1}^{n-h} (m_0 - x_{h+l} + l_{0, h+l})^2 + \sum_{l=1}^{n-1} \sum_{j=l+1}^{n-l} (x_l - x_{l+j} + l_{l, l+j})^2. \tag{2}$$

Продифференцировав (2) по всем переменным и приравняв производные нулю, получим систему нормальных уравнений:

$$(n-1)x_k - \sum_{i=1}^{k-1} x_i - \sum_{i=k+1}^n x_i = d_k \quad \text{при } k=1, 2, \dots, h; \quad (3)$$

$$n x_k - \sum_{i=1}^{k-1} x_i - \sum_{i=k+1}^n x_i = d_k \quad \text{при } k=h+1, h+2, \dots, n,$$

где введено следующее обозначение:

$$d_k = \begin{cases} \sum_{i=1}^{k-1} l_{i,k} - \sum_{i=k+1}^n l_{k,i} & \text{при } k=1, 2, \dots, h \\ m_0 + l_{0,k} + \sum_{i=1}^{k-1} l_{i,k} - \sum_{i=k+1}^n l_{k,i} & \text{при } k=h+1, h+2, \dots, n. \end{cases} \quad (4)$$

Из коэффициентов при неизвестных системы нормальных уравнений составим матрицу

$$B = \begin{pmatrix} n-1 & -1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & n-1 & -1 & \dots & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & -1 & \dots & n-1 & \dots & -1 \\ -1 & -1 & \dots & -1 & \dots & n-1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & -1 & \dots & -1 & \dots & -1n \end{pmatrix}$$

Определитель матрицы B , как нетрудно показать,

$$\Delta = n^h (n+1)^{n-h-1} \left(1 - \frac{h}{n}\right). \quad (5)$$

Определитель (5) не равен нулю, так как для совместности системы условий уравнений всегда $h < n$.

Для решения системы нормальных уравнений воспользуемся формулой Крамера для линейных уравнений: $\hat{x}_k = \Delta_k / \Delta$, где Δ_k — определитель матрицы B , в котором коэффициенты, соответствующие каждому неизвестному, заменены свободными членами.

После несложных преобразований получим решение для искомых оценок:

$$\hat{x}_k = \begin{cases} \frac{n+1}{n-h} \left[d_k + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^h (d_i - d_k) + \frac{1}{n+1} \sum_{i=h+1}^n (d_i - d_k) \right] & \text{при } k=1, 2, \dots, h \\ \frac{n}{n-h} \left[d_k + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^h (d_i - d_k) + \frac{1}{n+1} \sum_{i=h+1}^n (d_i - d_k) \right] & \text{при } k=h+1, h+2, \dots, n. \end{cases} \quad (6)$$

Для нахождения дисперсий оценок неизвестных определяем элементы обратной матрицы B^{-1} , диагональные элементы которой имеют вид:

$$\{B^{-1}\}_{ii} = \begin{cases} \frac{2 - \frac{1}{n}(h-1)}{n-h} & \text{при } i=1, 2, \dots, h \\ (n+1)^{-1} \left(1 + \frac{1}{1-h/n}\right) & \text{при } i=h+1, h+2, \dots, n \end{cases} \quad (7)$$

Из (7) при $h=0$ имеем для полной схемы попарных сличений известный результат [2]:

$$\{B^{-1}\}_{ii} = \frac{2}{n+1}.$$

Дисперсии оценок неизвестных

$$\sigma^2(\hat{x}_k) = \{B^{-1}\}_{kk} \frac{\sigma^2}{p}, \quad (8)$$

где p — число измерений каждой разности.

Как видно, дисперсии оценок тех вторичных эталонов, которые не сличались с исходным эталоном, больше, чем для эталонов, сличавшихся с исходным. При необходимости уравнивания всех дисперсий искомым оценкам можно для измеряемых величин $I_{0,i}$ и $I_{i,j}$ произвести разное число измерений (p_1 и p_2). Пусть σ_0^2 — предельно допустимая дисперсия оценок неизвестных. Тогда числа измерений, при которых все дисперсии оценок неизвестных равны σ_0^2 , выражаются формулами

$$p_1 = \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} \frac{2 - \frac{1}{n}(h-1)}{n-h}; \quad (9)$$

$$p_2 = \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} (n+1)^{-1} \left(1 + \frac{1}{1-h/n} \right).$$

Таким образом, для выравнивания дисперсии искомым оценкам при сличениях эталонов друг с другом число измерений разностей ($I_{i,j}$) должно быть больше числа измерений разностей при сличениях с исходным эталоном ($I_{0,i}$). При этом, чем больше параметр усечения, тем больше необходимо произвести измерений $I_{i,j}$. Обработка результатов измерений производилась на ЭВМ.

Результаты многократных взвешиваний на эталонных весах дали следующие значения $I_{0,i}$ и $I_{i,j}$ *

$$\begin{aligned} I_{0,3} &= +3,7984 \text{ мг}; & I_{1,4} &= -0,5967 \text{ мг}; \\ I_{0,4} &= -3,2162 \text{ мг}; & I_{2,3} &= +0,0566 \text{ мг}; \\ I_{1,2} &= +0,3648 \text{ мг}; & I_{2,4} &= -6,9582 \text{ мг}; \\ I_{1,3} &= +0,3913 \text{ мг}; & I_{3,4} &= -6,9980 \text{ мг}. \end{aligned}$$

С помощью формул (4) и (6), принимая $n=4$ и $h=2$, на основании результатов измерений получены оценки искомым величин:

$$\hat{x}_1 = 1 \text{ кг} + 3,4745 \text{ мг};$$

$$\hat{x}_2 = 1 \text{ кг} + 3,8312 \text{ мг};$$

$$\hat{x}_3 = 1 \text{ кг} + 3,8774 \text{ мг};$$

$$\hat{x}_4 = 1 \text{ кг} - 3,1252 \text{ мг};$$

* Сличения, в которых применялся прототип № 12, производились Н. А. Смирновой и Р. Д. Цапной. В других сличениях принимала участие И. Б. Блюмгардт.

Средняя квадратическая погрешность условных уравнений

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum v_{ij}^2}{m-n}}$$

где m — число условных уравнений.

Для проведенных измерений

$$\sum v_{ij}^2 = 4,2 \cdot 10^{-6} \quad \text{и} \quad \sigma_y = 0,010 \text{ мг.}$$

Средние квадратические погрешности оценок массы эталонов-копий

$$\sigma(\hat{x}_k) = \sigma_y \sqrt{(B^{-1})_{kk}}$$

Применительно к выполненным измерениям

$$\sigma(\hat{x}_1) = \sigma(\hat{x}_2) = 0,009 \text{ мг;} \quad \sigma(\hat{x}_3) = \sigma(\hat{x}_4) = 0,008 \text{ мг.}$$

Значения поправок эталонов-копий с соответствующими средними квадратическими отклонениями результатов измерений приведены в таблице. Здесь же приведены для сравнения поправки, полученные при сличениях в 1959 г.

Эталон-копия	Поправка 1969 г., мг	Поправка 1976 г., мг	Среднее квадратическое отклонение результата измерений, мг	Изменение массы, мг
V $\frac{\text{ст}}{\text{I кг}}$ № 6	+3,466	+3,474	0,009	+0,008
H $\frac{\text{ст}}{\text{I кг}}$ № 8	+3,746	+3,831	0,009	+0,085
V $\frac{\text{ст}}{\text{I кг}}$ № 15	+3,838	+3,877	0,008	+0,039
R ₁ $\frac{\text{Pt Ir}}{\text{I кг}}$	-3,116	-3,125	0,008	-0,009

При расчете поправок и их дисперсий по методике [1], в которой учитывались веса условных уравнений, практически получаются те же значения поправок и их дисперсий. Это подтверждает возможность принятия одинакового веса для всех условных уравнений. В работе [3] также указывается, что метод совокупных измерений массы малочувствителен к выбору весов условных уравнений.

Отсутствие систематических погрешностей в измерениях характеризуется критерием

$$\chi^2 = \frac{\sum v_{ij}^2}{\sigma^2};$$

для измерений, выполненных в 1976 г., он равен $\chi^2=3,8$; это указывает на отсутствие систематических погрешностей в результатах измерений, так как при четырех степенях свободы величина χ^2 должна быть не более 9,5 при 5%-ных доверительных пределах.

Как видно из данных таблицы, масса платиноиридиевого эталона-копия R₁ $\frac{\text{Pt Ir}}{\text{I кг}}$ за 17 лет уменьшилась на 0,009 мг, а масса эталонов-копий из нержавеющей стали увеличилась от 0,008 мг до 0,085 мг. Более всего увеличилась

масса эталона-копии $\text{H} \frac{\text{Pt}}{\text{Ir}}$ № 8, который практически не применялся. Очевидно, здесь играют роль как факторы механического износа, так и поверхностные эффекты, наиболее значительные для гирь из нержавеющей стали.

Проведенные сличения эталонов-копий с 1959 г. до настоящее время свидетельствуют о хорошей стабильности платиноиридиевого эталона $\text{R} \frac{\text{PtIr}}{\text{Ir}}$. Хотя эталоны-копии из нержавеющей стали менее стабильны, но их можно применять для аттестации рабочих эталонов массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнова Н. А. Оценка погрешностей при сличениях эталонов-копий с первичным эталоном единицы массы СССР и некоторые изменения в пользовании ими. — Исследования по методике оценки погрешностей измерений. Труды институтов комитета, 1962, вып. 57(117), Стандартгиз.
2. Kubacek L. The Homogeneity of Precision and the Optimality of Measuring of Derived Etalons of Length. — Metrologia, 1971, v. 7, No 1.
3. Prouse D. B. and Anderson A. R. Calibration of a set of masses in terms of one mass standard. — Metrologia, 1974, No. 3.

Поступила в редакцию 25/IV-77 г.

УДК 681.2.07.089.6

В. С. СНЕГОВ, Н. А. СМИРНОВА
ВНИИМ

КАЛИБРОВКА НАБОРОВ ГИРЬ ПО СПОСОБУ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Калибровка гирь заключается в сравнении различных гирь и их сочетаний в различных комбинациях и вычислении по результатам этих сравнений массы отдельных гирь, исходя из известного значения одной из них.

Калибровка применяется при проверке наборов эталонных гирь, образцовых гирь 1-го и 2-го разрядов и гирь 1-го и 2-го классов точности. Для аттестации эталонных и образцовых гирь до последнего времени применялись избыточные системы уравнений (число уравнений равно числу неизвестных) [1]. При аттестации эталонных гирь для достижения требуемой точности калибровка проводилась многократно (до 5—6 раз). Все калибровки рассчитывались отдельно, затем для каждой гири находилось среднее значение из полученных результатов. В связи с широким распространением ЭВМ в настоящее время появилась возможность использовать для калибровки гирь избыточные системы уравнений и решать их по методу наименьших квадратов. Д. В. Прауз и А. Р. Андерсон [2] разработали достаточно эффективную схему калибровки для наборов гирь с соотношением номинальных значений массы в каждом разряде 5:3;2:1. Схему калибровки определяет так называемая структурная матрица A . Систему условных уравнений можно записать в матричной форме следующим образом:

$$L = AX + V, \quad (1)$$

где L — вектор измеренных величин; X — вектор неизвестных параметров (значения массы гирь); V — вектор остаточных погрешностей.

Будем считать, что остаточные погрешности v подчиняются совместному распределению с нулевым математическим ожиданием, т. е. $E(V) = 0$ или

$$E(L) = \hat{L} = \hat{A}X,$$

Для решения условных уравнений (1) воспользуемся методом наименьших квадратов [4, 5]. Для этого необходимо знать ковариационную матрицу $D(L)$. В общем виде ее можно представить следующим образом:

$$D(L) = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 \rho_{11} \sigma_1^2 & \dots & \sigma_1 \sigma_n \rho_{1n} \\ \sigma_2^2 \rho_{21} \sigma_2^2 & \dots & \sigma_2 \sigma_n \rho_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \sigma_n^2 \rho_{n1} \sigma_n^2 \rho_{2n} \dots & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix}$$

где n — число неизвестных параметров;

$$\sigma_i^2 = E(v_i^2); \quad \sigma_{ij} \rho_{ij} = E(v_i v_j) = \text{cov}(l_i, l_j).$$

Метод наименьших квадратов основан на минимизации суммы квадратов остаточных погрешностей

$$\sum_{i=1}^n (l_i - \hat{l}_i)^2,$$

что приводит к системе нормальных уравнений [6], которые можно записать в матричной форме

$$[A^1 D^{-1}(L) A] \hat{X} = A^1 D^{-1}(L) L. \quad (2)$$

Решение системы [2] имеет вид

$$X = [A^1 D^{-1}(L) A]^{-1} A^1 D^{-1}(L) L. \quad (3)$$

Допустим, что $D(L)$ известна с точностью до постоянного множителя, т. е.

$$D(L) = \sigma^2 G \quad (4)$$

и

$$D^{-1}(L) = \frac{1}{\sigma^2} G^{-1}. \quad (5)$$

В (5) G^{-1} — весовая матрица, а σ^2 — дисперсия измерений с единичным весом. Путем преобразования

$$L^* = G^{-1/2} L; \quad A^* = G^{-1/2} A; \quad (6)$$

система нормальных уравнений (2) и ее решение примут вид

$$A^{*1} A^* X = A^{*1} L^*; \\ \hat{X} = (A^{*1} A^*)^{-1} A^{*1} L^*.$$

При калибровке наборов гирь применяются схемы, по которым одновременно могут калиброваться один или два набора [1, 2]. Схема калибровки для двух наборов более эффективна, так как при этом возможно получение значительного числа степеней свободы. При этом взвешивания производятся при наибольшей нагрузке на весы, что способствует уменьшению влияния погрешностей взвешивания.

