

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

Справ.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
МЕХАНИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ

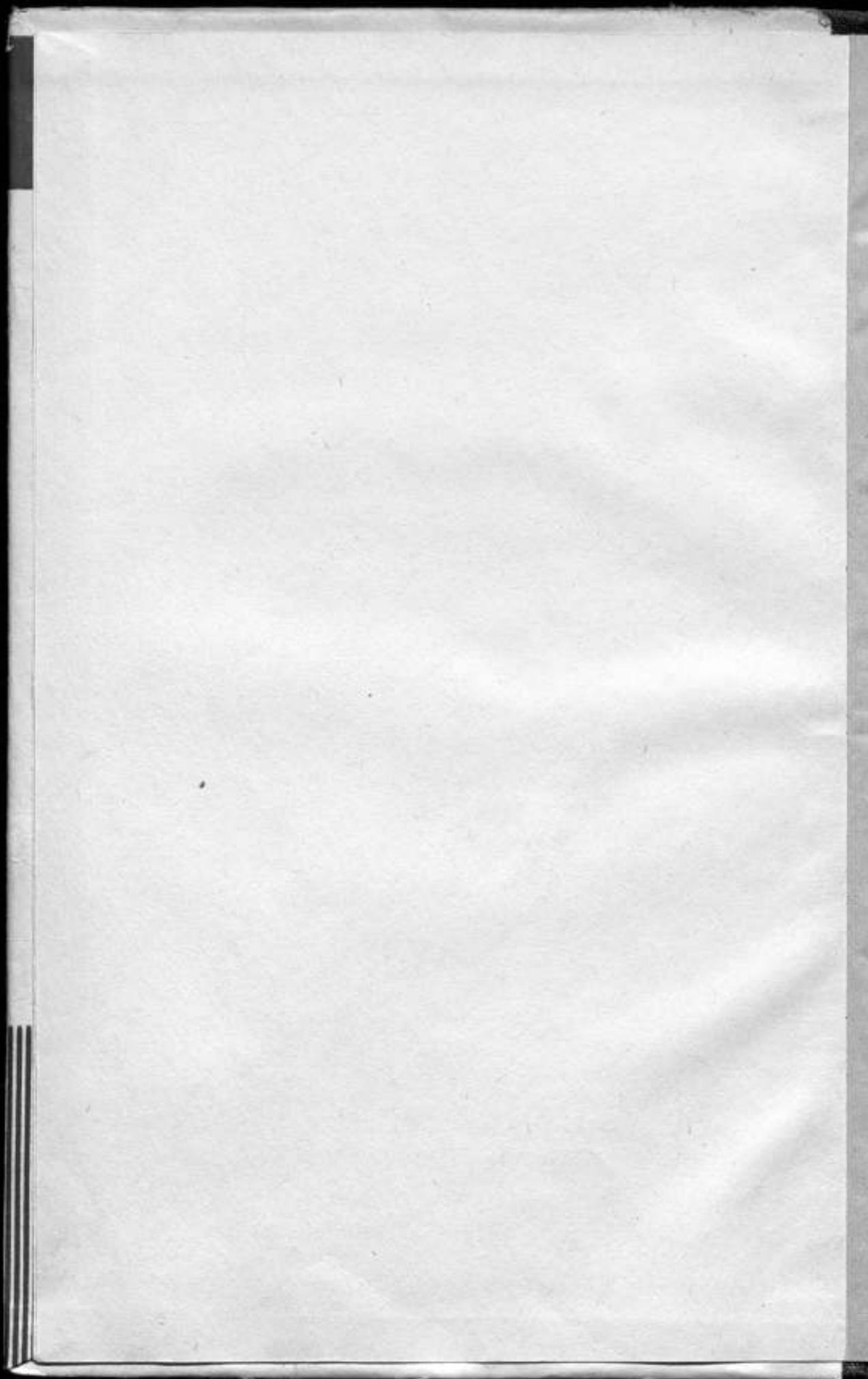
ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

ВЫПУСК 118 (178)









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

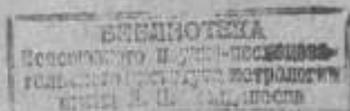
ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

ВЫПУСК 118 (178)

Под редакцией

к. т. н. Е. Ф. ДОЛИНСКОГО



ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ

МОСКВА—ЛЕНИНГРАД

1971

ж 15079

Редакционный совет

В. О. Арутюнов (председатель), Н. Н. Александрова (секретарь), С. В. Горбачевич, А. Н. Гордов, Е. Ф. Долинский, А. И. Карташев, Л. К. Каяк, И. И. Кириков, Д. К. Коллеров, Е. Д. Колтик, П. П. Кремлевский, И. Н. Кротков, В. Л. Лассан, О. А. Мяздриков, Б. Н. Олейник, Л. К. Пеккер, Т. Б. Рождественская, А. М. Федоров, Е. Н. Чезурина, К. П. Широков, Е. Г. Шрамков, М. Ф. Юдин

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

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сборник посвящен исследованиям в области механических измерений, выполненным во Всесоюзном научно-исследовательском институте им. Д. И. Менделеева.

Статья Васильева Б. В. и Долинского Е. Ф. посвящена планированию совместных измерений при обработке способом наименьших квадратов. Показано, что дисперсии искоемых оценок существенно зависят от величин углов между векторами-столбцами матрицы условных уравнений. Рассмотрены критерии оптимальных систем условных уравнений.

В статье Львовича А. Ю., Пеллица В. С. и др. рассмотрена динамическая погрешность измерения линейно изменяющихся ускорений, системами с одной степенью свободы и дифференцирующими усилителями.

Четыре статьи содержат материалы по измерениям силы. В двух из них, написанных Л. М. Максимовым, дан анализ погрешностей динамометров и предложен метод интерполяции показаний динамометров, обуславливающий погрешность, не превышающую 0,02%.

В статье Вандышева Б. А. и Савицкого Ф. С. рассмотрено влияние инерции маятникового силоизмерителя на результаты измерения механических характеристик материалов. Теоретический расчет подтвержден экспериментами.

В статье Савицкого Ф. С. дано описание метода определения потерь энергии при ударных испытаниях образцов на растяжение, изгиб и твердость.

Две статьи посвящены измерениям давления.

Статья Лоскутова Г. И., Могилна Ю. В. и др. содержит описание образцовой установки УПИМ-6000, предназначенной для поверки манометров с верхним пределом до 600 Мн/м².

Статья Дрига М. И. содержит расчет термомолекулярной разности давления в двух камерах различной температуры и дает формулу поправки, отличную от предложенной Кнудсеном, не учитывающей скачка температуры на границе газовой и твердой фаз.

Новый метод исследования и юстировки равноплечих весов описан в статье Торопина С. И. Этот метод позволяет найти момент инерции коромысла, величину «просвета» между призмами и расстояние центра тяжести коромысла до оси вращения.

Пять статей посвящены измерениям параметров вибраций. В первой из них, Баркова Е. А., показано, что непостоянство крепления пьезоакселерометрического преобразователя к объекту при высокочастотных вибрациях может привести к значительным погрешностям измерений, достигающим 30%.

В статье Бордиловского А. Ф. рассмотрен метод измерения амплитуды путем однонаправленного счета числа интерференционных полос. Указана область применения метода и дана оценка погрешностей измерения.

В статье Долицкого И. Н. показано, что максимальное значение собственной частоты мембраны при заданном прогибе определяется материалом мембраны и чистотой ее поверхности, но не зависит от размеров мембраны. Даны соответствующие формулы.

Компаратор для градуировки пьезопреобразователей ударных ускорений, описанный в статье Кованиной Н. Н. и Пеллица В. С., допускает градуировку при значениях ускорений, равных 40, 60, 200, 300 и 1500. Погрешность градуировки 4,5% в средней части и до 8% — на границах.

Статья Шумилина В. П. дает теорию и методику расчета параметров электродинамических преобразователей, применимую для колебательных систем, в диапазоне 5—500 гц. Приведен расчет виброустановки.

Две статьи Кондратенко М. И. посвящены измерениям предельных напряжений сдвига дисперсных систем. В одной из них дан обзор существующих методов измерений и применяемой аппаратуры. Во второй даны результаты исследования пластометра МНИ-2. Указана методика исключения систематических погрешностей. Приведены данные, относящиеся к некоторым консистентным смазкам.

В статье Богомолова Г. С. и др. описана автоматическая установка для закалки образцовых мер твердости.

Эксплуатация установки показала, что ее применение значительно уменьшает процент брака (по сравнению с наблюдающимся при обычном методе) и механизмирует трудоемкий рабочий процесс.

Статья Трубякова Ю. Н. дает описание экспериментальных методов исследования поля напряжений и деформаций в полимерных образцах.

Редактор

Б. В. ВАСИЛЬЕВ, Е. Ф. ДОЛННСКИЙ

ВНИИМ

ОПТИМАЛЬНАЯ СИСТЕМА УСЛОВНЫХ УРАВНЕНИЙ
СОВМЕСТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НЕСКОЛЬКИХ ВЕЛИЧИН

Условные уравнения, если ограничиться частным случаем трех совместно измеряемых величин и линейной зависимостью между ними, имеют вид

$$a_1 x_{i1} + a_2 x_{i2} + a_3 x_{i3} = y_i, \quad (1)$$

где $1 \leq i \leq n > 3$ (n — количество условных уравнений).

В этих уравнениях x_{i1} , x_{i2} , x_{i3} представляют заданные точные значения величин x_1 , x_2 и x_3 , а y_i — значения величины y , известные с некоторой погрешностью ε_i . Избыточность системы условных уравнений позволяет составить систему нормальных уравнений и найти оценки a_{10} , a_{20} , a_{30} совместно измеряемых величин a_1 , a_2 , a_3 , их дисперсии, а также дисперсию любой их функции по известным формулам способа наименьших квадратов*.

Однако рассмотрение отдельных числовых примеров, а также теоретический анализ показывают, что при заданном числе условных уравнений и неизменной их точности различные системы, отличающиеся значениями x_{i1} , x_{i2} , x_{i3} , дают разные по точности результаты. Иначе, системы с различными матрицами (определителями) систем нормальных уравнений дают результаты разной точности. При этом предполагается, что дисперсия значений величины y в таких системах одна и та же, т. е. точность измерений неизменна.

Для подтверждения этого положения достаточно рассмотреть следующие три элементарных примера, в которых случайные погрешности равноточных условных уравнений с одинаковыми номерами одни и те же.

I. $1,5a_1 + 0,6a_2 = 3,7$	II. $2,2a_1 + 0,6a_2 = 5,1$	III. $1,5a_1 + 1,8a_2 = 4,9$
$1,3a_1 - 1,2a_2 = 1,2$	$0,7a_1 - 1,2a_2 = 0$	$1,3a_1 + 1,2a_2 = 3,6$
$0,8a_1 - 1,7a_2 = 0$	$-0,2a_1 - 1,7a_2 = -2$	$0,8a_1 + 0,5a_2 = 2,2$
$3,9a_1 + 2,8a_2 = 10,5$	$6,7a_1 + 2,8a_2 = 16,1$	$3,9a_1 + 5,0a_2 = 12,7$
$1,8a_1 + 2,7a_2 = 6,5$	$4,1a_1 + 2,7a_2 = 11,1$	$1,8a_1 + 2,6a_2 = 6,4$
$-2,5a_1 - 2,7a_2 = -7,8$	$-5,0a_1 - 2,7a_2 = -12,8$	$-2,5a_1 - 3,4a_2 = -8,5$
$2,3a_1 - 3,4a_2 = 1,0$	$0,4a_1 - 3,4a_2 = -2,8$	$2,3a_1 + 1,8a_2 = 6,2$
$-4,8a_1 + 5,2a_2 = -4,2$	$-2,2a_1 + 5,2a_2 = 1$	$-4,8a_1 - 4,2a_2 = -13,6$
$5,3a_1 - 5,6a_2 = 5,1$	$2,5a_1 - 5,6a_2 = -0,5$	$5,3a_1 + 4,6a_2 = 15,3$
$-5,7a_1 + 4,6a_2 = -6,9$	$-3,8a_1 + 4,6a_2 = -3,1$	$-5,7a_1 - 5,3a_2 = -16,8$

Обработка этих данных по способу наименьших квадратов приводит к результатам, сведенным в табл. 1.

Анализ этих результатов показывает, что при равных оценках дисперсии погрешностей условных уравнений последние могут приводить к су-

* Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М., Физматгиз, 1962.

Таблица 1

Номер системы	$s_0^2 \times 10^2$	a_{10}	$D(a_{10}) \times 10^2$	a_{20}	$D(a_{20}) \times 10^2$	$\text{cov}(a_{10}a_{20}) \times 10^4$
1	2,49	2,008	0,032	1,016	0,032	1,82
2	2,48	2,007	0,021	1,012	0,021	0,0023
3	2,53	1,934	0,621	1,066	0,066	-60,98

Примечание:

- s_0^2 — оценка дисперсии погрешностей условных уравнений,
 a_{10}, a_{20} — оценки совместно измеряемых величин a_1, a_2 .
 $D(a_{10}), D(a_{20})$ — оценки дисперсий оценок a_{10} и a_{20} .
 $\text{cov}(a_{10}a_{20})$ — ковариация случайных величин a_{10} и a_{20} .

существенно различным оценкам совместно измеряемых величин и их дисперсий. При этом видно, что вторая система приводит к наилучшим оценкам, а третья — к наихудшим. В связи с этим интересно выяснить причину таких существенно различных оценок величин, получаемых в результате измерений равной точности, и сформулировать критерий, характеризующий степень приближения данной системы условных уравнений к оптимальной. Такие критерии позволят планировать измерения так, чтобы получить наилучшие в отношении точности результаты при заданном числе n измерений (условных уравнений) и заданной точности измерений ($D(e_i) = \sigma^2$).

Как уже отмечалось, каждое условное уравнение (1) имеет погрешность измерения e_i , поэтому соответствующее точное уравнение будет

$$a_1 x_{i1} + a_2 x_{i2} + a_3 x_{i3} + e_i = y_i$$

или в векторном виде

$$a_1 \bar{x}_1 + a_2 \bar{x}_2 + a_3 \bar{x}_3 + \bar{e} = \bar{y}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= (x_{11}, x_{21}, \dots, x_{n1}), \quad \bar{x}_2 = (x_{12}, x_{22}, \dots, x_{n2}), \\ \bar{x}_3 &= (x_{13}, x_{23}, \dots, x_{n3}), \quad \bar{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n), \\ \bar{e} &= (e_1, e_2, \dots, e_n) \text{ — } n\text{-мерные векторы.} \end{aligned}$$

Вектор погрешности измерений \bar{e} определить в результате измерений невозможно. Однако из условий проведения измерений относительно компонентов вектора \bar{e} можно сделать несколько предположений:

- 1) математическое ожидание e_i равно нулю,
- 2) дисперсия e_i равна σ^2 ,*
- 3) компоненты e_i взаимно независимые величины, т. е. математическое ожидание произведения любой пары компонент равно нулю ($M(e_i e_j) = 0$ при $i \neq j$).

Этих предположений достаточно для получения оценок a_{10}, a_{20}, a_{30} величин a_1, a_2, a_3 и их дисперсий из системы (2). Однако при этом вектор \bar{e} заменяется другим вектором $\bar{\alpha}$, а уравнение (2) — уравнением:

$$a_{10} \bar{x}_1 + a_{20} \bar{x}_2 + a_{30} \bar{x}_3 + \bar{\alpha} = \bar{y}. \quad (3)$$

* Для упрощения ограничимся случаем равноточных условных уравнений (т. е. $\sigma_i^2 = \sigma_j^2$ при $i \neq j$), так как при неравноточности условных уравнений их легко с помощью весовых коэффициентов преобразовать к равноточным.

Вектор невязок $\bar{\alpha}$ выбирается таким образом, чтобы его длина была наименьшей среди длин всех векторов $\bar{\alpha}$, удовлетворяющих уравнению (3).

Вычитая из (2) уравнение (3), получаем одно из важнейших равенств теории способа наименьших квадратов

$$(a_1 - a_{10}) \bar{x}_1 + (a_2 - a_{20}) \bar{x}_2 + (a_3 - a_{30}) \bar{x}_3 + \bar{\epsilon} - \bar{\alpha} = 0.$$

Откуда

$$\bar{\epsilon} = (a_{10} - a_1) \bar{x}_1 + (a_{20} - a_2) \bar{x}_2 + (a_{30} - a_3) \bar{x}_3 + \bar{\alpha}.$$

Или, введя обозначение

$$\bar{L} = (a_{10} - a_1) \bar{x}_1 + (a_{20} - a_2) \bar{x}_2 + (a_{30} - a_3) \bar{x}_3,$$

имеем

$$\bar{\epsilon} = \bar{L} + \bar{\alpha}. \quad (4)$$

По определению векторов в последнем равенстве $\bar{\epsilon}$ — n -мерный вектор, а \bar{L} — m -мерный вектор*, где m — число совместно измеряемых величин. Вектор невязок $\bar{\alpha}$ имеет наименьшую длину среди всех векторов $\bar{\alpha}$, удовлетворяющих уравнению (3). Поэтому он ортогонален векторам $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$ и, следовательно, вектору \bar{L} , а его размерность равна $n - m$. Значит, можно выбрать такую n -мерную систему координат, чтобы $n - m$ осей координат были ортогональны \bar{L} , а m осей — $\bar{\alpha}$. Тогда $n - m$ компонентов $\bar{\epsilon}$ будут совпадать с компонентами $\bar{\alpha}$, а остальные m компонентов с компонентами \bar{L} . Поскольку все компоненты $\bar{\epsilon}$ имеют дисперсию σ^2 , то математическое ожидание длины вектора $\bar{\alpha}$ равно

$$M(\alpha^2) = M((a_{10}\bar{x}_1 + a_{20}\bar{x}_2 + a_{30}\bar{x}_3 - \bar{y})^2) = (n - m) \sigma^2,$$

что делает возможным вычисление оценки дисперсии s_0^2 погрешностей условных уравнений

$$\sigma^2 \approx s_0^2 = \frac{\alpha^2}{n - m}.$$

Следует подчеркнуть, что равенство (4) и вытекающая из него формула для оценки дисперсии погрешностей условных уравнений справедливы только при сделанных предположениях о случайном характере погрешности ϵ_i и вытекающей из них независимости статистических характеристик ϵ_i от ориентации системы координат. Однако при наличии неучтенных систематических погрешностей картина может резко измениться и привести к такому положению, что α^2 не стремится к $(n - m) \sigma^2$ при бесконечном числе измерений. В частности, возможен случай $\alpha = 0$. При этом оценка дисперсии s_0^2 системы условных уравнений по способу наименьших квадратов становится бесполезной, и система условных уравнений (1) превращается в совместную и точную, но дает оценки искомых величин, имеющие систематические погрешности и существенно отличные от действительных значений совместно измеряемых величин.

Случай $\alpha = 0$ возможен только тогда, когда вектор погрешностей измерения $\bar{\epsilon}$ является линейной комбинацией векторов $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$, так как из формулы (4) при $\alpha = 0$ следует:

$$\bar{\epsilon} = \bar{L} = (a_{10} - a_1) \bar{x}_1 + (a_{20} - a_2) \bar{x}_2 + (a_{30} - a_3) \bar{x}_3. \quad (5)$$

* В нашем случае он трехмерный вектор, так как рассматриваются совокупные измерения трех величин.

Вектор $\bar{\epsilon}$ является компланарным по отношению к векторам $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$, т. е. лежит в одной плоскости (гиперплоскости) с векторами $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$. В этом случае можно говорить о компланарной погрешности, особенности которой вытекают из соотношения (5). Она является частным случаем систематической погрешности и не может быть вскрыта с помощью обработки результатов наблюдений по способу наименьших квадратов.

Таким образом, из равенства (4) непосредственно вытекает, что в результате обработки заданной серии совместных наблюдений можно произвести оценку только случайной, а следовательно, ортогональной к подпространству, заданному векторами $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$, составляющей погрешности измерений $\bar{\epsilon}$.

Однако, как показали примеры, при данной оценке дисперсии условных уравнений s_0^2 (т. е. оценке длины вектора $\bar{\alpha}$) можно получить существенно разные оценки дисперсий совместно измеряемых величин (табл. 1). Очевидно, что на оценки дисперсий совместно измеряемых величин существенное влияние оказывает взаимная ориентация векторов—столбцов $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$ системы условных уравнений.

Последнее легко доказать, анализируя оценку дисперсии любой из трех совместно измеряемых величин, получаемую из системы условных уравнений (1) по известным формулам. Так, для $D(a_{10})$ имеем*

$$D(a_{10}) = s_0^2 \frac{(\bar{x}_2\bar{x}_2)(\bar{x}_3\bar{x}_3) - (\bar{x}_2\bar{x}_3)^2}{(\bar{x}_1\bar{x}_1)(\bar{x}_2\bar{x}_2)(\bar{x}_3\bar{x}_3) + 2(\bar{x}_1\bar{x}_2)(\bar{x}_1\bar{x}_3)(\bar{x}_2\bar{x}_3) - (\bar{x}_1\bar{x}_1)(\bar{x}_2\bar{x}_2)^2 - (\bar{x}_2\bar{x}_2)(\bar{x}_1\bar{x}_3)^2 - (\bar{x}_3\bar{x}_3)(\bar{x}_1\bar{x}_2)^2} \quad (6)$$

Минимум $D(a_{10})$ определяется равенством нулю частных производных от $D(a_{10})$ по $(\bar{x}_1, \bar{x}_2), (\bar{x}_1, \bar{x}_3)$, и (\bar{x}_2, \bar{x}_3) . Соответствующая система уравнений имеет вид

$$-(\bar{x}_1\bar{x}_2)(\bar{x}_3\bar{x}_3) + (\bar{x}_1\bar{x}_3)(\bar{x}_2\bar{x}_2) = 0,$$

$$(\bar{x}_1\bar{x}_2)(\bar{x}_3\bar{x}_3) - (\bar{x}_1\bar{x}_3)(\bar{x}_2\bar{x}_2) = 0,$$

$$((\bar{x}_1\bar{x}_2)(\bar{x}_3\bar{x}_3) - (\bar{x}_1\bar{x}_3)(\bar{x}_2\bar{x}_2))((\bar{x}_1\bar{x}_2)(\bar{x}_2\bar{x}_3) - (\bar{x}_1\bar{x}_3)(\bar{x}_2\bar{x}_2)) = 0.$$

При этом из физических соображений

$$(\bar{x}_1\bar{x}_1) \neq 0, (\bar{x}_2\bar{x}_2) \neq 0 \text{ и } (\bar{x}_3\bar{x}_3) \neq 0,$$

так как равенство нулю одного из последних скалярных произведений приводит к неинтересному случаю — измерению в нулевой точке, а следовательно, к исчезновению в условных уравнениях одной из искоемых величин. Поэтому единственным имеющим физический смысл решением этой системы уравнений является

$$(\bar{x}_1\bar{x}_2) = (\bar{x}_1\bar{x}_3) = (\bar{x}_2\bar{x}_3) = 0.$$

К такому же результату приводит рассмотрение минимума дисперсий оценок и других величин (a_{20}, a_{30}) .

Таким образом, для получения минимально возможной дисперсии оценок совместно измеряемых величин многомерные векторы

$$\bar{x}_1 = (\bar{x}_{11}, \bar{x}_{12}, \dots, \bar{x}_{1n}), \bar{x}_2 = (\bar{x}_{21}, \bar{x}_{22}, \dots, \bar{x}_{2n}) \text{ и } \bar{x}_3 = (\bar{x}_{31}, \bar{x}_{32}, \dots, \bar{x}_{3n})$$

должны быть взаимно перпендикулярны.

* Далее, во всех формулах гауссовы суммы, обычно применяемые при изложении способа наименьших квадратов, заменены соответствующими им скалярными произведениями.

При этом условии матрица системы нормальных уравнений вырождается в следующую:

$$\begin{vmatrix} (\bar{x}_1\bar{x}_1) & 0 & 0 \\ 0 & (\bar{x}_2\bar{x}_2) & 0 \\ 0 & 0 & (\bar{x}_3\bar{x}_3) \end{vmatrix} \quad (8)$$

Условие (7) определяет оптимальную систему условных уравнений и легко может быть обобщено на любое конечное число неизвестных.

Дополнительное требование вытекает из формулы (6). Если принять условие (7), тогда

$$D(a_{10})_{\perp} = \frac{s_0^2}{(x_1x_1)}; \quad D(a_{j0})_{\perp} = \frac{s_0^2}{(x_jx_j)}, \quad (9)$$

т. е. дисперсия оценок величин уменьшается обратно пропорционально квадрату длины соответствующего n -мерного вектора-столбца матрицы системы условных уравнений.

Таким образом, задача образования оптимальной системы решается условием (7) и вытекающей из него формулой (9).

Однако условия измерений не всегда позволяют построить измерения так, чтобы получить матрицу системы нормальных уравнений (8). Поэтому представляет интерес установить критерий «качества» заданной системы условных уравнений по сравнению с оптимальной.

Предварительно введем ряд обозначений, позволяющих существенно упростить дальнейшие вычисления. Приняв во внимание, что

$$(\bar{x}_i\bar{x}_i) = x_i^2$$

и

$$(\bar{x}_i\bar{x}_j) = x_ix_j\alpha_{ij},$$

где

$$\alpha_{ij} = \cos\left(\frac{\wedge}{x_ix_j}\right), \quad (10)$$

Получим

$$\Delta = x_1^2x_2^2x_3^2 \begin{vmatrix} 1 & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{12} & 1 & \alpha_{23} \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & 1 \end{vmatrix} = x_1^2x_2^2x_3^2\delta,$$

$$\Delta_{11} = x_2^2x_3^2 \begin{vmatrix} 1 & \alpha_{23} \\ \alpha_{23} & 1 \end{vmatrix} = x_2^2x_3^2\delta_{11},$$

$$\Delta_{12} = x_1x_2x_3^2 \begin{vmatrix} \alpha_{12} & \alpha_{23} \\ \alpha_{13} & 1 \end{vmatrix} = x_1x_2x_3^2\delta_{12} \text{ и т. д.}$$

Соответственно для дисперсии $D(a_{10})$ получится

$$D(a_{10}) = s_0^2 \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = s_0^2 \frac{x_2^2x_3^2\delta_{11}}{x_1^2x_2^2x_3^2\delta} = \frac{s_0^2}{x_1^2} \cdot \frac{\delta_{11}}{\delta}.$$

Аналогично для любой $D(a_{i0})$

$$D(a_{i0}) = \frac{s_0^2}{x_i^2} \cdot \frac{\delta_{ii}}{\delta}.$$

Величина s_0^2/x_i^2 , как уже было показано, равна дисперсии в случае оптимальной системы условных уравнений. Поэтому отношение δ_{ii}/δ является величиной, характеризующей увеличение дисперсии, обусловленное только различной взаимной ориентацией векторов $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$, так как в определитель δ и его алгебраические дополнения входят только косинусы углов между векторами $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$.

Смысл отношений легко вскрыть, рассмотрев три орта $\bar{x}_{10}, \bar{x}_{20}, \bar{x}_{30}$, определяющих направления векторов \bar{x}_1, \bar{x}_2 и \bar{x}_3 . Спроектируем орт \bar{x}_{10} (рис. 1) на плоскость, определенную ортами \bar{x}_{20} и \bar{x}_{30} . Так как эта проекция лежит в одной плоскости с ортами \bar{x}_{20} и \bar{x}_{30} , она является их линейной комбинацией и может быть выражена в виде

$$\bar{p}_1 = \rho_2 \bar{x}_{20} + \rho_3 \bar{x}_{30}, \quad (11)$$

где ρ_2 и ρ_3 некоторые коэффициенты.

Значения этих коэффициентов легко определяются из условий перпендикулярности вектора $\bar{x}_{10} - \bar{p}_1$ к ортам \bar{x}_{20} и \bar{x}_{30} . Действительно, условие перпендикулярности $\bar{x}_{10} - \bar{p}_1$ и \bar{x}_{20} имеет вид

$$(\bar{x}_{10} - \bar{p}_1, \bar{x}_{20}) = 0, \text{ т. е. } (\bar{x}_{10} - \rho_2 \bar{x}_{20} - \rho_3 \bar{x}_{30}, \bar{x}_{20}) = 0.$$

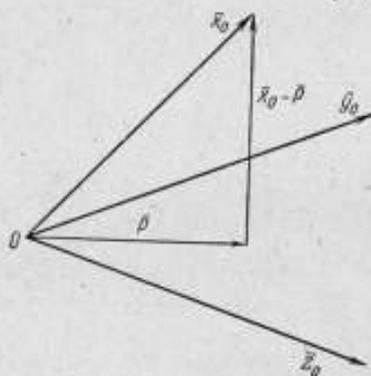


Рис. 1

Откуда, учитывая уравнение (10), имеем

$$\alpha_{12} - \rho_2 - \alpha_{23}\rho_3 = 0. \quad (12)$$

Аналогично из условия перпендикулярности векторов $\bar{x}_{10} - \bar{p}_1$ и \bar{x}_{30}

$$(\bar{x}_{10} - \bar{p}_1, \bar{x}_{30}) = 0,$$

получим

$$\alpha_{13} - \alpha_{23}\rho_2 - \rho_3 = 0. \quad (13)$$

Решая совместно уравнения (12), (13) относительно ρ_2 и ρ_3 , получим

$$\rho_2 = \frac{\alpha_{12} - \alpha_{13}\alpha_{23}}{1 - \alpha_{23}^2} \quad \text{и} \quad \rho_3 = \frac{\alpha_{13} - \alpha_{12}\alpha_{23}}{1 - \alpha_{23}^2}.$$

Поэтому из уравнения (11) для нормали $\bar{x}_{10} - \bar{p}_1$ имеем следующее выражение

$$\begin{aligned} \bar{x}_{10} - \bar{p}_1 &= \bar{x}_{10} - \frac{\alpha_{12} - \alpha_{13}\alpha_{23}}{1 - \alpha_{23}^2} \bar{x}_{20} - \frac{\alpha_{13} - \alpha_{12}\alpha_{23}}{1 - \alpha_{23}^2} \bar{x}_{30} = \\ &= \frac{(1 - \alpha_{23}^2) \bar{x}_{10} - (\alpha_{12} - \alpha_{13}\alpha_{23}) \bar{x}_{20} + (\alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{13}) \bar{x}_{30}}{1 - \alpha_{23}^2} = \\ &= \frac{1}{1 - \alpha_{23}^2} \begin{vmatrix} \bar{x}_{10} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \bar{x}_{20} & 1 & \alpha_{23} \\ \bar{x}_{30} & \alpha_{23} & 1 \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (14)$$

Легко убедиться, что квадрат длины вектора (14) равен

$$\begin{aligned} |\bar{x}_{10} - \bar{p}_1|^2 &= \frac{1}{(1 - \alpha_{23}^2)^2} \begin{vmatrix} \bar{x}_{10} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \bar{x}_{20} & 1 & \alpha_{23} \\ \bar{x}_{30} & \alpha_{23} & 1 \end{vmatrix}^2 = \\ &= \frac{1 + 2\alpha_{12}\alpha_{13}\alpha_{23} - \alpha_{12}^2 - \alpha_{13}^2 - \alpha_{23}^2}{1 - \alpha_{23}^2} = \frac{\delta}{\delta_{11}}. \end{aligned}$$

Откуда

$$\frac{\delta_{11}}{\delta} = \frac{1}{|\bar{x}_{10} - \bar{p}_1|^2}.$$

Следовательно,

$$D(a_{10}) = \frac{s_0^2}{x_1^2} \cdot \frac{1}{|\bar{x}_{10} - \bar{p}_1|^2}.$$

Аналогично

$$D(a_{i0}) = \frac{s_0^2}{x_i^2} \cdot \frac{1}{|\bar{x}_{i0} - \bar{p}_i|^2},$$

где $\bar{x}_{i0}\bar{p}_i$ — нормаль, проведенная из конца орта \bar{x}_{i0} на плоскость остальных ортов.