Для простоты решения условных уравнений целесообразно обрабатывать результаты наблюдений отдельно для каждого разряда гирь. Системы условных уравнений для всех разрядов идентичны. В первый разряд включается исходный эталон, в последующих разрядах роль промежуточного эталона выполняет наименьшая гиря предыдущего разряда. Например, при калибровке граммового набора гирь, включающего гири 500, 200, 200, 100, 50, 20, 20, 10, 5, 2, 2 и 1 г, роль исходного эталона выполняет гиря в 1 мг, а в качестве промежуточных эталонов используются гири 100 и 10 г.

При калибровке гири первого разряда их погрешности определяются погрешностью исходного эталона (систематическая составляющая) и погрешностями взвешивания (случайная составляющая). В последующих разрядах к ним добавляются перенесенные случайные погрешности промежуточных эталонов. Суммарная погрешность полученного значения для массы гири x_i будет определяться по формуле:

$$(\sigma_{\text{обш}})_i = r_{10} \delta_0 + \left(\sigma_i^2 + \sum_h r_{ih}^2 \sigma_h^2 \right)^{1/2},$$

где $r_{10} \delta_0$ — перенесенная систематическая погрешность исходного эталона; σ_i^2 — дисперсия, обусловленная измерениями в текущем разряде; $\sum r_{ih}^2 \sigma_h^2$ — перенесенная дисперсия промежуточных эталонов; r_{10} — отношение номинальных значений i -й гири и исходного эталона x_i/x_0 ; r_{ih} — отношение номинальных значений i -й гири и h -го промежуточного эталона x_i/x_h ; δ_0 — погрешность исходного эталона.

По вышеописанной методике была разработана схема калибровки для наборов гирь с соотношением номинальных значений в разрядах 5:2:2:1. Элементы матрицы **A** для этой схемы приведены в табл. 1.

Таблица 1

A	5	5'	5*	2	2'	2*	2'	1	1'
1	1	1	-1	-1	-1			-1	
2	1	1	-1		-1	-1			-1
3	1	1	-1			-1		-1	
4	1	1	-1	-1			-1		-1
5	1	1		-1	-1	-1	-1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1			-1	
7	1	-1	1		-1	-1			-1
8	1	-1	1			-1	-1	-1	-1
9	1	-1	1	-1			-1		-1
10*	1			1	1			1	
11*	1				1	1			1
12*	1					1	1	1	1
13*	1			1			1		1
14*		1		1	1			1	1
15*		1			1	1		1	1
16*		1				1	1	1	1
17*		1		1			1		1
18	*		1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
19	1		1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
20				1	1		-1		
21				1	1	-1		-1	-1
22				1	1		-1	-1	-1

* — сличения с исходным эталоном.

Для обеспечения избыточности системы условных уравнений калибровались одновременно два набора; в каждом разряде добавлялась дополнительная гиря, кратная 5, обозначения в табл. 1 как 5*.

Схема калибровки выбиралась таким образом, чтобы коэффициент заполнения составлял примерно 2/3, а число уравнений, соответствующих взвешиваниям при максимальной нагрузке, было как можно больше. Однород-

ность погрешностей может быть достигнута при одинаковой частоте применения калибруемых гирь. Выполнение этого требования возможно при включении в схему трех дополнительных уравнений, которым соответствуют взвешивания при неполной нагрузке на весы, т. е. условиях, отличных от других взвешиваний. Поэтому веса этих условных уравнений могут быть отличными от весов остальных уравнений. Нами были рассчитаны на ЭВМ четыре варианта для весов последних трех уравнений.

В табл. 2 приводятся диагональные элементы ковариационной матрицы неизвестных, которые не зависят от конкретных измерений (I_i) и справедливы для любой калибровки наборов гирь по схеме, приведенной в табл. 1. Данные табл. 2 определяют дисперсии неизвестных, которые зависят от выбора весов условных уравнений. Веса условных уравнений γ (от 1-го до 19-го) приняты равными 1, а веса последних трех уравнений (от 20-го до 22-го) принимались равными 1, 3, 5, 7.

Как видно из табл. 2, дисперсии неизвестных зависят от весов последних трех уравнений. Веса условных уравнений могут быть повышены за счет увеличения числа повторных измерений. Повышение веса свыше 3 нецелесообразно, так как при значительной затрате времени на повторные измерения повышения точности практически не происходит.

Таблица 2

x_j	Диагональные элементы ковариационной матрицы			
	$\gamma=1$	$\gamma=3$	$\gamma=5$	$\gamma=7$
5	0,0860	0,0860	0,0860	0,0860
5'	0,1145	0,1145	0,1145	0,1145
5''	0,1690	0,1690	0,1690	0,1690
2	0,6557	0,1910	0,1535	0,1431
2̄	0,6557	0,1910	0,1535	-0,1431
2'	0,5806	0,0796	0,0340	0,0211
2''	0,5806	0,0796	0,0340	0,0211
1	0,1743	0,0814	0,0709	0,0677
1'	0,1743	0,0814	0,0709	0,0677

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маликов М. Ф. Основы метрологии. М., Стандартгиз, 1949.
2. Prows D. B. and Anderson A. R. Calibration of a set of masses in terms of one mass standard.—Metrologia, 1974, No 4.
3. Долинский Е. Ф. Обработка результатов измерений по способу наименьших квадратов. М., Изд-во Комитета стандартов, 1971.
4. Чеботарев А. С. Способ наименьших квадратов с основами теории вероятностей. М., Геодезиздат, 1958.
5. Rao C. R. Lineror statistical Inference and its applications. New York, 1965.

Поступила в редакцию 25/IV-77 г.

УДК 531.751.1.081.6.089.6

Н. О. КРЫЛОВА, Н. А. СМЕРНОВА
ВНИИМ

К ВОПРОСУ О ЕСТЕСТВЕННОМ ЭТАЛОНЕ МАССЫ

Масса является фундаментальным свойством материи, однако современная физика не дает исчерпывающего ответа на вопрос о физическом содержании этого понятия.

Качественные соображения о свойстве тел обладать инерцией высказал впервые Иоганн Кеплер, но только в законах Ньютона понятие массы приобрело строгую количественную форму. Масса, входящая во второй закон Ньютона ($F=ma$), выражает свойство инерции, т. е. свойство тел определенным образом изменять свою скорость под влиянием данного воздействия, и называется инертной массой. Масса, входящая в закон всемирного тяготения Ньютона ($F = \gamma \frac{m_1 m_2}{R^2}$), описывает качественно и количественно поведение тел, находящихся в поле тяготения, и называется гравитационной массой. Тщательные исследования показали, что инертная и гравитационная массы пропорциональны друг другу и являются как бы различными проявлениями одного и того же свойства.

Экспериментально обнаруженная зависимость массы электрона от скорости

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (1)$$

где m_0 — масса покоя; $\beta = v/c$ — отношение скорости электрона к скорости света, заставила по-новому взглянуть на массу. В данном случае заряженное тело при изменении его скорости проявляет добавочную инертность, т. е. ведет себя как тело с добавочной массой. В отличие от механической массы, которая фигурирует в законах Ньютона, эта масса электромагнитного происхождения обусловлена движением электрона в электромагнитном поле, порожденном им самим.

Дальнейшее развитие понятие массы получило в теории относительности А. Эйнштейна, утверждающей, что зависимость от скорости имеет масса любого происхождения (не только электромагнитного) и эта зависимость описывается тем же соотношением (1).

Открытый Эйнштейном закон взаимосвязи массы и энергии ($\Delta E = \Delta mc^2$) значительно расширил представления как о массе, так и об энергии и ввел понятие об эквивалентности массы и энергии. В соответствии с теорией относительности изменение любого вида энергии (кинетической, электромагнитной, тепловой, энергии связи атомов и т. п.) на величину ΔE неизменно связано с изменением массы на величину $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$.

Идея М. Планка о том, что любая система при любых процессах может поглощать и отдавать энергию не непрерывно, а лишь определенными порциями, квантами, была подтверждена многочисленными опытами. Установлено, что энергия кванта E связана с частотой излучения ν соотношением $E = h\nu$, где h — постоянная Планка, и каждый квант энергии можно рассматривать как частицу с определенной массой. Последнее было подтверждено опытами П. Н. Лебедева, доказавшими наличие светового давления и послужившими началом коренных изменений ньютоновского понятия массы. Понятие массы в механическом смысле оказалось неприменимым к свету, так как ему присуще свойство инерции, неждественное с механическим понятием массы.

Отметим, что массой обладают также кванты других полей, а не только электромагнитного (например, мезоны для ядерного поля), но в каждом случае мы имеем дело как бы с разными массами, так как свойства инерции для различных материальных объектов в различных полях отличаются по своей природе.

Идеи теории относительности позволили предсказать ряд явлений, подтвержденных впоследствии экспериментально, и объяснить некоторые непонятные факты. Так, квантовой электродинамикой, которая оперирует квантовыми полями, отражающими единство корпускулярной и волновой природы физических объектов, предсказана возможность процессов рождения и поглощения частиц. Одним из экспериментальных фактов, подтвердивших эту гипотезу, явилось рождение электронно-позитронной пары из γ -кванта и выделение γ -квантов при аннигиляции пары. Современная квантовая теория рассмат-

ривает частицу как состояние реального поля, квант поля. Понятие частицы и поля соединяется в одно понятие квантового поля как особой формы существования материи. При взаимодействии различных квантовых полей кванты-частицы могут рассеиваться, размножаться, переходить в кванты-частицы других сортов. Таким образом, в микроусловиях деление материи на вещество и поле теряет смысл, тогда как в макроусловиях материя проявляет себя либо как вещество, либо как поле.

С развитием теории относительности была объяснена нецелочисленность атомного веса нуклидов. Оказалось, что при образовании ядра из протонов и нейтронов масса ядра меньше суммы масс изолированных нуклонов на величину, называемую дефектом массы. Дефект массы — это та часть массы элементарных частиц, которая перешла в излучение при образовании из этих частиц системы, причем величина этой энергии определяет энергию связи частиц в ядре и характеризует прочность ядра.

Рассмотрим первые два члена разложения соотношения, выражающего зависимость массы от скорости, в ряд при $v \ll c$:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx m_0 + \frac{m_0 v^2}{2c^2}. \quad (2)$$

Это означает, что полная масса частицы состоит из массы покоя m_0 и малой добавки, зависящей от скорости и называемой массой движения. Существует мнение, что физическая природа этих масс различна. До настоящего времени не решен вопрос, является ли масса электрона массой электромагнитного происхождения, или же масса покоя электрона — чисто механическая. Интересно, но пока не имеет объяснения факт существования частиц с нулевой массой покоя, которые могут двигаться только с максимально возможной скоростью c (скоростью света в вакууме). К таким частицам относятся фотоны, нейтрино.

Несмотря на качественную специфику масс различных материальных объектов, обусловленную различной природой их инертных свойств, все они подчиняются одному закону зависимости массы от скорости, что указывает на единство инертных свойств материи. Для разрешения трудностей в объяснении физической природы масс различных материальных объектов необходимо обобщить и раскрыть глубокую связь между различными полями — гравитационным, электромагнитным, мезонным и т. п.

Современное представление о массе дает основание не отождествлять массу с количеством вещества.* В связи с этим в 1971 г. решением XIV Генеральной конференции по мерам и весам в число основных единиц системы СИ был введен моль — единица количества вещества. Под количеством вещества понимается общее количество всех структурных элементов, образующих рассматриваемый объект, причем структурные элементы, которые обладают идентичным строением и идентичными в качественном отношении свойствами (например, молекулы, атомы, ядра атомов, протоны, нейтроны, электроны и т. д.), называются тождественными элементами. Отметим, что о тождественности можно говорить лишь в определенных пределах точности.

Все счетное множество структурных элементов складывается из более мелких подмножеств тождественных структурных элементов:

$$A_2 = \sum A_i, \quad (3)$$

где A_2 — общее количество структурных элементов; A_i — количество структурных элементов данного вида i .

За единицу количества вещества принят моль — количество вещества системы, содержащее столько структурных элементов, сколько содержится атомов в 0,012 кг нуклидов ^{12}C [7]. Это число называется числом Авогадро. Точное

* Подробный анализ различий между этими физическими величинами приведен в статье Б. Я. Горшштейна [1].

значение его неизвестно, поскольку не существует метода, который бы позволил пересчитать такое большое число атомов.

Косвенным путем число Авогадро определяется через массу вещества и относительные атомные и молекулярные массы, но полученное таким образом значение лишь с определенной степенью точности отражает истину, так как нельзя простым суммированием масс микрообъектов перейти к массе макрообъекта. Необходимо учитывать энергию связи при образовании из отдельных частиц системы. Так, например, в случае твердого тела при образовании из отдельных атомов системы или при разрыве химических связей общая масса изменяется на величину, определяемую энергией взаимодействия между частицами, и относительное изменение массы составляет 10^{-8} — 10^{-9} , что соответствует наименьшей погрешности измерения массы. В области ядерных превращений относительное изменение массы из-за взаимодействия между нуклонами еще больше ($\sim 10^{-2}$) и в принципе может быть обнаружено взвешиванием.

Переходя к проблеме естественного эталона массы, отметим, что под естественным эталоном понимается эталон, основанный на фундаментальных физических константах и устойчивых воспроизводимых физических явлениях. Для естественного эталона массы такой фундаментальной константой с большой степенью точности можно считать массу нуклона и попытаться каким-либо образом осуществить переход в область макромасс, установив при этом связь между существующей единицей измерения массы (килограммом) и единицей измерения масс нуклидов (e) [2].

Замена существующего эталона массы естественным эталоном необходима по ряду причин. Как известно, эталоном массы, воспроизводящим единицу массы, — килограмм, является международный прототип килограмма — платиноиридиевая гиря, которая хранится и используется в соответствии со специально разработанными рекомендациями, направленными на обеспечение максимальной стабильности ее массы при условии неизбежно протекающего процесса изменения массы вследствие механического износа, испарения и т. п. Кроме того, существующий эталон массы невоспроизводим и может быть навсегда утрачен. Если для двух других основных единиц измерения — метра и секунды — уже созданы естественные эталоны, связанные с такими физическими процессами, которые позволяют воспроизводить эти единицы с большой степенью точности, то для единицы массы этот вопрос является проблемным.

Проблема создания естественного эталона массы осложнена тем, что требуется очень высокая точность измерения. Существующий эталон и средства измерения массы позволяют измерять с относительной погрешностью $7 \cdot 10^{-8}$ — $2 \cdot 10^{-9}$ в диапазоне 1—20 кг; это дает основание отнести измерение массы едва ли не к самым точным среди различных видов измерения.* Однако массы от 2 г до 2 мг измеряются лишь с относительной погрешностью $1 \cdot 10^{-7}$ — $1 \cdot 10^{-4}$, а гири с массой менее 10^{-4} г вообще не могут быть изготовлены из-за очень малых размеров. Поэтому метод калибровки, применяемый для перехода от эталонного килограмма к кратным и дольным мерам единицы массы, не может быть использован для передачи размера единицы в область микромасс, где эталоном массы является масса изотопа углерода ^{12}C , принятая равной 12 единицам ($12e$). Для обеспечения единообразия и единства измерения массы необходимо применение одной исходной единицы, так как только в этом случае результаты измерения могут сравниваться между собой.

В настоящее время намечался путь создания естественного эталона массы. С развитием физики и техники полупроводников появились монокристаллы, совершенные по своей структуре. Такие монокристаллы практически не

* Анализ результатов сличений эталонов-свидетелей международного прототипа килограмма и национальных прототипов в МБМВ [3] показывает, что при учете нестабильности массы прототипов килограмма из платиноиридиевого сплава, обусловленной поверхностными явлениями, относительная погрешность измерения массы становится не менее $1 \cdot 10^{-8}$ — $2 \cdot 10^{-9}$.

имеют дислокаций, содержат малое количество примесей и могут быть использованы для создания естественного эталона массы. Имея идеальный (с достаточной степенью точности) монокристалл, можно вычислить его массу в единицах масс нуклидов по формуле

$$m_{\text{кр}} = \frac{Vf}{d^3\Phi} m_a, \quad (4)$$

где V — объем монокристалла, м^3 ; d — постоянная решетки, м ; f — число атомов в элементарной ячейке ($f=8$ для монокристаллов кремния); Φ — структурный множитель, зависящий от формы элементарной ячейки ($\Phi=1$ для кубических кристаллов); m_a — среднее значение массы атомов с учетом содержания изотопов, e .

В этой формуле отношение $Vf/d^3\Phi$ определяет число атомов в данном монокристалле. Умножая его на среднее значение массы атомов m_a , получим массу монокристалла в единицах масс нуклидов. Для получения точности 10^6 – 10^9 необходимо учитывать энергию связи атомов в кристалле, которая составляет величину порядка 10 эВ на атом. Взвесив монокристалл, получим его массу в килограммах ($m_{\text{кр}}^*$) и установим соотношение между единицей масс нуклидов и килограммом

$$m_{\text{кр}} = K m_{\text{кр}}^*, \quad (5)$$

Относительная погрешность определения массы монокристалла по формуле [4], определяемая погрешностями измерения объема V , постоянной решетки d и среднего значения массы атомов с учетом содержания изотопов m_a , может быть доведена в настоящее время до $1 \cdot 10^{-6}$; существует перспектива повышения точности по крайней мере на порядок [4].

Можно показать, что определение коэффициента перехода между единицей атомной массы и килограммом эквивалентно определению числа Авогадро. Действительно, учитывая, что число Авогадро N — это число атомов в одном моле, можно написать

$$N = \frac{A}{m_a^*} = K \frac{A}{m_a}, \quad (6)$$

где A — масса моля атомов, кг/моль ; m_a^* — масса атома в килограммах, кг . Из этого выражения следует, что так как отношение A/m_a численно равно 10^3 , то N численно равно $10^{-3} K$.

В НБС успешно проводятся работы по определению числа Авогадро с помощью совершенного монокристалла кремния. Число Авогадро выражается через параметры кристалла по формуле, аналогичной (4):

$$N = \frac{Vf}{d^3\Phi} \frac{A}{m_{\text{кр}}^*}, \quad (7)$$

где $\frac{Vf}{d^3\Phi}$ — число атомов в монокристалле, $m_{\text{кр}}^*/A$ — число молей в монокристалле.

Измерение постоянной решетки монокристалла d выполнено с помощью оптико-рентгеновского интерферометра с относительной погрешностью $0,25 \times 10^{-6}$ [4]; точность измерения может быть повышена еще на два порядка.

Большие трудности возникают при определении среднего значения атомной массы для монокристалла кремния. Относительные атомные массы отдельных изотопов кремния определены с относительной погрешностью $3 \cdot 10^{-6}$ [5], но проблема заключается в определении содержания изотопов ^{28}Si , ^{29}Si и ^{30}Si с относительной погрешностью $1 \cdot 10^{-4}$. Специально разработанная методика определения относительного содержания изотопов позволила получить требуемую точность [4].

Определение объема монокристалла кремния путем измерения его геометрических размеров оказывается затруднительным, поэтому вместо измерения объема и массы была измерена его плотность. При этом вместо воды,

которая не может обеспечить требуемую точность, использовались твердые эталоны плотности. С помощью специально сконструированного интерферометра были измерены с большой точностью геометрические размеры шести стальных шаров. Массы этих шаров определялись сравнением с эталоном-копией № 20. Полученные таким образом значения плотности были переданы четырем образцам из монокристаллов кремния методом гидростатического взвешивания по фторуглероде. Новый метод определения плотности позволил повысить точность измерений. В дальнейшем этим способом можно будет измерять плотность с относительной погрешностью, значительно меньшей, чем $1 \cdot 10^{-6}$ [4].

В настоящее время получено новое значение числа Авогадро с относительной погрешностью $1,05 \cdot 10^{-6}$ [4]. По мнению специалистов ИБС, существует реальная перспектива повышения точности этой фундаментальной константы и перехода на естественный эталон массы [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горюштейн Б. Я. Моль — единица количества вещества. — Измерительная техника, 1972, № 5.
2. Кравиц В. А. Массы атомов и энергии связи ядер. Атомиздат, 1974.
3. Bonhore A. Kilogrammes prototypes. Travaux et memories. — "BIPM", 1966.
4. Deslattes R. D., Henins A., Bowman H. A. Determination of the Avogadro Constant. — Phys. Rev. Lett. 1974, v. 33, № 8.
5. Wapstra A. H., Gove N. B. Data Tables, 1971, v. A9.
6. Avogadro Constant Determination Sparks Advances in Measurement Science. — Dimensions, 1974, v. 58, № 10.
7. Definition of Basic SI Units. — Metrologia, 1968, № 4.

Поступила в редакцию 25/IV-77 г.

УДК 681.2.07 : 669.14.018

М. И. ТЮТКОВА, Р. Д. ЦАПИН
ВНИИМ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ТОЧНЫХ ГИРЬ

К числу наиболее точных гирь, применяемых в СССР, помимо эталонов, относятся образцовые гири 1-го разряда по ГОСТ 12656—67, гири общего назначения по ГОСТ 7328—73, гири, встраиваемые в лабораторные весы 1-го класса и специальные наборы гирь, предназначенные для поверки этих весов.

Основным требованием, предъявляемым к точным гирям, является стабильность их массы, которая зависит от материала гири, качества изготовления гири и условий их применения и хранения.

Стабильность массы гирь определяется прежде всего свойствами материала: сопротивлением его износу, коррозии, гидроскопичностью, способностью хорошо обрабатываться и его физическими свойствами. Сопротивление материала износу зависит от его твердости и вязкости. Чем тверже материал, тем меньше истирание поверхности гири при ее сравнении с поверхностью чаши, подставки, пишета, гнета футляра и т. д. В нормативных документах сопротивление гири износу характеризуется изменением ее массы после применения в нормальных условиях в течение 30 дней. Это изменение должно быть не более предела допускаемой погрешности определения массы гири. В работе [6] для изготовления точных гирь рекомендуется использовать материал, твердость которого не менее 75—85 RB или $\sigma_a = 50 \pm 60$ кгс/мм².

Материал для гирь без каких-либо покрытий не должен корродировать как в нормальных атмосферных условиях, так и при наличии в атмосфере вредных паров и газов. Межкристаллическая коррозия и коррозия поверхностных слоев гирь приводит к изменению ее массы.

Материал для гирь не должен иметь микропор и микротрещин, в которые могли бы проникать пары влаги, пыль и другие посторонние вещества, могущие вызвать изменения массы гирь. Изменение массы гирь после пребывания ее в воде в течение 2—3 ч и последующей ее протирки и просушки в течение двух суток должно быть не более предела допустимой погрешности определения массы гирь. Износ гирь зависит также и от шероховатости поверхности: чем выше класс шероховатости, тем меньше износ, тем стабильнее адсорбционная пленка, а следовательно, и масса гирь. Поверхность гирь должна быть зеркальной, не ниже 10—12-го класса шероховатости.

Стабильность массы и точность гирь зависят и от физических свойств материала: теплоемкости, теплопроводности, плотности и магнитных характеристик. Материал для гирь должен обладать низкой теплоемкостью и высокой теплопроводностью для быстрого выравнивания температуры гирь с температурой окружающей среды.

Как показал опыт работы с точными гирями, даже для слабомагнитных гирь характерны изменения результатов взвешивания вследствие взаимодействия гирь с отдельными деталями весов и блуждающих магнитных полей. Размагничивание гирь не приводит к желаемым результатам, так как они быстро вновь намагничиваются до полного насыщения блуждающими магнитными полями. В качестве характеристики магнитного состояния материала можно принять магнитную проницаемость и остаточную намагничиваемость. В работах [3, 6] рекомендуется изготавливать точные гирь из материала, магнитная проницаемость которого не превосходит 1,001 и остаточная намагничиваемость не более 100 А/м. Во ВНИИМ в качестве характеристики магнитного состояния материала принят магнитный момент. Исследованиями установлено, что для образцовых гирь 1-го разряда массой 1 кг магнитный момент должен быть не более $(1+2) \cdot 10^{-3}$ А·м² (1,0±2,0 ед. CGSM). Магнитные характеристики материала должны быть стабильными и не изменяться при механической обработке. Электростатический заряд гирь также должен быть постоянным и не изменяться под воздействием водяных паров воздуха, при трении поверхности гирь о стенки футляра или при очистке поверхности гирь. Изменение электростатического заряда гирь ведет к кажущемуся изменению ее массы.

Точность аттестации гирь во многом зависит от плотности материала. В соответствии с действующими стандартами юстирование и поверку всех гирь производят в воздухе на основе единой условной плотности материала $8,0 \cdot 10^3$ кг/м³ и средней плотности воздуха 1,2 кг/м³. Это позволило значительно упростить методику поверки точных гирь, так как при этом отпала необходимость введения в результат взвешивания поправки на действие аэростатической силы на сличаемые гирь. Введение этой поправки требует дополнительных измерений и трудоемких расчетов.

Поправка m на действие аэростатической силы на гирь рассчитывается по формуле

$$m = \Delta V e \text{ или } m \pm \Delta m = \Delta V (e \pm \Delta e) = \Delta V e \pm \Delta V \Delta e,$$

где ΔV — разность объемов сличаемых гирь; e — средняя плотность воздуха, равная 1,2 кг/м³; Δe — отклонение действительной плотности воздуха во время сличений от среднего значения; Δm — изменение поправки, вызываемое изменением плотности воздуха.

Таким образом, поправка m состоит из двух частей — постоянной $m = \Delta V e$ и переменной $\Delta m = \Delta V \Delta e$. Для определения последней необходимо знание действительной плотности воздуха во время сличения гирь.

При поверке гирь по условной плотности материала и средней плотности воздуха переменная часть поправки $\pm \Delta m$ полностью войдет в погрешность аттестации гирь. Значение ΔV в данном случае следует рассматривать как разность между действительным объемом гирь и ее объемом, рассчитанным

по плотности $8,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Уменьшить указанную составляющую погрешности аттестации гири можно за счет уменьшения значения ΔV , что возможно только в том случае, если действительная плотность материала гири близка к принятой условной.

Рассмотрим, какова должна быть действительная плотность материала для точных гирь. Предел допускаемой погрешности определения массы образцовых гирь 1-го разряда и рабочих гирь 1-го класса массой 1 кг, 500 г, 200 г, и 100 г равен $2 \cdot 10^{-7}$, $2 \cdot 10^{-7}$, $2,5 \cdot 10^{-7}$ и $3 \cdot 10^{-7}$ соответственно (ГОСТ 7328—73).

В лабораторных условиях плотность воздуха изменяется не более, чем на 10%, т. е. $\Delta \rho = \pm 0,12 \text{ кг/м}^3$. Гиря поверяются по рабочему эталону массой 1 кг. В свидетельствах указывается масса эталона, приведенная к условной плотности материала и средней плотности воздуха. Масса эталона при поверке гирь вследствие изменения плотности воздуха может отличаться от значения, указанного в свидетельстве, и поэтому в результате поверки гирь будет вноситься дополнительная погрешность, величина которой зависит от отклонения действительной плотности материала эталона от плотности $8,0 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Таким образом, точность аттестации гирь будет зависеть от погрешности рабочего эталона, вызванной пересчетом его массы на условную плотность материала, погрешности метода и погрешности весов. Погрешность аттестации рабочего эталона, равная $1 \cdot 10^{-6}$, мала по сравнению с указанными и ею можно пренебречь. В благоприятных случаях первые две составляющие погрешности будут складываться.