Из последней формулы непосредственно следует, что наименьшая достижимая при поставленных выше условиях дисперсия $D(a_{i0})_{\perp}$ равна s_0^2/x_i^2 . Поэтому отношение полученной дисперсии $D(a_{i0})$ к принципиально достижимой $D(a_{i0})_{\perp}$ равно

$$\frac{D(a_{i0})}{D(a_{i0})_{\perp}} = \frac{1}{|\bar{x}_{i0} - \bar{p}_i|^2}, \quad (15)$$

т. е. равно обратной величине квадрата длины перпендикуляра, опущенного из конца орта \bar{x}_{i0} на плоскость остальных ортов. Эта величина характеризует качество системы условных уравнений, а также и качество совместных измерений величин a_i . Наименьшее значение этой величины достигается при ортогональной системе векторов \bar{x}_i , т. е. при выполнении условий (7).

Таким образом, ориентация векторов-столбцов матрицы системы условных уравнений \bar{x}_i играет существенную роль в обеспечении наивысшей точности совместных измерений. Наиболее четко сущность этой зависимости вскрывается из непосредственного анализа равенства (4).

Действительно, из формулы (4), благодаря ортогональности векторов \bar{L} и $\bar{\alpha}$, имеем

$$L^2 = m\sigma^2$$

или, выражая \bar{L} через векторы \bar{x}_1 и \bar{x}_2 (для $m = 2$), имеем*

$$((a_{10} - a_1)\bar{x}_1 + (a_{20} - a_2)\bar{x}_2)^2 = 2\sigma^2. \quad (16)$$

Уравнение (16) в косоугольной системе координат ($a_{10} - a_1$, $a_{20} - a_2$) с базисными векторами \bar{x}_1 и \bar{x}_2 является уравнением окружности радиуса

* Для произвольного m равенство (16) имеет вид:

$$\left(\sum_{i=1}^m (a_{i0} - a_i)\bar{x}_i \right)^2 = m\sigma^2.$$

$\sqrt{2}\sigma$ (рис. 2). Эта окружность (в общем случае сфера) является совокупностью точек, соответствующих возможным значениям погрешностей $(a_{i0} - a_i)$, получающихся при различных совместных измерениях для заданных длин векторов \bar{x}_i , величин углов между ними γ_i и дисперсии погрешностей условных уравнений σ^2 . Верхняя граница значений координаты $(a_{i0} - a_i)$ соответствует случаю, когда радиус-вектор точки упомянутой окружности перпендикулярен вектору \bar{x}_i . Эта верхняя граница, как следует из рис. 2, равна

$$(a_{i0} - a_i)_{\gamma} = \frac{\sqrt{2}\sigma}{x_i \sin \gamma}. \quad (17)$$

Аналогично для $(a_{20} - a_2)$ верхняя граница равна

$$(a_{20} - a_2)_{\gamma} = \frac{\sqrt{2}\sigma}{x_2 \sin \gamma}. \quad (18)$$

Из формул (17) и (18) видно, что наименьшее значение $(a_{i0} - a_i)_{\gamma}$ и $(a_{20} - a_2)_{\gamma}$ при неизменных величинах x_1, x_2 и σ достигается при $\gamma = \frac{\pi}{2}$ т. е. при ортогональности векторов \bar{x}_1 и \bar{x}_2 . В этом случае границы погрешностей $(a_{i0} - a_i)_{\gamma}$ и $(a_{20} - a_2)_{\gamma}$ равны

$$(a_{i0} - a_i)_{\gamma = \frac{\pi}{2}} = \frac{\sqrt{2}\sigma}{x_i},$$

$$(a_{20} - a_2)_{\gamma = \frac{\pi}{2}} = \frac{\sqrt{2}\sigma}{x_2}.$$

Поэтому отношение

$$\frac{(a_{i0} - a_i)_{\gamma = \frac{\pi}{2}}}{(a_{i0} - a_i)_{\gamma}} = \frac{(a_{20} - a_2)_{\gamma = \frac{\pi}{2}}}{(a_{20} - a_2)_{\gamma}} = \frac{1}{\sin \gamma}$$

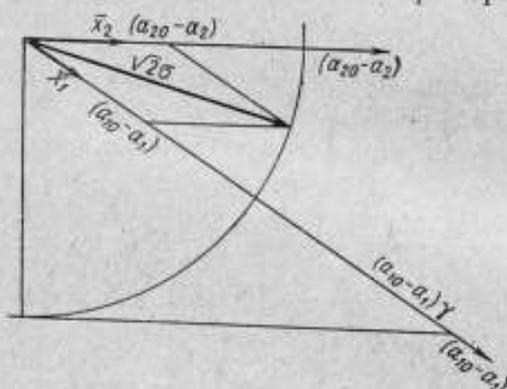


Рис. 2

также может явиться величиной, характеризующей рациональность системы условных уравнений. При переходе к общему случаю ($m > 2$) ход рассуждений сохраняется, если учесть, что при определении верхней границы значений координаты $(a_{i0} - a_i)_{\gamma}$ необходимо проводить плоскость, касательную к сфере радиуса $\sqrt{m}\sigma$ и параллельную плоскости остальных ортов. Тогда, обозначив угол между ортом \bar{x}_{i0} и плоскостью остальных ортов через γ_i , получим:

$$(a_{i0} - a_i)_{\gamma} = \frac{\sqrt{m}\sigma}{x_i} \cdot \frac{1}{\sin \gamma_i}.$$

Откуда наименьшая верхняя граница

$$(a_{i0} - a_i)_{\gamma = \frac{\pi}{2}} = \frac{\sqrt{m}\sigma}{x_i}$$

и, следовательно,

$$\frac{(a_{i0} - a_i)_{\gamma}}{(a_{i0} - a_i)_{\gamma = \frac{\pi}{2}}} = \frac{1}{\sin \gamma_i}. \quad (19)$$

Этот критерий полностью согласуется с отношением (15), так как длина нормали, опущенной из конца орта \bar{x}_{i0} на плоскость остальных ортов, равна $\sin \gamma_i$.

Таким образом, из условий минимума в дисперсии и верхней границы погрешностей совместно измеряемых величин следует существование оптимальной системы условных уравнений, обеспечивающей получение наименьших погрешностей при постоянных длинах векторов-столбцов \bar{x}_i матрицы системы условных уравнений, их количества n и дисперсии погрешности σ^2 последних. Оптимальная система условных уравнений образует матрицу с ортогональными векторами-столбцами \bar{x}_i . Чем ближе получаемая в результате измерений система векторов \bar{x}_i к ортогональной, тем ближе данная система условных уравнений к оптимальной. Величины (15 и 19) характеризуют степень отклонения данной системы условных уравнений от оптимальной и показывают, во сколько раз превосходит дисперсия $D(a_{i0})$ и верхняя граница погрешности $(a_{i0} - a_i)_y$ соответствующие величины, получаемые при наиболее благоприятном (оптимальном) случае.

Как уже говорилось, оптимальной системой условных уравнений является система с ортогональными векторами-столбцами \bar{x}_i , т. е. система, для которой

$$\frac{(\bar{x}_i \bar{x}_j)}{x_i x_j} = 0, \text{ при } i \neq j. \quad (20)$$

Однако получить для всех условий (20) точное равенство нулю невозможно. Поэтому желательно знать, какой величины не должны превысить косинусы углов между векторами \bar{x}_i (т. е. величины (20)) для того, чтобы отношения получаемых дисперсий $D(a_{i0})$ к принципиально достижимой $D(a_{i0})_{\perp}$ не превышали заданное число t . Из формулы (15) следует

$$\frac{D(a_{i0})}{D(a_{i0})_{\perp}} = \frac{1}{|\bar{x}_{i0} - \bar{p}_i|^2} = \frac{1}{\sin^2 \gamma_i} \leq t,$$

откуда

$$|\cos \gamma_i| = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma_i} \leq \sqrt{1 - \frac{1}{t}}.$$

Но γ_i — угол между ортом \bar{x}_{i0} и плоскостью остальных ортов, поэтому он меньше любого острого угла между направлением \bar{x}_i и любым из векторов \bar{x}_j ($j \neq i$). Поэтому, так как функция $\cos \gamma$ при $0 \leq \gamma \leq \pi$ убывающая, то

$$\left| \frac{(\bar{x}_i \bar{x}_j)}{x_i x_j} \right| = |\cos(\widehat{\bar{x}_i \bar{x}_j})| \leq |\cos \gamma_i| \leq \sqrt{1 - \frac{1}{t}},$$

т. е.

$$\left| \frac{(\bar{x}_i \bar{x}_j)}{x_i x_j} \right| \leq \sqrt{1 - \frac{1}{t}}, \text{ при } i \neq j.$$

Поэтому, если считать допустимым двукратное превышение дисперсии $D(a_{i0})_{\perp}$, т. е. $t = 2$, то условие оптимальности системы условных уравнений (20) принимает вид:

$$\left| \frac{(\bar{x}_i \bar{x}_j)}{x_i x_j} \right| \leq \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Таблица 2

Номер системы условных уравнений	Матрица системы нормальных уравнений		$\left \frac{(\bar{x}_i, \bar{x}_j)}{x_i x_j} \right $ $\cos \gamma =$	$\frac{(a_{i0} - a_i) \gamma}{(a_{i0} - a_i) \gamma} = \frac{\pi}{2}$ $\gamma = \frac{\pi}{2}$ $-\sin \gamma$	$\frac{D(a_{i0})}{D(a_{i0})_{\perp}}$
1	118,2 -68,2	-68,2 118,2	0,58	1,22	1,5
2	117,8 -0,1	-0,1 118,2	$8,5 \times 10^{-4}$	1	1
3	118,2 116,2	116,2 118,4	0,98	5,3	28

Таким образом, в этом случае достаточно, чтобы величины углов между направлениями векторов \bar{x}_i превышали бы $\pi/4$.

С изложенных выше позиций становится ясным различие результатов, представленных в табл. 1. Приведенные в табл. 2 данные показывают, что дисперсии оценок, получаемые из первой и второй систем, наиболее близки к оптимальным $D(a_{i0})_{\perp}$. В то же время третья система приводит к дисперсиям $D(a_{i0})$, в 28 раз превышающим принципиально достижимые оценки. Таблица 1 подтверждает этот прогноз: первая и вторая системы дали близкие результаты (дисперсии отличаются менее, чем в 1,5 раза), а дисперсии $D(a_{i0})$ и $D(a_{20})$ в третьем случае в 29 раз больше.

Таким образом, среди систем условных уравнений, получаемых в результате совместных измерений величин a_i имеются оптимальные системы, обеспечивающие получение наименьших дисперсий при заданной длине векторов—столбцов \bar{x}_i , количестве n и дисперсии погрешности σ^2 условных уравнений. Для того, чтобы получаемые оценки дисперсий $\bar{D}(a_{i0})$ не превышали более, чем в i раз оценок дисперсий $D(a_{i0})_{\perp}$, получаемых из оптимальной системы, необходимо выполнить условия

$$\left| \frac{(\bar{x}_i, \bar{x}_j)}{x_i x_j} \right| \leq \sqrt{1 - \frac{1}{i}} \quad \text{для всех } i \neq j \text{ и } 1 \leq i, j \leq m.$$

Этим неравенством можно пользоваться в качестве критерия при планировании совместных измерений нескольких величин.

Поступила в редакцию
23/XII 1968 г.

А. Ю. ЛЬВОВИЧ, В. С. ПЕЛЛИНЕЦ,
В. С. САБАНЕЕВ, М. П. ЮШКОВ

ВНИИМ

ОБ ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ НАРАСТАЮЩИХ УСКОРЕНИЙ

1. Постановка задачи

Ударные ускорения объектов, деформирующихся в процессе эксперимента, обычно измеряют лишь на участке нарастания ускорения. Используемая для этой цели аппаратура, особенно в случае дистанционных измерений, содержит ряд звеньев, служащих для последовательных преобразований сигнала. Для аналитической оценки систематической динамической погрешности измерения нарастающих ускорений рассмотрим структуру соответствующих измерительных устройств.

Характерная блок-схема такого устройства приведена на рис. 1, а. Измерительный преобразователь 1 представляет собой линейную механическую систему, преобразующую ускорение x_0 в смещение. Ее можно с достаточной точностью представить как колебательную систему с одной степенью свободы. Смещение практически без искажений преобразовывается в электрический сигнал x_1 . Чтобы повысить мощность сигнала x_1 для обеспечения эксплуатационной устойчивости аппаратуры, применяют аperiodический усилитель 2 переменного тока с выходным сигналом x_2 .

Для коррекции искажений сигнала, создаваемых измерительным преобразователем 1, используют фильтр нижних частот 3 [1], выходной сигнал которого x_3 поступает на регистрирующее устройство 4.

В качестве регистрирующего устройства применяют светолучевой осциллограф, гальванометры которого в первом приближении соответствуют колебательным системам с одной степенью свободы [2], или электронно-лучевой осциллограф с усилителем переменного тока. Отклонение луча осциллографа обозначим x_4 .

В общем случае, как показано на рис. 1, б, устройство может содержать как меньшее, так и большее количество звеньев. Однако все возможные звенья можно свести к двум видам:

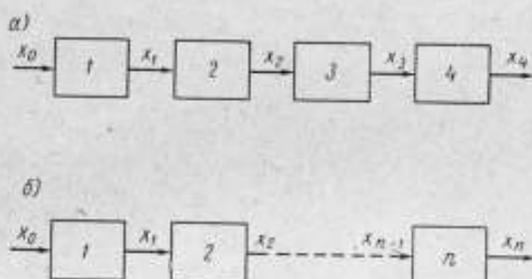


Рис. 1. Блок-схемы аппаратуры:

а — для измерения ускорений с помощью четырехзвенной системы; 1 — первичный преобразователь, 2 — усилитель, 3 — фильтр, 4 — регистрирующее устройство; б — то же, с помощью n -звенной системы.

1. Колебательные (измерительный преобразователь, гальванометр), описываемые уравнением

$$\ddot{x}_i + 2\theta_i \dot{x}_i + \omega_{0i}^2 x_i = \omega_{0i}^2 x_{i-1}, \quad (1.1)$$

где θ — коэффициент успокоения;

ω_{0i} — собственная частота.

2. Дифференцирующие (усилители переменного тока), описываемые уравнением:

$$\tau_i^{-1} x_i + \dot{x}_i = \dot{x}_{i-1}, \quad (1.2)$$

где τ_i — постоянная времени.

Динамическая погрешность измерения подобными устройствами ударных ускорений для каждого конкретного случая может быть оценена с помощью аналоговых вычислительных машин. Однако для выявления общих математических закономерностей и составления критериальных оценок пригодности аппаратуры для конкретных измерений необходимо установить аналитическую зависимость между выходным и входным сигналами устройства.

В качестве x_0 в работе рассмотрена линейная функция

$$x_0(t) = \frac{t}{T}, \quad (1.3)$$

где $T = \text{const}$.

Анализ проводят для невозмущенных звеньев, т. е. когда $t \leq 0$

$$x_0 = x_1 = \dots = x_n = 0; \quad \dot{x}_0 = \dot{x}_1 = \dots = \dot{x}_n = 0. \quad (1.4)$$

Масштабные преобразования измеряемой величины не рассматривают, поэтому в уравнениях (1.1) и (1.2) коэффициенты при x_{i-1} и x_i берут равными.

2. Анализ работы звеньев I-го вида

Для входного сигнала (1.3) при одном звене I-го вида (1.1) имеем уравнение:

$$\ddot{x}_1 + 2\theta_1 \dot{x}_1 + \omega_{01}^2 x_1 = \omega_{01}^2 \frac{t}{T},$$

решение которого при начальных условиях (1.4) дает

$$x_1(t) = \frac{t}{T} - C_1 + e^{-\theta_1 t} (P_1^{(1)} \cos \omega_1 t + Q_1^{(1)} \sin \omega_1 t), \quad (2.1)$$

где

$$C_1 = \frac{2\theta_1}{\omega_{01}^2 T}; \quad \omega_1 = \sqrt{\omega_{01}^2 - \theta_1^2}; \quad P_1^{(1)} = C_1; \quad Q_1^{(1)} = -\frac{\omega_1^2 - \theta_1^2}{\omega_1 \omega_{01}^2 T}.$$

Для системы, состоящей из n последовательно соединенных звеньев первого вида, сигнал на выходе можно представить в виде:

$$x_n(t) = \frac{t}{T} - C_n + \sum_{k=1}^n e^{-\theta_k t} (P_k^{(n)} \cos \omega_k t + Q_k^{(n)} \sin \omega_k t), \quad (2.2)$$

где

$$C_n = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i}{\omega_{0i}^2}; \quad \omega_k = \sqrt{\omega_{0k}^2 - \theta_k^2}.$$

$P_k^{(n)}$ и $Q_k^{(n)}$ находят по формулам:

$$\left. \begin{aligned} P_k^{(n)} &= \frac{\omega_{0n}^2}{l_{nk}^2 + m_{nk}^2} (l_{nk} P_k^{(n-1)} - m_{nk} Q_k^{(n-1)}) \\ Q_k^{(n)} &= \frac{\omega_{0n}^2}{l_{nk}^2 + m_{nk}^2} (m_{nk} P_k^{(n-1)} + l_{nk} Q_k^{(n-1)}) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

$$k = 2, 3, \dots, n-1,$$

где

$$l_{nk} = \omega_{0n}^2 - \omega_{0k}^2 - 2\theta_k (\theta_n - \theta_k),$$

$$m_{nk} = 2(\theta_n - \theta_k) \omega_k.$$

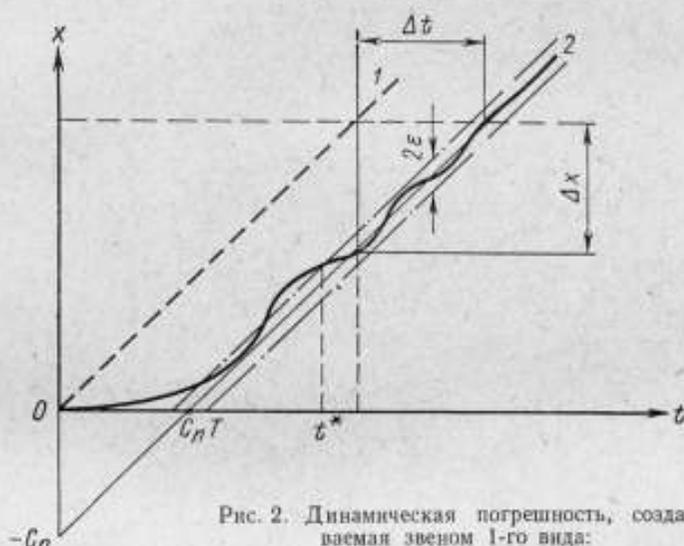


Рис. 2. Динамическая погрешность, создаваемая звеном 1-го вида:

1 — исходная кривая $x_0 = \frac{t}{T}$. 2 — кривая сигнала x_n на выходе n -го звена.

$P_n^{(n)}$ и $Q_n^{(n)}$ определяют из соотношений:

$$P_n^{(n)} = C_n - \sum_{i=1}^{n-1} P_i^{(n)}$$

$$Q_n^{(n)} = \frac{1}{\omega_n} \left\{ \theta_n C_n - \frac{1}{T} + \sum_{i=1}^{n-1} [(\theta_i - \theta_n) P_i^{(n)} - \omega_i Q_i^{(n)}] \right\}, \quad (2.4)$$

Кривая, выраженная уравнением (2.2), имеет асимптоту $x_n = \frac{t}{T} - C_n$, пересекающую ось абсцисс в точке $C_n T$ (рис. 2). Поэтому динамическая погрешность имеет установившуюся составляющую, соответствующую

сдвигу сигнала по оси времени на величину $\Delta t = C_n T = 2 \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i}{\omega_{0i}^2}$.

Для определения времени t^* установления выходного сигнала выражение (2.2) представляется в виде

$$x_n = \frac{t}{T} - C_n + \sum_{k=1}^n e^{-\theta_k t} A_k^{(n)} \sin(\omega_k t - \alpha_k^{(n)}), \quad (2.5)$$

(где введены очевидные обозначения, например, $A_k^{(n)} = \sqrt{(P_k^{(n)})^2 + (Q_k^{(n)})^2}$). Найдем значение t , при котором сумма в формуле (2.5) будет по абсолютной величине меньше допустимой погрешности ϵ .

При $n = 1$ из неравенства $A_1^{(1)} e^{-\theta_1 t} < \epsilon$ следует, что время установления будет не более, чем

$$t = \frac{1}{\theta_1} \ln \frac{A_1^{(1)}}{\epsilon}. \quad (2.6)$$

Для определения t^* при $n > 1$ можно рекомендовать следующий графический метод. Задаваясь удобными значениями t , построим в системе координат t, y кривую $y = \sum_{k=1}^n A_k^{(n)} e^{-\theta_k t}$. Абсцисса точки пересечения этой кривой с прямой $y = \epsilon$ и даст значение t^{**} , приближающееся сверху к t^* , т. е. всегда будет

$$t^* \leq t^{**}.$$

3. Анализ работы звена 2-го вида

Для исследования работы звена второго вида после интегрирования уравнения (1.2) при нулевом начальном условии получим:

$$x_i(t) = \frac{\tau_i}{T} (1 - e^{-t/\tau_i}).$$

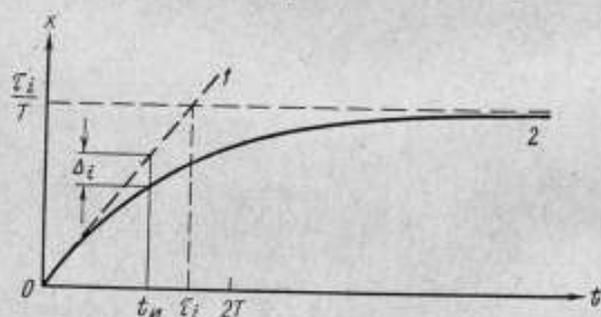


Рис. 3. Динамическая погрешность, создаваемая звеном 2-го вида:

1 — исходная кривая $x_{i-1} = \frac{t}{T}$, 2 — кривая сигнала x_i на выходе звена.

Это решение не содержит слагаемого, равного $x_{i-1} = \frac{t}{T}$, и может показаться, что система, имеющая звенья второго вида, непригодна для воспроизведения линейного сигнала. Однако, так как уравнение касательной к кривой $x_i = x_i(t)$ в начале координат имеет вид $x = \frac{t}{T}$, то, если ограничиться достаточно малыми значениями t , можно приближенно считать:

$$x_i \approx x_{i-1} = \frac{t}{T}.$$

Допускаемая при этом абсолютная погрешность равна (рис. 3):

$$\Delta_i = \frac{t}{T} - x_i = \frac{1}{T} [t - \tau_i (1 - e^{-t/\tau_i})] \approx \frac{t^2}{2\tau_i T}. \quad (3.1)$$

Из формулы (3.1) следует, что погрешность Δ_i не превышает величины $\eta \frac{t}{T}$, где $\eta < 1$, если время воспроизведения сигнала не выходит за пределы промежутка $0 \leq t < 2\eta\tau_i$.

Другими словами, чтобы погрешность не превышала Δ_i при времени измерения $t_u < 2T$, необходимо выполнять следующее условие:

$$\tau_i > \frac{t_u^2}{2T\Delta_i}. \quad (3.2)$$

Характер искажений, создаваемых звеном второго вида, противоположен рассмотренному выше в том смысле, что наименьшие искажения наблюдаются в начальный момент времени.

4. Совместная работа звеньев 1-го и 2-го видов

При анализе совместной работы звеньев первого и второго видов для входного сигнала (1.3) рассмотрим сначала случай, когда звену второго вида предшествует $i-1$ звеньев первого. Подставляя в уравнение (1.2) вместо x_{i-1} выражение (2.2) при $n = i-1$, после интегрирования получим:

$$x_i = \frac{\tau_i}{T} (1 - e^{-t/\tau_i}) + N_i^{(i)} e^{-t/\tau_i} + \sum_{k=1}^{i-1} e^{-\theta_k t} (P_k^{(i)} \cos \omega_k t + Q_k^{(i)} \sin \omega_k t), \quad (4.1)$$

где

$$N_i^{(i)} = - \sum_{k=1}^{i-1} P_k^{(i)};$$

$$P_k^{(i)} = \frac{(\omega_{0k}^2 - \tau_i^{-1} \theta_k) P_k^{(i-1)} + \frac{\omega_k}{\tau_i} Q_k^{(i-1)}}{\omega_k^2 + (\tau_i^{-1} - \theta_k)^2};$$

$$Q_k^{(i)} = - \frac{\tau_i^{-1} \omega_k P_k^{(i-1)} - (\omega_{0k}^2 - \tau_i^{-1} \theta_k) Q_k^{(i-1)}}{\omega_k^2 + (\tau_i^{-1} - \theta_k)^2}. \quad (4.2)$$

Если процесс исследуют в промежутке $[0, 2T]$ при соблюдении условия (3.2), то решение (4.1) можно заменить приближенным равенством

$$x_i \approx \frac{t}{T} + N_i^{(i)} + \sum_{k=1}^{i-1} e^{-\theta_k t} (P_k^{(i)} \cos \omega_k t + Q_k^{(i)} \sin \omega_k t), \quad (4.3)$$

допуская при этом ошибку

$$\Delta_i \approx \frac{t^2}{2\tau_i T}. \quad (4.4)$$

Характер возникающих при этом искажений представлен на рис. 4. Очевидно, что при выборе достаточно больших значений постоянной времени τ_i характер искажений будет близок к показанному на рис. 2.

Если сигнал, описываемый уравнением (4.1), поступает на вход звена первого вида, то решая полученное уравнение при нулевых начальных условиях, получим:

$$x_{i+1} = \frac{\tau_i}{T} (1 - e^{-t/\tau_i}) + N_i^{(i+1)} e^{-t/\tau_i} + \sum_{k=1; k \neq i}^{i+1} e^{-\theta_k t} (P_k^{(i+1)} \cos \omega_k t + Q_k^{(i+1)} \sin \omega_k t), \quad (4.5)$$

где

$$N_i^{(i+1)} = \frac{1 - 2\theta_{i+1}\tau_i + \omega_{0, i+1}^2 \tau_i T N_i^{(i)}}{1 - 2\theta_{i+1}\tau_i + \omega_{0, i+1}^2 \tau_i^2} \cdot \frac{\tau_i}{T}, \quad (4.6)$$

$$P_{i+1}^{(i+1)} = -N_i^{(i+1)} - \sum_{k=1}^{i-1} P_k^{(i+1)},$$

$$Q_{i+1}^{(i+1)} = \frac{1}{\omega_{i+1}} \left\{ (\tau_i^{-1} - \theta_{i+1}) N_i^{(i+1)} - \frac{1}{T} + \sum_{k=1}^{i-1} [(\theta_k - \theta_{i+1}) P_k^{(i+1)} - \omega_k Q_k^{(i+1)}] \right\}.$$

Все остальные коэффициенты $P_k^{(i+1)}$, $Q_k^{(i+1)}$ вычисляются по формуле (2.3).

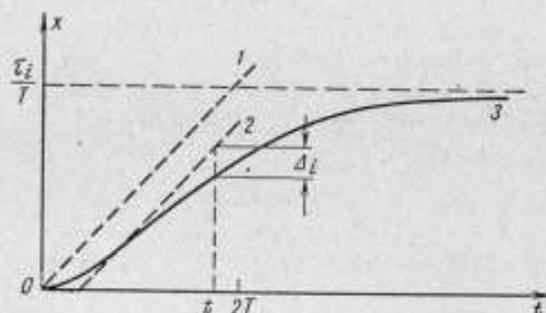


Рис. 4. Динамическая погрешность, создаваемая устройством, содержащим звенья 1 и 2-го видов:

1 — исходная кривая $x_0 = \frac{t}{T}$, 2 — приближенное решение для x_1 согласно уравнению (4.3), 3 — точное решение для x_1 согласно уравнению (4.1).

Как видно из сопоставления уравнений (4.5) и (4.1), характер искажений в обоих случаях одинаков; однако при увеличении числа звеньев запаздывание выходного сигнала Δt увеличивается, а время установления t^* может изменяться как в ту, так и в другую сторону.

Если система содержит два звена второго вида r -ое и s -ое соответственно, а остальные звенья будут первого вида, то сигнал x_s определяют по формуле:

$$x_s = \frac{\tau_r \tau_s}{T} \cdot \frac{e^{-t/\tau_r} - e^{-t/\tau_s}}{\tau_r - \tau_s} - \tau_s N_r^{(s-1)} \frac{e^{-t/\tau_r} - e^{-t/\tau_s}}{\tau_r - \tau_s} + N_1^{(s)} e^{-t/\tau_s} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^{s-1} e^{-\theta_k t} (P_k^{(s)} \cos \omega_k t + Q_k^{(s)} \sin \omega_k t), \quad (4.7)$$

где $P_k^{(s)}$ и $Q_k^{(s)}$ находят по формулам (4.2);

$$N_s^{(1)} = - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^{s-1} P_k^{(s)}. \quad (4.8)$$

Если время воспроизведения достаточно мало, то решение (4.7) можно записать в виде

$$x_s \approx \frac{t}{T} + N_s^{(s)} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^{s-1} e^{-\theta_k t} (P_k^{(s)} \cos \omega_k t + Q_k^{(s)} \sin \omega_k t) \quad (4.9)$$

с погрешностью

$$\Delta_s = \left(\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_s} \right) \frac{t^2}{2T} + \left(\frac{N_r^{(s-1)}}{\tau_r} + \frac{N_s^{(s)}}{\tau_s} \right) t. \quad (4.10)$$

Когда $\tau_r = \tau_s = \tau$, то вместо формулы (4.7) будем иметь:

$$x_s = \frac{t}{T} e^{-t/\tau} - \frac{N_r^{(s-1)}}{\tau} t e^{-t/\tau} + N_s^{(s)} e^{-t/\tau} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^{s-1} e^{-\theta_k t} (P_k^{(s)} \cos \omega_k t + Q_k^{(s)} \sin \omega_k t). \quad (4.11)$$

При малых значениях t решение (4.11) можно заменить приближенным равенством:

$$x_s \approx \frac{t}{T} + N_s^{(s)} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^{s-1} e^{-\theta_k t} (P_k^{(s)} \cos \omega_k t + Q_k^{(s)} \sin \omega_k t) \quad (4.12)$$

с погрешностью

$$\Delta_s \approx \frac{t^2}{2T} + (N_s^{(s-1)} + N_s^{(s)}) \frac{t}{\tau}. \quad (4.13)$$

Из сопоставления формул (4.3), (4.9), (4.12) следует, что характер динамической погрешности при различных комбинациях звеньев сохраняется. Отметим, что формулы (4.4), (4.10), и (4.13) дают возможность подобрать значения параметров τ_i для получения заданных погрешности Δ_i воспроизведения входного сигнала и времени измерения t_m .