Примем погрешность аттестации гирь, вносимую рабочим эталоном и методом измерения равной половине предела допускаемой погрешности, т. е. $1 \cdot 10^{-7}$. Чтобы обеспечить такую погрешность, отклонение действительной плотности материала гирь массой 1 кг, 500 г, 200 г и 100 г от условной плотности должно быть не более $\pm 0,05 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Для рабочих эталонов и других более точных гирь отклонение действительной плотности материала от условной должно быть еще меньше.

Для образцовых гирь 1-го разряда и гирь 1-го класса массой от 50 до 1 г, предел допускаемой погрешности определения массы которых составляет от $6 \cdot 10^{-7}$ до $7 \cdot 10^{-6}$; это отклонение должно быть в пределах $(0,15 \pm 0,20) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, для миллиграммовых гирь отклонение может достигать $\pm 0,4 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Всем перечисленным выше требованиям отвечают немагнитные, коррозионностойкие, аустенитные, хромоникелевые или хромомарганцовоникелевые (нержавеющие) стали. Из хромоникелевых нержавеющей сталей широкое промышленное распространение получили стали марок X18H9, X18H9T, X18H10T и др. Недостаток этих сталей — нестабильность магнитных характеристик: после механической обработки магнитные моменты этих сталей возрастают. Кроме того, плотность этих сталей, равная $\sim 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, мала для точных гирь.

Для изготовления точных гирь наиболее подходящим материалом являются хромоникелевые стали с большим содержанием хрома и никеля с присадками молибдена, меди и титана.

Молибден способствует лучшей обрабатываемости резанием, повышает износостойчивость, замедляет процесс естественного старения, ведущего к изменению структуры сплава, и несколько повышает его плотность. Медь также несколько увеличивает плотность сплава и повышает коррозионную стойкость в воздушной среде; титан повышает стойкость сплава к межкристаллической коррозии.

Большое влияние на свойства и стабильность структуры хромоникелевых сталей оказывает термическая обработка; в состоянии после закалки большинство хромоникелевых сталей становятся практически немагнитными.

Характеристики марок сталей, рекомендуемых для изготовления килограммовых и граммовых гирь, приведены в табл. 1.

Первые шесть марок сталей выпускаются отечественной промышленностью по ГОСТ 5632—72, две последние марки взяты из каталогов зару-

бежных фирм («Эртлинг», «Стантон», «Сямдаду»). Первые две марки стали можно использовать лишь для изготовления гирь массой 50 г и менее. Для изготовления миллиграммовых гирь рекомендуется, кроме указанных в табл. 1, использовать сплав на никелевой основе марки ХН78Т (ЭИ-35), плотность которого равна $8,4 \times 10^3$ кг/м³.

Таблица 1

Марка стали	Плотность, кг/м ³ × 10 ³	Твердость, РВ	Коэффициент линейного расширения, °С ⁻¹ × 10 ⁶	Магнитный момент, А · м ³ × 10 ⁴	Сопротивление коррозии
X18H9T	7,88	75—80	—	1,0	Коррозионно-стойкая
X23H18(ЭИ-417)	7,87	75—80	16,3	0,05	То же
OX23H28M2T (ЭИ-628)	8,0	$\sigma_{\text{в}}=60$ кгс/мм ²	10,9	0,01	.
4X14H14B2M (ЭИ-69)	8,06	$\sigma_{\text{в}}=55$ кгс/мм ²	17,0	0,01	.
OX23H28M3Д3T	7,98	85	10,9	0,001	Высококоррозионно-стойкая
X25H20C2	7,96	90	—	0,001	То же
X20H25	7,99	75—86	—	1,001 (магнитная проницаемость)	Коррозионно-стойкая
X24H22	7,95	—	—	—	То же

Из сталей X18H9T, X23H18, 4X14H14B2M, OX23H28M3Д3T были изготовлены образцы в форме прямого цилиндра массой 1 кг и исследованы. Для этих образцов были определены плотность, твердость, магнитный момент и коррозионная стойкость. Полученные характеристики оказались близкими к указанным в табл. 1. Более детальному исследованию был подвергнут образец из стали марки OX23H28M3Д3T. Характеристики этого образца определялись после механической обработки (обточки и шлифовки), после закалки и после искусственного старения. Закалка производилась при температуре 1150°С с последующим охлаждением в воде. Искусственное старение осуществлялось путем нагревания образца до 100°С и выдерживания его при этой температуре в течение двух суток.

Плотность материала образца после термической обработки незначительно снизилась, твердость практически не изменилась, а магнитный момент уменьшился более чем в десять раз. После пребывания образца в водопроводной воде в течение трех суток никаких видимых следов коррозии на поверхности образца обнаружено не было, масса образца не изменилась. При комнатной температуре на сталь практически не оказывают влияния: концентрированная серная кислота (50%), слабая соляная кислота (до 2%), солянокислый раствор сернистой меди (4 части CuSO₄, 20 частей HCl и 20 частей H₂O), реактив «Марбле» (20 частей CuSO₄, 100 частей HCl и 100 частей этилового спирта), раствор хлорного железа в воде и этиловом спирте.

Как показали исследования, сталь марки OX23H28M3Д3T отвечает всем указанным требованиям и может быть использована для изготовления точных гирь. Во ВНИИМ из этой стали изготовлены гири массой 1 кг в форме прямого цилиндра. Перед изготовлением заготовки гирь были подвергнуты термической обработке. Шероховатость боковой поверхности гирь соответствует 10—11-м классам, а верхнего и нижнего оснований — 13-му классу. Магнитные моменты гирь, определенные на аstaticком магнитометре ВНИИМ, очень

малы — менее 1×10^{-4} А · м², а магнитная проницаемость — менее 1,001. Масса, объем и плотность материала гири приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер гири	Действительная масса, г	Объем при 20°C, см ³	Плотность материала, кг/м ³ · 10 ³
30	1000,00099	125,342	7,9782
31	1000,00386	125,342	7,9782
32	1000,00238	125,346	7,9779
33	1000,00197	125,346	7,9779
34	1000,00543	125,344	7,9781

В дальнейшем эти гири могут быть использованы в качестве рабочих эталонов единицы массы [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаков А. А., Приданцев М. В. Коррозионностойкие сплавы. М., Металлургия, 1971.
2. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник под ред. Б. Е. Неймарка. М., Энергия, 1967.
3. Could F. A. Tests on Highly Non-magnetic Stainless Steels for use in the Construction of weights.—Journal of Scientific Instruments, 1946, v. 23, № 6.
4. Bigg P. H. and Burch F. H. Further tests on the stability of analytical weights in chemical laboratories.—Brit. J. Appl. Phys., 1954, № 5.
5. Bigg P. H., Burch F. H. The stability of analytical weights particularly in chemical laboratories.—Brit. J. Appl. Phys., 1951, № 2.
6. Gupta S. V., Mathur B. G. Precision weights.—J. S. Y. Bulletin*, 1970, v. 22, № 6.
7. Тютикова М. И. Создание рабочих эталонов единицы массы в 1 кг с погрешностью $\pm 1 \cdot 10^{-4}$. — Метрология и точные измерения, 1976, № 4.

Поступила в редакцию 25/IV-77 г.

УДК 531.752.089.68

В. А. БАРАНОВ
ВНИИМ

СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕСОВ

Точность передачи размера единицы массы на высших ступенях поверочной схемы для гирь и весов во многом определяется точностью метрологических весов.

Работы по повышению точности метрологических весов обусловили создание традиционных весов, включающих в себя трехризмное равноплечее коромысло с подвесками, снабженное системой арретирования, обеспечивающей разъединение призм и подушек при перестановке гирь на чашках весов, и механизм перестановки гирь, позволяющий производить эту операцию, не открывая витрины весов. Совершенствование таких весов с пределом взвешивания в 1 кг позволило достигнуть стандартного отклонения при единичном взвешивании на весах порядка 15—20 мкг.

Известно, что значительная часть от общей погрешности взвешивания зависит от арретирования коромысла и подвесок. В последнее время этот вопрос исследовался более подробно рядом авторов [1—4]. Обнаружено, что после арретирования коромысла и подвесок вследствие нарушения контактов между призмами и подушками, которое происходит не по идеальным линиям, а занимает какую-то площадь, значительно изменяется положение центра качения и соотношение плеч коромысла; это и ограничивает точность взвешивания.

В ряде стран (США, Англия, Япония) созданы новые конструкции весов, в которых перестановка гирь осуществляется без нарушения контактов между призмами и подушками, в результате чего стандартное отклонение при единичном взвешивании на таких весах уменьшилось до 2—10 мкг. В США разработаны метрологические весы с двухпризменным коромыслом [5].

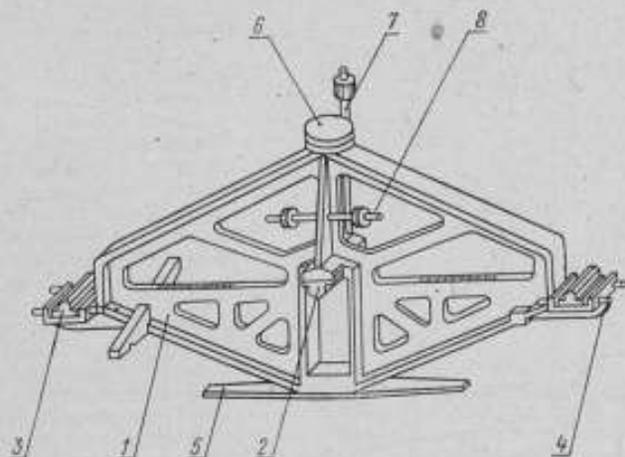


Рис. 1. Коромысло метрологических весов НФД

В статье приводятся краткие описания и анализ конструкций метрологических весов Англии, США и Японии, ознакомление с которыми полезно при разработке новых высокоточных весов.

Принцип перестановки гирь без нарушения контактов между призмами и подушками был впервые осуществлен в метрологических весах на 1 кг Национальной физической лаборатории Англии [4]. Результаты испытаний показали высокую точность взвешивания на этих весах; стандартное отклонение для единичного взвешивания составляет 2—5 мкг.

Коромысло весов (рис. 1) трехпризменное, равноплечее, выполнено в виде жесткой фермы 1 с длиной плеча 150 мм. Для увеличения жесткости наружные ребра коромысла имеют Т-образное сечение. Опорная 2 и грузоприемные 3 призмы установлены на коромысле на специальных плоскопараллельных прокладках, толщина которых подбирается такой, чтобы лезвия призм лежали в одной плоскости. Параллельность лезвий призм регулируется при помощи винтов 4.

Для температурной стабилизации основные детали коромысла, в том числе и призмы, выполнены из одного материала — литого инваритного сплава. Для увеличения твердости рабочих лезвий призм грани, образующие эти лезвия, хромпированы; толщина покрытия составляет 0,1 мм.

В нижней части коромысла горизонтально установлена плоская пружина толщиной 1,6 мм, а в верхней — зеркало 6, используемое в отсчетной системе весов. Коромысло снабжено винтами 7 и 8 с гайками для регулировки чувствительности и положения равновесия. Более точно положение равнове-

сия регулируется рейтерами, выполненными в виде двух дюралюминиевых шариков массой 5,0 мг и 5,5 мг, расположенных на правом и левом плечах коромысла в продольных V-образных канавках и перемещаемых при помощи специальных штанг.

Нагрузка прикладывается к коромыслу через систему последовательно соединенных серег (рис. 2). Верхняя серга 1 в своей нижней части имеет промежуточную призму 2, лезвие которой располагается параллельно лезвию грузоподъемной призмы 3 коромысла.

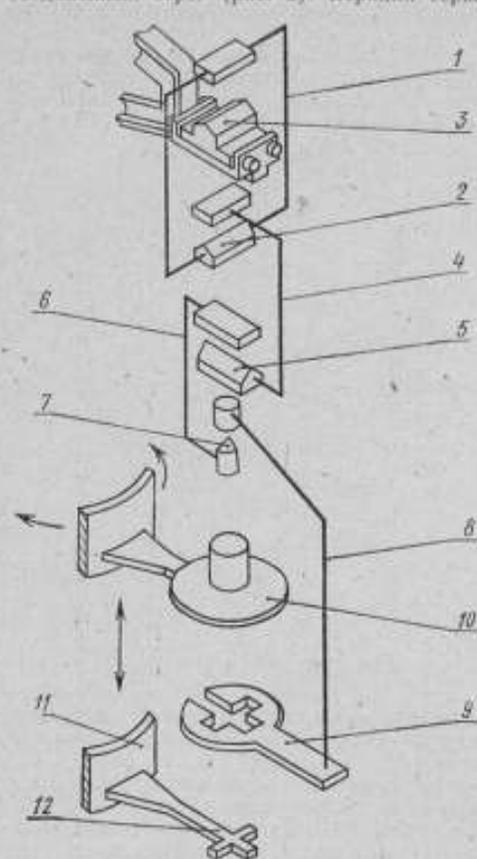


Рис. 2. Схематическое изображение подвески и транспортера гирь весов НФЛ

Средняя серга 4 в нижней части имеет промежуточную призму 5, лезвие которой перпендикулярно к лезвию грузоподъемной призмы 3 коромысла. Нижняя серга 6 снабжена расположенным вертикально керном 7, на который с помощью агатового конического подпятника установлена подвеска 8 с имеющей крестообразное отверстие чашкой 9, на которой на подставке 10 располагается взвешиваемая гиря. Данная система последовательно соединенных перекрещивающихся серег обеспечивает единообразное приложения нагрузки на коромысло весов и способствует уменьшению погрешностей взвешивания.

Перестановка гирь на чашках подвесок осуществляется при помощи транспортера, содержащего вращающееся кольцо 11 и два рычага 12, расположенных под углом 180° по отношению друг к другу и имеющих крестообразные окончания, которые могут свободно проходить через отверстия чашек подвесок. Рычаги транспортера могут вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей через рабочее ребро опорной призмы, и перемещаться возвратно-поступательно и в вертикальном направлении.

Как правило, взвешивания осуществляются по способу Гаусса. После окончания первого частного взвешивания транспортер из нижнего положения перемещается вверх, при этом слываемые гири вместе с подставками 10 подхватываются рычагами 12 и снимаются с чашек 9. Далее транспортер поворачивается на 180° до упора и опускается, после чего слываемые гири с подставками оказываются над противоположными чашками; затем производится следующее частное взвешивание.

Перестановка гирь на чашках весов осуществляется без нарушения контакта между призмами и подушками с помощью специального устройства для остановки колебаний коромысла, выполненного в виде горизонтальной тра-

верса, снабженной упорами, воздействующими на плоскую пружину *Б*, установленную в нижней части коромысла.

Серьги и подвески выполнены из алюминиевого сплава, подушка опорной призмы коромысла и промежуточные призмы и подушка серег — из агата. Вращающееся кольцо транспортера гирь снабжено зубчатым венцом и получает движение от прямозубой шестерни.

Весы содержат арретир коромысла и серег, выполненный в виде бронзовой рамы с упорами, перемещающейся вертикально по стойкам весов, и арретир подвесок — в виде вертикально перемещающихся штоков с упорами, расположенными под чашками подвесок.

Витрина весов представляет собой массивный литой корпус, снабженный воздухонепроницаемыми окнами, через которые можно визуально контролировать работу механизмов весов. Данная конструкция витрины обеспечивает возможность взвешивания при условиях, отличающихся от атмосферных, и способствует лучшему теплораспределению вокруг коромысла. Управление весами осуществляется дистанционно, при помощи специальных штанг.

Высокая точность взвешивания в данной конструкции достигается, в основном, благодаря устройству для перестановки гирь без нарушения контактов между призмами и подушками. Применение симметричного коромысла и высокая однородность литейного сплава, из которого выполнены детали коромысла, обуславливают высокую объемную равномерность. Конструкция перекрещивающихся серег и транспортера обеспечивает приложении нагрузки к призмам коромысла практически в одном и том же месте и минимальное раскачивание подвесок.

Данная конструкция весов обладает рядом недостатков. Так, при перестановке гирь значительно изменяются силы, действующие в контактах между призмами и подушками: после снятия гирь они минимальны, а после нагружения подвесок — достигают наибольшего значения. Поэтому в какой-то мере изменяется и состояние этих контактов.

Транспортер гирь получает вращение от прямозубой шестерни. Известно, что работа подобных передач сопровождается обычно большими или меньшими ударами, толчками и вибрациями. Поворот транспортера гирь происходит до упора, в момент соприкосновения транспортера с упором конструкция весов испытывает удар, сила которого зависит от скорости транспортера, а гири по инерции смещаются на своих подставках.

В Национальном бюро стандартов США в начале 70-х годов были изготовлены двухпризменные весы на 1 кг с коротким плечом. При испытаниях в НБС и Международном бюро мер и весов (МБМВ) получено стандартное отклонение для единичного взвешивания порядка 5 мкг [5].

Основание весов снабжено центральной колонной, на которой установлен держатель гирь, выполненный в виде кольца с концентрическими пазами и снабженный приводным фрикционным и двумя направляющими роликами, обеспечивающими его вращательное движение, и кулачковым приводом вертикального перемещения. На основании также установлены три стойки с закрепленным на них верхним основанием, на котором расположена подушка опорной призмы коромысла, представляющая собой пластинку из карбида бора длиной 62 мм и сечением 10×10 мм²; механизм подъема коромысла, выполненный в виде вертикально перемещающегося ролика, и упоры коромысла и подвески, работающие во время арретирования.

Коромысло весов (рис. 3) двухпризменное, выполненное из заочечной латуни, имеет корпус *1*, на котором установлены два противовеса *2*, закрепленные на свинчивающихся алюминиевых втулках *3* при помощи крепежных винтов *4* с коническими центрирующими поверхностями. Опорная *5* и грузоподъемная *6* призмы выполнены из материала марки «Tantung G», имеют угол заточки 120° и крепятся в специальных гнездах коромысла при помощи клиньев *7*. Длина плеча коромысла 50 мм; расстояние от оси качания противовесов такое же; противовесы сменные. С целью достижения более высокой объемной равномерности коромысла на нем устанавливаются противовесы из материала сличаемых гирь (нержавеющая сталь или платиноиридиевый сплав).

На коромысле установлены также крошечины 8 и 9, работающие при арретировании. Над опорной призмой на коромысле установлено зеркало, являющееся элементом оптической системы весов (на рис. 3 не показано).

В нижней части подвески расположена чашка, выполненная с вертикальными ребрами, входящими в концентрические пазы держателя гирь. При помощи тяг чашка соединена с универсальным шарниром, обеспечивающим свободные колебания чашки, а шарнир — с промежуточной призмой, воздействующей на грузоприемную призму коромысла через специальную подушку. На нижних концах тяг подвески установлена планка с бобышкой, контактирующей со специальным упором верхнего основания при арретировании.

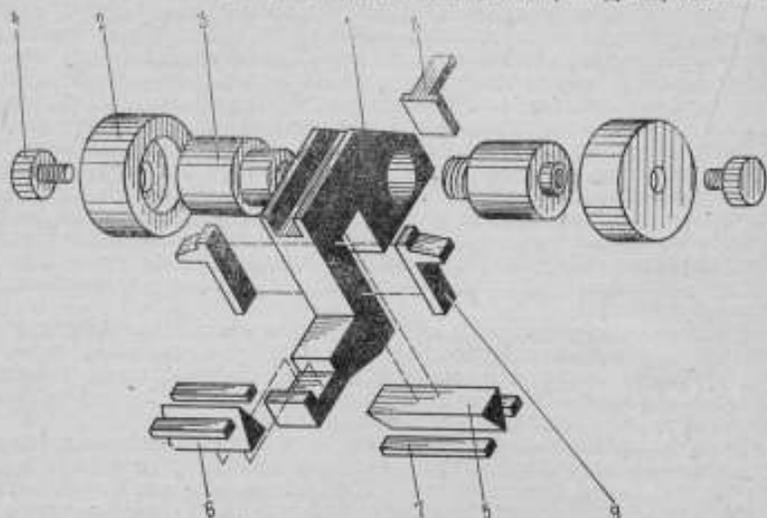


Рис. 3. Схема коромысла весов НЭС.

На держателе гирь могут одновременно располагаться шесть гирь. При перемещении держателя гирь вниз на 10 мм, одна из гирь остается на чашке весов, а ведущий ролик выходит из зацепления с держателем гирь.

Арретирование весов можно осуществлять двумя способами: первый — «полное» арретирование, которое применяется при долговременных перерывах в работе; оно выполняется механизмом подъема, воздействующим на крошечину 8 коромысла (см. рис. 3) при помощи ролика, заклоняющего его до тех пор, пока подвеска не коснется упоров, установленных на верхнем основании. При дальнейшем движении ролика коромысло продолжает заклоняться и крошечинами 9 ложится на соответствующие упоры верхнего основания, а опорная призма и подушка разъединяются.

Второй способ — арретирование «с полной нагрузкой». Начальное положение весов показано на рис. 4, а. При движении держателя гирь 1 вверх он касается гирь 2, расположенной на чашке 3 подвески (рис. 4, б). При дальнейшем движении держателя гирь коромысло заклоняется до тех пор, пока бобышка 4, установленная на подвеске, не коснется упора 5 верхнего основания (рис. 4, в). Далее держатель снимает гирю 2 с чашки 3 подвески и поворачивается до положения, когда над чашкой подвески оказывается гиря, предназначенная для сличения с предыдущей. Держатель движется вниз, и вся процедура повторяется в обратном порядке.

При смене гирь со стороны подвески на коромысло действует постоянная сила; контакт между призмами и подушками при этом не нарушается.

Весы снабжены двойной витриной, содержащей внешний съемный и внутренний корпусы, выполненные из специального картона и колец из рифленной

бумаги, чередующихся с алюминиевыми кольцами. В оптическую систему отсчета входят освещенная шкала, расположенная на расстоянии 3 м от веса, зеркало на коромысле весов и зрительная труба. Для увеличения оптического рычага служит система зеркал, обеспечивающая многократное отражение оптического луча.

К преимуществам конструкции этих весов следует отнести то, что коромысло имеет лишь две призмы, вследствие чего уменьшается трение в опорах весов. Кроме того, оно имеет малый период колебания, вследствие чего на процесс взвешивания затрачивается меньше времени. Коромысло со сменными противовесами, применяемыми при взвешивании гирь из различных материалов, выполнено в виде сплошной детали, благодаря чему тепло в материале коромысла распределяется более равномерно.

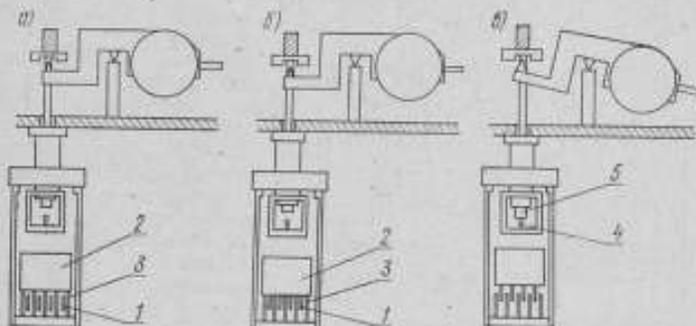


Рис. 4. Схема арретирования «с полной нагрузкой»

В витрине весов одновременно размещается шесть гирь, которые могут сравниваться в различных сочетаниях. Процесс перестановки гирь на чашках весов происходит плавно, так как вертикальное перемещение держатель гирь получает от электродвигателя с регулируемой скоростью, а вращательное — через фрикционную передачу, отличающуюся мягкостью хода. Смена гирь происходит без нарушения контактов между призмами и подушками при постоянных действующих между ними силах. Система «полного» арретирования проста по конструкции. Материал с низкой теплопроводностью, из которого изготовлена витрина, наличие воздушного промежутка между наружными и внутренними корпусами витрины обеспечивают высокую температурную стабильность ее внутреннего объема, а наличие алюминиевых колец — уменьшает горизонтальные температурные градиенты внутри витрины весов.

В Институте метрологии Японии также были изготовлены новые метрологические весы грузоподъемностью 1 кг [7]. Стандартное отклонение для единичного взвешивания на этих весах составляет 2—5 мкг. Основные детали выполнены из немагнитной стали аустенитного класса (Cr — 25%, Ni — 20%). Схема весов дана на рис. 5.

Коромысло весов 1 литое трехпризменное с длиной плеча 150 мм. Призмы коромысла агатовые, угол их заточки составляет 120°, подушки 2 выполнены из сапфира. Подвеска 3 содержит универсальный шарнир 4 и раму 5. Чашки 6 и 7, установленные на раме 5 одна над другой на расстоянии 120 мм, имеют крестообразные отверстия.

Механизм перестановки гирь выполнен в виде двух пар крестообразных рычагов 8 и 9, расположенных друг над другом и получающих противоположно направленное вертикальное возвратно-поступательное движение от блока кулачков 10. При этом рычаги проходят через отверстия в чашках.

Взвешивание, как правило, осуществляется методом Борда. Поверяемая и эталонная гири воздействуют поочередно на левые чашки весов. На пра-

вой верхней чашке весов находится тарная гиря. Возможно применение метода Гаусса, для чего в весах предусмотрен механизм переноса гирь с левой чашки на правую и наоборот (на рис. 5 не показан).

Перед взвешиванием эталонная гиря устанавливается на рычаге 9, расположенном над левой нижней чашкой 7, а поверяемая гиря — на верхней левой чашке 6, под которой в это время находится рычаг 8. После первого частного взвешивания поверяемую гирю необходимо заменить эталонной. Эта операция производится следующим образом. При синхронном противоположном движении рычагов 8 и 9 эталонная гиря касается чашки 7, а поверяемая — снимается с чашки 6.

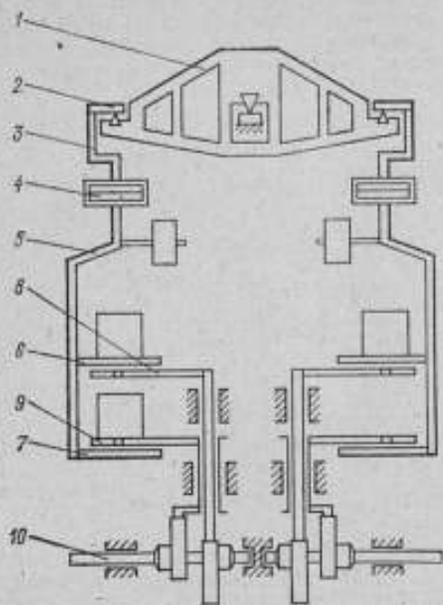


Рис. 5. Схема метрологических весов (Институт метрологии, Япония)

При этом коромысло весов удерживается в неизменном положении специальными поджимами (на рис. 5 не показаны). Перестановка гирь производится без арретирования коромысла и подвесок; усилия, действующие в контактах между призмами и подушками, остаются постоянными.

Весы снабжены герметичной камерой, позволяющей осуществлять взвешивания в вакууме. По нашему мнению, механизм, обеспечивающий полное взвешивание без нарушения контакта между призмами и подушками, менее надежен, чем в весах ИБС. На этих весах можно считать одновременно только две гири, а на весах ИБС — шесть гирь.