5. Пример расчета

Рассмотрим четырехзвенную систему, состоящую из измерительного преобразователя, усилителя, фильтра и усилителя осциллографа, на вход которой подается сигнал

$$x_0(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{t}{T}, & t \geq 0, \quad T = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ сек.} \end{cases}$$

Параметры системы имеют следующие значения:

$$\omega_{01}^2 = 2,85 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-2}, \quad \theta_1 = 5,34 \cdot 10^2 \text{ сек}^{-1}, \quad \tau_2 = 0,1 \text{ сек};$$

$$\omega_{03}^2 = 6,25 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-2}, \quad \theta_3 = 1,77 \cdot 10^4 \text{ сек}^{-1}, \quad \tau_4 = 0,2 \text{ сек}.$$

В соответствии с выражением (4.9) сигнал на выходе рассматриваемой системы может быть представлен в виде:

$$x_4(t) = \frac{t}{T} + N_4^{(4)} + e^{-\theta_1 t} (P_1^{(4)} \cos \omega_1 t + Q_1^{(4)} \sin \omega_1 t) + e^{-\theta_3 t} (P_3^{(4)} \cos \omega_3 t + Q_3^{(4)} \sin \omega_3 t). \quad (5.1)$$

Коэффициенты этой формулы определяются в следующей последовательности:

$$P_1^{(1)} = 1,5 \cdot 10^{-3}, \quad Q_1^{(1)} = -0,125 \quad \text{по формуле (2.1),}$$

$$P_1^{(2)} = 2,48 \cdot 10^{-3}, \quad Q_1^{(2)} = -0,125 \quad \text{» » (4.2),}$$

$$P_1^{(3)} = 2,12 \cdot 10^{-3}, \quad Q_1^{(3)} = -3,46 \cdot 10^{-2} \quad \text{» » (2.3),}$$

$$P_1^{(4)} = 2,12 \cdot 10^{-3}, \quad Q_1^{(4)} = -3,45 \cdot 10^{-2} \quad \text{» » (4.2),}$$

$$N_2^{(2)} = 2,48 \cdot 10^{-3} \quad \text{» » (4.2),}$$

$$N_2^{(3)} = -0,376, \quad P_3^{(3)} = 0,374, \\ Q_3^{(3)} = 0,101 \quad * \quad * \quad (4.6),$$

$$P_3^{(4)} = 0,375, \quad Q_3^{(4)} = 0,101 \quad * \quad * \quad (4.2),$$

$$N_4^{(4)} = -0,377 \quad * \quad * \quad (4.8).$$

Представляя выходной сигнал системы в виде (5.1), мы допустили погрешность, которая в соответствии с формулой (4.10) равна

$$\Delta_4 = \left(\frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_4} \right) \frac{t^2}{2T} + \left(\frac{N_2^{(3)}}{\tau_2} + \frac{N_4^{(4)}}{\tau_4} \right) t = 0,5 \cdot 10^3 t^2 - 5,64 t.$$

Максимальная ошибка на конце промежутка $[0, 2T]$ имеет величину:

$$\Delta_4(2T) = 4,5 \cdot 10^{-3} - 1,69 \cdot 10^{-3}$$

Сдвиг сигнала равен $\Delta t = -N_4^{(4)} T = 0,566 \cdot 10^{-4}$ сек.

Для определения времени установления выходного сигнала вычислим коэффициенты

$$A_1^{(4)} = \sqrt{(P_1^{(4)})^2 + (Q_1^{(4)})^2} = 3,45 \cdot 10^{-2},$$

$$A_3^{(4)} = \sqrt{(P_3^{(4)})^2 + (Q_3^{(4)})^2} = 0,388.$$

Тогда, применяя графический метод, изложенный в конце пункта 2, для $\epsilon = 0,05$ легко найдем приближенное значение $t^{**} = 1,71 \cdot 10^{-4}$ сек вместо истинного значения времени установления $t^* = 1,59 \cdot 10^{-4}$ сек.

Выводы

Найденные выражения позволяют оценить динамическую погрешность измерения линейно нарастающего ускорения любыми практически применяемыми системами.

Для предварительной оценки динамической погрешности выведены приближенные формулы и дана оценка степени их приближения.

Показано, что динамическая погрешность нарастающих ускорений, начиная со времени установления t^* , характеризуется постоянным во времени сдвигом измеряемой величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пеллинец В. С., Гаюн В. В. «Измерительная техника», 1966, № 1, стр. 29.
2. Буральник С. И. «Измерительная техника», 1967, № 1, стр. 92.

Поступила в редакцию
11/VII 1968 г.

Л. М. МАКСИМОВ
ВНИИМ

ОЦЕНКА ОБЩЕЙ ПОГРЕШНОСТИ ДИНАМОМЕТРОВ И ДАТЧИКОВ СИЛЫ

В настоящее время не имеется общепринятой методики оценки погрешностей силоизмерительных приборов, работающих в условиях статики [1]. При нормировании этих погрешностей, а также в поверочной практике применяют чрезвычайно упрощенные способы их оценки, учитывающие лишь какую-либо одну частную погрешность приборов. Для динамометров с условной шкалой это обычно ширина рассеяния (вариации) их показаний [2], а для приборов с именованной шкалой — систематические временные изменения показаний [3]. Такая упрощенная и недостаточная оценка не удовлетворяет потребителей динамометров и датчиков силы. Их интересует прежде всего конечная точность измерений приборами или, иначе говоря, общая погрешность измерений в условиях нормальной эксплуатации приборов. Потребитель вправе требовать, чтобы соответствующие нормативы однозначно нормировали, с одной стороны, численную величину общей погрешности данных приборов и, с другой стороны, способ ее контроля при очередных поверках.

Для надежной оценки общей погрешности измерений, как известно, достаточно знать перечень ее составляющих, законы распределения каждой из них и численные значения параметров этих законов. Однако получить полный комплект такой информации, как правило, не представляется возможным. Поэтому любая методика упомянутой оценки неизбежно будет основываться на недостаточной информации и, следовательно, содержать ряд допущений и упрощений. Не вполне свободна от этого недостатка и предлагаемая методика оценки общей погрешности динамометров и датчиков общего назначения с условными шкалами, хотя она и основана на конкретном анализе всех частных погрешностей приборов. Тем не менее, последнее обстоятельство позволяет полагать, что данная методика дает достаточно надежную в практическом отношении оценку рассматриваемой общей погрешности.

1. Анализ частных погрешностей

Ниже рассматриваются причины возникновения, допустимые величины и ориентировочные плотности распределения вероятностей частных погрешностей применительно к конкретным условиям градуировки и нормального применения силоизмерительных приборов общего назначения с условными шкалами.

1.1 Невоспроизводимость показаний. Невоспроизводимость показаний определяют при повторных нагружениях прибора

одними и теми же силами при постоянной температуре. Она является следствием случайных погрешностей, возникших в нормальных условиях нагружения. Количественно ее удобно оценивать величиной средних квадратичных отклонений ряда нагружений σ .

Значения средних квадратичных отклонений $\sigma_{гр}$, получаемые экспериментально при градуировке приборов, суммарно характеризуют как случайные погрешности динамометра или датчика, так и случайные погрешности вторичного прибора и средств нагружения при градуировке. Очевидно, что

$$\sigma_{гр} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}, \quad (1.1.1)$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 — характеристики случайных погрешностей в данных условиях нагружения соответственно датчика, вторичного прибора и машины, на которой производилась градуировка.

Из формулы (1.1.1) вытекает возможность оценивать величину σ при замене вторичного прибора, с которым производилась градуировка датчика, другим вторичным прибором:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{гр}^2 - \sigma_{21}^2 + \sigma_{22}^2}. \quad (1.1.2)$$

При этом значения σ_{21} и σ_{22} обоих вторичных приборов предполагаются известными или могут быть определены независимыми способами.

1.2. Временная нестабильность. Временная нестабильность силоизмерительного прибора с условной шкалой характеризуется величиной систематических изменений его показаний $\delta\tau'$ за нормированное время τ' между двумя очередными поверками. Причинами ее возникновения являются изменения со временем упругих свойств динамометра или датчика, чувствительности передаточных устройств и вторичных приборов в связи с их старением. Количественно она оценивается величиной:

$$\delta\tau' = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \quad (1.2.1)$$

где ε_1 и ε_2 — средние значения показаний прибора при нескольких нагружениях данной силой соответственно при первой и второй очередных поверках.

Информацию о численном значении $\delta\tau'$ можно получить двумя путями: 1) для данного экземпляра прибора — экспериментальным исследованием ее действительной величины $\delta_1\tau'$, 2) для данного типа прибора — из технических условий на изготовление, в которых обычно нормируется допустимая величина временной нестабильности всех приборов данного типа $\delta_2\tau'$. Очевидно, что

$$\delta_2\tau' \geq \delta_1\tau'. \quad (1.2.2)$$

Для конкретизации неравенства (1.2.2) были проведены исследования временной нестабильности, включая анализ результатов поверок пятидесяти динамометров и датчиков разных типов. При этом наблюдались различные значения $\delta_1\tau'$, находящиеся преимущественно в верхней половине интервала от 0 до $\delta_2\tau'$. Близких к нулю значений $\delta_1\tau'$ почти не наблюдалось (рис. 1).

Для оценки величины $\delta\tau$ при данном измерении силы произвольно выбранным прибором данного типа необходимо сделать следующие допущения.

1. За время между поверками прибора τ' величина $\delta\tau$ изменяется от 0 до $\delta_1\tau'$. При этом предполагается, что она пропорциональна времени τ , прошедшему после первой поверки. Промежуточные измерения в общем подтверждают это предположение.

2. Предполагается равная вероятность применения прибора в любой день между двумя его поверками.

Для совокупности применений данного прибора из этих двух непротиворечивых действительности допущений вытекает равная вероятность появления любого значения $\delta\tau$, находящегося в пределах от 0 до $\delta_1\tau'$ (рис. 2).

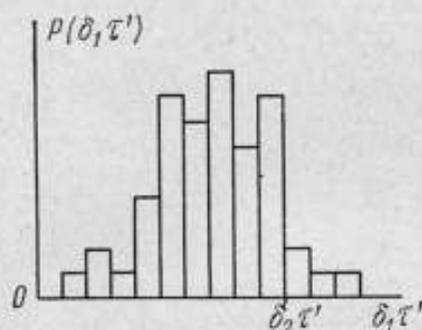


Рис. 1. Экспериментальная плотность распределения погрешности $\delta_1\tau'$ в пределах от 0 до $\delta_2\tau'$.

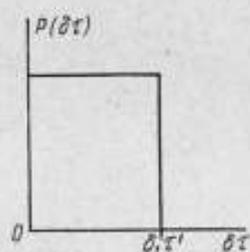


Рис. 2. Плотность распределения вероятностей погрешности $\delta\tau$ в пределах от 0 до $\delta_1\tau'$.

3. С небольшой перестраховкой предполагается равная вероятность появления любого значения $\delta_2\tau'$, находящегося в пределах от $0,5\delta_2\tau'$ до $\delta_2\tau'$ (рис. 3). Это предположение подтверждается результатами проведенных исследований (рис. 1).

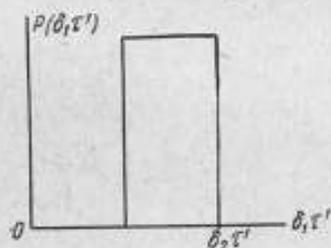


Рис. 3. Плотность распределения вероятностей погрешности $\delta_1\tau'$ в пределах от 0 до $\delta_2\tau'$.

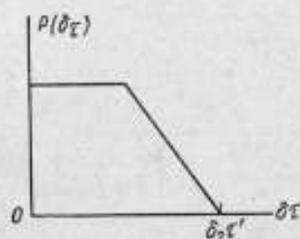


Рис. 4. Плотность распределения вероятностей погрешности $\delta\tau$ в пределах от 0 до $\delta_2\tau'$.

Складывая два распределения, представленные на рис. 2 и 3, получим следующую ориентировочную плотность распределения вероятностей погрешности $\delta\tau$, относящуюся ко всей совокупности применения приборов данного типа (рис. 4). Дисперсия такого распределения

$$D(\delta\tau) = \frac{5}{24} \delta_2^2 \tau'^2. \quad (1.2.3)$$

Следует учитывать, что у некоторых типов приборов и, в частности у электротензометрических датчиков общего назначения, временная нестабильность показаний часто имеет наибольший вес среди всех частных погрешностей. Это обстоятельство требует особого внимания как при

оценке численного значения $\delta_2 t'$, так и при поисках путей его уменьшения, притом не только путем увеличения частоты поверок приборов.

1.3. Температурные погрешности. Температурные погрешности силоизмерительных приборов обусловлены температурными изменениями модуля упругости и размеров упругих элементов, вызывающих температурные приращения деформаций при данной нагрузке. Они связаны также с температурными изменениями чувствительности устройств для преобразования и измерения деформаций, например с изменениями тензочувствительности преобразователей. Эти погрешности иногда частично исключаются термокомпенсацией или введением температурных поправок.

Для единичного прибора температурные погрешности или их неисключенный остаток δt — систематические. Их наибольшее значение $\delta_1 t'$ при наибольшем нормированном отклонении температуры применения t от температуры градуировки t_0 практически постоянно. Для каждого прибора оно может быть определено экспериментально с достаточной для практики точностью. Далее, может быть определен так называемый температурный коэффициент прибора k , количественно выражающий относительные изменения показаний прибора при изменении температуры на 1°C .

В показания обычных динамометров с механическими передаточными устройствами, применяемых при температурах $20 \pm 5^\circ \text{C}$, температурные поправки не вводятся. При более широком диапазоне температур поправки вводятся исходя из некоторого среднего значения температурного коэффициента $k_{\text{ср}}$. При этом не исключенный поправкой остаток температурной погрешности может достигать 20% первоначального значения δt [4].

Тензометрические динамометры и датчики силы обычно термокомпенсируются. Их температурные погрешности δt — это остаточные погрешности термокомпенсации. В технической документации на данный тип прибора оговариваются наибольшие допустимые значения этих погрешностей $\delta_2 t'$ при предельно допустимой температуре применения t' . Наибольшие значения температурной погрешности единичных приборов $\delta_1 t'$ при этом могут иметь любую величину в пределах $\delta_2 t'$, причем нет оснований предполагать, что какое-либо значение $\delta_1 t'$ будет встречаться чаще других.

При изготовлении датчиков погрешности их термокомпенсации часто нормируются средним значением $\delta_1 t'$ данной партии датчиков — $\delta_1 t'_{\text{ср}}$. Такое нормирование не может быть рекомендовано, поскольку не исключается возможность появления отдельных недопустимо больших отклонений от среднего. При оценке δt на основе нормированного значения $\delta_1 t'_{\text{ср}}$ условно принимают:

$$\delta_2 t' \approx 2\delta_1 t'_{\text{ср}} \quad (1.3.1)$$

Для оценки погрешности δt при данном измерении следует различать три случая.

1. Данное измерение силы нетермокомпенсированным прибором проведено при известной постоянной температуре t , отличающейся от температуры градуировки t_0 . Располагая значениями t , t_0 и $k_{\text{ср}}$, можно ввести соответствующую поправку в показания прибора. Как упоминалось выше, остаточная температурная погрешность в этом случае не превысит двух десятых первоначального значения δt . Следовательно:

$$|\delta_2 t| \leq 0,2k_{\text{ср}}(t - t_0) \quad (1.3.2)$$

При этом для совокупности приборов данного типа следует предполагать равную вероятность любого значения δt в пределах, ограниченных $\delta_2 t$. Дисперсия такого распределения вероятностей будет

$$D(\delta t) = \frac{1}{3} \delta_2^2 t. \quad (1.3.3)$$

Аналогичен рассмотренному случай применения термокомпенсированного прибора при известной температуре t . Тогда

$$D(\delta t) = \frac{1}{3} \left(\delta_2 t' \frac{t-20}{t-20} \right)^2. \quad (1.3.4)$$

2. Температурные поправки в показания нетермокомпенсированных приборов не вводятся. Приборы градуируют и применяют в сравнительно узком диапазоне температур, пределы которых t_{\min} и t_{\max} нормированы. В этом случае с некоторой перестраховкой логично предположить равную вероятность любого значения температуры в нормированных пределах как при градуировке, так и при применении прибора. Наибольшее возможное значение температурной погрешности в этом случае будет:

$$\delta t' \leq k_{\text{ср}} (t_{\max} - t_{\min}). \quad (1.3.5)$$

Складывая два равномерных распределения $H(t)$, одно из которых относится к градуировке прибора, а другое — к его применению, получим треугольное распределение плотности вероятностей δt (рис. 5). Дисперсия такого распределения равна:

$$D(\delta t) = \frac{1}{6} \delta t'^2. \quad (1.3.6)$$

Для упоминавшихся динамометров с механическими передаточными устройствами, градуируемых и применяемых при $t = 20 \pm 5^\circ \text{C}$, температурная погрешность получается равной

$$\delta t' < k_{\text{ср}} (t_{\max} - t_{\min}) = 0,03 \cdot 10 = 0,3$$

и

$$D(\delta t) = \frac{1}{6} \cdot 0,3^2 = 0,015.$$

3. Температуры, при которых производятся измерения, неизвестны и непостоянны. Известно лишь, что они находятся в нормированных пределах, а также что температурный диапазон применения прибора во много раз шире градуировочного. Датчик термокомпенсирован. Допустимые для данного типа датчиков погрешности термокомпенсации $\delta_2 t'$ известны.

Как отмечалось выше, для совокупности приборов по условиям термокомпенсации следует ожидать равномерное распределение $\delta_2 t'$ в пределах $\delta_2 t'$. Для совокупности применений также возможно равномерное распределение t в нормированных пределах t' . Сложением двух упомянутых распределений получают треугольное распределение вероятностей погрешности δt , ограниченной пределами $\delta_2 t'$. Дисперсия такого распределения будет:

$$D(\delta t) = \frac{1}{6} \delta_2^2 t'. \quad (1.3.7)$$

1.4. Систематические погрешности средств градуировки. Динамометры и датчики силы обычно градуируют

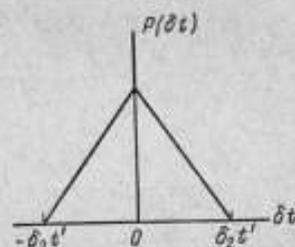


Рис. 5. Плотность распределения вероятностей погрешности δt в пределах $\delta_2 t'$.

на образцовых машинах 2-го разряда. Все эти машины, помимо указанных в п. п. 1.1. случайных погрешностей, имеют также систематические погрешности δP_0 , являющиеся погрешностями подгонки так называемого передаточного отношения машин. Согласно ГОСТ 14017-68 эти погрешности не должны превышать $\delta P_{0 \max} = 0,12$. Частные их значения у каждой машины не определяются. Поэтому у данной машины они имеют какую-то более или менее постоянную величину, не превышающую 0,12 процента воспроизводимой силы.

По совокупности образцовых машин в стране рассматриваемые погрешности являются случайными величинами, предельные значения которых $\delta P_{0 \max} = \pm 0,12$. Плотность распределения вероятностей этих погрешностей можно ориентировочно установить исходя из конкретного анализа

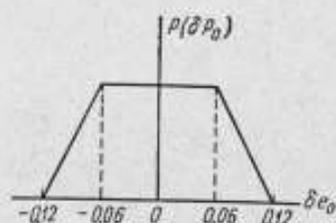


Рис. 6. Плотность распределения вероятностей погрешности δP_0 у образцовых машин 2-го разряда.

условий, принятых методик, средств и практики проведения проверок образцовых машин. Проведенные в этом направлении исследования, наряду с обработкой первичных документов поверочного архива, показали, что здесь можно принять распределение по трапеции (рис. 6). Дисперсия такого распределения:

$$D(\delta P_0) = \frac{5}{24} \delta^2 P_{0 \max} \quad (1.4.1)$$

и ее численное значение для всего парка этих машин:

$$D(\delta P_0) = \frac{5}{24} \cdot 0,12^2 = 0,003.$$

1.5. Погрешности, зависящие от условий эксплуатации. Рассмотренные выше четыре частные погрешности в той или иной мере присущи всем динамометрам и датчикам силы в любых условиях их эксплуатации. Поэтому они всегда должны учитываться при оценке общей погрешности силоизмерительных приборов. Кроме рассмотренных, возможны другие частные погрешности, особенность которых состоит в том, что они присущи приборам только в определенных условиях применения. К их числу относятся погрешности в результате действия на прибор изгибающих моментов от гистерезиса, а также погрешности из-за нелинейности градуировочной характеристики прибора, проявляющиеся при необходимости интерполяции его показаний. Каждая из этих погрешностей должна учитываться при оценке общей погрешности измерений прибором, если только нормированные условия эксплуатации не исключают возможности ее появления или не делают ее величину пренебрежимо малой.

1.5.1. В условиях нормальной эксплуатации некоторых типов динамометров и датчиков допускается воздействие на них изгибающих моментов, связанное с планируемой возможностью перекосов силовой оси приборов по отношению к вектору силы. Допустимые величины перекосов нормируются. Такие условия применения, отличающиеся от обычных условий градуировки, при наличии у приборов так называемой поперечной чувствительности, существенно изменяют невоспроизводимость показаний, определенную при градуировке. Это обстоятельство учитывают введением некоторых средних для данного типа приборов поправочных коэффициентов $k_{изг}$ на изменение условий применения по сравнению с условиями градуировки. Ориентировочные численные значения $k_{изг}$ можно получить расчетным путем, исходя из наибольших допустимых величин перекосов [5]. Однако обычно их определяют экспериментально в процессе госу-

дарственных или ведомственных испытаний, проводимых для каждого нового типа приборов.

С учетом $k_{\text{из}}$ величины средних квадратичных отклонений показаний прибора, ожидаемые в условиях эксплуатации, будут:

$$\sigma = k_{\text{из}} \sigma_{\text{гр}}. \quad (1.5.1)$$

1.5.2. Практически влияние гистерезиса прибора на погрешности измерений проявляется следующим образом: 1) приборы с большим гистерезисом, за редкими исключениями, имеют большую временную нестабильность; 2) при большом гистерезисе часто увеличивается невоспроизводимость показаний прибора при повторных нагружениях; 3) при неблагоприятных условиях эксплуатации прибора петля гистерезиса искажает его градуировочную характеристику даже, когда она представлена обеими ветвями петли.

Очевидно, что влияние гистерезиса на временную нестабильность и невоспроизводимость показаний приборов, наряду с влиянием других составляющих, автоматически учитывается при экспериментальном определении σ и δt . Что же касается третьего вида проявления влияния гистерезиса, то здесь следует различать два случая измерений.

1. Нормальный случай измерений, когда отсчеты показаний прибора производятся либо при прямом, либо при обратном ходах нагружений, причем точно известно, при каком именно из двух упомянутых ходов произведен данный отсчет. Влияние петли гистерезиса на погрешность измерений здесь проявляется лишь при так называемых всплесках силы при условии, что сами эти всплески не являются объектами измерений. Возникающие в связи с этим погрешности, как правило, пренебрежимо малы.

2. Случай измерений силы, когда разделить отсчеты показаний прибора, полученные при прямых и обратных ходах, невозможно. В этом случае соответствующие отрезки петли гистерезиса войдут составляющей в общую погрешность измерений. Надежным способом учета влияния этой составляющей на точность и правильность измерений является проведение градуировок приборов при прямых и обратных ходах и определение численных величин $\epsilon_{\text{гр}}$ и $\sigma_{\text{гр}}$ путем совместной обработки показаний прибора, полученных при обоих ходах.

1.5.3. Погрешности от нелинейности градуировочных характеристик силовых измерительных приборов связаны с дискретностью градуировок и применением линейной интерполяции в процессе эксплуатации. При данной градуировочной характеристике прибора и данном способе интерполяции величина погрешности интерполяции ξ определится условиями применения прибора. Здесь следует различать два случая применения.

1. Показания прибора в процессе эксплуатации мало отличаются от градуировочных, как это часто бывает в условиях применения образцовых динамометров. Погрешности интерполяции в этом случае невелики и иногда вообще могут не приниматься во внимание. Для силовых измерительных приборов общего назначения этот случай нехарактерен.

2. Прибор применяется по протяженности всей его шкалы. В этом случае при неправильно выбранном способе интерполяции погрешности интерполяции ξ оказываются очень большими, часто превосходящими все прочие погрешности прибора вместе взятые. Недопустимость их игнорирования при оценке общей погрешности измерений очевидна.

2. Формула общей погрешности

Дисперсию общей погрешности δ_P однократного измерения силы прибором определяют суммой дисперсий всех частных погрешностей:

$$D(\delta P) = \sigma^2 + D(\delta P_0) + D(\delta t) + D(\delta f), \quad (2.1)$$

где σ — среднее квадратичное отклонение, характеризующее невоспроизводимость показаний прибора в условиях применения, определенное по формулам (1.1.1), (1.1.2) или (1.5.1);
 $D(\delta P_0)$ — дисперсия погрешностей средств градуировки прибора, определенная по формуле (1.4.1);
 $D(\delta \tau)$ — дисперсия погрешностей, связанных с временной нестабильностью прибора, определенная по формуле (1.2.3);
 $D(\delta t)$ — дисперсия температурных погрешностей, определенная по формулам (1.3.3), (1.3.4), (1.3.6) или (1.3.7).

Действительное значение общей погрешности при каждом данном измерении с вероятностью $0,98 \div 0,99$ не выйдет за пределы:

$$(\delta P)_{\max} = \pm k \sqrt{D(\delta P)} + \zeta, \quad (2.2)$$

где $k = 2,2 \div 2,5$;

ζ — погрешности интерполяции, численные значения которых определяют применительно к данному измерению.

В формуле (2.2) условно складываются две существенно различные величины, вторая из которых есть действительное значение погрешности интерполяции при данном измерении, тогда как первая является лишь некоторым предельным значением суммы других частных погрешностей, действительное значение которой для данного измерения неизвестно. Поэтому можно лишь утверждать, что результат сложения с вероятностью $98 \div 99\%$ не превысит арифметической суммы слагаемых.

Пример. Оценить общую погрешность прибора $(\delta P)_{\max}$ исходя из следующих допустимых значений частных погрешностей, заданных техническими условиями на изготовление приборов данного типа: временная нестабильность $\delta_2 \tau' = 0,25$; погрешность термокомпенсации не более $0,01$ на 1°C ; температура применения прибора $20 \pm 20^\circ \text{C}$. Градуировка прибора производилась на образцовой машине 2-го разряда при температуре, близкой к 20°C . Обработкой результатов градуировки получено: $\sigma_{\text{гр}} \leq 0,11$.

$$D(\delta \tau) = \frac{5}{24} \delta_2^2 \tau'^2 = \frac{5}{24} \cdot 0,25^2 \approx 0,012,$$

$$D(\delta t) = \frac{1}{6} \delta_2^2 t'^2 = \frac{1}{6} (0,01 \cdot 20)^2 \approx 0,007,$$

$$D(\delta P_0) = 0,003,$$

$$D(\delta P) = 0,11^2 + 0,012 + 0,007 + 0,003 \approx 0,034,$$

$$(\delta P)_{\max} = k \sqrt{D(\delta P)} = 2,5 \sqrt{0,034} \approx 0,45.$$

Погрешности интерполяции не определялись. Для упрощения записи все погрешности представлены их относительными значениями, выраженными в процентах от измеряемой величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимов Л. М. Стандартизация классов точности динамометров и датчиков силы. «Измерительная техника», № 7, 1967.
2. ГОСТ 9500—60. Динамометры образцовые переносные.
3. Инструкция 43—63 по поверке динамометров общего назначения. Издательство стандартов, 1964.
4. Максимов Л. М. Временная стабильность и температурные погрешности динамометров. «Измерительная техника», № 11, 1963.
5. Базжи Ю. М. Исследование и разработка электротензометрических силовых измерительных датчиков высокой точности для промышленного контроля. Автореферат кандидатской диссертации. Московский институт электронного машиностроения, 1964.

Поступила в редакцию
15/V 1967 г.

Л. М. МАКСИМОВ

ВНИИМ

ТОЧНОСТЬ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПОКАЗАНИЙ ОБРАЗЦОВЫХ ДИНАМОМЕТРОВ 1-го РАЗРЯДА

Применяемые в СССР образцовые динамометры 1-го разряда типа ВНИИМ [1] имеют нелинейную градуировочную характеристику, что, естественно, вызывает погрешности при линейной интерполяции их показаний. В зависимости от условий градуировки и применения динамометров эти погрешности могут оказаться недопустимо большими. При этом конечная точность измерений силы резко снижается и перестает удовлетворять требованиям, предъявляемым к образцовым динамометрам 1-го разряда. Это обстоятельство предопределяет практическую необходимость разработки вопросов, связанных с оценкой и повышением точности интерполяции применительно к данным динамометрам.

Условия градуировки и применения динамометров

Образцовые динамометры 1-го разряда градуируют на нескольких равноотстоящих друг от друга ступенях нагружения, прикладывая к ним силы, равные $P_{01}; P_{02}; \dots; P_{0j}; \dots; P_{0n}$, где P_{0n} — сила, равная верхнему пределу измерений динамометров; n — число ступеней нагружения в интервале от $P_{00} = 0$ до P_{0n} (обычно $n = 10$); j — порядковый номер ступени.

Обозначим отношения $\frac{P_{0j}}{P_{0n}}$ через x_{0j} , тогда

$$x_{01} = \frac{P_{01}}{P_{0n}}; \dots; x_{0j} = \frac{P_{0j}}{P_{0n}}; x_{0j+1} = \frac{P_{0j+1}}{P_{0n}}; \dots; x_{0n} = \frac{P_{0n}}{P_{0n}} = 1. \quad (1)$$

По условиям градуировки:

$$x_{0n} - x_{0n-1} = \dots = x_{0j+1} - x_{0j} = x_{0j} - x_{0j-1} \dots x_{02} - x_{01} = x_{01} = \frac{1}{n}, \quad (2)$$

$$x_{0j} = \frac{j}{n}. \quad (3)$$

В результате градуировки получают ряд дискретных значений показаний динамометра ϵ_{0j} , выраженных в условных делениях его шкалы. Зависимость показаний динамометров типа ВНИИМ от приложенной силы хорошо описывается уравнением степенного многочлена:

$$\epsilon = ax + bx^2 + cx^3. \quad (4)$$

Коэффициенты a, b, c получают обработкой градуировочных данных по способу наименьших квадратов [2]. Отношения этих коэффициен-

тов $\frac{b}{a}$ и $\frac{c}{b}$ позволяют численно характеризовать нелинейность градуировок динамометров. Такая характеристика оказывается весьма удобной, в частности, при оценке погрешностей интерполяции. Для рассматриваемых динамометров характерными значениями упомянутых отношений являются:

$$\left. \begin{aligned} \frac{b}{a} &\approx -0,15, \\ \frac{c}{b} &= -0,15 \div 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

При эксплуатации динамометров, нагружая их некоторой силой P , сравнивают полученное при нагружении показание ϵ с одним или несколькими градуировочными значениями ϵ_{0j} и на этом основании судят о величине приложенной силы P . Определение значения аргумента P (или $x = \frac{P}{P_{0n}}$, где $P_{0n} = \text{const}$), по полученным при нагружении значениям функции ϵ — является обычной задачей, так называемой, обратной интерполяции. Пределы интерполяции определяются условиями применения динамометров. В этой связи различают два характерных случая применения: обычную поверку образцовых машин, осуществляемую нагружением одного образцового динамометра 1-го разряда и поверку посредством группы параллельно нагружаемых динамометров [2].