Недостаток весов состоит в том, что снимаемые гири располагаются на подвеске на разной высоте, и в результате

взвешивания необходимо вводить две поправки, связанные с различием в значении аэростатической и гравитационной сил, действующих на эти гири.

За последние годы с целью увеличения точности в Национальной физической лаборатории была произведена модернизация ряда метрологических весов [6]. Так, приводы рычагов, регулирующих размах колебаний коромысла, механизм наложения и снятия рейтерных гирь и вертикального перемещения транспортера снимаемых гирь сделаны гидравлическими. Вращение транспортер получает от электродвигателя с автоматически регулируемой скоростью, увеличивающейся в начале поворота и уменьшающейся при его приближении к ограничительному упору. Благодаря этому удалось значительно увеличить плавность работы механизмов весов.

Оптическая система весов, в которой использовано многократное отражение луча, имеет эквивалентную длину оптического рычага 32 м. Весы заключены в алюминиевый корпус с теплоизоляционным и отражающим экранами, в котором поддерживаются номинальные метеорологические условия.

В других весах введено устройство, обеспечивающее проведение полного взвешивания без нарушения контакта между призмами и подушками, и электромагнитный компенсатор массы [8]. Конструкция устройства для перестановки гирь аналогична принятой в описанных выше весах ИБС, с той разницей, что закрытие коромысла до упора перед перестановкой гирь производится при помощи электромагнитного компенсатора. Коромысло весов снаб-

жено демпфером, а в отчетном устройстве применена цифровая индикация, благодаря чему значительно сократилось время взвешивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устройство смены гирь для аналитических весов. — Реферативный журнал, 1967, № 1.
2. Kobayashi Y. On the new Substitution Method of Weighing without Arrestment. — Report of the National Research Laboratory, 1968, v. 17, № 2 (47).
3. Bowmann H. and Almer H. Minimization of the Arrestment Error in One-pan, Two-Knife Balance System. — J. of Res. of NBS, Eng. and Instr., 1963, v. 67C, № 3, July-Sept.
4. Gould F. A Knife-Edge Balance for Weighing of the Highest Accuracy. — Proceeding of the Physical Society, 1949, v. 62.
5. Almer H. National Bureau of Standards One Kilogram Balance, NBS No 2. — J. of Res. of NBS, Eng. and Instr., 1972, v. 76C, № 1, 3.
6. Green E. The adaptation of a Knife edge balance to the comparison of precision standards of mass. — Acta INEKO, 1976, v. 1, Budapest, 1968.
7. Kobayashi Y. Research of Mass Standard. — J. Soc. Instrum. and Contr. Eng., 1970, v. 6, № 6, pp. 439—448.
8. Kibble B. A modification to a Precision Balance Incorporating Substitution Weighing and Feedback Control which gives Improved Accuracy and Convenience. — Metrologia, 1975, № 2.

Поступила в редакцию 25/IV-77 г.

УДК 531.754

С. И. ТОРОПИИ
ВНИИМ

НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ МАЛЫХ ОБРАЗЦОВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

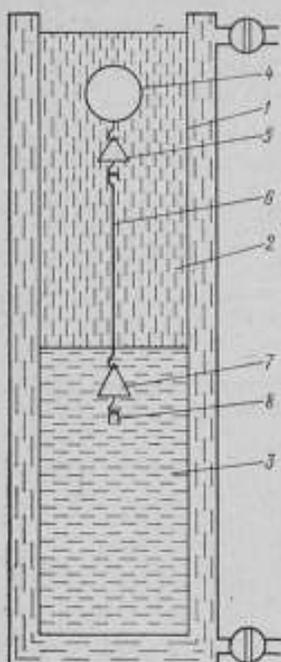
Точные измерения плотности небольших образцов твердых тел, не превышающих по массе нескольких десятков миллиграмм, необходимы при изучении дефектов кристаллов, изучении воздействия различных типов излучения и при выполнении работ, связанных с физико-химическими исследованиями.

Измерения плотности малых образцов твердых тел сопряжены со значительными трудностями, отсутствующими при исследованиях образцов объемом в несколько кубических сантиметров и более. Поэтому разработка новых методов и средств, не требующих изготовления сложных установок, обеспечивающих определение плотности образцов малой массы с погрешностью $\pm(1 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-5})$, весьма актуальна.

В работе [1] изложен относительный метод сравнения плотности исследуемого образца с эталонным образцом массой около 40 мг. Среднее квадратическое отклонение измерения плотности относительным методом не превышает $\pm 3 \cdot 10^{-4}$. Недостаток этого метода — его сложность, обусловленная необходимостью иметь эталонный образец плотности твердого тела малой массы. В качестве таких эталонов применялись сверхчистые монокристаллы, плотность которых вычислялась через молекулярный вес, число Авогадро и постоянную решетки. Создание таких эталонов плотности требует больших затрат, средств и времени. В результате усовершенствования относительного мет-

тогда разработан новый метод измерений плотности малых образцов твердых тел.

Ниже рассматривается новый метод определения плотности малых образцов твердых тел с использованием поплавка и подвешенной к нему тонкой проволоки, концы которой расположены в двух неперемешиваемых жидкостях с различными плотностями [2]. Исследуемый образец помещают в каждую из



Устройство для измерений плотности малых образцов твердых тел.

жидкостей и располагают на чашках, закрепленных на концах проволоки, при этом плотность исследуемого образца определяют по величинам перемещений проволоки из верхней в нижнюю жидкость и плотности жидкостей.

На рисунке изображена принципиальная схема устройства, реализующего предложенный метод.

Устройство состоит из термостатируемого сосуда 1 с двумя несмешивающимися различной плотности жидкостями 2 и 3, поплавок 4 с верхней чашкой 5, проволоки 6, нижней чашки 7 с крючком, на который накладывается соответственно подобранный по массе груз 8 для компенсации излишней подъемной силы поплавка с целью приведения его в исходное состояние, при котором лишь незначительная часть проволоки 6 будет погружена в нижнюю жидкость.

Для измерения перемещений проволоки из верхней жидкости в нижнюю, после наложения на каждую из чашек исследуемого образца, может быть использован катетометр, который на рисунке не показан. Проволока 6, чашка 7 и тарный груз 8 должны иметь плотность, большую плотности нижней жидкости, для того чтобы они имели опускающую силу.

После наложения исследуемого образца на чашку 5 или 7 поплавок будет опускаться вниз и проволока 6 из более легкой жидкости будет переходить в нижнюю жидкость с большей плотностью. С увеличением объема проволоки 6 в нижней жидкости будет возрастать подъемная сила, дей-

ствующая на проволоку, и когда она будет равна равнодействующей силы тяжести и выталкивающей силы, действующих на исследуемый образец, поплавок придет в устойчивое равновесное состояние.

Введем следующие обозначения:

m_1, v_1 — масса и объем поплавка; m_2 — масса проволоки с общей длиной L и поперечным сечением S ; m_3, v_3 — масса и объем чашки 5; m_4, v_4 — масса и объем чашки 7 с учетом груза 8; l_0, l_1, l_2 — длина проволоки, находящейся в нижней жидкости, когда исследуемый образец не положен на одну из чашек, положен на чашку 5 и на чашку 7; m_x, v_x — масса и объем исследуемого образца; ρ_x — плотность исследуемого образца; ρ_1, ρ_2 — плотность верхней и нижней жидкости.

Равновесному состоянию поплавок до наложения исследуемого образца на одну из чашек, после наложения образца на чашку 5 и на чашку 7 будут соответствовать выражения:

$$m_1 - v_1 \rho_1 + m_2 - S(L - l_0) \rho_1 - S l_0 \rho_2 + m_3 - v_3 \rho_1 + m_4 - v_4 \rho_2 = 0; \quad (1)$$

$$m_1 - v_1 \rho_1 + m_2 - S(L - l_1) \rho_1 - S l_1 \rho_2 + m_3 - v_3 \rho_1 + m_4 - v_4 \rho_2 + m_x - v_x \rho_1 = 0; \quad (2)$$

$$m_1 - v_1 \rho_1 + m_2 - S(L - l_2) \rho_1 - S l_2 \rho_2 + m_3 - v_2 \rho_1 + m_4 - v_1 \rho_2 + m_x - v_x \rho_2 = 0. \quad (3)$$

После вычитания (1) из (2) и (3) получим

$$S \Delta l_1 (\rho_1 - \rho_2) = v_x \rho_1 - m_x = v_x (\rho_1 - \rho_2); \quad (4)$$

$$S \Delta l_2 (\rho_1 - \rho_2) = v_x \rho_2 - m_x = v_x (\rho_2 - \rho_1). \quad (5)$$

где

$$\Delta l_1 = l_1 - l_0; \quad \Delta l_2 = l_2 - l_0.$$

Используя равенства (4) и (5), получим формулу для определения плотности исследуемого образца

$$\rho_x = \frac{\Delta l_2 \rho_2 - \Delta l_1 \rho_1}{\Delta l_1 - \Delta l_2}. \quad (6)$$

Измерение плотности производится следующим образом. Катетометром 9 визируют какую-либо хорошо заметную марку (точка или штрих на подвеске поплавка) и отсчитывают по шкале катетометра. Исследуемый образец помещают на чашку 5, и после установления равновесного состояния поплавок на новом уровне погружения вновь производят визирование катетометра на ту же марку; после этого снимают отсчет по шкале катетометра и определяют величину перемещения поплавка Δl_1 . Образец с чашки 5 снимают и помещают на чашку 7; аналогичным образом определяют величину перемещения поплавка Δl_2 .

Используя опытные данные, по формуле (6) вычисляют плотность исследуемого образца.

В качестве верхней жидкости можно использовать бензол с несколькими процентами гептана или воду с добавкой смачивающего агента, в качестве нижней — фтороуглеродороды, имеющие плотность около 1,8 г/см³, обладающие химической инертностью, малой растворимостью и низкой упругостью пара.

Плотности жидкостей должны быть определены заранее одним из лабораторных методов измерений: при помощи ареометра, методом гидростатического взвешивания стеклянного поплавка или же при помощи пикнометра.

При поддержании температуры в термостатируемом сосуде в пределах $\pm(0,025 \div 0,010)^\circ\text{C}$ среднее квадратическое отклонение относительной погрешности определения плотности будет находиться в пределах $\pm(3 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-5})$.

При определении плотности образцов твердых тел малой массы новым способом не требуется эталонного образца плотности твердого тела и измерения его массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Франклин А. Д. и Снел Р. Метод точного определения плотностей небольших образцов. — Приборы для научных исследований, 1971, № 12.
2. Торонин С. И., Руденко А. Т. Способ определения плотности твердых тел. Авт. свид. № 479024. — Бюлл. изобр., 1976, № 28.

Поступила в редакцию 29/IV-77 г.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОПЛАВКОВЫЙ ПЛОТНОМЕР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТЕЙ И ОБРАЗЦОВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Точные измерения среднего значения плотности образцов твердых тел производятся гидростатическим взвешиванием. В этом случае на точность измерений существенное влияние оказывает механическое трение в паре призма — подушка весов и непостоянство силы поверхностного натяжения из-за

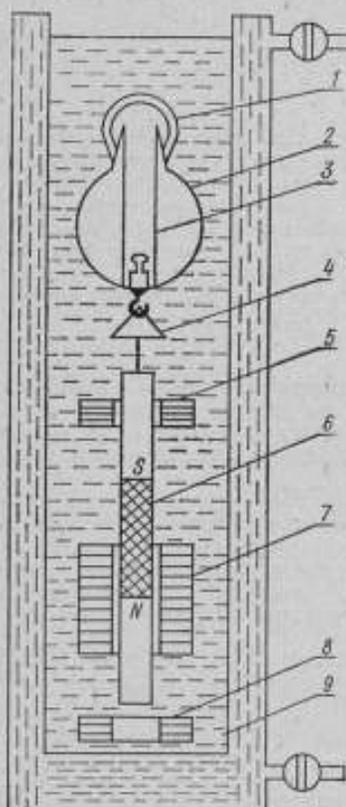
изменения угла контакта мениска жидкости с проволокой на границе раздела воздух — жидкость. Эти влияния полностью исключаются в случае применения силовой компенсации автоматического уравновешивания к полностью погруженным в жидкости поплавкам, широко применяемым для измерений плотности жидкостей.

Свободно плавающее в жидкости тело, используемое в качестве нулевого индикатора, реагирует на малейшую приложенную к нему силу.

В работе [1] показано, что сфера радиусом 1 см, плавающая в воде при комнатной температуре, реагирует на массу 3 мкг движением со скоростью 1 см в 1 мин. Поплавки (ареометры полного погружения) с электромагнитной силовой компенсацией силы веса, содержащие поплавок, постоянный магнит, соленоид и датчик вертикальных перемещений, нашли широкое применение для точных измерений жидкости в лабораторных и промышленных условиях.

Система автоматического регулирования, изменяя силу тока в катушке, удерживает поплавок на заданном уровне погружения его в жидкости. Шкала прибора градуируется путем измерений различных образцов проб жидкостей с известной плотностью. Путем усовершенствования поплавка область его применения можно расширить: производить измерения плотности образцов твердых тел, в градуировку шкалы прибора — по массе.

Усовершенствованный поплавок (см. рисунок) состоит из стеклянного пустотелого шара 2, имеющего сверху отверстие, закрывающееся притертой пробкой 1. Внутри шара расположена пробирка 3, в которую помещают гири. В нижней части поплавка расположен крючок 4 для наложения образцов твердых тел при исследовании их плотности, и постоянный магнит 6, на концах которого сверху и снизу закреплены металлические трубки, хорошо проводящие ток.