В первом случае динамометры нагружают силами P_j , номинально равными силам P_{0j} , которыми они нагружались при градуировке. Поэтому пределы возможной интерполяции, как правило, ограничиваются значениями допустимых нормированных погрешностей поверяемых машин. У образцовых машин 2-го разряда эти погрешности равны $\pm 0,2\%$ воспроизводимой силы. Следовательно,

$$P_{0j} - 0,002P_{0j} \leq P_j \leq P_{0j} + 0,002P_{0j},$$

или, принимая во внимание формулы (1) и (3), получим:

$$\left| x_j - \frac{1}{n} \right| \leq 0,002 \frac{1}{n}. \quad (6)$$

Во втором случае из-за различной жесткости динамометров, составляющих группу, и по другим причинам, силы P , приложенные к отдельным динамометрам, могут значительно отличаться от градуировочных значений P_{0j} и принимать любые значения на протяжении всей шкалы динамометра.

Простейший способ интерполяции

Для первого случая применения динамометров возможен простейший способ интерполяции — по прямой, соединяющей ближайшую градуировочную точку с началом координат (рис. 1). Такая интерполяция допустима лишь в том случае, когда функция $\epsilon = f(x)$ линейна. Однако в поверочной практике она применяется для всех динамометров, что нашло отражение в нормативной документации [3].

Интерполированное значение x , равное абсциссе точки 2 — x_2 , лежащей на прямой, соединяющей точку 3, имеющую координаты x_{0j} ; ϵ_{0j} , с началом координат, определяют из равенства:

$$x_2 = \frac{\epsilon}{\epsilon_{0j}} x_{0j}, \quad (7)$$

между тем как действительное значение x равно абсциссе точки 1, лежащей на градуировочной кривой. Разность

$$x_2 - x = \xi \quad (8)$$

суть погрешность данного способа интерполяции. Определим ее величину. Ординату точки 1 найдем из уравнения градуировочной кривой (4), а равную ей ординату точки 2, лежащей на прямой 0—3, из уравнения этой прямой:

$$\varepsilon = ax_2 + b \frac{j}{n} x_2^2 + c \frac{j^2}{n^2} x_2.$$

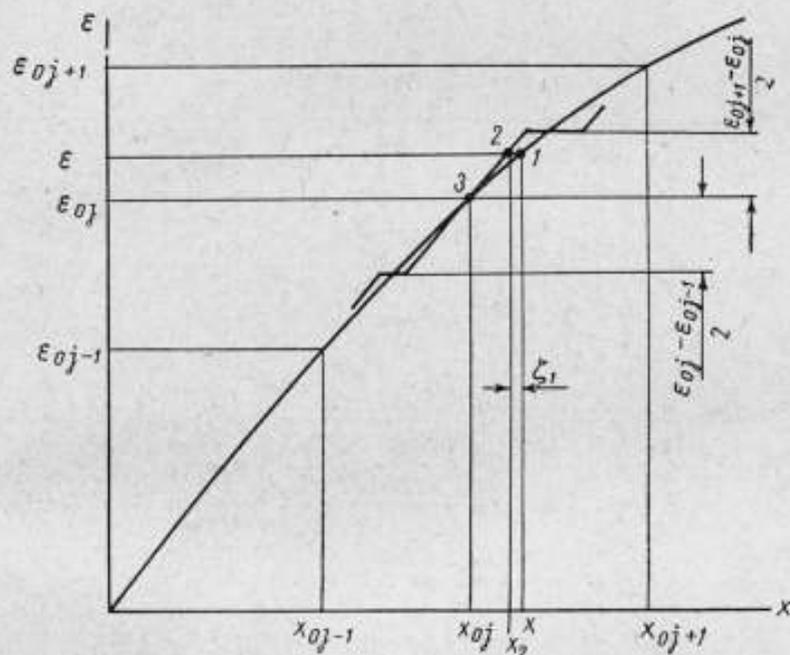


Рис. 1. Схема интерполяции по прямой, соединяющей ближайшую градуировочную точку с началом координат.

Решая эти уравнения совместно и принимая во внимание формулу (8), получим искомую погрешность:

$$\xi_1 = \frac{bx \left(x - \frac{j}{n}\right) + cx \left(x^2 - \frac{j^2}{n^2}\right)}{a + b \frac{j}{n} + c \frac{j^2}{n^2}} \quad (9)$$

и ее относительное значение:

$$\frac{\xi_1}{x} = \frac{b \left(x - \frac{j}{n}\right) \left[1 + \frac{c}{b} \left(x + \frac{j}{n}\right)\right]}{1 + \frac{b}{a} \frac{j}{n} \left(1 + \frac{c}{b} \frac{j}{n}\right)} \quad (10)$$

С достаточным для практики приближением можно считать, что наибольшего значения $\frac{\xi_1}{x}$ достигает в середине промежутка между x_{0j} и x_{0j+1} , когда разность $x - \frac{j}{n} = \frac{1}{2n}$.

При этом наибольшее значение искомой погрешности равно:

$$\left| \frac{\xi_1}{x} \right|_{\max} = \frac{\frac{b}{a} \frac{1}{2n} \left(1 + \frac{c}{b} \frac{4j+1}{2n} \right)}{1 + \frac{b}{a} \frac{j}{n} \left(1 + \frac{c}{b} \frac{j}{n} \right)} \quad (11)$$

Подставив формулы (5, 6) в уравнение (10), а формулу (5) в уравнение (11), получим численные значения наибольших возможных погрешностей данного способа интерполяции соответственно для первого и второго случаев применения образцовых динамометров 1-го разряда ВНИИМ (табл. 1).

Таблица 1

Порядковые номера ступени	Численные значения погрешностей $\left \frac{\xi_1}{x} 100\% \right _{\max}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Первый случай	0,00		0,01			0,02			0,03	
Второй случай		0,7					0,8			

Общая допустимая погрешность измерений силы данными динамометрами равна 0,1%. Поэтому приведенные в табл. 1 значения погрешностей интерполяции могут считаться приемлемыми для первого случая и совершенно неприемлемыми для второго. Очевидно, что для второго случая необходим способ интерполяции, который был бы в десятки раз точнее рассмотренного.

Это требование можно удовлетворить либо применяя нелинейную интерполяцию по известным формулам Ньютона, Стирлинга, Бесселя или Лагранжа, преобразованным для обратного интерполирования, либо решая уравнение многочлена (4) относительно x . Однако эти способы весьма трудоемки, а потому мало удобны в условиях практического применения образцовых динамометров. Что же касается обычно применяемых способов линейной интерполяции по прямой, соединяющей две соседние градуировочные точки, то они оказываются недостаточно точными, хотя присущие им погрешности в несколько раз меньше указанных в табл. 1. Описанный ниже способ значительно точнее других способов линейной интерполяции и менее трудоемок, чем способы нелинейной интерполяции.

Линейная интерполяция по числу делений шкалы

Этот метод применяется во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, когда необходимо аттестовать образцовые динамометры по протяженности всей шкалы.

Для неравномерных шкал образцовых динамометров число делений шкалы

$$z = \frac{e}{x} \quad (12)$$

есть переменная величина, характеризуемая кривой 0-3-1-4-5 (рис. 2). В каждой точке шкалы она равна тангенсу угла между осью x и прямой, соединяющей данную точку с началом координат системы x, e .

Как и в других методах линейной интерполяции, здесь соответствующие участки кривой заменяются отрезками прямой 3—4, построенными по точкам, координаты которых — градуировочные значения ϵ_{0j} и z_{0j} , вычисленные по формуле (12). Пример вычислений z_{0j} для всех градуировочных точек конкретного образцового динамометра 1-го разряда приведен в табл. 2.

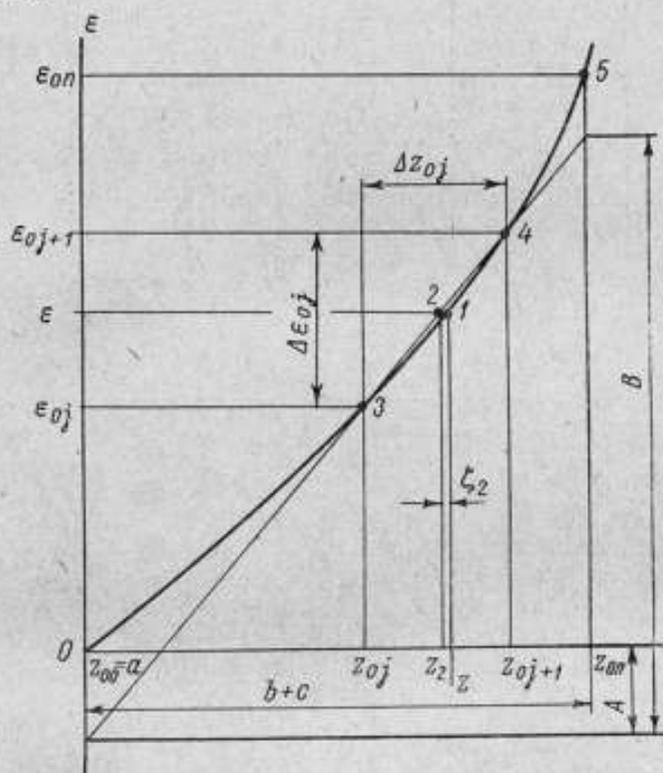


Рис. 2. Схема интерполяции по числу делений шкалы.

При последующих нагружениях динамометра в процессе эксплуатации значения x , соответствующие показаниям динамометра ϵ , вычисляют по уравнению:

$$x = \frac{\epsilon}{z} = \frac{\epsilon}{z_{0j} + \Delta z_{0j} \frac{\epsilon - \epsilon_{0j}}{\Delta \epsilon_{0j}}}. \quad (13)$$

Пример. При нагружении динамометра, градуировка которого приведена в табл. 2, некоторой силой P его показания $\epsilon = 65\,277$. Определим x :

$$x = \frac{65\,277}{77\,318 - 1035 \cdot \frac{65\,277 - 61\,854}{6811}} = 0,84998.$$

Для практической оценки погрешностей предлагаемого метода интерполяции сопоставим, как это делалось выше, положение точки 2 на прямой 3—4 и точки 1 на кривой $\epsilon = f(z)$.

Если, согласно формуле (4), $\epsilon = ax + bx^2 + cx^3$, то

$$z = \frac{\epsilon}{x} = a + bx + cx^2. \quad (14)$$

Градировка и число делений шкалы динамометра

x_{0j}	ε_{0j}	$\Delta\varepsilon_{0j} = \varepsilon_{0j+1} - \varepsilon_{0j}$	$z_{0j} = \frac{\varepsilon_{0j}}{x_{0j}}$	$\Delta z_{0j} = z_{0j+1} - z_{0j}$
0	0			
0,1	8 543 ₅	8543 ₅	85 435	
0,2	16 836	8292 ₅	84 180	-1255
0,3	24 888	8052	82 960	-1220
0,4	32 707	7819	81 768	-1192
0,5	40 304	7597	80 608	-1160
0,6	47 688	7384	79 480	-1128
0,7	54 868	7180	78 383	-1097
0,8	61 854	6986	77 318	-1065
0,9	68 655	6811	76 283	-1035
1	75 280	6625	75 280	-1003

$$z_{00} = a; z_{0n} = a + b + c; z_{0n} - z_{00} = b + c,$$

$$x_{00} = 0, x_{0n} = 1,$$

так как

$$\Delta\varepsilon_{0j} = \varepsilon_{0j+1} - \varepsilon_{0j} = \frac{1}{n} \left(a + b \frac{2j+1}{n} + c \frac{3j^2+3j+1}{n^2} \right), \quad (15)$$

$$\Delta z_{0j} = z_{0j+1} - z_{0j} = \frac{1}{n} \left(b + c \frac{2j+1}{n} \right). \quad (16)$$

Указанные зависимости приняты во внимание при составлении рис. 2. Здесь по построению:

$$\frac{\Delta z_{0j}}{\Delta\varepsilon_{0j}} = \frac{b+c}{B}, \quad (17)$$

$$z_2 = z + \xi_z, \quad (18)$$

$$\frac{\varepsilon_{0j} - A}{\Delta\varepsilon_{0j}} = \frac{z_{0j} - a}{\Delta z_{0j}}, \quad (19)$$

$$\frac{z_2 - a}{b+c} = \frac{\varepsilon - A}{B}. \quad (20)$$

Для определения $\left| \frac{\xi_z}{z} \right|_{\max}$ принято упрощающее допущение о том, что этот максимум имеет место при

$$x = \frac{1}{2} (x_{0j+1} + x_{0j}) = \frac{2j+1}{2n}. \quad (21)$$

Погрешность такого допущения пренебрежимо мала.

Подставив в уравнение (20) значения его членов, взятые из формул (4), (14), (15), (16), (17), (18), (19) и (21), после соответствующих преобразований получим:

$$\left| \frac{\xi_z}{z} \right|_{\max} \approx \frac{1}{1 + \frac{b}{a} \left[\frac{2j+1}{2n} + \frac{c}{b} \left(\frac{2j+1}{2n} \right)^2 \right]} \times \\ \times \left\{ \frac{\left[\frac{1}{2n} + \frac{b}{a} \left(\frac{4j+1}{4n^2} + \frac{c}{b} \frac{12j^2+6j+1}{8n^3} \right) \right] \frac{b}{a} \left(1 + \frac{c}{b} \frac{2j+1}{n} \right)}{1 + \frac{b}{a} \left(\frac{2j+1}{n} + \frac{c}{b} \frac{3j^2+3j+1}{n^2} \right)} + \right.$$

$$+ \frac{b}{a} \left(\frac{f}{n} + \frac{c}{b} \frac{f^2}{n^2} \right) + 1 \Bigg\} - 1. \quad (22)$$

$$\frac{\xi_x}{x} = - \frac{\xi_z}{z + \xi_z} \approx - \frac{\xi_z}{z}. \quad (23)$$

Подставляя формулу (5) в (22), найдем численные значения наибольших возможных погрешностей данного метода интерполяции применительно к образцовым динамометрам I-го разряда типа ВНИИМ. Вычисления показывают, что значения $\left| \frac{\xi_x}{x} \right|_{\max}$ ни на одном участке шкалы динамометра не превысят 0,02% измеряемой силы.

Таким образом, предложенный метод полностью решает задачу точной линейной интерполяции показаний рассматриваемых динамометров в любом случае их применения, в том числе и по протяженности всей шкалы.

Упрощенный способ интерполяции по числу делений шкалы

Семейство кривых (рис. 3) $\varepsilon = f(z)$ дано исходя из постоянного значения $\frac{b}{a}$ и шести различных значений $\frac{c}{b}$. Кривые построены по точкам с координатами $z_{00}, \varepsilon_{00}, z_{01}, \varepsilon_{01}, \dots, z_{0j}, \varepsilon_{0j}, \dots, z_{0n}, \varepsilon_{0n}$. Соседние

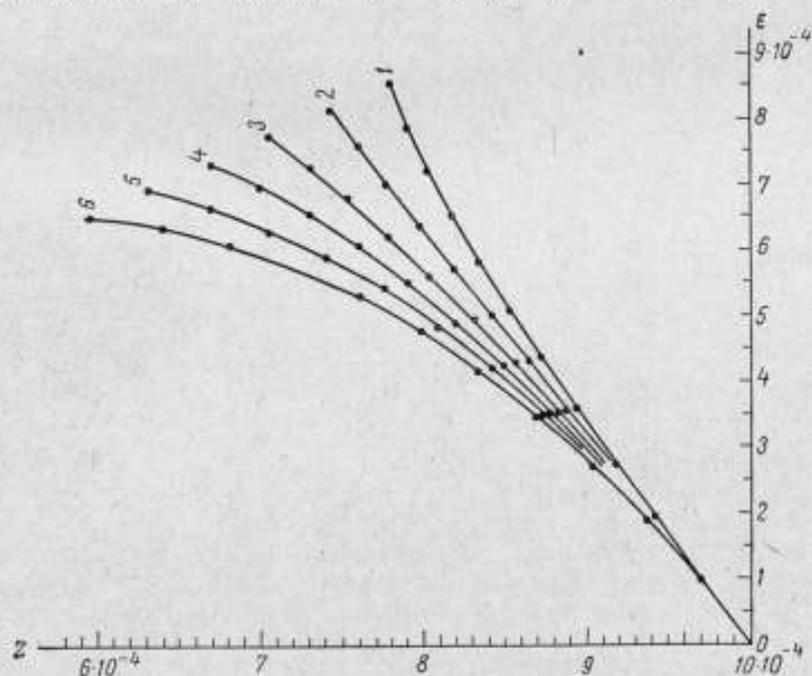


Рис. 3. Семейство кривых $\varepsilon = f(z)$.

точки соединены прямыми. Углы наклона этих прямых к оси z определяются из равенства:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\varepsilon_{0j+1} - \varepsilon_{0j}}{z_{0j+1} - z_{0j}} = \frac{\Delta \varepsilon_{0j}}{\Delta z_{0j}}.$$

Очевидно, что при условии $\operatorname{tg} \beta = \operatorname{const}$, функция $\varepsilon = f(z)$ становится линейной. Для градуировочных кривых вида формулы (4) это условие невыполнимо. Однако можно найти некоторое приближение к нему, например, $\operatorname{tg} \beta_0 = \operatorname{tg} \beta_n$, при котором функция $\varepsilon = f(z)$ приближается к линейной с точностью, достаточной для практической интерполяции.

Определим соотношения коэффициентов $\frac{b}{a}$ и $\frac{c}{b}$, при которых имеет место равенство:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{0n}}{\Delta z_{00}} = \frac{\Delta \varepsilon_{0n}}{\Delta z_{0n}}.$$

Подставив сюда формулы (15) и (16) при $n = 10$, будем иметь

$$\frac{1 + 0,1 \frac{b}{a} + 0,01 \frac{b}{a} \frac{c}{b}}{\frac{b}{a} + 0,1 \frac{b}{a} \frac{c}{b}} = \frac{1 + 2,1 \frac{b}{a} + 3,31 \frac{b}{a} \frac{c}{b}}{\frac{b}{a} + 2,1 \frac{b}{a} \frac{c}{b}},$$

откуда после соответствующих преобразований получим квадратное уравнение:

$$0,31 \frac{b}{a} \left(\frac{c}{b}\right)^2 + \left(3,3 \frac{b}{a} - 2\right) \frac{c}{b} + 2 \frac{b}{a} = 0. \quad (24)$$

Задавая значениями $\frac{b}{a}$ и решая формулу (24) относительно $\frac{c}{b}$, найдем значения последних, отвечающие данному уравнению при заданных значениях $\frac{b}{a}$. При указанных ниже

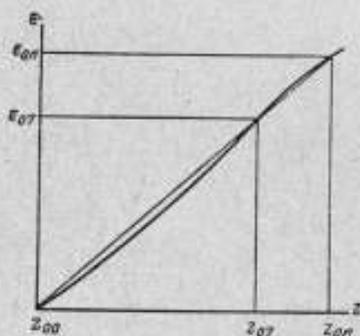


Рис. 4. График функции $\varepsilon = f(z)$

«оптимальных» соотношениях $\frac{b}{a}$ и $\frac{c}{b}$ функция $\varepsilon = f(z)$ практически линейна (кривая 2 на рис. 3), что позволяет составлять удобные интерполяционные формулы для градуировок с такими соотношениями указанных коэффициентов.

«Оптимальные» соотношения коэффициентов

$$\frac{b}{a} \quad -0,2 \quad -0,15 \quad -0,1$$

$$\frac{c}{b} \quad -0,15 \quad -0,12 \quad -0,09$$

В качестве примера рассмотрим градуировку образцового динамометра 1-го разряда (столбцы 1, 2 и 3 табл. 3). По данным столбцов 2 и 3 построен график $\varepsilon = f(z)$ (рис. 4). Если на этом графике провести прямую, соединяющую две точки с координатами z_{00} , ε_{00} и z_{0n} , ε_{0n} , то она пересечет построенную кривую еще в одной точке, приблизительные координаты которой z_{07} , ε_{07} . Это обстоятельство позволит составить уравнение прямой, которое может быть использовано в качестве интерполяционной формулы данного динамометра:

$$z = z_{07} + (\varepsilon - \varepsilon_{07}) \frac{z_{0n} - z_{07}}{\varepsilon_{0n} - \varepsilon_{07}} = 78383 + (\varepsilon - 54868) \frac{75280 - 78383}{75280 - 54868},$$

или

$$z = 86\,724 - 0,152\varepsilon.$$

Сравним градуировочные значения z_{0j} со значениями z_j на тех же ступенях нагружения, но полученными вычислениями по интерполяционной формуле (25) (столбец 4 табл. 3). В столбцах 5 и 6 приведены абсолютные и относительные расхождения между z_j и z_{0j} , являющиеся в данном случае погрешностями интерполяции по формуле (25). Все значения относительных погрешностей получились небольшими, несмотря на то, что

Таблица 3

К примеру интерполяции по формуле (25)

x_{0j}	e_{0j}	z_{0j}	z_j	$\delta z = z_j - z_{0j}$	$\frac{\delta z}{z} 100\%$
1	2	3	4	5	6
1,0	8 543 ₆	85 435	84 424	-11	0,01
0,2	16 836	84 180	84 164	-16	-0,02
0,3	24 888	82 960	82 940	-20	-0,02
0,4	32 707	81 768	81 751	-17	-0,02
0,5	40 304	80 608	80 597	-11	-0,01
0,6	47 688	79 480	79 474	-6	-0,01
0,7	54 868	78 383	78 383	0	0
0,8	61 854	77 318	77 321	3	0,00
0,9	68 655	76 283	76 287	4	0,01
1	75 280	75 280	75 280	0	0
1,05	78 530	74 790	74 786	-4	-0,01

градуировочная характеристика динамометра нелинейна.

Помимо высокой точности, интерполяция по формулам вида (25) весьма удобна в практическом отношении, хотя она применима только к градуировкам с соотношениями $\frac{b}{a}$ и $\frac{c}{b}$, близкими к «оптимальным». При других соотношениях этих коэффициентов необходимо применять интерполяцию по уравнению (13).

Выводы

Для условий применения образцовых динамометров 1-го разряда типа ВНИИМ характерны два случая. В первом из них пределы возможной интерполяции очень узкие, определяемые допустимыми погрешностями поверяемых образцовых машин. Во втором случае оказывается необходимой интерполяция по протяженности всей шкалы динамометра.

В первом случае приемлем простейший способ интерполяции по формуле (7). Наибольшие возможные погрешности интерполяции при этом оцениваются по формуле (11). Их численная величина для рассматриваемых динамометров не превышает 0,03% измеряемой силы.

Во втором случае интерполяция по формуле (7) категорически недопустима из-за чрезмерно больших погрешностей. Вполне приемлемым здесь оказывается предложенный автором метод интерполяции по формуле (13). Наибольшие погрешности этого метода оцениваются по формулам (22) и (23). Их численная величина для данных динамометров ни на одном участке шкалы не превысит 0,02%.

Градуировочные характеристики образцовых динамометров 1-го разряда ВНИИМ в принципе допускают применение предложенного автором упрощенного способа интерполяции по интерполяционным формулам

вида (25). Такая интерполяция практически очень удобна, однако она допустима только при определенных соотношениях коэффициентов a , b и c , отвечающих уравнению (24).

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимов Л. М. Набор образцовых динамометров 1-го разряда «Измерительная техника», № 11, 1964.
2. Максимов Л. М. Образцовый динамометр 1-го разряда до 30 тс. Труды институтов комитета, вып. 85 (145). Издательство стандартов, 1966.
3. Методические указания № 247 по поверке образцовых силовизмерительных машин 2-го разряда образцовыми динамометрами 1-го разряда. Изд-во стандартов, 1963.

Поступила в редакцию
15/V 1967 г.

Б. А. ВАНДЫШЕВ, Ф. С. САВИЦКИЙ
СВЕРДЛОВСКИЙ ФИЛИАЛ ВНИИМ

ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИОННОСТИ МАЯТНИКОВОГО СИЛОИЗМЕРИТЕЛЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ МАШИН НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

За последние 10 лет на страницах журнала «Заводская лаборатория» было опубликовано много работ, посвященных вопросу влияния скорости деформации на механические характеристики металлов: предел текучести, временное сопротивление и истинное сопротивление разрыву.

Большинство исследователей отмечают, что увеличение скорости деформации по сравнению с верхним пределом, предусмотренным ГОСТ 1497—61, приводит к заметному изменению численных значений механических характеристик материалов. Однако нет единого мнения о том, какие скорости следует применять, чтобы не нарушить единства измерений определяемых характеристик. Объясняется это тем, что при изменении скорости деформации деформирующее усилие может возрастать или уменьшаться в зависимости от испытываемых металлов и сплавов.

При испытании сплавов и металлов, находящихся в структурно-стабильном состоянии, деформирующее усилие всегда возрастает с увеличением скорости деформации, что связано с изменением свойств металла. В дальнейшем будем называть это явление скоростным возрастанием.

У сплавов, находящихся в структурно-метастабильном состоянии, наблюдается аномальное поведение. С увеличением скорости деформации деформирующее усилие уменьшается [1]. Это происходит благодаря упрочняющему действию выделяющихся из твердого раствора мельчайших частиц. Степень упрочнения при этом будет тем больше, чем полнее при данной деформации произошел процесс распада твердого раствора. Распад твердого раствора является диффузионным процессом, и для его завершения требуется определенное время.

Степень упрочнения будет тем больше, чем медленнее протекает пластическая деформация, стимулирующая процесс распада твердого раствора.

При испытании материалов на машинах с маятниковым силоизмерителем механические характеристики оказываются всегда завышенными тем больше, чем больше скорость деформации из-за влияния сил инерции подвижных частей силоизмерителя.

В работах [2—7] изучалось влияние скорости деформации на величину механических характеристик без учета всех особенностей, которые отмечены выше. Так, например, в работе [6] изучалось влияние скорости на показание маятникового силоизмерителя при испытании алюминиевых сплавов, находящихся в метастабильном состоянии. Авторы на основании

результатов исследований пришли к заключению о существовании критической скорости деформации, разной для различных сплавов, выше которой механические характеристики начинают резко возрастать.

Приблизительно такие же результаты были получены в работе [7] при испытании образцов из сплавов на медной основе на машине ИМ-12А с различными скоростями.

Авторы этих исследований не учитывали того, что при увеличении скорости деформации деформирующее усилие, с одной стороны, понижается из-за упрочняющего действия частиц, выпадающих из твердого раствора, а с другой стороны, повышается из-за инерционности маятникового силоизмерителя. Две причины действуют в противоположном направлении, и при некотором значении скорости влияние второй причины оказывается преобладающим и наступает резкое возрастание регистрируемой нагрузки.

В работе [2] отмечается, что при определении предела текучести со скоростью деформации в 15 и 25 мм/мин для стали 6 наблюдалось увеличение предела текучести на 0,7% и 1,3% по сравнению с его значением, полученным при скорости 4 мм/мин. В работе [2] не указывается на какой машине испытывались образцы, поэтому трудно судить о том, в результате каких причин произошло повышение предела текучести.

В работе [3] предлагается увеличение скорости заводских контрольных испытаний при определении предела текучести в 5 раз по сравнению со скоростью, указанной в ГОСТ 1497—42, а за пределом текучести — даже в 8 раз.

Из данных, приведенных автором для стали 2, следует, что такое увеличение скорости деформации не оказывается ни на пределе текучести, ни на временном сопротивлении. Автор не указывает, на какой машине он производил испытания. Полученные им результаты не подтверждаются другими авторами.

Так, Ф. Ф. Педанов [4], пользуясь прессом Гагарина и машиной фирмы Шопера, получил ярко выраженную зависимость предела текучести и временного сопротивления от скорости деформации.

Такие же результаты были получены М. Б. Коробчинской [5] при испытании катаной проволоки на машине Шопера.

Вопросу влияния инерционности силоизмерителя на механические характеристики металлов посвящена работа Л. Т. Тимошука и В. С. Зотеева [8].

Авторы испытывали образцы из стали 45 с различными скоростями деформации на 30-тонной гидравлической машине фирмы Шопер. Деформирующее усилие регистрировалось маятниковым силоизмерителем и осциллографом, получающими сигнал от датчиков электрического сопротивления, наклеенных на упругий элемент, включенный последовательно с испытуемым образцом. Результаты исследования показали, что характеристики прочности σ_T , σ_b и S_k , определяемые силоизмерителем машины, уже на скорости 0,8 мм/сек заметно завышены. Форма машинных диаграмм деформации изменяется в зависимости от массы маятника, жесткости системы (машина — образец), свойств испытуемого материала и настройки масляного тормоза силоизмерителя.

Влияние жесткости испытательной машины на диаграммы растяжения и изгиба указывается в работах [9, 10]. В работе [9] дается рекомендация изготовителям испытательных машин давать в качестве характеристики машины ее жесткость.

В. Г. Улегин [10] отмечает, что с увеличением жесткости испытательной машины точность записи диаграммы деформации повышается. Он рекомендует внести в стандарт ограничение на скорость деформации испы-

туемого образца, а не на скорость опускания активного захвата, как это записано в ГОСТ 1797—61. В области текучести автор предлагает установить скорость деформации 10^{-3} 1/сек.

Весьма обстоятельные исследования о влиянии инерционности маятникового силоизмерителя на предел текучести провели Кохендорфер А. и Винк В. [11].

Они показали, что маятниковый силоизмеритель при регистрации искажает истинный характер участка диаграммы при переходе от верхнего предела текучести к нижнему. Искажение оказывается тем сильнее, чем больше скорость деформации и чем больше масса маятника. Авторы высказали пожелание о пересмотре конструкции маятникового силоизмерителя с таким расчетом, чтобы погрешность при регистрации диаграммы растяжения не выходила за пределы одного процента.

Результаты работ [8, 10, 11] показали, что при испытании образцов на машинах с маятниковым силоизмерителем при значениях скорости испытания, близких к значениям, указанным в ГОСТ 1797—61, определяемые механические характеристики могут оказаться заметно завышенными. В ГОСТ 1797—61 сказано, что скорость перемещения подвижного захвата в мм/мин при испытании до предела текучести должна быть не более 0,1, а за пределом текучести — не более 0,4 от длины расчетной части образца. Погрешность измерения силы сопротивления как при малых, так и при больших деформациях при указанных значениях скорости не должна превосходить 1% независимо от конструкции силоизмерителя испытательной машины.

В настоящее время в литературе нет достаточных сведений, на основе которых можно было бы сделать заключение, что испытательные машины с маятниковыми силоизмерителями удовлетворяют этим требованиям.

Отсутствие безинерционных динамометров, с помощью которых можно было бы отсчитывать нагрузку в процессе испытания образца, не позволяет выявить истинные погрешности машин с маятниковым силоизмерителем при государственных испытаниях.

Для выяснения вопроса о влиянии инерционности маятникового силоизмерителя на величину измеряемой нагрузки проведена настоящая работа. Объектом исследования были выбраны две испытательные машины с маятниковым силоизмерителем: УМ-5А и ГМС-20 с механическим и с гидравлическим приводами.

Теоретический анализ

Оценка влияния инерционности маятникового силоизмерителя испытательных машин на результаты определения характеристик сопротивления материалов деформированию при испытании на растяжение аналитически может быть произведена на основании известной теоремы механики об изменении кинематической энергии системы.

При нагрузке, соответствующей пределу текучести или временному сопротивлению, маятник силоизмерителя, имея угловую скорость ω , продолжает движение по инерции и отклоняется на некоторый угол α , при котором угловая скорость становится равной нулю. Погрешность в результате инерционности маятника при определении предела текучести и временного сопротивления будет равна:

$$\delta = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1} 100, \quad (1)$$

где α_1 — угол отклонения маятника, при котором наступает предел текучести или временное сопротивление образца;

α_2 — угол, на который отклоняется маятник по инерции.

При измерении нагрузки, соответствующей временному сопротивлению материала, разрушающегося без заметной пластической деформации (чугун, закаленная сталь с низким отпуском, пластмассы), для вычисления погрешности по выражению (1) угол α_2 определяется из следующего уравнения, составленного на основании теоремы об изменении кинетической энергии:

$$\frac{J_0 \omega^2}{2} = Qz (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (2)$$

где J_0 — момент инерции маятника относительно его оси подвеса;
 Q — вес маятника;
 z — расстояние от центра тяжести маятника до его оси подвеса.

При измерении нагрузки, соответствующей физическому пределу текучести или временному сопротивлению сильно наклепанного материала, угол α_2 определяется из уравнений следующего вида:

а) для машины УМ-5А

$$\frac{J_0 \omega^2}{2} = Qz (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) - P_{T(b)} \frac{r}{i} (\alpha_2 - \alpha_1); \quad (3)$$

б) для машины ГМС-20 при $0 < \alpha < \frac{\varphi_0}{2}$

$$\frac{J_0 \omega^2}{2} = Qz (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) - P_{T(b)} \frac{r}{i} \left[\sin \left(\frac{\varphi_0}{2} - \alpha_1 \right) - \sin \left(\frac{\varphi_0}{2} - \alpha_2 \right) \right], \quad (4)$$

а при $\frac{\varphi_0}{2} < \alpha < \varphi_0$

$$\frac{J_0 \omega^2}{2} = Qz (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) - P_{T(b)} \frac{r}{i} \left[\sin \left(\alpha_1 - \frac{\varphi_0}{2} \right) - \sin \left(\alpha_2 - \frac{\varphi_0}{2} \right) \right], \quad (5)$$

где $P_{T(b)}$ — нагрузка, соответствующая физическому пределу текучести или временному сопротивлению сильно наклепанного материала;

r — длина рычага, к которому прикладывается нагрузка к маятнику;

i — передаточное отношение систем рычагов силоизмерителя;

φ_0 — максимальный угол отклонения маятника, соответствующий предельной нагрузке.

Для вычисления значений угла α_2 по заданным значениям угла α_1 и скорости привода машины необходимо знать угловую скорость, соответствующую начальному моменту движения. Определение этой скорости составит задачу последующих рассуждений.

Анализируя рис. 1, на котором в качестве примера приведена кинематическая схема машины УМ-5А, можно для малого промежутка времени при испытании образца написать равенство:

$$\Delta x = \Delta (\Delta l) + \frac{\Delta S_E}{i}, \quad (6)$$

где Δx — приращение перемещения винта активного захвата относительно гайки привода;

$\Delta (\Delta l)$ — приращение деформации системы машина—образец по направлению линии действия силы на образец;

ΔS_E — приращение перемещения точки E маятника.

Равенство (6) справедливо для любой испытательной машины, в том числе и гидравлической. Только для последней Δx обозначает приращение перемещения рабочего поршня относительно цилиндра, а i — отношение

площади поршня рабочего цилиндра к площади поршня силоизмерительного цилиндра.

Если отнести приращение перемещения (6) к приращению времени, то получим равенство

$$v_M = v_g + \frac{v_E}{i}, \quad (7)$$

где v_M — скорость привода машины или скорость активного захвата при холостом режиме машины;

v_g — скорость роста деформации системы «машина — образец»;

v_E — скорость точки E маятника.

Существуют следующие соотношения:

$$\Delta(\Delta l) = \frac{\Delta P}{C_0}; \quad \Delta S_E = \frac{\Delta P/i}{C_{EP}i^2}$$

или

$$v_g = \frac{v_P}{C_0}, \quad v_E = \frac{v_P}{C_{EP}} i, \quad (8)$$

где C_0 — жесткость системы «машина — образец»;

C_{EP} — жесткость маятника силоизмерителя, определяемая по линии действия силы на образец;

ΔP — приращение нагрузки на образец за малый промежуток времени;

v_P — скорость роста нагрузки на образец.

Подставляя формулу (8) в уравнение (2), найдем скорость v_P роста нагрузки при испытании образца и скорость точки маятника в следующем виде:

$$v_P = \frac{C_0 C_{EP}}{C_0 + C_{EP}} v_M \quad (9)$$

и

$$v_E = \frac{i}{\left(1 + \frac{C_{EP}}{C_0}\right)} v_M \quad (10)$$

Формула (10) позволяет находить среднее значения скорости, так как при выводе ее не учитывались наблюдаемые в действительности колебания маятника.

Пользуясь формулой (10), можно вычислить угловую скорость маятника силоизмерителя. Для рассматриваемых испытательных машин получим:

а) для машины УМ-5А

$$\omega = \frac{iv_M}{r \left(1 + \frac{C_{EP}}{C_0}\right)}, \quad (11)$$

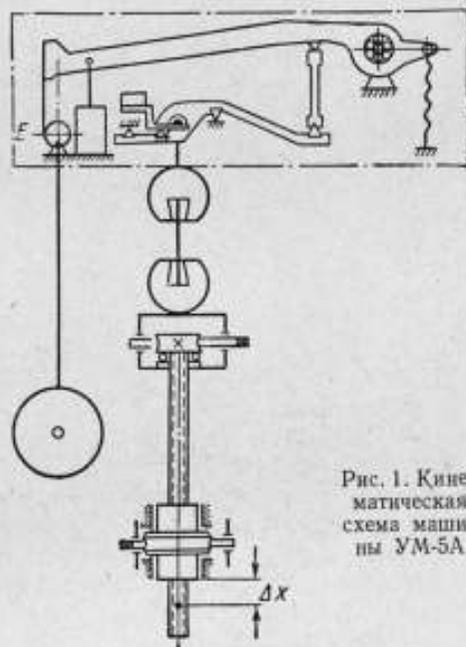


Рис. 1. Кинематическая схема машины УМ-5А

б) для машины ГМС-20 при $0 < \alpha < \frac{\varphi_0}{2}$

$$\omega = \frac{i v_m}{r(1 + C_{EP}/C_0) \cos\left(\frac{\varphi_0}{2} - \alpha\right)} \quad (12)$$

и при $\frac{\varphi_0}{2} < \alpha < \varphi_0$

$$\omega = \frac{i v_m}{r(1 + C_{EP}/C_0) \cos\left(\alpha - \frac{\varphi_0}{2}\right)} \quad (13)$$

Величина C_{EP} , входящая в равенства (11) и (12), определяется для данного маятникового силонизмерителя как производная от силы сопротивления образца по перемещению x вдоль линии действия нагрузки на образец. Применительно к рассматриваемым машинам имеем выражения для определения C_{EP} в виде:

а) для УМ-5А:

$$C_{EP} = \frac{Qz l^2}{r^2} \cos \alpha, \quad (14)$$

так как $p = \frac{Qz l}{r} \sin \alpha$, $x = \frac{r}{l} \alpha$;

б) для ГМС-20 при $0 < \alpha < \frac{\varphi_0}{2}$

$$C_{EP} = \frac{Qz l^2 \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)}{r^2 \cos^2\left(\frac{\varphi_0}{2} - \alpha\right)} \quad (15)$$

и при $\frac{\varphi_0}{2} < \alpha < \varphi_0$

$$C_{EP} = \frac{Qz l^2 \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)}{r^2 \cos^2\left(\alpha - \frac{\varphi_0}{2}\right)} \quad (15')$$

так как при $0 < \alpha < \frac{\varphi_0}{2}$

$$p = \frac{Qz l \sin \alpha}{r \cos\left(\frac{\varphi_0}{2} - \alpha\right)}, \quad x = \frac{r}{l} \left[\sin \frac{\varphi_0}{2} - \sin\left(\frac{\varphi_0}{2} - \alpha\right) \right],$$

а при $\frac{\varphi_0}{2} < \alpha < \varphi_0$

$$p = \frac{Qz \sin \alpha}{r \cos\left(\alpha - \frac{\varphi_0}{2}\right)}, \quad x = \frac{r}{l} \left[\sin \frac{\varphi_0}{2} - \sin\left(\alpha - \frac{\varphi_0}{2}\right) \right].$$

Численные средние значения C_{EP} , полученные по формулам (14) и (15), приведены в таблице:

Величина C_0 , входящая в равенства (11) и (12), является жесткостью системы «машина—образец». При последовательном соединении жесткость системы выражается через жесткость ее элементов по известной формуле:

$$C_0 = \frac{C_m C_{об}}{C_m + C_{об}}, \quad (16)$$

где C_m , $C_{об}$ — жесткости машины и испытуемого образца.

Таблица 1

Машина	УМ-5А			ГМС-20		
	0÷1	0÷2	0÷5	0÷5	0÷10	0÷20
Шкала, тс	0÷1	0÷2	0÷5	0÷5	0÷10	0÷20
C_{EP} , кгс/мм ²	4260	8450	21 400	8250	16 500	35 000

Определение жесткости образца не представляет никаких затруднений. Опишем вкратце методику нахождения жесткости машин.

Для экспериментального определения жесткости машины УМ-5А в захваты ее устанавливался стандартный образец из высокопрочной стали. После небольшой предварительной нагрузки образец нагружался ступенями через 0,1 предельной нагрузки с помощью ручного привода. Зная передаточное отношение ручного привода и шаг винта, вычисляли осевое перемещение винта относительно сопряженной с ним гайки, а затем исключали из него деформации образца и перемещение, связанное с отклонением маятника. Найденные значения деформации всех деталей и узлов под нагрузкой наносили на график в зависимости от нагрузки. Графическое дифференцирование графика позволило определить жесткость машины при разных нагрузках.

Жесткость машины ГМС-20 была определена по следующей методике. При установленном в захватах машины из высокопрочной стали стандартном образце были измерены для различной производительности насоса значения максимально достигаемых нагрузок. По результатам многократных измерений построен график зависимости максимально достигаемой нагрузки от скорости v_m перемещения активного захвата на холостом режиме работы машины, т. е. величины, пропорциональной производительности насоса. С ростом силы сопротивления образца действительная скорость v_m перемещения активного захвата и, следовательно, полезная производительность насоса уменьшается. Далее при заданной производительности ($\omega = 113 \times 1,29 \text{ см}^3/\text{мин}$) насоса с помощью секундомера было измерено время, за которое достигаются нагрузки определенного значения. На основании многократных измерений построен график зависимости времени от нагрузки. С помощью графиков можно вычислить полезную производительность насоса для любого момента времени. Умножая ее на дифференциал времени, найдем объем масла, нагнетаемый насосом в масляную систему за вычетом существующих в системе утечек. Деля этот объем на площадь поршня рабочего цилиндра, получаем суммарную деформацию всех звеньев машины с образцом, приведенную к линии действия силы на образец. Исключая из вычисленных значений перемещений деформацию образца и перемещения, вызванные отклонением маятника, получили деформацию всех деталей и узлов машины, находящихся под нагрузкой. По зависимости этой деформации от нагрузки графическим дифференцированием определены для разных нагрузок значения жесткости машины.

Задаваясь всевозможными значениями угла отклонения маятника, при котором наступает предел текучести или временное сопротивление, различными значениями скорости привода машины и учитывая конструкцию и параметры маятника силоизмерителя, вычислили значения погрешности по формуле (1) для случая определения временного сопротивления хрупкого и сильно наклепанного материалов, а также предела текучести материала с ярко выраженной площадкой текучести.

Кривые, изображенные на рис. 2, характеризуют зависимость относительной погрешности от отношения измеряемой нагрузки к предельной нагрузке шкалы машины УМ-5А при определении временного сопротивления сильно наклепанного материала или при определении предела

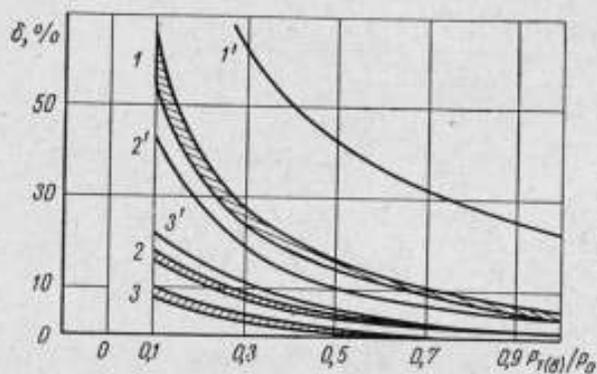


Рис. 2. Зависимость погрешности от отношения измеряемой нагрузки к предельной нагрузке шкалы при определении σ_b наклепанного материала или при определении σ_T на машине УМ-5А. (1, 2, 3 — для шкалы 0—5 тс; 1', 2', 3' — для шкалы 0—1 тс при $v_m = 60, 20, 10$ мм/мин соответственно).

На рис. 4 для машины ГМС-20 изображены кривые погрешности при определении временного сопротивления сильно наклепанного материала или при определении предела текучести материала с площадкой текучести. Погрешности вычислены для наибольшей шкалы 0—20 тс и наименьшей — 0—1 тс. Границы заштрихованных областей соответствуют образцам с диаметрами от 5 до 25 мм.

На рис. 5 приведены погрешности для машины ГМС-20 при определении временного сопротивления хрупких образцов диаметром 10 мм нормальной длины.

По ГОСТ 1497—61 предусматривается, что скорость перемещения подвижного захвата до предела текучести, выраженная в мм/мин, должна быть не более 0,1 от длины расчетной части образца. Если учесть, что на машине УМ-5А предусмотрено испытание длинных и коротких образцов диаметрами от 5 до 15 мм, то испытания можно проводить при скоростях до 15 мм/мин. Ступенчатое изменение скорости у машины УМ-5А позволяет производить испытания при скорости до 10 мм/мин. При соблюдении требований ГОСТ максимальная погрешность в результате инерционности при определении предела текучести на машине УМ-5А (шкала

текучести материала с площадкой текучести. Границы заштрихованных областей соответствуют максимальным и минимальным размерам образца, испытания которых предусматриваются на машине УМ-5А по рекомендации завода-изготовителя, т. е. образцов с диаметрами от 5 до 15 мм.

Кривые на рис. 3 характеризуют относительные погрешности при определении временного сопротивления, когда испытываются образцы диаметром 5 мм нормальной длины из хрупкого материала на машине УМ-5А.

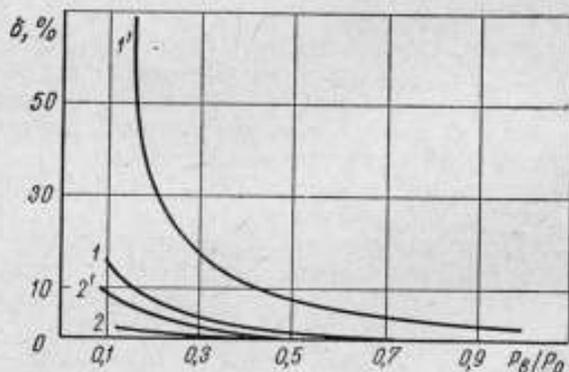


Рис. 3. Зависимость погрешности от отношения измеряемой нагрузки к предельной нагрузке шкалы при определении σ_b хрупкого материала на машине УМ-5А (1, 2 для шкалы 0—5 тс, 1' для шкалы 0—1 тс при $v_m = 60, 20$ мм/мин соответственно).

0÷5 тс) достигает 9%. Если предположить, что по шкале 0÷1 тс могут испытываться образцы диаметром не более 5 мм, то предельная скорость при определении σ_T с учетом ступенчатого редуктора машины равна 4 мм/мин. Максимальная погрешность будет равна 5%.

На машине ГМС-20 испытания по определению предела текучести могут производиться при скоростях до 25 мм/мин, так как для этой машины рекомендуются короткие и длинные образцы диаметрами от 5 до 25 мм. Максимальная погрешность при этом для шкалы 0—20 тс равна 9—10%. Для шкалы 0—5 тс можно предположить, что могут испытываться образцы с диаметрами до 10 мм. Тогда предельная скорость при определении σ_T составит 10 мм/мин и, следовательно, максимальная погрешность будет равна 5%.

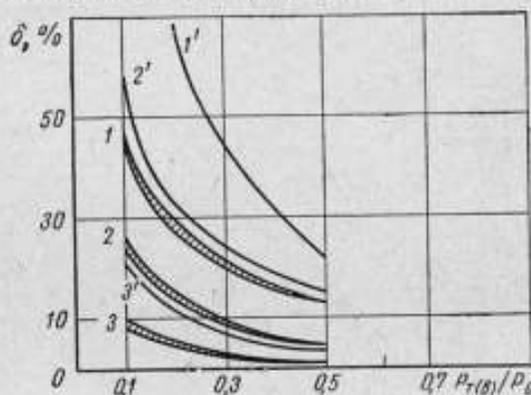


Рис. 4. Зависимость погрешности от отношения измеряемой нагрузки к предельной нагрузке шкалы при определении наклепанного материала или при определении σ_T на машине ГМС-20 (1, 2, 3 — для шкалы 0—20 тс, 1', 2', 3' — для шкалы 0—5 тс при $v_m = 120, 60, 20$ мм/мин соответственно).

При определении временного сопротивления скорость перемещения подвижного захвата в мм/мин по ГОСТ 1497—61 должна иметь численное значение не более 0,4 от длины расчетной части образца. Следовательно, максимальные погрешности

в результате инерционности маятника могут достигать следующих значений:

1. Для машины УМ-5А по шкале 0—5 тс при испытании хрупких материалов 15%, при испытании наклепанных материалов 60%. По шкале 0—1 тс соответственно 3 и 24%.

2. Для машины ГМС-20 по шкале 0—20 тс при испытании наклепанных материалов 40%, при испытании хрупких материалов 8%. По шкале 0—5 тс соответственно 20 и 5%*.

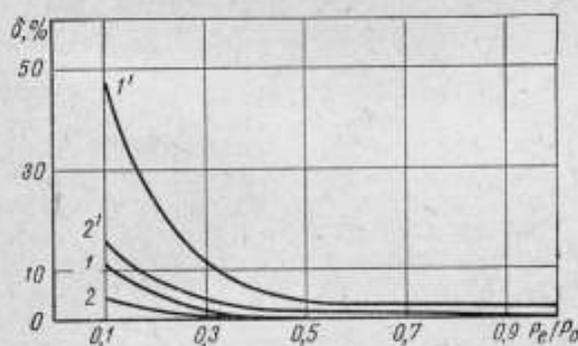


Рис. 5. Зависимость погрешности от отношения измеряемой нагрузки к предельной нагрузке шкалы при определении σ_b хрупкого материала на машине ГМС-20 (1, 2 для шкалы 0—20 тс, 1', 2' для шкалы 0—5 тс при $v_m = 120, 60$ мм/мин соответственно).

Методика экспериментального исследования

Обе исследуемые испытательные машины ГМС-20 и УМ-5А с гидравлическим и с механическим приводами прежде всего были тщательно проверены в соответствии с указаниями инструкции 233—63.

* При оценке максимальных значений погрешности определения временного сопротивления учитывалось, что на машине УМ-5А по шкале 0÷5 тс испытываются образцы с диаметром до 15 мм, по шкале 0—1 тс — образцы с диаметром до 5 мм. Для машины ГМС-20 по шкале 0—20 тс — образцы с диаметрами до 25 мм, а по шкале 0—5 тс — до 10 мм.

Максимальное сопротивление образца, а также сопротивление, отвечающее пределу текучести, измерялось одновременно с помощью силоизмерительного устройства каждой машины и последовательно включенного безынерционного контактного динамометра.

Безынерционный контактный динамометр представляет собой упругий элемент, состоящий из сегмента сферы радиусом 160 мм, опирающегося на плоскую торцевую поверхность цилиндра (рис. 6). Сегмент и цилиндр изготовлены из стали ШК-15 и термически обработаны на твердость 62 ед. HRC. Соприкасающиеся поверхности деталей шлифованы и полированы.

Упругий элемент 1 устанавливается в гнездо оправы 2, так что сила, действующая на образец 3, при растяжении передается через хомут 4

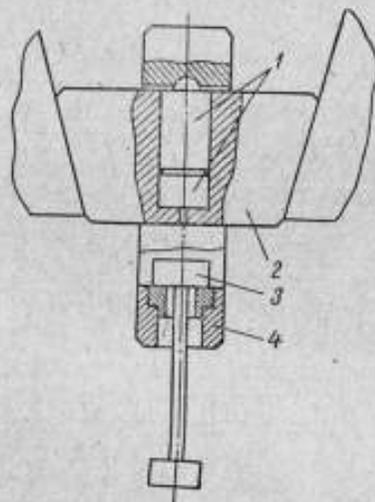


Рис. 6. Приспособление для испытания на растяжение с упруго-контактным динамометром (1 — динамометр, 2 — клиновой вкладыш, 3 — образец, 4 — хомут).

Для испытания на растяжение были изготовлены стандартные образцы типа III №№ 14к, 15к, 18к и 18 из стали 60С2м стали 1. Размеры образцов и марок стали выбраны с таким расчетом, чтобы оценить погрешности силоизмерителя машины УМ-5А и ГМС-20 в наиболее важных участках шкалы.

Образцы испытывались на машине УМ-5А при скорости деформирования 4, 10, 20 и 60 мм/мин, а на машине ГМС-20 при скорости деформирования 30, 60, 90, 120 мм/мин. В процессе испытаний определялась нагрузка, соответствующая пределу текучести (только для стали 1), временному сопротивлению и для некоторых образцов — нагрузка, соответствующая моменту разрыва образца.

Измерение сопротивления пластическому деформированию на уровне временного сопротивления не встречало особых трудностей, так как для этого требовалось измерить максимальную нагрузку при разрушении образца. Это легко достигалось как силоизмерителем машины, так и контактным динамометром. При измерении контактным динамометром нагрузки, отвечающей пределу текучести, необходимо приостанавливать процесс растяжения и по диаметру отпечатка определять нагрузку. Однако мгновенная остановка машины невозможна. После выключения

на верхнюю торцевую поверхность цилиндра. Под действием этой силы сфера упруго вдавливается в нижнюю торцевую поверхность цилиндра. Диаметр упругого отпечатка может быть измерен, если перед установкой контактного динамометра торцевая поверхность цилиндра была покрыта тонким слоем парафина.

Сила P , действующая на упругий элемент, равная силе, приложенной к образцу, может быть найдена по таблице зависимости силы от диаметра упругого отпечатка, составленной предварительной статической градуировкой по образцовому динамометру 3-го разряда при разных нагрузках.

Эксперименты показали, что средняя квадратическая погрешность описанного контактного динамометра при нагрузке 500 кг составляет 1,54%, а при нагрузке 10 000 кгс — 0,74%. Таким образом, точность контактного динамометра такая же, как силоизмерительного устройства испытательной машины, однако он имеет преимущество безынерционности.

двигателя процесс растяжения некоторое время продолжается с замедленной скоростью, при этом сопротивление деформированию повышается и измеренное максимальное усилие будет отвечать напряжению с большим допуском, чем это принято для предела текучести. Поэтому усилие, соответствующее верхнему пределу текучести, определялось только на стали 1, имеющей ярко выраженную площадку текучести.

В процессе испытания образцов на разрыв было замечено, что максимальной нагрузке отвечает наибольший отпечаток, а нагрузке, соответствующей моменту разрыва образца, — отпечаток меньшего диаметра, отчетливо видимый на фоне большого отпечатка. Образование отпечатка меньшего диаметра, по-видимому, можно объяснить внезапным прекращением действия силы. Таким образом, с помощью контактного динамометра можно было определить нагрузку, отвечающую моменту разрыва образца. По величине этой нагрузки находилось истинное сопротивление разрыву. Величина погрешности при определении нагрузки на уровне разрыва образца такая же, как и при определении максимальной нагрузки.

Результаты опытов

При одинаковых условиях испытывалось не менее трех образцов, среднее арифметическое из трех определений нагрузки принималось за действительное значение.

На машинах из двух марок стали при разных условиях испытано около 200 образцов. Полученные данные приведены в табл. 2 и 3.

По результатам испытаний вычислены разности нагрузок на уровне предела текучести, временного сопротивления разрыву, * определенных по шкале силовизмерителя машины и по контактному динамометру. Эти

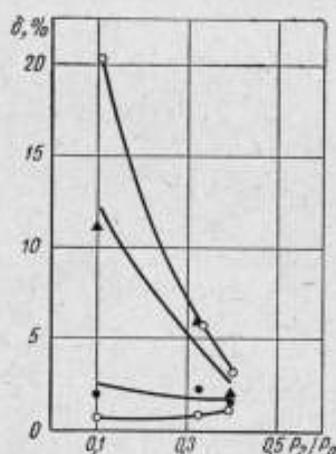
Таблица 2

Оценка погрешности от инерционности маятника силовизмерителя машины ГМС-20
(d_0 и l_0 — диаметр и расчетная длина образца)

Марка стали и размер образцов	Предел или нагрузка шкалы P_0 , тс	Скорость деформирования V , мм/мин	P_T/P_0	ΔP_T , кгс	$\frac{\Delta P_T}{P_0} \cdot 100$	$\frac{P_b}{P_0}$	ΔP_b , кгс	$\frac{\Delta P_b}{P_0} \cdot 100$	$\frac{P_b}{P_0}$	ΔP_b , кгс	$\frac{\Delta P_b}{P_0} \cdot 100$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сталь 60С2	20	$0,4l_0=20$				0,098	6	0,3			
$d_0=5$ мм	»	$1,2l_0=60$				0,10	37	1,85			
$l_0=50$ мм	»	$1,8l_0=90$				0,098	216	11,0			
	»	$2,4l_0=120$				0,10	413	20,5	0,083	228	13,6
Сталь 1	20	$0,4l_0=30$	0,256	92	1,8	0,326	50	0,8	0,192	114	3,0
$d_0=15$ мм	»	$0,8l_0=60$	0,254	245	4,8	0,324	134	2,1	0,187	138	3,7
$l_0=75$ мм	»	$1,2l_0=90$	0,265	1574	10,8	0,32	365	5,7	0,193	40	1,0
	»	$1,6l_0=120$	0,261	662	12,7	0,827	360	5,5	0,195	256	6,5
Сталь 60С2	20	$0,4l_0=20$				0,396	91	1,15	0,34	32	0,47
$d_0=10$ мм	»	$1,2l_0=60$				0,403	109	1,35	0,344	111	1,6
$l_0=50$ мм	»	$1,8l_0=90$				0,407	167	2,05	0,34	122	1,8
	»	$2,4l_0=120$				0,404	232	2,9	0,344	402	5,8
Сталь 60С2	5	$0,4l_0=20$				0,40	39	1,95	0,334	101	6,0
$d_0=5$ мм	»	$1,2l_0=60$				0,386	75	3,8	0,325	183	11,3
$l_0=50$ мм	»	$1,8l_0=90$				0,376	161	8,6	0,32	290	18,2
	»	$2,4l_0=120$				0,387	229	11,8	0,312	382	24,5

Оценка погрешности от инерционности маятника силоизмерителя машины УМ-5А
(d_0 и l_0 — диаметры и расчетная длина образца)

Марка стали и размер образцов	Предельная нагрузка по шкале P_0 , тс	Скорость деформирования v_M , мм/мин	P_T/P_0	ΔP_T , кс	$\frac{\Delta P_T}{P_T} \cdot 100$	P_b/P_0	ΔP_b , кс	$\frac{\Delta P_b}{P_b} \cdot 100$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сталь 1	5	0,08 $l_0=4$	0,115	24	4,2	0,15	11	1,5
$d_0=5$ мм	»	0,4 $l_0=20$	0,110	21	3,8	0,15	11	1,5
$l_0=50$ мм	»	1,2 $l_0=60$	0,113	403	72,0	0,152	362	47,8
Сталь 60С2	5	0,08 $l_0=4$	—	—	—	0,382	71	3,7
$d_0=5$ мм	»	0,4 $l_0=20$	—	—	—	0,391	82	4,2
$l_0=50$ мм	»	1,2 $l_0=60$	—	—	—	0,392	352	17,9
Сталь 1	5	0,08 $l_0=4$	0,389	51	2,6	0,56	58	2,1
$d_0=10$ мм	»	0,4 $l_0=20$	0,414	107	5,2	0,56	51	1,8
$l_0=50$ мм	»	1,2 $l_0=60$	0,44	191	8,7	0,555	141	4,9
Сталь 1	5	0,16 $l_0=4$	0,111	12	2,2	0,14	31	4,45
$d_0=5$ мм	»	0,4 $l_0=10$	0,108	32	5,9	0,14	49	7,1
$l_0=25$ мм	»	0,8 $l_0=20$	0,12	48	8,0	0,14	51	7,25
	»	2,4 $l_0=60$	0,122	356	58,8	0,145	287	39,5
Сталь 1	1	0,4 $l_0=20$	0,64	45	7,0	0,74	27	3,6
$d_0=5$ мм	»	1,2 $l_0=60$	0,66	252	38	0,77	224	29

Рис. 7. Зависимость погрешности при измерении нагрузки, соответствующей σ_b , от отношения измеряемой нагрузки к пределу шкалы 0—20 тс машины ГМС-20 (сверху вниз: 1-я кривая — при $v_M=120$ мм/мин, 2-я кривая — при $v_M=90$ мм/мин, 3-я кривая — при $v_M=60$ мм/мин, 4-я кривая — при $v_M=20$ мм/мин).

усилия в момент разрыва образца в зависимости от относительной нагрузки при скорости 20, 60, 90, 120 мм/мин. В основном ход этих кривых

* Сопротивление разрыву определялось только на машине ГМС-20, поэтому в табл. 3 графы 10, 11 и 12 отсутствуют.