Поплавок полного погружения для измерений плотности жидкостей и твердых тел

для приведения поплавка в погруженное состояние на заданном уровне. В нижней части поплавка расположен крючок 4 для наложения образцов твердых тел при исследовании их плотности, и постоянный магнит 6, на концах которого сверху и снизу закреплены металлические трубки, хорошо проводящие ток.

Нижний конец магнита расположен в центре многопредельного соленоида 7. Верхняя трубка на магните расположена внутри центрирующего устройства 5, а нижняя — над катушкой индуктивного датчика перемещений 8. Поплавок установлен в термостатируемой ванне 9.

Принципиальная схема, поясняющая принцип поддержания поплавка на заданном уровне погружения в жидкости здесь не приводится, так как такие схемы подробно описаны в ряде работ [2—10].

Отличительной особенностью устройства является то, что с целью повышения точности измерений поплавок снабжен камерой для размещения в ней гири, а для ускорения подбора гири соленоид выполнен многопредельным.

Основная часть выталкивающей силы, действующей на поплавок, компенсируется гирями и лишь незначительная часть — с помощью тока, протекающего по соленоиду.

Предварительное значение массы гири, накладываемых в камеру 3, определяют с помощью многопредельного соленоида, что значительно облегчает подбор гири и ускоряет весь процесс измерений.

При аттестации поплавка, после его изготовления, необходимо определить его объем V_{20} и массу m_0 . Эти параметры для данного поплавка постоянны и должны быть определены заранее.

При взвешивании системы поплавок на лабораторных весах по методу Борда получим

$$m_0 - V_{20} [1 + \beta (t_0 - 20)] \rho_0 = P_0 - v_{\rho_0} e_0 + (L_2 - L_1) S = P_0, \quad (1)$$

где ρ_0, v_{ρ_0} — масса и объем гири, уравновешивающих на весах поплавок; L_1, L_2 — отсчеты по шкале весов; S — цена деления весов; β — объемный коэффициент расширения поплавка; e_0 — плотность воздуха при температуре $t_0, ^\circ\text{C}$.

Для поплавка, приведенного в воде при температуре $t_0, ^\circ\text{C}$ в равновесное состояние, будем иметь выражение

$$m_0 - V_{20} [1 + \beta (t - 20)] \rho_t + P_1 - v_{\rho_t} e_1 = \varepsilon t_0, \quad (2)$$

где ρ_t — плотность воды при температуре $t, ^\circ\text{C}$; ρ_1, v_{ρ_1} — масса и объем гири, установленных в камере 3 поплавка; i_0 — ток, протекающий по соленоиду; ε — цена деления шкалы прибора, проградуированная по массе. Из (1) и (2) получим

$$V_{20} = \frac{P_0 + P_1 - \varepsilon t_0}{\rho_t - e_0 + \beta (t \rho_t - t_0 e_0)}, \quad (3)$$

$$m_0 = P_0 + \frac{(P_0 + P_1 - \varepsilon t_0) e_0}{\rho_t - e_0 + \beta (t \rho_t - t_0 e_0)}, \quad (4)$$

где $P_1 = \rho_1 - v_{\rho_1} e_1$.

Если в камере 3 поплавок поместить добавочную гирю массой r , то равенство (2) примет вид

$$m_0 - V_{20} [1 + \beta (t - 20)] \rho_t + P_1 + r - v_{\rho_t} e = \varepsilon t_1, \quad (5)$$

Из (2) и (5) для определения цены деления шкалы прибора получим

$$\varepsilon = \frac{r - v_{\rho_t} e}{t_1 - t_0}, \quad (6)$$

где v_{ρ_t} — объем гири; e — плотность воздуха; t_1 — ток, протекающий по соленоиду после добавления в поплавок гири r .

При измерении плотности ρ_T какой-либо жидкости при температуре $T, ^\circ\text{C}$ поплавок необходимо погрузить в исследуемую жидкость и с помощью многопредельного соленоида подобрать массу гири ρ_2 , которую необходимо поместить в камеру 3 поплавка. При равновесном состоянии поплавок в жидкости

$$m_0 - V_{20} [1 + \beta (T - 20)] \rho_T + P_2 - v_{\rho_T} e = \varepsilon t_2$$

Из этого выражения будем иметь

$$\rho_T = \frac{m_0 + P_3 - \varepsilon t_2}{V_{20} [1 + \beta (T - 20)]} \quad (7)$$

где $P_3 = p_3 - v_{p_3} \varepsilon_1$; p_3, v_{p_3} — масса и объем гирь.

При определении плотности образцов твердых тел необходимо произвести взвешивания образцов в воздухе и в жидкости с помощью поплавка, полностью погруженного в жидкости.

Если масса исследуемого образца m_x , объем V_{20}^x и коэффициент объемного расширения β_x , то уравнение равновесия поплавка в жидкости после наложения исследуемого образца на чашку 4 примет вид

$$m_0 - V_{20} [1 + \beta (T_1 - 20)] \rho_{T_1} + m_x - V_{20}^x [1 + \beta_x (T_1 - 20)] \rho_{T_1} + P_3 = \varepsilon t_3 \quad (8)$$

Здесь ρ_{T_1} — плотность жидкости при температуре T_1 °С; $P_3 = p_3 - v_{p_3} \varepsilon_1$ — масса гирь в камере 3.

При взвешивании исследуемого образца в воздухе

$$m_x - V_{20}^x [1 + \beta_x (t_1 - 20)] \varepsilon_1 = p_4 - v_{p_4} \varepsilon_1 = P_4 \quad (9)$$

где t_1 — температура образца; ε — плотность воздуха; p_4, v_4 — масса и объем образцовых гирь.

Из (8) и (9) получим:

$$V_{20}^x = P_3 + P_4 - \varepsilon t_3 + m_0 - V_{20} [1 + \beta (T_1 - 20)] \rho_{T_1};$$

$$m_x = P_4 + \frac{P_3 + P_4 - \varepsilon t_3 - V_{20} [1 + \beta (T_1 - 20)] \rho_{T_1}}{\rho_{T_1} - \varepsilon_1 + \beta_x [(T_1 - 20) \rho_{T_1} - (t_1 - 20)] \varepsilon_1} [1 + \beta_x (t_1 - 20)] \varepsilon_1.$$

С точностью до величин второго порядка малости плотность исследуемого образца

$$d_x = \frac{P_4 [\rho_{T_1} - \varepsilon_1 + \beta_x (T_1 - 20)] + [P_3 + P_4 - \varepsilon t_3 - V_{20} \rho_{T_1}] \varepsilon_1}{P_3 + P_4 - \varepsilon t_3 + m_0 - V_{20} [1 + \beta (T_1 - 20)] \rho_{T_1}}$$

Автоматический поплавковый плотномер обеспечивает возможность производить измерения плотности образцов твердых тел с большей точностью, поскольку измерения можно производить в любых рабочих жидкостях с плотностью большей плотности воды за счет исключения влияния поверхностного натяжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haller W. K. and Calcagni G. Apparatus for the measurement of extremely small weight, volume and density changes.—Rev. Sci. Instrum., 1955, 26, № 11.
2. Almeida S. P., Croch T. H. Magnetic densimeter using an rf sensing coil.—Rev. Sci. Instrum., 1971, 42, № 9.
3. Грушко В. И. К вопросу об электромагнитном поплавковом подвесе.—Труды Московского энергетического института, 1972, вып. 107.
4. Сломьянский П. Г. Исследования электромагнитного подвеса с линейной характеристикой.—Приборы и системы управления, 1972, № 5.
5. Beams I. M. Magnetic suspension densimeter.—Rev. Sci. Instrum., 1969, 40, № 1.
6. Eberhardt L., Hörnich O. Statisches und dynamisches Verhalten einer Flüssigkeits-dichtemesseneinrichtung mit Kraftkompensierten Auftriebskörper.—Mess.—Steuern—Regeln, 1970, 13, № 7.

7. Robust specific gravity meter.—Power and Plant South Africa, 1968, 9, № 9.

8. Sage P. K. Industrial measurement of liquid density.—Instrum. Practice, 1968, 22, № 9.

9. Holbein G. Betriebsgrössmessung mit Zustandskorrektur.—Elek.—Anz., 1971, 24, № 8.

10. Schilder K. Das Flüssigkeitsdichte-Messgerät.—Fluidityt in exgeschützter Ausführung Techn. Inform., 1968, 6, № 5.

Поступила в редакцию 25/IV-77 г.

УДК 531.754.089.6

В. Я. КУЗЬМИН
ВНИИМ

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

При измерении плотности высокие требования предъявляются к точности и быстрдействию. Этим требованиям отвечают автоматические приборы, в основу которых положен метод гидростатического взвешивания, позволяющий измерять с высокой точностью плотность образцов любой конфигурации по результатам взвешивания образца в воздухе и жидкости согласно известной формуле*.

На рис. 1 представлена блок-схема автоматического цифрового прибора для определения плотности, основанного на методе взвешивания исследуемого образца в воздухе, а затем в жидкости с известной плотностью. В этом приборе в качестве первичных измерительных преобразователей значений массы в цифровую форму используются автоматические весы с фотоэлектрическими кодовыми преобразователями. Принцип действия прибора заключается в следующем. Образец, плотность которого необходимо определить, помещается на подвеску 1 автоматических весов, измеряющих массу образца в воздухе. В весах использовано устройство предварительного измерения, которое состоит из квадранта 2, фотоэлектрического кодового преобразователя ФКП1 с фотоспротивлениями 3, запоминающего устройства ЗУ1. Значение массы исследуемого образца m преобразуется в цифровую форму с помощью ФКП1 и поступает на ЗУ1, на выходе которого получаем в цифровом виде $m_1 = k_1 m$ (k_1 — коэффициент преобразования автоматических весов, измеряющих массу образца в воздухе).

С запоминающего устройства ЗУ1 информация поступает на устройство автоматического тиреналожения УАГ1, которое осуществляет подбор гирь таким образом, чтобы номинальное значение массы этих гирь m_n равнялось измеренному значению m_1 . Подобранные гири снимаются с подвески. Затем включается устройство для точного измерения массы, которое состоит из коромысла 5, фотоэлектрического кодового преобразователя ФКП2 с фотоспротивлениями 6, запоминающего устройства ЗУ2. При этом квадрант 2 отключается, а подвеска освобождается от квадранта и подсоединяется к чувствительному коромыслу 5. Условие равновесия точных весов можно записать в таком виде:

$$(m - eV) - (m_{т1} - eV_{т1}) = \Delta m,$$

где $m_{т1}$ — действительная масса гирь, набранных устройством автоматического тиреналожения при взвешивании в воздухе; e — плотность воздуха; V —

* См. Гаузнер С. И., Кивилис С. С., Осокина А. П., Павловский А. Н. Измерение массы, объема и плотности. М., Изд-во стандартов, 1972.

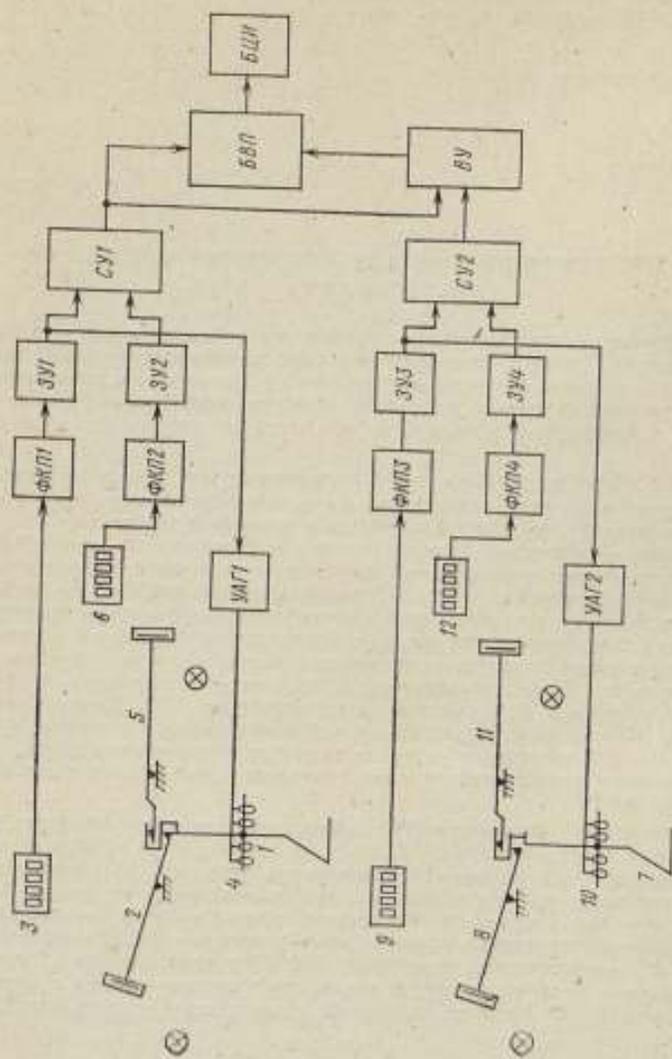


Рис. 1. Блок-схема автоматического цифрового прибора для определения плотности твердых тел

объем образца; $V_{г1}$ — объем гирь массой $m_{г1}$; Δm — разность масс, определяемая отклонением коромысла 5 от начального положения.