разности приведены в графах 5, 8, 11 (табл. 2, 3); в графах 6, 9 и 12 тех же таблиц приведены относительные значения указанных разностей, выраженные в процентах. В графах 4, 7 и 10 даны отношения измеряемых нагрузок к верхнему пределу шкалы машины

На рис. 7 изображена зависимость погрешности силоизмерителя машины ГМС-20 от относительного значения нагрузки.

При скорости машины 20 мм/мин для обеих шкал и различных относительных нагрузках разница в показаниях силоизмерителя и динамометра или, как в дальнейшем ее будем называть, погрешность маятникового силоизмерителя, не превосходит точности применяемого динамометра. При скорости 60 мм/мин погрешность составляет около 2%. При более высоких значениях скорости погрешность резко возрастает и при 120 мм/мин составляет от 3 до 20% в зависимости от величины относительной нагрузки. Наибольшая погрешность получается при нагрузке в 0,1 от предельного значения шкалы.

На рис. 8 приведены кривые, показывающие изменение погрешности при определении

совпадает с аналогичными кривыми, полученными на уровне временного сопротивления.

Влияние величины относительной нагрузки и пределы шкалы на погрешность измерения нагрузки на уровне временного сопротивления, предела текучести и разрыва образца в литературе до сих пор не освещалось.

На рис. 9 показано изменение погрешности силовизмерителя машины УМ-5А в зависимости от относительной нагрузки при скорости машины 4, 20 и 60 мм/мин. Для шкалы 0—5 тс кривые построены по трем точкам, а для шкалы с пределом 0—1 тс показаны только точки, соответствующие $\frac{P_b}{P_0} = 0,74$ для скорости 20 и 60 мм/мин.

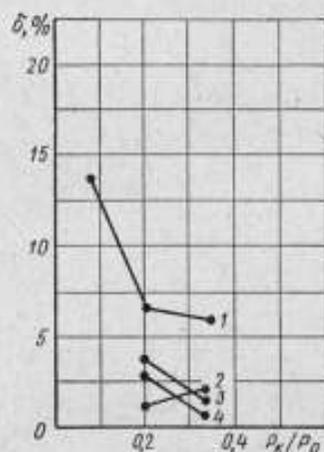


Рис. 8. Зависимость погрешности при измерении нагрузки, соответствующей разрыву образца, от отношения измеряемой нагрузки к пределу шкалы 0—20 тс машины ГМС-20 (1, 2, 3, 4 соответствуют $v_m = 120, 90, 60$ и 20 мм/мин).

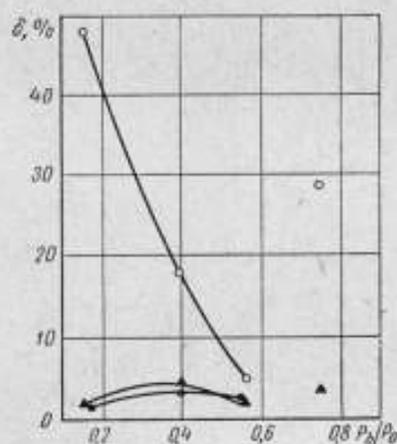


Рис. 9. Зависимость погрешности при измерении нагрузки, соответствующей σ_b от отношения измеряемой нагрузки к пределу шкалы 0—5 тс машины УМ-5А (сверху вниз: 1-я кривая — при $v_m = 60$ мм/мин; 2-я кривая — при $v_m = 20$ мм/мин; 3-я кривая — при $v_m = 4$ мм/мин).

Зависимость погрешности на уровне предела текучести от относительного значения нагрузки изображена кривыми на рис. 10. Из хода кривых видно, что при малых скоростях погрешность сравнительно невелика для всех значений $\frac{P_T}{P_0}$ и не превосходит 6—8%; для скорости же 60 мм/мин погрешность возрастает от 10 до 70% при изменении $\frac{P_T}{P_0}$ от 0,40 до 0,12

соответственно. Для шкалы 0—1 тс на этом рисунке указаны только точки, соответствующие $\frac{P_T}{P_0} = 0,65$ для скорости 20 и 60 мм/мин.

Приведенные данные достаточно четко указывают на резкое возрастание погрешности как с ростом скорости машины с уменьшением относительной величины нагрузки, так и при переходе на шкалу с меньшим пределом измерения. Погрешность измерения нагрузки на уровне временного сопротивления на машине УМ-5А при всех равных условиях больше, чем на машине ГМС-20.

Сопоставление расчетных данных о погрешностях маятниковых силовизмерителей машин УМ-5А и ГМС-20 с данными, полученными экспериментально, обнаруживает удовлетворительное совпадение.

Наши результаты подтверждает отмеченное в литературе [8] повышение механических характеристик при увеличении скорости деформации. На рис. 11 приведены кривые, указывающие на увеличение временного

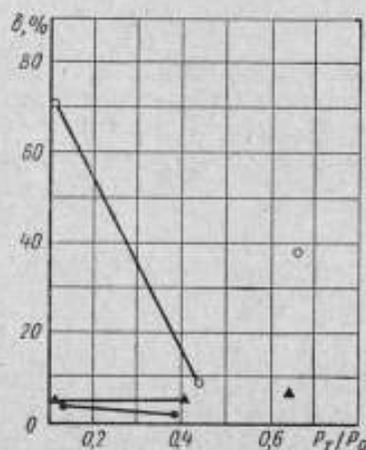


Рис. 10. Зависимость погрешности при измерении нагрузки, соответствующей σ_T , от отношения измеряемой нагрузки к пределу шкалы 0—5 тс машины УМ-5А (Δ — при $v_m = 20$ мм/мин; \bullet — при $v_m = 4$ мм/мин; \square — при $v_m = 60$ мм/мин).

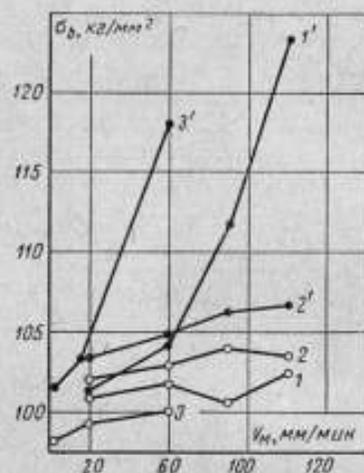


Рис. 11. Изменение σ_0 стали 60С2 от скорости привода машины (1, 2 — для ГМС-20 по упруго-контактному динамометру; 1', 2' — для ГМС-20 по силовизмерителю машины; 3 — для УМ-5А по упруго-контактному динамометру; 3' — для УМ-5А по силовизмерителю машины)

сопротивления с повышением скорости машины для стали 60С2. Кривые 1 и 2 получены для образцов диаметром 5 и 10 мм соответственно на машине ГМС-20. Так как нагрузка измерялась безынерционным динамометром,

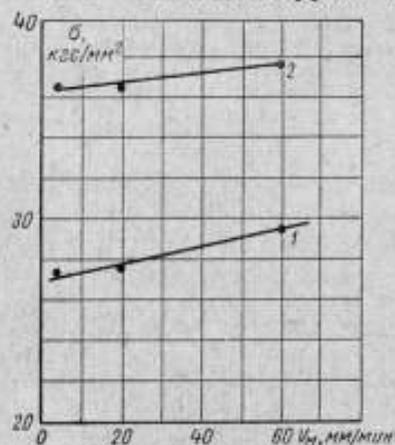


Рис. 12. Изменение σ_T и σ_0 стали 1 от скорости привода машины (1 — соответствует σ_T , 2 — σ_0).

то наблюдаемое увеличение временного сопротивления связано с изменением свойства металла при возрастании скорости. Для сравнения на этом же рисунке кривыми 1' и 2' показано изменение временного сопротивления в зависимости от скорости с учетом влияния инерционности силовизмерителя для тех же образцов стали 60С2. Кривые 3 и 3' показывают ту же зависимость, но только для машины УМ-5А.

На рис. 12 показано изменение предела текучести и временного сопротивления на образцах из стали 1, испытанных на машине УМ-5А. Наблюдаемое увеличение сопротивления деформированию с повышением скорости деформации, согласуется с формулой, указанной Ф. Ф. Витманом и В. А. Степановым [12]

$$\lg \frac{\sigma''}{\sigma'} = n \lg \frac{v''}{v'}$$

где σ' , σ'' — сопротивления пластическому деформированию, отвечающие начальной скорости v' и конечной v'' , соответственно.

Анализируя опытные данные, можно видеть, что инерционность маятникового силоизмерителя оказывает влияние на точность измерения нагрузки, особенно при повышенных скоростях машины. Это относится как к машинам с гидравлическим приводом, так и к машинам с механическим приводом. Однако в машинах с механическим приводом это влияние выражено более резко.

При одинаковых условиях испытания погрешность нагрузки на уровне предела текучести при малых значениях относительной нагрузки больше, чем на уровне временного сопротивления, а для больших значений относительной нагрузки погрешность меньше. В случае испытаний пластичных материалов погрешность, обусловленная инерционностью маятника меньше, чем при испытанных наклепанных материалов.

Сильное влияние относительной нагрузки и предела шкалы на величину погрешности указывает на необходимость пересмотра и изменения существующих нормативных документов, ГОСТ и инструкции по проверке испытательных машин.

Выводы

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований испытательных машин УМ-5М и ГМС-20 свидетельствуют о том, что погрешность вследствие инерционности маятникового силоизмерителя при определении предела текучести и временного сопротивления зависит от скорости деформации образца, предельной нагрузки шкалы, уровня измеряемой нагрузки по шкале, испытываемого материала, размеров образцов.

2. Установлено, что при испытании на растяжение по ГОСТ 1497—61 маятниковый силоизмеритель испытательных машин вносит в измерения нагрузок, соответствующих пределу текучести и временному сопротивлению, значительные погрешности, связанные с его инерционностью. Чтобы обеспечить при измерении нагрузки точность, требуемую ГОСТ 1497—61, необходимо заменить маятниковый силоизмеритель безынерционным. Учитывая однако широкое распространение машин с маятниковым силоизмерителем, можно рекомендовать внести в ГОСТ 1497—61 изменения на условия испытания образцов. Изменения стандарта должны быть направлены на ограничение рабочих участков шкал силоизмерителя и на уменьшение верхнего предела скорости испытания.

3. Предложена новая методика определения жесткости гидравлических испытательных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давиденков Н. Н., Витман Ф. Ф. и Златин Н. А. Влияние старения на зависимость твердости от скорости и температуры. Сборник, посвященный 70-летию А. Ф. Иоффе, издательство АН СССР, 1950, стр. 307.
2. Коваль Ф. Я. О некоторых стандартах на методы механических и технологических испытаний металлов. «Заводская лаборатория», т. XIX, 1953, № 1, стр. 59.
3. Поляков М. С. О механических характеристиках, включаемых в технические условия на приемку и поставку материалов. «Заводская лаборатория», том XIX, 1953, № 6, стр. 731.
4. Педанов Ф. Ф. Влияние скорости деформации на механические характеристики стали, получаемые при испытании на растяжение. «Заводская лаборатория», т. XXI, 1955, № 7, стр. 847.
5. Коробчинская М. Б. О скорости перемещения зажимов при испытании проволоки на растяжение. «Заводская лаборатория», т. XXI, 1955, № 5, стр. 588.
6. Тулянский Ф. В. и Галацкий Б. Д. Об учете скорости деформации при испытаниях на растяжение листов из алюминиевых сплавов. «Заводская лаборатория», т. XXI, 1955, № 8, стр. 975.

7. Волкогон Г. М. и Приматова Л. В. Влияние скорости испытания на механические свойства некоторых цветных металлов и сплавов. «Заводская лаборатория», т. XXV, 1959, № 2, стр. 196.

8. Тимошук Л. Т. и Зотеев В. С. Об инерционности силовизмерителя гидравлических испытательных машин. «Заводская лаборатория», т. XXV, 1959, № 1, стр. 109.

9. Савицкий Ф. С. и Вандышев Б. А. Жесткость испытательных машин и ее влияние на спадающий участок диаграммы растяжений и изгиба. «Заводская лаборатория», т. XXII, 1956, № 6, стр. 717.

10. Улеги В. Г. Влияние жесткости машины на результаты испытания металлов на растяжение и сжатие. «Заводская лаборатория», т. XXV, 1959, № 10, стр. 1242.

11. Кохендорфер А. и Винник В. Влияние свойств испытательных машин на ход кривой напряжение-деформация при единичной и повторной релаксации. Архив фюр дас Айзенхутенвизен, 1957, № 2, стр. 703.

12. Витман Ф. Ф. и Степанов В. А. О влиянии скорости деформирования на хладоломкость стали. Журнал технической физики, 1939, т. IX, вып. 12, стр. 1070.

Поступила в редакцию
6/IX 1968 г.

Ф. С. САВИЦКИЙ

Свердловский филиал ВНИИМ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ПРИ УДАРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Энергию, поглощаемую образцом при ударных испытаниях на разных копрах, определяют как разность значений кинетической энергии ударяющего тела до и после удара. Энергию, расходуемую в процессе удара на упругие деформации деталей копра, сотрясение фундамента и почвы, обычно не учитывают, хотя она, судя по литературным данным, может составлять значительную долю первоначального запаса энергии бабы копра. Так, по утверждению Г. П. Зайцева [1, 2], потери энергии могут составлять 20—30% у копров, надежно градуированных методом определения момента маятника относительно оси вращения. По расчетным и экспериментальным данным С. Э. Гарфа [3, 4] эти потери при изгибе не превышают 7%, но при ударном растяжении достигают 25% и даже выше.

Столь значительные потери энергии не должны оставаться неучтенными, так как при пренебрежении ими искомая работа деформации образца будет определяться с большими положительными погрешностями. Наличие этих погрешностей неизбежно приведет к нарушению единства измерений при пользовании разными копрами, что сильно обесценит результаты ударных испытаний. Поэтому разработка методики определения потерь энергии является актуальной задачей.

Для определения действительных потерь энергии было выполнено экспериментальное исследование на специально изготовленном баллистическом копре из двух маятников массой 14,2 и 295 кг, подвешенных на гибких тросах длиной 360 см и на нескольких обычных копрах.

Баллистический копер, в отличие от маятниковых, позволяет при учете отброса контрбабы составить полный баланс энергии при ударе:

$$T_0 = E_0 + E_{кб} + A,$$

где T_0 — запас энергии бабы перед ударом о неподвижную контрбабу;

E_0 и $E_{кб}$ — энергии отброса бабы и контрбабы после удара;

A — работа, затраченная на деформацию испытуемого образца.

При упругом отраженном ударе разность $T_0 - E_0$ нетрудно выразить через импульс удара бабы

$$S = m_0 (V_0 + V_1),$$

где m_0 — масса, V_0 и V_1 — скорость бабы до и после удара.

В самом деле, выражение

$$T_0 - E_0 = \frac{m_0}{2} (V_0^2 - V_1^2)$$

после несложных алгебраических преобразований можно привести к виду:

$$T_0 - E_0 = kS^2,$$

где коэффициент пропорциональности

$$k = \frac{1 - V_1/V_0}{2m_0(1 + V_1/V_0)}$$

будет постоянным при условии постоянства коэффициента восстановления V_1/V_0 для данных соударяющихся тел.

Рассмотренная разность $T_0 - E_0$ больше работы A , так как в нее вышла энергия отброса контрбабы

$$T_0 - E_0 = A + E_{кб}.$$

При экспериментировании на баллистическом копре были установлены следующие закономерности:

1. Энергия отброса контрбабы баллистического копра пропорциональна квадрату ударного импульса, причем коэффициент пропорциональности $k_1 = \frac{1}{2m_{кб}}$ не зависит от скорости бабы. $E_{кб} = k_1 S^2$.

2. Относительные потери энергии при упругом ударе постоянны

$$\frac{E_{кб}}{T_0} - E_0 = \frac{k_1}{k} = \text{const.}$$

3. При разных значениях ударного импульса энергия, идущая на отброс контрбабы, одинакова для упругого и упруго-пластического ударов.

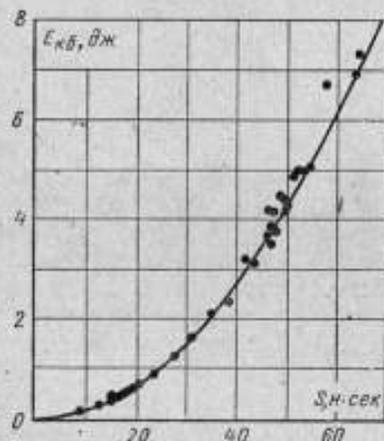


Рис. 1. Зависимости энергии отброса контрбабы от ударного импульса для упругого и упруго-пластического удара.

Последняя закономерность установлена при испытании стандартных надрезанных образцов на баллистическом копре.

На рис. 1 показана зависимость энергии отброса контрбабы от ударного импульса для упругого и упруго-пластического ударов. Из рисунка видно, что точки, соответствующие как упругому, так и упруго-пластическому ударам, одинаково хорошо расположены вдоль кривой второго порядка.

Равенство энергий отброса контрбабы при упругом и упруго-пластическом ударах при одинаковых значениях ударного импульса свидетельствует о том, что коэффициенты пропорциональности в обоих случаях равны. Это обстоятельство позволяет предложить следующую методику учета потерь энергии на маятниковых копрах, если допустить, что закономерности, установленные для потерь энергии на баллистическом копре, справедливы для любого маятникового копра.

Копер градуируется при упругих ударах, т. е. устанавливаются зависимости абсолютных потерь энергии от ударного импульса, тогда при ударе поверхность сферического сегмента, установленного в маятнике вместо ножа, должна контактировать с поверхностью жесткой балки.

Образцы градуировочных кривых показаны на рис. 2. Кривые 1, 2, 3 являются параболой второго порядка и отличаются лишь коэффициентами. Последнее обстоятельство свидетельствует о различии потерь энергии при упругом ударе для разных копров.

Зная k при упругом ударе, легко вычислить потери при упруго-пластическом ударе:

$$\Delta E = kS^2.$$

Целесообразность учета этих потерь была проверена ударными испытаниями образцов на изгиб, растяжение и твердость. Испытание на изгиб проводили на двух маятниковых копрах типа МК-30 с резко отличающимися значениями h для двух партий, каждая из них имела пять ненадрезанных образцов из ст.3. Размеры образцов первой партии $55 \times 10 \times 5$ мм, а второй — $55 \times 10 \times 3$ мм. Результаты испытания приведены в таблице

Номер копра	Коэффициент пропорциональности	Толщина образцов, мм	Занес энергии маятника, дж	Средние значения		Работа деформации с поправкой на потери энергии, дж
				работа деформации, дж	потери энергии, дж	
402	0,045	5	92	74,5	5,8	68,7
9	0,086	5	98	80,0	13,5	66,5
402	0,045	3	37	21,3	0,09	21,2
9	0,086	3	41	23,4	2,0	21,4

Для образцов толщиной 5 мм среднее значение работы деформации, отсчитанное по шкале, отличается на 5,5 дж. С введением поправки ΔE эта разница уменьшилась до 2,2 дж (3,3%). Для образцов толщиной 3 мм она составляет 2,1 дж (9,3%), а с поправкой — 0,2 дж (1,0%). Кроме того, различие между средними значениями работы деформации, полученными на копрах, намного уменьшилось.

Анализ опытных данных показал, что потери энергии у каждого копра зависят от вида испытания. При испытании образцов на ударный изгиб они составляют в среднем 7%, что согласуется с данными С. Э. Гарфа [3, 4]. При испытании на растяжение потери энергии меньше, чем при испытании на изгиб и в среднем составляют около 5%, что далеко не согласуется с утверждением С. Э. Гарфа, который указывает, что при таком жестком испытании как растяжение потери могут достигать 25% и выше [4].

Относительные потери при испытании образцов на ударную твердость во много раз больше, чем при испытании на растяжение и изгиб. Поэтому при всех испытаниях необходимо учитывать потери энергии. Сказанное в особенности относится к испытаниям на ударную твердость, если она определяется через работу деформации.

Выводы

1. Потери энергии при ударных испытаниях прямо пропорциональны квадрату ударного импульса маятника копра.
2. Опыты с баллистическим копром показали, что при одинаковом ударном импульсе бабы потери энергии при упругом и упруго-пластическом ударах одинаковы.
3. Поправку на потери энергии в маятниковых копрах можно вводить на основе предварительной градуировки копра при упругих ударах.

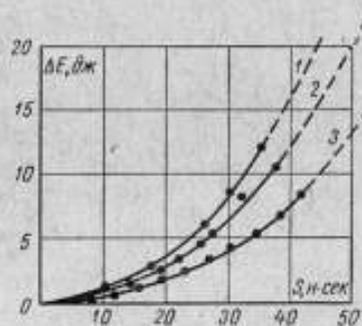


Рис. 2. Зависимость потерь энергии от ударного импульса

1 — копр типа МК-15 № 189, 2 — копр типа МК-15 № 1, 3 — баллистический копр.

4. Потери энергии у каждого копра зависят от вида ударного испытания. Особенно велики потери при испытании на ударную твердость и введение поправок в этом случае обязательно.

ЛИТЕРАТУРА

1. З а й ц е в Г. П. Сравнимость показаний маятниковых копров. «Заводская лаборатория», УП, 1938, № 11.
2. З а й ц е в Г. П. О построении баллистических копров. «Заводская лаборатория», 1948, № 11.
3. Г а р ф С. Э. Потери энергии в маятниковых копрах. «Заводская лаборатория», XI, 1945, № 4.
4. Г а р ф С. Э. Применение баллистического копра для определения потерь энергии в маятниковых копрах. «Заводская лаборатория», XI, 1945, № 5.

Поступила в редакцию
6/IX 1968 г.

Г. И. ЛОСКУТОВ, Ю. В. МОГИЛИН, Г. И. ПОЛУХИН

ВНИИМ

УСТАНОВКА ТИПА УПМ-6000 ДЛЯ ПОВЕРКИ МАНОМЕТРОВ

Недостатки специализированных средств для поверки манометров до 6000 кгс/см^2 (600 Мн/м^2) привели к необходимости создания установки для поверки манометров, отвечающей современным требованиям к аппаратуре такого рода. Основными требованиями к поверочной аппаратуре являются простота и удобство эксплуатации, т. е. снижение до минимума физических затрат и вычислительных операций по образцовому прибору.

Исходя из этих требований и была разработана во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева установка для поверки манометров до 6000 кгс/см^2 (600 Мн/м^2).

Внешний вид разработанной установки представлен на рис. 1, принципиальная схема — на рис. 2.

Поверку на этой установке осуществляют непосредственным сравнением показаний образцового и поверяемого манометров.

Принцип действия установки сводится к следующему. Открыв вентиль 13 (рис. 2) насосом 8 подают рабочую жидкость в систему высокого давления, состоящую из камеры высокого давления мультипликатора 5, прессы тонкой регулировки 12, образцового грузопоршневого манометра 1, поверяемых манометров 2 и системы трубопроводов с распределительными блоками и вентилем 13. Насосом можно создать давление до 150 Мн/м^2 , которое контролируют манометром 6. После этого вентиль 13 закрывают, а вентиль 3 открывают. Далее мультипликатором 5 и насосом 8 повышают давление. Точное значение необходимого давления достигают посредством прессы тонкой регулировки 12. Давление снижают, открывая вентиль 4 и сливая рабочую жидкость в бачок 7, имеющий указатель уровня. Точного значения необходимого давления, как и при повышении давления, добиваются прессом 12.

Общий вид установки представлен на рис. 3. Несущей конструкцией установки является жесткий сварной каркас, имеющий три платы: нижнюю, среднюю и верхнюю. Каркас обшит съемными облицовочными щитами, окрашенными согласно требованиям промышленной эстетики. Насосная группа, мультипликатор и электроблокировочный узел закреплены на нижней плате.

Насосная группа состоит из электродвигателя 8, редуктора 7 и модернизированного насоса 6 на 250 Мн/м^2 , разработанных во ВНИИФТРИ [1]. Мультипликатор 13 представляет собой копию мультипликатора на 6000 кгс/см^2 (600 Мн/м^2), описанного в работе [2].

Электроблокировочный узел представлен магнитным пускателем, электроводом и пакетным выключателем. Кнопка пуска расположена на уровне средней платы на переднем щитке, где, кроме того, расположены

все вентили, манометр 16, рукоятки пресса тонкой регулировки и системы нагружения. Распределительные блоки, корпуса вентиляей и пресса тонкой регулировки, а также система подъема и опускания узла нагружения крепятся на средней плате. Штуцеры для поверяемых и образцового манометров, а также узел полуавтоматического нагружающего устройства закреплены на верхней плате.

В установке применены вентили игольчатого типа с прямой винтовой (без редукции) ручной подачей, выполненные каждый совместно с распре-

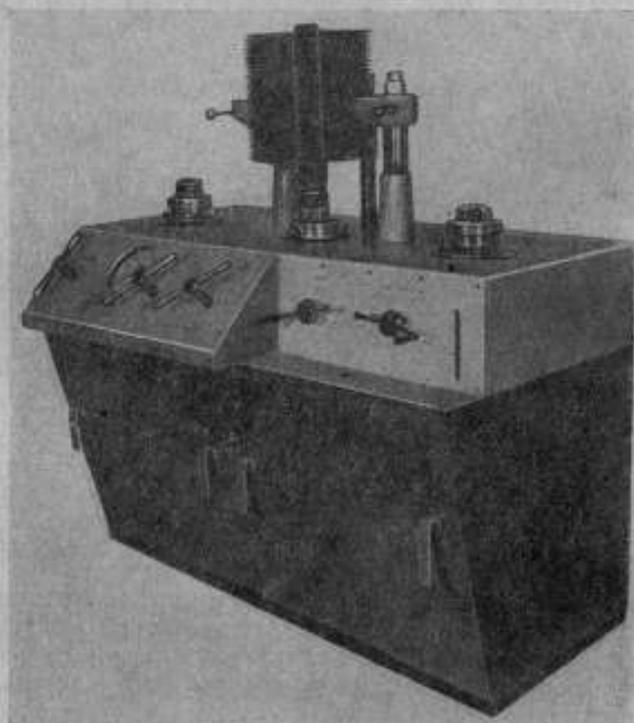


Рис. 1. Внешний вид установки типа УПМ-6000.

делительным блоком, т. е. монолитной конструкцией. Пресс тонкой регулировки выполнен аналогично вентилям, но с редуктором и большим ходом иглы. Он допускает отключение системы «образцовый — поверяемые манометры» от системы «мультипликатор — насосная группа». Узел полуавтоматического нагружающего устройства представляет собой конструкцию, разработанную рижским заводом «Эталон» и модернизированную во ВНИИМ.

Штуцера для проверки приборов содержат нормально запертые шариковые клапаны, открывающиеся при установлении прибора в резьбовое гнездо, которое при необходимости может быть легко и быстро заменено другим. Установка укомплектована резьбовыми гнездами, соответствующими резьбам штуцеров стандартных манометров с верхними пределами измерений от 2500 до 6000 кгс/см².

Трубопровод выполнен из трубок: для высоких давлений $\varnothing 12 \times 5$ и для низких $\varnothing 10 \times 3,5$. Материал трубок — нормализованная сталь 40Х.

Соединения трубопровода с блоками и мультипликатором осуществлены с помощью упруго-пластических уплотнителей [2].

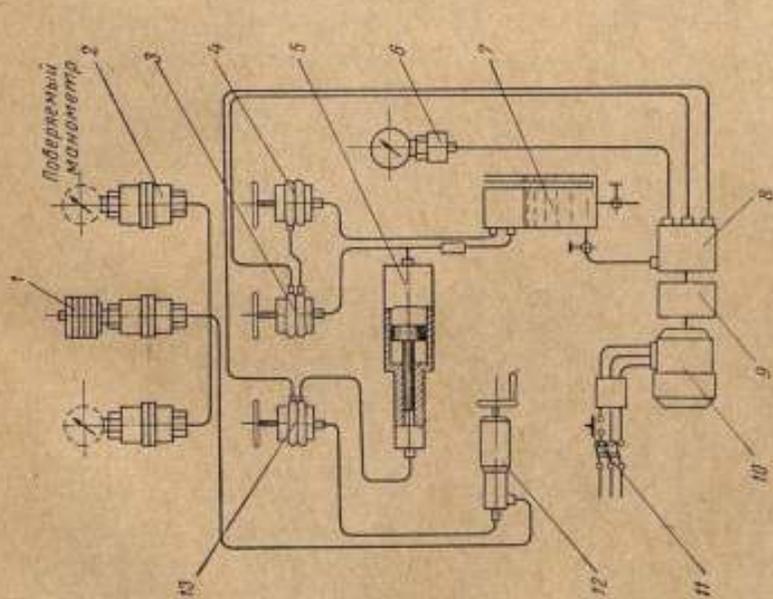


Рис. 2. Принципиальная схема установки типа УПМ-6000.
 1 — образцовый грузопоршневой манометр МП-6000; 2 — штуцеры для присоединения поверяемых манометров; 3 — указатель уровня жидкости в бачке; 4, 5 — пресс-топливный регулятор; 6 — насос; 7 — редуктор; 8 — мультипликатор; 9 — электродвигатель; 10 — бак; 11 — насос; 12 — электродвигатель; 13 — электроблокировочный узел; 14 — пресс топливного бака.

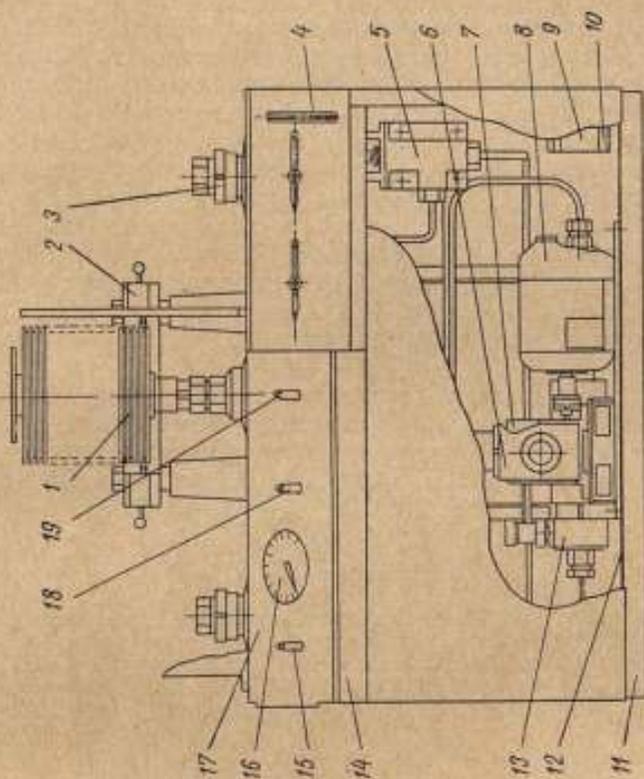


Рис. 3. Общий вид установки типа УПМ-6000.
 1 — образцовый грузопоршневой манометр МП-6000; 2 — узел автоматического нагружающего устройства; 3 — штуцеры для присоединения поверяемых манометров; 4 — указатель уровня жидкости в бачке; 5 — пресс-топливный регулятор; 6 — насос; 7 — редуктор; 8 — электродвигатель; 9 — бак; 10 — бак; 11 — насос; 12, 13, 14, 15 — электродвигатель; 16 — мультипликатор; 17, 18, 19 — пластины; 20 — контрольный манометр.

Образцовый манометр представлен грузопоршневым манометром типа МП-6000 2-го разряда класса точности 0,05. Комплект грузов состоит из двадцати девяти грузов с номинальной массой каждого 4 кг и одного груза — 2 кг. Номинальная масса подвижной части грузопоршневого манометра тоже 2 кг. Номинальное значение приведенной площади поршня составляет 0,02 см². Масса подвижной части манометра и грузов приведена в соответствие с действительным значением приведенной площади поршня местным ускорением свободного падения тел и поправкой на изменение приведенной площади поршня от давления. Грузы имеют нумерацию от 1 до 29 и каждый из них в последовательности нумерации соответствует давлению 200 кгс/см² ($\approx 20 \text{ Мн/м}^2$). Таким образом, поверитель полностью освобожден от расчетов значения давления, если выдержан допустимый интервал температуры окружающей среды $20 \pm 5^\circ \text{С}$.

Рабочая жидкость: смесь 90% глицерина с 10% этиленгликоля по объему.

Испытания и исследования установки показали удобство, простоту и надежность работы всех узлов установки. Техническое исполнение заслуживает высшей оценки и отвечает требованиям современной эстетики.

Габариты установки 1300 × 855 × 1360, вес 400 кгс, потребляемая мощность 1 квт при напряжении сети 220/380 в и частоте 50 гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Исследования в области измерений высоких давлений». Труды институтов Комитета, вып. 75 (135), М., Издательство стандартов, 1964.
2. Долинский Е. Ф., Кирмалов Л. А. и Полухин Г. И. Образцовый грузопоршневой манометр до 25 000 кгс/см² ($\sim 2,45 \cdot 10^9 \text{ н/м}^2$). «Измерительная техника», 1964, № 11.

Поступила в редакцию
27/1 1969 г.

М. И. ДРИГА

ВНИИМ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОПРАВКИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЙ ГАЗОВ

Кинетическая теория газов дает строгую зависимость, связывающую значения температуры \bar{T}_1 , \bar{T}_2 и давления высокоразреженного газа P_1 , P_2 , заполняющего две камеры при условии равновесия газа:

$$\frac{P_2}{P_1} = \sqrt{\frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1}} \quad (1)$$

Полагая, что температура газа в каждой из камер равна температуре ее стенок, из условия (1) можно получить приближенную формулу (формулу Кнудсена):

$$\frac{P_2}{P_1} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \quad (2)$$

где T_1 , T_2 — температуры камер.

Формула (2) часто применяется в технике вакуумных измерений для определения температурной поправки к показаниям манометра при различных температурах вакуумной камеры и манометра.

Множитель $\sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$ является температурной поправкой, учитывающей разность давлений в манометре и в вакуумной камере $P_2 - P_1$ в момент измерения давления (так называемую «термомолекулярную разность давлений»)

Условием равновесия газа в манометре и в вакуумной камере является равенство потоков молекул, летящих в манометр из вакуумной камеры и в обратном направлении.

В практике вакуумных измерений размеры манометра обычно меньше размеров вакуумной камеры и количество газа, поступающего в нее из манометра на единицу времени, мало по сравнению с общим количеством газа, заполняющего вакуумную камеру. Поэтому температура газа практически не отличается от температуры камеры.

Значительная часть газа, поступающего в манометр из вакуумной камеры, уходит в нее обратно после небольшого числа столкновений молекул этого газа со стенками манометра. Поэтому температура газа, заполняющего манометр, существенно отличается от температуры самого манометра. Особенно большим должно быть различие температур при малом значении коэффициента аккомодации (k_a) на внутренней поверхности манометра, когда температурное равновесие газа со стенками достигается только после большого числа столкновений молекул со стенками манометра.

Внутренняя поверхность манометра (манометрического преобразователя) представляет собой либо гладкую поверхность стекла, либо поверхность металла с минимальной шероховатостью, что является необходимым условием технологии удаления адсорбированных газов. На такой поверхности k_a имеет малое значение [1], поэтому теплообмен между газом и стенкой происходит неинтенсивно и на границе твердой и газовой фаз неизбежен скачок температуры. Разница температур тем больше, чем меньше численное значение k_a . Поэтому расчетное значение отношения $\frac{P_2}{P_1}$, определяемого по формуле (2), отличается от истинного значения отношения давлений в вакуумной камере и в манометре.

Величина k_a на внутренней поверхности вакуумной камеры тоже может оказать влияние на величину отношения $\frac{P_2}{P_1}$; это влияние тем больше, чем меньше размеры камеры.

Целью настоящей работы является определение отношения давлений в вакуумной камере и в манометре (P_2/P_1) с учетом влияния величины k_a на внутренней поверхности манометра и вакуумной камеры на температуру и давление газа.

1. Вакуумная камера велика по сравнению с манометром

В качестве исходных предположений примем следующие:

1. Манометр и вакуумная камера имеют шарообразную форму и сообщаются друг с другом через короткую трубку (диафрагму) (рис. 1).

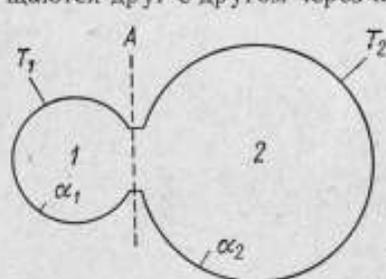


Рис. 1. Схема вакуумной системы, состоящей из манометра (1) и вакуумной камеры (2).

2. Стенки камеры и манометра представляют собой изотермические поверхности, температуры которых имеют постоянные значения T_2 и T_1 , а в плоскости A—A температура изменяется скачкообразно от T_2 до T_1 ($T_2 < T_1$).

3. Температура газа, заполняющего камеру, равна температуре ее стенок.

4. Коэффициент аккомодации на внутренней поверхности манометра имеет произвольное значение α_1 , находящееся в пределах $0 < \alpha_1 < 1$.

5. Разреженность газа, заполняющего камеру и манометр, достаточно высокая, чтобы выполнялся критерий Кнудсена $\frac{d}{\lambda} \ll 1$.

6. Газ, заполняющий камеру и манометр, находится в состоянии статического равновесия (через 1 см^2 плоскости сечения трубки, соединяющей камеру и манометр, пролетают в противоположные стороны одинаковые количества молекул газа за единицу времени).

Температура газа, заполняющего манометр, зависит от интенсивности теплообмена между газом и его стенками, характеризуемой значением коэффициента аккомодации α_1 .

Коэффициент аккомодации [2] определяется уравнением:

$$\alpha = \frac{T_0 - T_n}{T_c - T_n}, \quad (3)$$

где T_n , T_0 — температуры, соответствующие энергии падающих и отраженных молекул;

T_c — температура стенки.

Количество молекул z_0 , попадающих в манометр за промежуток времени Δt_i , определяется уравнением:

$$z_0 = \frac{1}{4} n_2 v_2 s_0 \Delta t_i, \quad (6)$$

где n_2 — число молекул в 1 см^3 в камере;

v_2 — средняя скорость молекул газа при температуре T_2 ;

s_0 — площадь поперечного сечения трубки, соединяющей манометр с камерой;

$$\Delta t_i = \frac{t_0 - t_k}{k}.$$

Поступив в манометр, молекулы группы z_0 в соответствии с законом косинуса равномерно распределяются по всей поверхности. После первого столкновения молекулы отражаются от поверхности и равномерно распределяются на ней, причем определенная часть их, численно равная $z_0 f_1$, попадает через соединительную трубку в камеру (f_1 — отношение площади поперечного сечения трубки, соединяющей манометр с камерой, к площади внутренней поверхности манометра).

Остальные молекулы равномерно распределяются по внутренней поверхности манометра и сталкиваются с ней во второй раз. Количество этих молекул равно $z_0 (1 - f_1)$. После второго отражения опять часть молекул, численно равная $z_0 (1 - f_1) f_1$, уходит в камеру, а остальные $z_0 (1 - f_1)^2$ равномерно распределяются по поверхности манометра и т. д. В результате этого процесса молекулы z_0 , поступившие в манометр за промежуток времени Δt_1 , к моменту времени t_k столкнутся со стенками манометра k раз, а количество их уменьшится до значения $z_0 (1 - f_1)^k$. От следующей группы молекул z_1 , поступившей в манометр за промежуток времени Δt_2 , к моменту времени t_k останется в нем $z_0 (1 - f_1)^{k-1}$ молекул, столкнувшихся со стенками $k - 1$ раз; каждая последующая группа молекул будет иметь к моменту времени t_k на одно столкновение меньше предыдущей.

Таким образом, к концу рассматриваемого отрезка времени $t_0 - t_k$ в манометре находятся группы молекул, различающиеся по числу столкновений:

$$\left. \begin{aligned} z_0 \\ z_1 = z_0 (1 - f_1), \\ z_2 = z_0 (1 - f_1)^2, \\ \dots \\ z_k = z_0 (1 - f_1)^k. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Введя в уравнение (5) найденные значения величин $z_1, z_2, z_3, \dots, z_k$ и T_1', T_2', \dots, T_k' после элементарных преобразований, получим

$$\bar{T}_1 = \frac{T_2 + T_1 \sum_{i=1}^k (1 - f_1)^i + (T_1 - T_2) \sum_{i=1}^k (1 - f_1)^i (1 - \alpha_1)^i}{\sum_{i=0}^k (1 - f_1)^i}. \quad (8)$$

Применив формулу суммы членов убывающей геометрической прогрессии, из уравнения (8) имеем:

$$\bar{T}_1 = \frac{T_2 + T_1 \left(\frac{1 - f_1}{f_1} \right) [1 - (1 - f_1)^k] - \frac{(1 - f_1)(1 - \alpha_1) [1 - (1 - f_1)^k (1 - \alpha_1)^k] (T_1 - T_2)}{1 - (1 - f_1)(1 - \alpha_1)}}{1 + \frac{(1 - f_1) [1 - (1 - f_1)^k]}{f_1}}. \quad (9)$$

Величина рассматриваемого отрезка времени $t_0 - t_k$ произвольна. Выберем этот промежуток времени достаточно большим, чтобы число промежутков времени Δt_1 было велико, и выполнялось условие:

$$(1 - f_1)^k \ll 1. \quad (10)$$

При обычных размерах манометра и трубки, соединяющей его с камерой (диаметр манометра 7 см, диаметр трубки 2 см), параметр f_1 имеет численное значение $f_1 = 0,02$, средняя длина пути молекул газа в объеме манометра не превышает 7 см. Средняя скорость молекул воздуха при температуре 20° составляет $450 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-1}$ [2] и число столкновений каждой молекулы со стенками манометра равно $450 : 0,07 = 6400$ за одну секунду. Следовательно, достаточно взять отрезок времени $t_0 - t_k$ равным одной секунде, чтобы получить значение $k = 6400$. При этом значении k величина $(1 - f_1)^k = (1 - 0,02)^{6400}$ мала по сравнению с единицей и ею можно пренебречь. Таким образом, из формулы (9) получается

$$\bar{T}_1 = \frac{f_1 (T_1 - T_2)}{f_1 + \alpha_1 (1 - f_1)}. \quad (11)$$

Уравнения (8), (9) и (11) позволяют определить среднюю температуру \bar{T}_1 газа, состоящего из групп молекул $z_0, z_1, z_2, \dots, z_k$. Этот ряд, как показывает система уравнений (7), представляет собой убывающую геометрическую прогрессию, сумма членов этой прогрессии равна:

$$Q = \sum_{i=0}^k z_i = z_0 \sum_{i=0}^k (1 - f_1)^i = z_0 \frac{1 - (1 - f_1)^{k+1}}{1 - (1 - f_1)}. \quad (12)$$

При $k = 6400, f_1 = 0,02; Q \cong \frac{(0,98)^{6401}}{0,02} = 49z_0$.

Количество молекул газа, оставшихся в манометре к моменту времени t_k из числа поступивших в манометр до момента времени t_0 , можно представить в виде ряда групп молекул:

$$Q_1 = \sum_{i=k}^{\infty} z_i = z_0 \sum_{i=k}^{\infty} (1 - f_1)^i = z_0 \frac{(1 - f_1)^k (1 - f_1)^{\infty}}{1 - (1 - f_1)}. \quad (13)$$

Как видно из формулы, значение Q_1 ничтожно мало, что объясняется сменой газа в манометре за время, меньшее 1 сек, при $k = 6400, f_1 = 0,02, Q_1 = z_0 \frac{(0,98)^{6400}}{0,02} = z_0 3 \cdot 10^{-56}$.

Это значит, что все количество газа, заполняющего манометр к моменту времени t_k , определяется величиной Q , а температура этого газа равна \bar{T}_1 .

Подставив полученное значение \bar{T}_1 в уравнение (1) и заменив в нем \bar{T}_2 на равное значение T_2 , получим уравнение для отношения $\frac{P_2}{P_1}$ в следующем виде:

$$\frac{P_2}{P_1} = \gamma_1 \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}, \quad (14)$$

где $\gamma_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1 (1 - f_1) + f_1}{\alpha_1 (1 - f_1) + f_1 \frac{T_2}{T_1}}}$.

Если температура вакуумной камеры выше температуры манометра, то справедливо получить следующее уравнение:

$$\frac{P_1}{P_2} = \gamma_2 \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}, \quad (15)$$

где $\gamma_2 = \sqrt{\frac{\alpha_1(1-f_1) + f_1 \frac{T_2}{T_1}}{\alpha_1(1-f_1) + f_1}}$.

Уравнения (14 и 15) дают возможность определить величину отношения давления в манометре и в вакуумной камере при известных значениях k , а. на внутренней поверхности манометра в условиях температурного равновесия газа и стенок вакуумной камеры.

2. Размеры вакуумной камеры соизмеримы с размерами манометра и с диаметром соединяющей их трубки

В качестве исходных допущений вместо пунктов 3 и 4, принятых в разделе 1, возьмем следующие:

1. Температура газа T_2 , заполняющего вакуумную камеру, не равна температуре ее стенок.

2. Коэффициенты аккомодации на внутренней поверхности манометра и камеры (рис. 1) имеют произвольные значения α_1 и α_2 и находятся в пределах $0 < \alpha_1 < 1$; $0 < \alpha_2 < 1$.

Применяя метод разделения газа на группы молекул, различающихся по числу столкновений со стенками камеры и манометра, находим для температуры газа в манометре следующее выражение:

$$\bar{T}_1 = \frac{z_0 \left[\bar{T}_2 + T_1 \sum_{i=1}^k (1-f_1)^i + (\bar{T}_1 - \bar{T}_2) \sum_{i=1}^k (1-f_1)^i (1-\alpha_1)^i \right]}{z_0 \sum_{i=0}^k (1-f_1)^i}. \quad (16)$$

Введя в уравнение (16) предельное значение k , получим:

$$\bar{T}_1 = T_1 - \frac{f_1(T_1 - \bar{T}_2)}{f_1 + \alpha_1(1-f_1)}. \quad (17)$$

На основании зависимости (3) получаем выражения для T_0^* , T_1^* , T_2^* в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} T_0^* &= \bar{T}_1, \\ T_1^* &= \bar{T}_1 - \alpha_2(\bar{T}_1 - T_2) = T_2 + (1 - \alpha_2)(\bar{T}_1 - T_2), \\ T_2^* &= T_1^* - \alpha_2(T_1^* - T_2) = T_2 + (1 - \alpha_2)^2(\bar{T}_1 - T_2), \\ &\dots \dots \dots \\ T_k^* &= T_{k-1}^* - \alpha_2(T_{k-1}^* - T_2) = T_2 + (1 - \alpha_2)^k(\bar{T}_1 - T_2), \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где T_1^* , T_2^* , T_3^* , T_k^* — температуры групп молекул газа после одного, двух, трех и т. д. столкновений со стенками в камере.

Температуру газа в вакуумной камере определяем как среднюю температуру групп молекул, различающихся по числу столкновений со стенками камеры:

$$z_0, z_1 = z_0(1 - f_2), z_2 = z_0(1 - f_2)^2, \dots \text{ и т. д.},$$

где f_2 — отношение площади сечения соединительной трубки к площади внутренней поверхности камеры.

$$\bar{T}_2 = \frac{z_0 \bar{T}_1 + z_1 T_1' + z_2 T_2' + \dots + z_k T_k'}{z_0 + z_1 + z_2 + \dots + z_k}. \quad (19)$$

Подставив в это уравнение найденные значения величин $z_0, z_1, z_2, \dots, z_k; T_1', T_2', T_3', \dots, T_k'$, после элементарных преобразований получим:

$$\bar{T}_2 = \frac{T_1 + T_2 \sum_{i=1}^k (1 - f_2)^i + (\bar{T}_1 - T_2) \sum_{i=1}^k (1 - f_2)^i (1 - \alpha_2)^i}{\sum_{i=0}^k (1 - f_2)^i}. \quad (20)$$

При достаточно большом значении k из формулы (20) получается:

$$\bar{T}_2 = T_2 + \frac{f_2(\bar{T}_1 - T_2)}{f_2 + \alpha_2(1 - f_2)}. \quad (21)$$

Решая совместно уравнения (17) и (21), находим:

$$\bar{T}_1 = \frac{T_1(\alpha_1 - \alpha_1 f_1)(\alpha_2 + f_2 - \alpha_2 f_2) + f_1(\alpha_2 - \alpha_2 f_2) T_2}{(\alpha_1 + f_1 - \alpha_1 f_1)(\alpha_2 + f_2 - \alpha_2 f_2)}, \quad (22)$$

$$\bar{T}_2 = \frac{T_2(\alpha_2 - \alpha_2 f_2)(\alpha_1 + f_1 - \alpha_1 f_1) + f_2(\alpha_1 - \alpha_1 f_1) T_1}{(\alpha_1 + f_1 - \alpha_1 f_1)(\alpha_2 + f_2 - \alpha_2 f_2)}. \quad (23)$$

Поделив \bar{T}_2 на \bar{T}_1 и отбросив в полученном выражении слагаемые, в которые входят f_1 и f_2 в степени выше первой или произведения f на f_2 , получаем

$$\frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1} = \frac{T_2[\alpha_1 \alpha_2 (1 - f_1 - f_2) + \alpha_2 f_1] + \alpha_1 f_2 T_1}{T_1[\alpha_1 \alpha_2 (1 - f_1 - f_2) + \alpha_1 f_2] + \alpha_2 f_1 T_2}. \quad (24)$$

Окончательно из формулы (1) и (24) получим следующее уравнение:

$$\frac{P_2}{P_1} = \gamma_2 \sqrt{\frac{T_2}{T_1}},$$

где

$$\gamma_2 = \sqrt{\frac{\alpha_1 \alpha_2 (1 - f_1 - f_2) + \alpha_2 f_1 + \alpha_1 f_2 \frac{T_1}{T_2}}{\alpha_1 \alpha_2 (1 - f_1 - f_2) + \alpha_1 f_2 + \alpha_2 f_1 \frac{T_2}{T_1}}}. \quad (25)$$

Уравнение (26) дает возможность определить отношение давлений P_2/P_1 в камере и в манометре любых размеров при заданных значениях величин $T_1, T_2, \alpha_1, \alpha_2, f_1, f_2$.

Формулы (14), (15), (25) справедливы при условии шарообразной формы неодинаково нагретых манометра и камеры. Однако эти формулы можно применять для оценки величины погрешности в определении отношения P_2/P_1 по формуле (2), если форма вакуумной камеры и манометра лишь приближается к шарообразной. В этих случаях значение f должно

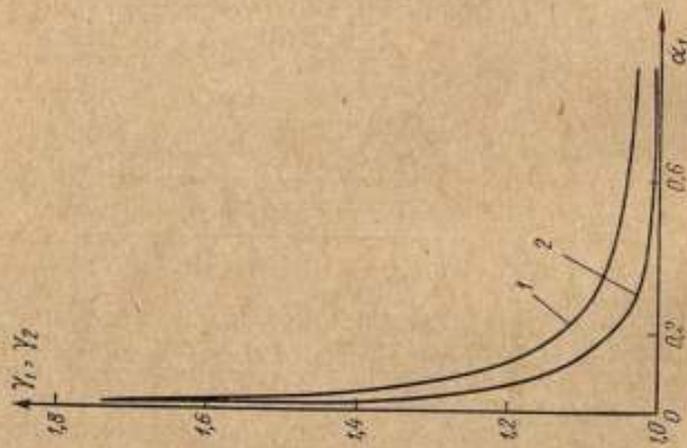


Рис. 2. График зависимости γ от коэффициента аккомодации α_1 :

1 — $\gamma_1 = f(\alpha_1)$ при $\gamma_1 > \gamma_2$; 2 — $\gamma_2 = f(\alpha_1)$ при $\gamma_1 < \gamma_2$.

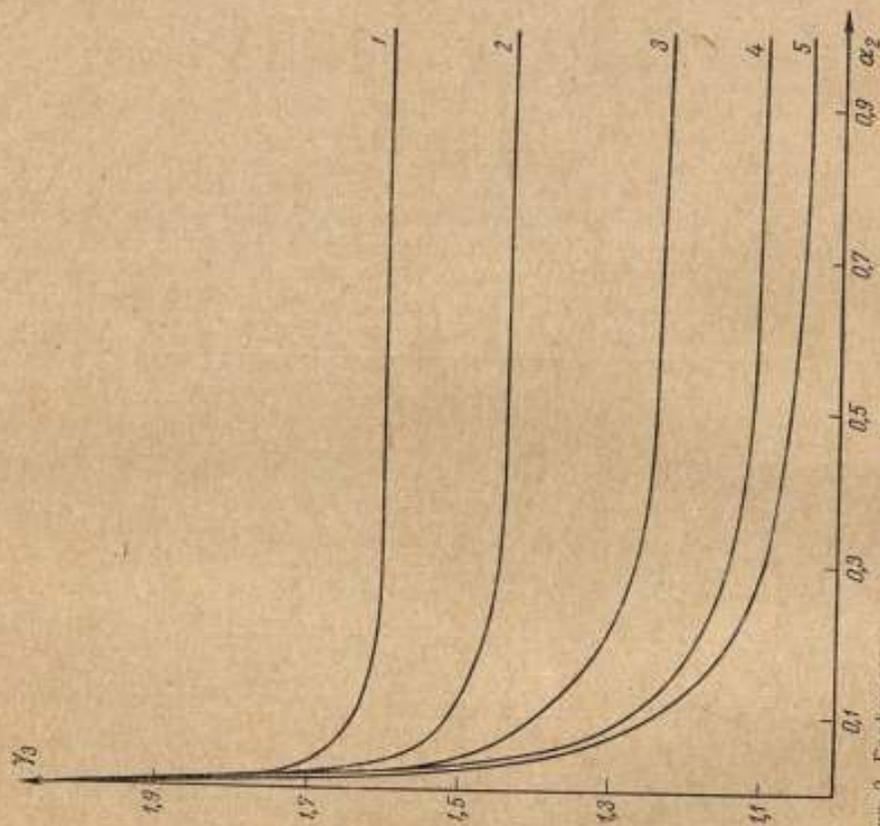


Рис. 3. График зависимости γ от коэффициента аккомодации α_2 при различных значениях α_1 :

1 — $\alpha_1 = 0,005$; 2 — $\alpha_1 = 0,01$; 3 — $\alpha_1 = 0,02$; 4 — $\alpha_1 = 0,1$; 5 — $\alpha_1 = 0,9$.

быть равно отношению площади поперечного сечения соединительной трубки к площади поверхности шара, вписываемого в камеру или манометр.

На рис. 2 даны результаты расчета величины множителя γ_1 и γ_2 по формулам (14) и (15) для обычного случая измерения давления: $f_1 = 0,02$, $T_1 = 4T_2$ и $T_1 = \frac{1}{4}T_2$ (диаметр манометрического преобразователя 7,5 см, диаметр соединительной трубки 2 см); коэффициент аккомодации на внутренней поверхности манометра $\alpha_1 = 0,01; 0,1; 0,2; 0,9; \alpha_2 = 1$. График показывает, что γ_1 и γ_2 изменяются в зависимости от значения к. а. в пределах от 0,74 (при $\alpha_1 = 0,01$) до 1,03 (при $\alpha_1 = 0,9$).

На рис. 3 дан график величины γ_3 как функции параметров: $f_1, f_2, \alpha_1, \alpha_2$ и T_1, T_2 при значениях f_1 и f_2 численно равных $f_1 = f_2 = 0,02$, соответствующие размерам обычного манометрического преобразователя $D = 4,5$ см (при обычном значении диаметра трубки (диафрагмы), через которую манометр сообщается с объектом измерения ($D = 2$ см)). Диаметр вакуумной камеры принят равным диаметру манометра; коэффициенты аккомодации на поверхности манометра и вакуумной камеры принимают различные значения: от $\alpha_1 = 0,001$ до $\alpha_1 = 0,9$ при значениях температур камер $4T_2 = T_1$.

График (рис. 3) показывает, что при указанных размерах вакуумной камеры, величина множителя γ_3 изменяется в зависимости от значения к. а. α_2 на поверхности камеры, имеющей температуру T_2 , в пределах от $\gamma_3 = 1,74$ (при $\alpha_2 = 0,01$) до $\gamma_3 = 1,04$ (при $\alpha_2 = 0,9$). Зависимость величины γ_3 от значения к. а. на более нагретой поверхности манометра оказывается более слабой; γ_3 изменяется от значения 1,6 (при $\alpha_1 = 0,005$) до значения $\gamma_3 = 1,08$ (при $\alpha_1 = 0,9$).

Приведенный расчет показал, что погрешность, обусловленная неполной аккомодацией молекул газа при малых размерах вакуумной камеры (сравнимых с размерами манометра), может достигнуть 75% при расчете величины отношения P_2/P_1 по общепринятой формуле (2) и может быть полностью исключена при расчете по формуле (25), если известны численные значения коэффициентов аккомодации на внутренних поверхностях вакуумной камеры и манометра при шарообразной форме.

Выводы

1. Если манометр и камера, в которых измеряют давление, имеют шарообразную форму (либо близкую к ней), то температурную поправку можно определить по формуле (25), отличающуюся от формулы Кнудсена только постоянным множителем, учитывающим влияние теплопередачи через разреженный газ.

2. Расчет, проведенный по выведенным формулам (14), (15) и (25), показал, что погрешность в определении отношения давлений P_2/P_1 в вакуумной камере и в манометре, соединенном с ней короткой трубкой при расчете по общеизвестной формуле (2), может достигать величины порядка 75%, а в большинстве случаев практики к. а. находятся в пределах $0,3 < \alpha < 0,7$, эта погрешность достигает 10+30%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дрига М. И., Фролова Е. Н. Измерения коэффициента аккомодации. Труды институтов Комитета, вып. 85 (145), М.—Л., Изд. стандартов, 1966.
2. Дешман С. Научные основы вакуумной техники. М., Изд. И. Л. 1950.
3. Крылов К. И. Физические основы электровакуумной техники, М., Госэнергоиздат, 1949.

Поступила в редакцию
2/XII 1968 г.

С. И. ТОРОПИН
ВНИИММЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ И ЮСТИРОВКИ РАВНОПЛЕЧИХ
ВЕСОВ ПО ПЕРИОДУ КОЛЕБАНИЙ

До настоящего времени рычажные равноплечие весы широко применяются как в качестве образцовых для поверки гирь, так и аналитических для измерения массы при физико-химических исследованиях и анализах, а также и для других целей, связанных с точными измерениями массы, например, драгоценных металлов, камней и целого ряда других материалов. Рычажные весы обычного типа имеют равноплечее коромысло, на котором закреплены три призмы: в середине — опорная и по концам две грузоприемные призмы, на которых располагаются серьги. Коромысло весов средней призмой опирается на подушку, расположенную на колонке весов.

Грузоприемные призмы располагают на равных расстояниях по обе стороны от опорной призмы.

Расстояние от рабочего ребра опорной призмы до линии, соединяющей рабочие вершины боковых призм, называют просветом между призмами.

У весов с именованной шкалой просвет между призмами должен быть равен нулю.

У весов с неименованной шкалой призмы могут иметь как положительный, так и отрицательный просвет.

Для обеспечения устойчивости колебаний коромысла центр тяжести в нем располагают ниже вершины рабочего ребра опорной призмы.

В рычажных весах для изменения чувствительности, связанной с положением центра тяжести коромысла относительно его оси колебаний, имеется регулятор в виде гайки, перемещающейся по винту в верхней части стрелки коромысла или на специальном винте, расположенном на коромысле весов.

В теории рычажных весов [1, 2] даны формулы, связывающие цену деления S_b и период колебания весов T_b с их основными параметрами:

$$S_b = \frac{(Rc + 2Pm)l}{aL}; \quad (1)$$

$$T_b = \pi \sqrt{\frac{J + 2Pa^2}{(Rc + 2Pm)g}}; \quad (2)$$

где R — масса коромысла;
 c — расстояние от центра тяжести коромысла до его оси колебания;
 $2P$ — общая масса чашек и грузов, подвешенных к коромыслу;
 m — просвет между призмами;
 l — длина наименьшего деления шкалы равновесия коромысла;
 L — длина стрелки;

a — длина плеча коромысла;

J — момент инерции коромысла относительно его оси колебания;

g — ускорение силы тяжести.

В формулах (1) и (2), полагая $2P = 0$, получим равенства, определяющие цену деления S_k и период колебаний T_k коромысла:

$$S_k = \frac{Rcl}{aL}, \quad (3)$$

$$T_k = \pi \sqrt{\frac{J}{Rcg}} = \pi \sqrt{\frac{Rp^2}{Rcg}} = \pi \sqrt{\frac{p^2}{cg}}. \quad (4)$$

где p — радиус инерции коромысла.

Точность измерения массы на весах определяется средней квадратичной погрешностью ряда измерений, погрешностью гирь и зависит от метода взвешивания.

Если жесткость коромысла весов и креплений призм недостаточна, то под действием нагрузки, приложенной на чашке весов, коромысло будет прогибаться, а боковые призмы — смещаться вниз. При этом изменится величина просвета m между призмами и расстояние c от оси вращения коромысла до его центра тяжести. Это вызовет изменение метрологических характеристик весов и увеличит вариацию их показаний. Поэтому при конструировании весов рассчитывают необходимую жесткость коромысла при его минимальной массе. Высокоточные весы после изготовления исследуют и юстируют для придания им надлежащей чувствительности, обусловленной заданными значениями m и c . Если коромысло весов не имеет прогиба, то просвет между призмами при всех нагрузках, включая предельную допускаемую нагрузку, будет постоянным.

Поскольку параметры весов c и m , входящие в формулы (1—4), не могут быть определены прямыми измерениями, то их значения определяют косвенным путем, т. е. через периоды колебаний коромысла и весов при некоторой нагрузке.

В работе [3] показано, что при наличии прогиба коромысла цена деления шкалы равновесия коромысла с изменением нагрузки изменяется по параболе. Определение значений c и m по цене деления весов в этом случае сводится к решению системы трех уравнений с тремя неизвестными.

Поскольку точность определения цены деления весов мала, необходимо произвести ряд наблюдений при различных нагрузках, чтобы составить избыточную систему условных уравнений с тремя неизвестными и решить ее по способу наименьших квадратов. Ввиду трудоемкости решения системы уравнений способ определения значений c и m по цене деления не нашел практического применения.