Значение разности масс Δm преобразуется в цифровую форму с помощью фотоэлектрического кодового преобразователя ФКП2 и поступает на запоминающее устройство ЗУ2, на выходе которого в цифровом виде получаем

$$\Delta m_1 = k_1 \Delta m.$$

Измеренные значения m_1 и Δm_1 поступают на суммирующее устройство СУ1, на выходе которого получаем результат измерения массы образца в воздухе

$$m_0 = m_1 + \Delta m_1.$$

После этого с помощью манипулятора образец переносится на подвеску 7 автоматических весов, производящих взвешивание в жидкости. Эти весы также имеют устройство предварительного измерения, в которое входят квадрант 8, фотоэлектрический кодовый преобразователь ФКП3 с фотосопротивлениями 9, запоминающее устройство ЗУ3. При измерении подвеска 7 с исследуемым образцом опускается в жидкость и измеряется значение m_v , определяемое выражением

$$m_v = m - \rho_l V,$$

где ρ_l — плотность жидкости при температуре $t^\circ \text{C}$.

Значение m_v преобразуется в цифровую форму с помощью ФКП3 и поступает на ЗУ3, на выходе которого

$$m_{v0} = k_2 m_v.$$

где k_2 — коэффициент преобразования автоматических весов, осуществляющих взвешивание образца в жидкости.

С ЗУ3 информация поступает на устройство автоматического гиреналожения УАГ2, которое осуществляет набор гирь так, чтобы номинальное значение $m_{гн}$ массы этих гирь равнялось измеренному значению m_{v0} . После этого включается устройство для точного измерения массы, которое состоит из коромысла 11, фотоэлектрического кодового преобразователя ФКП4 с фотосопротивлениями 12, запоминающего устройства ЗУ4. При этом квадрант 8 поворачивается, а подвеска 7 освобождается от квадранта и подсоединяется к чувствительному коромыслу 11. Так как масса гирь $m_{гн}$, набранная устройством автоматического гиреналожения УАГ2, снимается с подвески, то условие равновесия коромысла 11 можно записать в виде

$$(m - \rho_l V) - (m_{гн} - \epsilon V_{гн}) = \Delta m_v.$$

где $m_{гн}$ — масса гирь, набранных устройством автоматического гиреналожения при взвешивании в жидкости; $V_{гн}$ — объем гирь массой $m_{гн}$; Δm_v — разность масс, определяемая отклонением коромысла 11 от начального положения.

Значение разности Δm_v преобразуется в цифровую форму с помощью ФКП4 и поступает на ЗУ4, на выходе которого имеем

$$\Delta m_{v0} = k_3 \Delta m_v.$$

Измеренные значения m_{v0} и Δm_{v0} поступают на суммирующее устройство СУ2, на выходе которого получаем результат измерения в жидкости

$$m_{v0} = m_{v0} + \Delta m_{v0}$$

или

$$m_{v0} = k_3 [(m - \rho_l V) + \epsilon V_{гн}].$$

Результаты измерения в воздухе и в жидкости в цифровой форме поступают с выходов суммирующих устройств СУ1 и СУ2 на вход вычитающего устройства ВУ, которое осуществляет вычитание $m_0 - m_{v0} = m_p$.

Значения m_0 и m_p с выходов суммирующего устройства CVI и вычитающего устройства BV поступают на входы блока вычисления плотности $БВП$, схема которого представлена на рис. 2. В качестве блока вычисления плотности используется электрическая мостовая схема, при сбалансировании которой выполняется условие

$$R_1 = R_2 \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

где R_1, R_2, R_3, R_4 — сопротивления плеч электрической мостовой схемы.

Сопротивление электрической мостовой схемы R_1 , состоящее из дискретных сопротивлений r_{1i} , подключаемых коммутирующим устройством KVI (см. рис. 2), пропорционально значению m_0 :

$$R_1 = \sum_{i=1}^n a_i r_{1i} = c_1 m_0 \quad (2)$$

где $a_i = \begin{cases} 1 & \text{— если сопротивление } r_{1i} \text{ включено;} \\ 0 & \text{— если сопротивление } r_{1i} \text{ выключено.} \end{cases}$

Сопротивление электрической мостовой схемы R_2 , состоящее из дискретных сопротивлений r_{2i} , подключаемых коммутирующим устройством $KV2$, пропорционально разности m_p :

$$R_2 = \sum_{i=1}^n a_i r_{2i} = c_2 m_p = c_2 (m_0 - m_{cv}) \quad (3)$$

Сопротивление мостовой схемы R_3 устанавливается по заранее вычисленным значениям $(\rho_l - e)$ для соответствующих значений температуры рабочей жидкости

$$R_3 = c_3 (\rho_l - e) \quad (4)$$

Подставив в уравнение (1) значения R_1, R_2, R_3 , полученные из уравнений (2) — (4), видим, что при балансе электрической мостовой схемы сопротивление

$$R_4 = \frac{c_1 c_3}{c_2} \frac{(\rho_l - e) m_0}{m_0 - m_{cv}} \quad (5)$$

Это сопротивление пропорционально измеренному значению плотности исследуемого образца ρ_0

$$R_4 = c_4 \rho_0 \quad (6)$$

В выражениях (2) — (6) $c_1 \div c_4$ — масштабные коэффициенты.

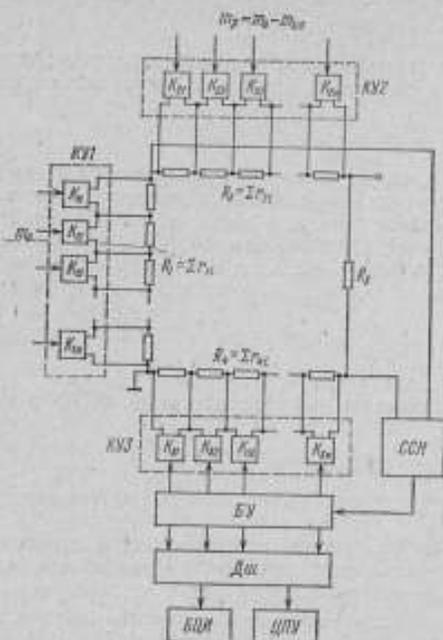


Рис. 2. Схема блока вычисления плотности

Из уравнений (5), (6) находим

$$\rho_0 = \frac{R_4}{c_4} = \frac{c_3 c_5}{c_2 c_4} \frac{(\rho_l - e) m_0}{m_0 - m_{v_0}} \quad (7)$$

С учетом (7) при $\frac{c_3 c_5}{c_2 c_4} = 1$ получаем плотность образца

$$\rho_0 = \frac{(\rho_l - e) m_0}{m_0 - m_{v_0}} \quad (8)$$

Этот результат согласуется с известной формулой для гидростатического взвешивания с точностью до $0,0012 \text{ г/см}^3$.

При вычислении плотности мостовая электрическая схема приводится в равновесное положение с помощью R_4 , состоящего из дискретных сопротивлений r_{4i} , подключаемых коммутирующим устройством КУЗ, которым управляет блок управления БУ. Для определения положения равновесия электрической мостовой схемы и подачи соответствующих управляющих команд на БУ служит схема сравнения напряжений ССН, вход которой подключен к диагонали мостовой схемы.

В момент равновесия мостовой схемы через дешифратор Дш информация с БВП поступает в цифровой виде на блок цифровой индикации БЦИ и на цифрочитающее устройство ЦПУ.

Блок-схема автоматического цифрового прибора для определения плотности была использована при создании приборов АИП-12 и АИП-110. В этих приборах для измерения массы в воздухе и в жидкости предусмотрены весы с устройством предварительного измерения, разработанные А. Н. Нечаевым.

Экспериментальными исследованиями установлено, что погрешность этих приборов не превышает 0,5% от наибольшего предела измерения. Анализ схем приборов показывает, что, увеличив число дискретных сопротивлений уравновешивающего плеча R_4 , можно снизить относительную погрешность этих приборов до 0,02%—0,1% от наибольшего предела измерения.

Кроме того, исследования автоматических приборов для определения плотности подтвердили правильность теоретических выводов и перспективность технического решения, которое в дальнейшем может быть использовано при разработке автоматических приборов для определения плотности, основанных на методе гидростатического взвешивания.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Н. А. Смирнова, В. С. Снегов, Р. Д. Цапина.</i> Сравнения эталонных копий с государственным первичным эталоном единицы массы	3
<i>В. С. Снегов, Н. А. Смирнова.</i> Калибровка наборов гирь по способу наименьших квадратов	8
<i>Н. О. Крылова, Н. А. Смирнова.</i> К вопросу о естественном эталоне массы	11
<i>М. И. Тютикова, Р. Д. Цапина.</i> Рекомендации по выбору материала для точных гирь	16
<i>В. А. Баранов.</i> Современные конструкции метрологических весов	20
<i>С. И. Торопин.</i> Новый метод определения плотности малых образцов твердых тел	27
<i>С. И. Торопин, А. Т. Руденко.</i> Автоматический поплавковый плотномер для измерения плотности жидкостей и образцов твердых тел	30
<i>В. Я. Кузьмин.</i> Автоматический прибор для измерения плотности твердых тел	33
Рефераты публикуемых статей	39

РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 531.751.089.68

Сличения эталонов-копий с государственным первичным эталоном единицы массы. Смирнова Н. А., Снегов В. С., Цапина Р. Д. — «Исследования в области измерений массы». Труды метрологических институтов СССР, вып. 224(284), 1978, с. 3—8.

Рассматривается методика сличений эталонов-копий, проводимых в 1976 г., и обобщаются полученные результаты.

Результаты сличений показали, что эталоны-копии находятся в удовлетворительном состоянии и пригодны для дальнейшей эксплуатации. Библиограф. Табл. 1.

УДК 681.2.07.089.6

Калибровка наборов гирь по способу наименьших квадратов. Снегов В. С., Смирнова Н. А. — «Исследования в области измерений массы». Труды метрологических институтов СССР, вып. 224(284), 1978, с. 8—11.

Рассматривается метод наименьших квадратов применительно к калибровке наборов гирь. Приводится конкретная схема для калибровки одновременно двух наборов. Дается предпочтение поразрядному методу калибровки и рассматриваются погрешности результатов измерений, присущие данной методике. Табл. 2. Библиограф. 5.

УДК 531.751.1.081.6.089.6

К вопросу о естественном эталоне массы. Крылова Н. О., Смирнова Н. А. — «Исследования в области измерений массы». Труды метрологических институтов СССР, вып. 224(284), 1978, с. 11—15.

Рассмотрена возможность перехода на естественный эталон массы, основанный на физической постоянной — массе нуклида. Показано, что создание естественного эталона массы непосредственно связано с уточнением значения фундаментальной физической константы — числа Авогадро. На основе анализа литературных данных дана оценка точности, которая может быть достигнута при использовании в качестве естественного эталона массы совершенного монокристалла. Библиограф. 7.

УДК 681.2.07 : 669.14.018

Рекомендации по выбору материала для точных гирь. Тютюкова М. Н., Цапина Р. Д. — «Исследования в области измерений массы». Труды метрологических институтов СССР, вып. 224(284), 1978, с. 16—20.

Приведены основные требования к материалу для точных гирь, даны конкретные марки нержавеющей стали, которые рекомендуется использовать для изготовления точных гирь.

Изложены результаты исследования образцов и гирь, изготовленных из стали марки ОХ23Н28М3Д5Г. Табл. 2. Библиограф. 7.

УДК 531.752.089.65

Современные конструкции метрологических весов. Баранов В. А. — «Исследования в области измерений массы». Труды метрологических институтов СССР, вып. 224 (284), 1978, с. 20—27.

Приводится краткое описание и анализ конструкций весов, применяемых в настоящее время для сличения эталонных гирь в Англии, США и Японии. Ил. 5. Библ. 8.

УДК 531.754

Новый метод определения плотности малых образцов твердых тел. Горюхи С. И. — «Исследования в области измерений массы». Труды метрологических институтов СССР, вып. 224(284), 1978, с. 27—29.

Изложен новый метод определения плотности малых образцов твердых тел с использованием поплавка и подвешенной к нему тонкой проволоки, концы которой расположены в двух неперемешиваемых жидкостях с различными плотностями. Этот способ определения плотности не требует измерения массы исследуемого образца и эталонного образца плотности. Ил. 1. Библ. 2.

УДК 531.75

Автоматический поплавковый плотномер для измерений плотности жидкостей и образцов твердых тел. Горюхи С. И., Руденко А. Т. — «Исследования в области измерений массы». Труды метрологических институтов СССР, вып. 224(284), 1978, с. 30—33.

Описывается поплавковый плотномер с электромагнитной компенсацией. Основная часть выталкивающей силы, действующей на погруженный в жидкость поплавок, компенсируется гирями и лишь незначительная часть с помощью тока, протекающего по соленоиду. Шкала прибора градуируется по массе. При таком устройстве поплавок становится возможным измерение не только плотности жидкостей, но и образцов твердых тел.

Приведены формулы для определения плотности жидкостей и образцов твердых тел через массу гирь, накладываемых в камеру поплавка, и основные параметры поплавка: массу и его объем. Ил. 1. Библ. 10.

УДК 531.754.089.6

Автоматический прибор для измерения плотности твердых тел. Кузьмин В. Я. — «Исследования в области измерений массы». Труды метрологических институтов СССР, вып. 224(284) 1978, с. 33—37.

Описывается автоматический прибор для измерения плотности твердых тел. Дан анализ погрешностей и приведены сведения о разработанных приборах. Ил. 2.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ

Труды метрологических институтов СССР

Выпуск 224(284)

Редактор *И. А. Шайкевич*

Технический редактор *Т. В. Гвоздова*

Корректор *В. В. Румянцева*

Сдано в набор 01.03.78. Подписано в печать 10.04.78.
М-14652. Формат 60×90/16. Бумага офсетная № 2.
Гарнитура шрифта литературный. Печать высокая.
Усл. печ. л. 2,5. Уч. изд. л. 3,56. Тираж 1000 экз.
Заказ 125. Цена 35 коп.

Ленинградское отделение издательства «Энергия», 192041,
Ленинград, Д-41, Марсово поле, 1.

Типография ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 195230,
Ленинград, К-220, Гжатская ул., 21.

Цена 35 коп.