Как известно, периоды колебаний коромысла и весов имеют хорошее постоянство. Поэтому их определение из большого числа колебаний может быть выполнено даже с помощью секундомера с достаточной точностью без каких-либо трудностей.

В связи с этим в 1939 году С. Д. Гидасповым [2] был разработан метод исследования и юстировки весов по периоду колебаний, основанный на предварительном определении момента инерции коромысла J при помощи крутильного маятника.

Зная момент инерции коромысла J , из формулы (4) после определения периода колебания коромысла T_k , можно определить расстояние c , а затем из формулы (2) по наблюдаемому периоду колебаний весов T_b при некоторой нагрузке определяется значение просвета m между призмами.

Для практического применения этого метода требуется изготовить крутильный маятник и установку для определения его периода колеба-

ний, специальное тело правильной геометрической формы, момент инерции которого может быть определен расчетным путем, при этом масса вспомогательного тела должна быть равна массе коромысла.

После определения периодов колебаний крутильного маятника, крутильного маятника со вспомогательным телом и, наконец, крутильного маятника с коромыслом весов вычисляется значение момента инерции коромысла J . После этого по наблюдаемому периоду колебаний коромысла T_k определяют значение c . По найденному значению c и наблюдаемому периоду колебаний весов T_0 при некоторой нагрузке $2P$ вычисляют значение m . Наблюдения на крутильном маятнике требуют не только большой затраты труда и времени, но и достаточно высокой квалификации наблюдателя. Поэтому предложенный С. Д. Гидасповым [2] метод исследования и юстировки весов по периоду колебаний, несмотря на его преимущества по точности, не вышел из рамок лабораторных исследований весов.

В связи с этим разработан новый более простой метод исследования и юстировки весов по периоду колебаний.

Коромысло весов с регулировочным грузиком для перемещения центра тяжести можно рассматривать как систему, состоящую из двух тел, центр тяжести которой определяется равенством:

$$\frac{rz_1 + Qz_2}{R} = z_0, \quad (5)$$

где r — масса грузика для изменения положения центра тяжести коромысла;

Q — масса коромысла без массы грузика r ;

R — общая масса коромысла;

z_1, z_2 — координаты центра тяжести масс r и Q ;

z_0 — координата центра тяжести системы двух тел.

Согласно работе [4], момент инерции коромысла J представлен равенством

$$J = J_Q + J_r + rz^2, \quad (6)$$

где J_Q — момент инерции без регулировочного грузика r относительно оси колебаний коромысла;

J_r — момент инерции регулировочного грузика r относительно оси, проходящей через его центр тяжести параллельно оси колебаний коромысла;

z — расстояние от центра тяжести грузика r до оси колебаний.

При размещении грузика r $J_Q + J_r = \text{const}$ и равенство (6) примет вид:

$$J = J_0 + rz^2, \quad (7)$$

где $J_0 = J_Q + J_r$.

Период колебания коромысла T_k , согласно формулам (4) и (7), будет

$$T_k = \pi \sqrt{\frac{J_0 + rz^2}{Rcg}}. \quad (8)$$

При двух положениях центра тяжести грузика r относительно оси колебаний коромысла периоды колебаний будут равны:

$$\left. \begin{aligned} T_{k1} &= \pi \sqrt{\frac{J_0 + rz_1^2}{Rc_1g}}, \\ T_{k2} &= \pi \sqrt{\frac{J_0 + rz_2^2}{R(c_1 - \Delta c)g}}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где c_1 — расстояние от центра тяжести коромысла до его оси колебаний, когда грузик r находится на расстоянии z_1 от оси колебаний коромысла;

Δc — перемещение центра тяжести коромысла относительно оси колебаний, соответствующее перемещению грузика r на величину $z_2 - z_1$.

Согласно формуле (5), Δc будет равно

$$\Delta c = \frac{r}{R} \Delta z = \frac{r}{R} (z_2 - z_1). \quad (10)$$

Из равенств (9) и (10) получим:

$$c_1 = \left(\frac{r}{R} \right) \left(\frac{z_2 - z_1}{T_{\kappa_2}^2 - T_{\kappa_1}^2} \right) \left[T_{\kappa_2}^2 + \frac{\pi^2}{g} (z_2 + z_1) \right]; \quad (11)$$

$$J_0 = \frac{g}{\pi^2} T_{\kappa_1}^2 R c_1 - r z_1^2. \quad (12)$$

Момент инерции коромысла весов J и расстояние c при расположении в коромысле регулировочного грузика r на любом расстоянии z от оси колебаний будут равны:

$$J = J_0 + r z^2; \quad (13)$$

$$c = c_1 - \frac{z}{R} (z - z_1). \quad (14)$$

Величина просвета m между призмами при найденных значениях J и c , согласно формуле (2) равна

$$m = \left(\frac{\pi^2}{g} \right) \left(\frac{J}{2P} + a^2 \right) \frac{1}{T_b^2} - \left(\frac{R}{2P} \right) c. \quad (15)$$

Если периоды колебаний коромысла и весов определены точно, то и значения c и m будут определены с достаточной для практических целей точностью. Если у коромысла масса регулировочного грузика r незначительна, то в равенстве (7) влияние члена $r z^2$ при малых z будет незначительным и им можно пренебречь. В этом случае из равенства (9), полагая $r z^2 = 0$, получим:

$$c_1 = \frac{T_{\kappa_2}^2}{T_{\kappa_2}^2 - T_{\kappa_1}^2} \Delta c = \left(\frac{r}{R} \right) \left(\frac{T_{\kappa_2}^2}{T_{\kappa_2}^2 - T_{\kappa_1}^2} \right) (z_2 - z_1). \quad (16)$$

$$\rho^2 = \frac{R}{\pi^2} T_{\kappa_1}^2 c_1; \quad J = R \rho^2.$$

Вышеизложенным методом были исследованы весы с равноплечим коромыслом, у которого $P = 801,05$ г, $r = 2,35$ г, $a = 25$ см.

Периоды колебаний коромысла при расположении в нем грузика r на расстоянии $z_1 = 2,34$ см и $z_2 = 7,82$ см оказались соответственно равными: $T_{\kappa_1} = 11,301$ сек; $T_{\kappa_2} = 45,525$ сек.

Из формул (11) и (12) получим: $c_1 = 171,33$ мм, $J_0 = 174 369,5$ г/см².

При вычислении этих значений по формулам (16) получим: $c_1 = 171,32$ мм, $\rho^2 = 217,68$ см², $J_0 = 174 373,6$ г/см².

Полученные результаты имеют хорошее согласие. Момент инерции коромысла J_0 определяли также и с помощью крутильного маятника по формуле:

$$J_0 = J_T \frac{T_2^2 - T_0^2}{T_1^2 - T_0^2}, \quad (17)$$

где J_T — момент инерции вспомогательного тела;
 T_0 — периоды колебания крутильного маятника;
 T_1 и T_2 — то же со вспомогательным телом и с коромыслом весов.
 В качестве вспомогательного тела, момент инерции которого определен расчетным путем, был изготовлен стальной брусок массой в 800 г в форме параллелепипеда.

Размеры бруска в плоскости, перпендикулярной оси колебаний крутильного маятника, 25×3 см.

Из наблюдений с крутильным маятником получены периоды колебаний, сек: $T_0 = 8,895$, $T_1 = 14,545$, $T_2 = 25,010$.

Момент инерции коромысла, вычисленный по формуле (17), равен $J_0 = 174\,375,4$ г/см². Сравнение значения J_0 с ранее полученным его значением по периодам колебаний коромысла указывает на достаточно хорошую точность определения момента инерции коромысла новым методом.

В коромысле весов грузик r был установлен на расстоянии $z = 6,02$ см от оси колебаний. Расстояние s от центра тяжести коромысла до его оси колебаний в этом случае согласно выражению (14) равно $s = 63,37$ мк.

Момент инерции коромысла J при $z = 6,02$ см² (согласно формуле (13), будет: $J = 174\,454,7$ см²).

Для исследования прогиба коромысла от нагрузок были определены периоды колебания весов при трех значениях нагрузок $2P$.

Результаты вычислений величины просвета t по формуле (15) приведены ниже:

Масса грузов $2P$, г	Период колебания T , сек	Просвет между призмами t , мкм
709,00	33,440	7,70
1748,95	44,367	7,98
2751,00	51,284	7,85

Анализ значений t позволяет сделать заключение о том, что коромысло весов при нагрузках массой до 2,7 кг не имеет прогиба, а результаты определения значений t имеют хорошую сходимость.

Выводы

Предлагаемая в статье новая методика исследования весов дает возможность по измеренным значениям двух периодов колебаний коромысла и одному периоду колебаний весов определить следующее: момент инерции коромысла относительно оси колебаний; расстояние от центра тяжести коромысла до его оси колебаний; величину просвета между призмами.

Поскольку искомые величины определяют путем элементарных вычислений по весьма простым формулам, то для проведения исследований весов по периоду колебаний не требуется большой затраты времени и высокой квалификации наблюдателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доброхотов А. Н. Рычажные весы, 2-ое изд. Каталогиздат НКОН СССР, М.—Л., 1939.
2. Гидаспов С. Д. Некоторые исследования в области точных весов. Масса, объем и плотность, ГОНТИ, 1939.
3. Смирнова Н. А. Исследование прогиба коромысла весов. «Труды институтов Комитета», вып. 62 (122), М., Издательство стандартов, 1962.
4. Торопин С. И. Дифференциальный физический маятник с одной системой призма—подушка. Исследования в области гравиметрических измерений. «Труды ВНИИМ», вып. 23 (83), Машгиз, 1954.

Поступила в редакцию
 27/1 1969 г.

Е. А. БАРКОВ

ВНИИМ

О ВЛИЯНИИ ЖЕСТКОСТИ КРЕПЛЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ

Параметры движения во многих случаях измеряют с помощью акселерометрических преобразователей, жесткость крепления которых к объекту измерения, как правило, не контролируется, а изменение динамических свойств преобразователей, вызванное их установкой на объект, не учитывается.

Для оценки влияния конечной жесткости крепления измерительного акселерометрического преобразователя на результат измерения необходимо найти эквивалентную механическую схему, учитывающую эту жесткость.

Представление измерительного преобразователя, закрепленного на объекте в виде системы с одной степенью свободы [1, 2] оказывается неудовлетворительным.

Высокочастотные акселерометрические преобразователи, для которых особенно нужен учет влияния жесткости крепления, обычно используют явление пьезоэффекта различных моно- и поликристаллических веществ, затухание которых весьма незначительно.

Рассмотрим в качестве следующего приближения систему с двумя степенями свободы, эквивалентная схема которой приведена на рис. 1. Инерционное тело преобразователя представлено на ней сосредоточенной массой m_1 ; корпус преобразователя — массой m_2 . Суммарная жесткость между пьезоэлементом и инерционным телом обозначена C_1 , жесткость крепления преобразователя к объекту — C_2 .

Реакцией акселерометрического преобразователя на входной сигнал $y(t)$ является перемещение X инерционного элемента относительно корпуса m_2 :

$$X = X_1 - X_2 \quad (1)$$

где X_1 и X_2 — смещения масс инерционного элемента и корпуса преобразователя относительно неподвижной системы координат.

Движение масс m_1 и m_2 описывается системой двух дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} m_2 \ddot{X}_2 + (C_1 + C_2) X_2 - C_1 X_1 &= -m_2 Y \\ m_1 \ddot{X}_1 + C_1 (X_1 - X_2) &= -m_1 Y. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для измерения вибрационных (периодических) и ударных ускорений рассмотрим решения системы уравнений (2) для случаев гармонического

и импульсного возбуждения, причем целью анализа поставим нахождение амплитудно-частотной характеристики преобразователя в первом случае и мгновенных значений выходного сигнала — во втором. Решение системы дифференциальных уравнений (2) и его анализ при гармоническом возбуждении $Y = Y_0 \sin \Omega t$ даны в работе [3]. Как следует из указанного решения, наличие конечной жесткости C_2 вызывает как амплитудные, так и фазовые искажения результатов измерения.

Для анализа амплитудных искажений обратимся к выражению (3), представляющему собой отношение измеренной акселерометрическим преобразователем амплитуды ускорения к действительному ее значению (коэффициент передачи или частотная характеристика системы):

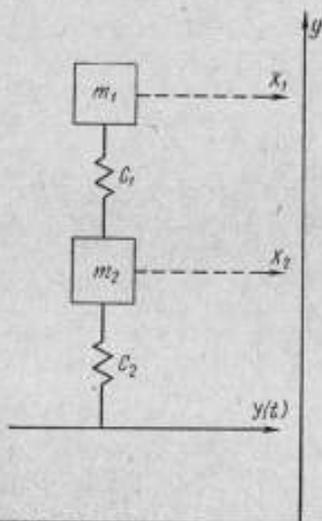


Рис. 1. Эквивалентная схема акселерометрического преобразователя.

$$S = \frac{\frac{C_2}{C_1}}{\frac{m_2}{m_1} \frac{\Omega^2}{\omega_0^2} - \left(1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{m_2}{m_1}\right) \frac{\Omega^2}{\omega_0^2} + \frac{C_2}{C_1}} \quad (3)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{C_1}{m_1}}$ — парциальная собственная частота системы $C_1; m_1$.

Из выражения (3) следует, что для существующих конструкций преобразователей коэффициент передачи акселерометрического преобразователя должен быть больше 1; при одном и том же значении $\frac{\Omega}{\omega_0}$ коэффициент передачи тем больше отклоняется от 1, чем меньше отношение $\frac{C_2}{C_1}$ и больше $\frac{m_2}{m_1}$.

Коэффициент передачи преобразователя как функция частоты вынуждающих колебаний имеет два разрыва непрерывности, соответствующие двум собственным частотам системы:

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{C_2}{m_2} + \frac{C_1}{m_2} + \frac{C_1}{m_1} \right)} \mp \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{C_2}{m_2} + \frac{C_1}{m_2} + \frac{C_1}{m_1} \right)^2 - \frac{C_1 C_2}{m_1 m_2}} \quad (4)$$

Значение низшей собственной частоты ω_1 всегда меньше собственной частоты любой из парциальных одномассовых систем m_1, C_1 и m_2, C_2 , т. е. при конечной жесткости крепления преобразователя его рабочий частотный диапазон сокращается.

При C_2 , стремящейся к бесконечности, выражение (3) представляет собой коэффициент передачи системы с одной степенью свободы (кривая 1 на рис. 2—4). Предельной жесткости крепления преобразователя соответствует кривая 2, относительно которой можно оценить подъем частотной характеристики преобразователя, соответствующий верхней рабочей частоте при действительной жесткости его крепления.

Перейдем к количественной оценке влияния жесткости крепления измерительного акселерометрического преобразователя на результат измерения, для чего рассмотрим три типа преобразователей: ВП-1 (крепление с помощью конической резьбы); ВП-2 (с цилиндрической резьбой); ИС-313 (приклеиваемый).

Каждая из жесткостей C_1 и C_2 общей схемы (рис. 1) определяется рядом последовательно соединенных контактных жесткостей и жесткостей сплошных тел.

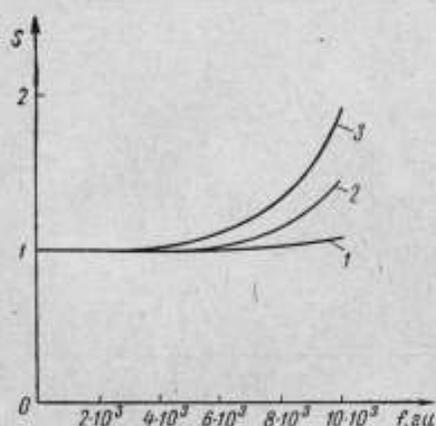


Рис. 2. Расчетная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) акселерометрического преобразователя ВП-1:

1 — с абсолютно жестким креплением ($C_2 \rightarrow \infty$); 2, 3 — закрепленного с моментом затяжки 30 нм (C_2 макс) и 9 нм (C_2 мин) соответственно.

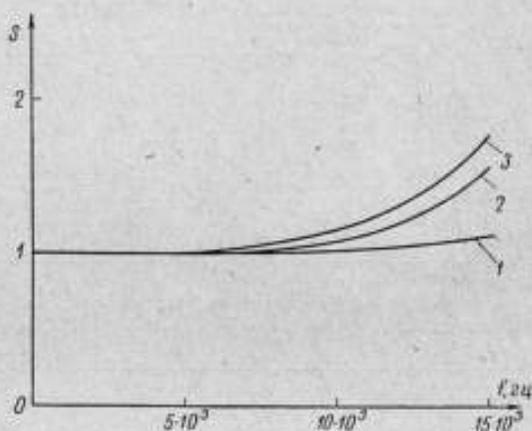


Рис. 3. Расчетная амплитудно-частотная характеристика акселерометрического преобразователя ВП-2:

1 — с абсолютно жестким креплением ($C_2 \rightarrow \infty$); 2, 3 — закрепленного с моментом затяжки 180 нм (C_2 макс) и 54 нм (C_2 мин) соответственно.

Контактные жесткости рассчитывались в соответствии с данными работы [4], жесткость соединения с помощью конической резьбы — согласно работе [5], жесткости сплошных тел определялись по закону Гука.

Изменение жесткости крепления акселерометрических преобразователей ВП-1 и ВП-2 вызвано различием вращающего момента при их закреплении, достигающим 75% [6].

Для преобразователя ВП-1 изменение момента от 9 до 30 нм вызывает колебания усилия поджатия корпуса преобразователя к поверхности объекта от 3100 до 10 300 н и соответствующее изменение контактных жесткостей. Изменения жесткости крепления акселерометрического преобразователя ИС-313 возникают вследствие колебаний толщины клеевого слоя в пределах от 0,03 до 0,25 мм [7].

Результаты расчета жесткостей C_1 и C_2 по конструктивным данным преобразователей сведены в табл. 1.

Амплитудно-частотные характеристики акселерометрических преобразователей рассчитывали по формуле (3) для значений $C_{2\text{ макс}}$ и $C_{2\text{ мин}}$.

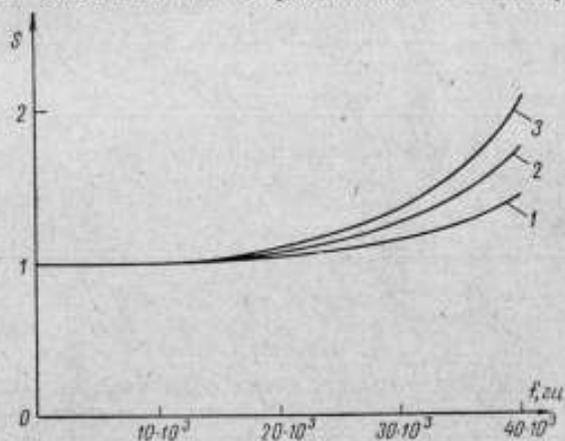


Рис. 4. Расчетная амплитудно-частотная характеристика акселерометрического преобразователя ИС-313:

1 — с абсолютно жестким креплением ($C_2 \rightarrow \infty$); 2, 3 — закрепленного эпоксидным компаундом с толщиной слоя 30 и 100 мкм соответственно.

Таблица 1

Расчетные значения жесткостей C_1 и C_2

Конструктивные данные преобразователей	Типы акселерометрических преобразователей			
	ВП-1	ВП-2	ИС-313	
Составляющие жесткости C_1 , н/м:	C_{11}	$2,15 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^9$	10^{10}
	C_{12}	$2,15 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^9$	10^{10}
	C_{13}	$2,15 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^9$	10^{10}
	C_{14}	$1,05 \cdot 10^9$	$1,55 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^9$
	C_{15}	$3,2 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^9$
	C_{16}	—	—	$5 \cdot 10^9$
Жесткость соединения инерционного элемента с корпусом C_1 , н/м	$4,5 \cdot 10^9$	$6,0 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^{10}$	
Составляющие жесткости C_2 , н/м:	C_{21}	$3,2 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^9$
	$C_{2макс}$	$0,74 \cdot 10^9$	$5,6 \cdot 10^9$	$2,6 \cdot 10^{10}$
	$C_{2мин}$	$0,42 \cdot 10^9$	$2,2 \cdot 10^9$	$7,9 \cdot 10^9$
Жесткость соединения акселерометрического преобразователя с объектом измерения C_2 , н/м:				
$C_{2макс}$	$6 \cdot 10^9$	$2,6 \cdot 10^9$	$6,7 \cdot 10^9$	
$C_{2мин}$	$3,7 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$4,2 \cdot 10^9$	
Масса инерционного элемента m_1 , кг	10^{-2}	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	
Масса корпуса акселерометрического преобразователя m_2 , кг	$3 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}	
Парциальная частота системы m_1, C_1 , кгц	34	31	72	
Нижняя собственная частота двухмассовой системы $c_1, m_1, c_2, m_2 - f_1$, кгц:	$f_{1макс}$	18,6	27,4	64,5
	$f_{1мин}$	14,8	24,7	60,5
Верхняя рабочая частота, кгц	10	15	40	

По данным расчетов построены графики (рис. 2—4), из которых видно, что при расчетном изменении жесткости закрепления преобразователя относительный подъем частотной характеристики в точке, соответствующей верхней рабочей частоте, изменяется соответственно для преобразователей: ВП-1 от 1,49 до 1,95; ВП-2 — от 1,15 до 1,22; ИС — 313 от 1,78 до 2,06. Для всех рассмотренных акселерометрических преобразователей подъем частотной характеристики в рабочем диапазоне частот превышает 1 дБ.

Уменьшение этой составляющей погрешности измерения вибрации и удара может быть достигнуто введением цепей динамической коррекции в усилителе пьезоэлемента, с которым работает данный преобразователь. Так, частотная характеристика усилителя 7007 [8] для компенсации динамических искажений, вносимых преобразователем ВП-1, соответ-

ствует закону, обратному функции, определяющей первый подъем амплитудно-частотной характеристики преобразователя при $C_2 = C_{2\text{мин}}$.

Влияние жесткости крепления акселерометрического преобразователя к объекту измерения на точность воспроизведения импульсных ускорений зависит от формы и длительности импульса. Так, случай полусинусоидального импульса рассмотрен в работе [9], где показано, что погрешность воспроизведения амплитуды импульса ускорения акселерометрическим преобразователем не превышает 10% в случае, если

$$25\Omega > 5\omega_{20} > \omega_{10}, \quad (5)$$

где Ω — эквивалентная частота входного сигнала длительностью

$$T_n; \quad \Omega = \frac{2\pi}{T_n};$$

ω_{20}, ω_{10} — парциальные частоты систем m_2, C_2 и m_1, C_1 .

Для распространенного случая соударения двух тел со сферическими поверхностями ударное ускорение имеет вид смещенной косинусоиды (кривая 1 на рис. 5—7)

$$J(t) = \begin{cases} A \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T_n} t \right) & \text{при } 0 \leq t \leq T_n, \\ 0 & \text{при } t > T_n. \end{cases}$$

Рассмотрим этот случай. Подставляя аналитическое выражение входного сигнала $Y(t)$ в правую часть дифференциальных уравнений (2), найдем перемещение X инерционного тела относительно корпуса, представляющее собой реакцию акселерометрического преобразователя на входной сигнал $Y(t)$.

За время действия входного импульса $t \leq T_n$ акселерометрический преобразователь воспроизведет кривую, описываемую выражением

$$S = b_1(\sigma_1 - 1) \cos \omega_1 t + b_2(\sigma_2 - 1) \cos \omega_2 t + \\ + A \frac{\frac{C_2}{m_2}}{(\Omega^2 - \omega_1^2)(\Omega^2 - \omega_2^2)} \cos \Omega t - A \frac{m_1}{C_1}, \quad (6)$$

где

$$b_1 = \frac{A}{\sigma_1 - \sigma_2} \left[\frac{m_1 + m_2}{C_2} (\sigma_2 - 1) - \frac{m_1}{C_1} + \frac{\left(\Omega^2 - \frac{C_1}{m_1} - \frac{C_1}{m_2} \right) (\sigma_2 - 1) + \frac{C_2}{m_2}}{(\Omega^2 - \omega_1^2)(\Omega^2 - \omega_2^2)} \right];$$

$$b_2 = \frac{A}{\sigma_1 - \sigma_2} \left[\frac{m_1 + m_2}{C_2} (\sigma_1 - 1) - \frac{m_1}{C_1} + \frac{\left(\Omega^2 - \frac{C_1}{m_1} - \frac{C_1}{m_2} \right) (\sigma_1 - 1) + \frac{C_2}{m_2}}{(\Omega^2 - \omega_1^2)(\Omega^2 - \omega_2^2)} \right];$$

$$\sigma_1 = -\omega_1^2 \frac{m_2}{C_1} + \frac{C_2}{C_1} + 1;$$

$$\sigma_2 = -\omega_2^2 \frac{m_2}{C_1} + \frac{C_2}{C_1} + 1.$$

Значения собственных частот ω_1 и ω_2 соответствуют уравнению (4).

Для входных импульсов малой длительности представляет интерес их воспроизведение акселерометрическим преобразователем и после окончания действия входного сигнала, т. е. с момента времени $t > T_n$:

$$S = B_1(\sigma_1 - 1) \sin(\omega_1 t + \varepsilon_1) + B_2(\sigma_2 - 1) \sin(\omega_2 t + \varepsilon_2), \quad (7)$$

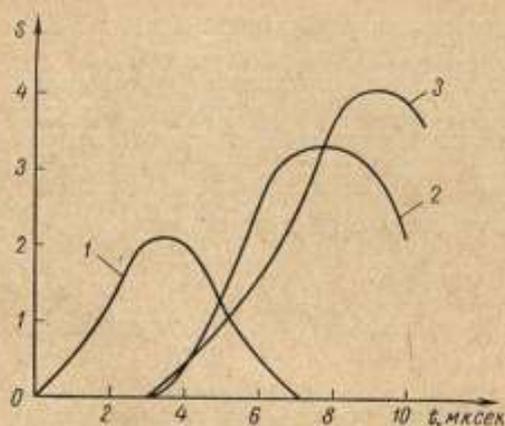


Рис. 5. Расчетная реакция преобразователя ИС-313 на воздействие импульса ускорения при $\frac{T_n}{T_0} = 0,5$:

1 — входной сигнал $Y(t) = A \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T_n} t\right)$ при $0 \leq t \leq T_n$; 2, 3 — реакция преобразователя, закрепленного эпоксидным компаундом с толщиной слоя 30 и 100 мкм соответственно.

Рис. 6. Расчетная реакция преобразователя ИС-313 на воздействие импульса ускорения при $\frac{T_n}{T_0} = 1,7$.

1 — входной сигнал $Y(t) = A \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T_n} t\right)$ при $0 \leq t \leq T_n$; 2, 3 — реакция преобразователя, закрепленного эпоксидным компаундом с толщиной слоя 30 и 100 мкм соответственно.

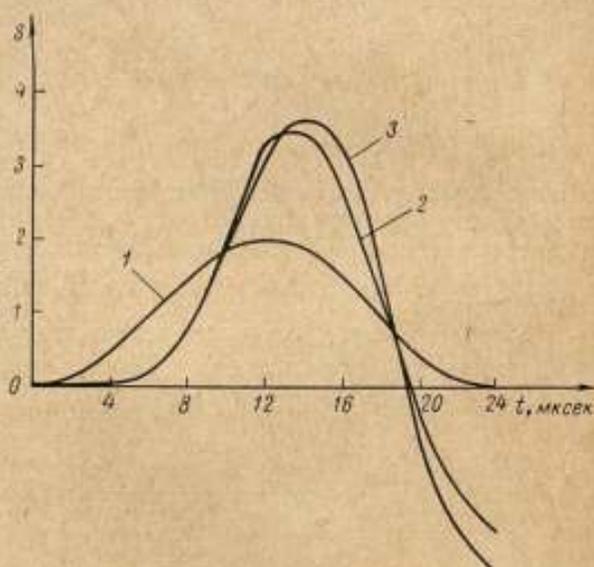
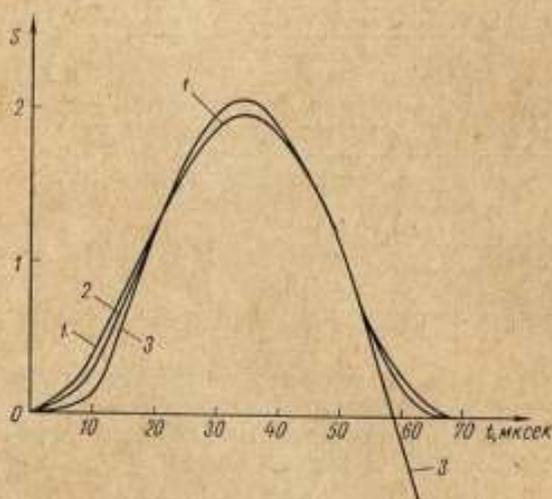


Рис. 7. Расчетная реакция преобразователя ИС-313 на воздействие импульса ускорения при $\frac{T_n}{T_0} = 5$:

1 — входной сигнал $Y(t) = A \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T_n} t\right)$ при $0 \leq t \leq T_n$; 2, 3 — реакция преобразователя, закрепленного эпоксидным компаундом с толщиной слоя 30 и 100 мкм.



где

$$B_1 = b_1 \left[\sin \varepsilon_1 - \sin \left(2\pi \frac{\omega_1}{\Omega} + \varepsilon_1 \right) \right];$$

$$B_2 = b_2 \left[\sin \varepsilon_2 - \sin \left(2\pi \frac{\omega_2}{\Omega} + \varepsilon_2 \right) \right];$$

$$\varepsilon_1 = \pi \left(1 - \frac{\omega_1}{\pi} \right); \quad \varepsilon_2 = \pi \left(1 - \frac{\omega_2}{\pi} \right).$$

Из выражений (6) и (7) следует, что выходной сигнал преобразователя будет отличаться от входного как по амплитуде, так и по длительности.

При C_2 , стремящейся к бесконечности, выражения (6) и (7) представляют собой реакцию системы с одной степенью свободы. Предельной жесткости крепления преобразователя соответствует кривая 2 на рис. 5, 6, 7. Ее максимальное значение A_{M2} равно моменту времени t_{M2} .

Погрешность воспроизведения максимального значения импульсного ускорения в результате изменения жесткости крепления преобразователя может быть определена по формуле

$$\delta A_M = \frac{A_{M1} - A_{M2}}{A_{M2}}, \quad (8)$$

где A_{M1} — максимальное значение реакции преобразователя, соответствующее моменту времени t_{M1} , при жесткости крепления преобразователя, меньшей $C_{2\text{макс}}$.

Запаздывание максимумов ускорения определяется аналогично

$$\delta t_M = \frac{t_{M1} - t_{M2}}{t_{M2}}. \quad (9)$$

Количественная оценка влияния жесткости крепления акселерометрического преобразователя на результат измерения импульсного ускорения была проведена для высокочастотного преобразователя ИС-313 при трех значениях отношения T_H/T_0 длительности импульса к периоду собственных колебаний парциальной системы $C_1; m_1$.

По данным расчетов построены графики (рис. 5—7). В табл. 2 приведены значения погрешностей воспроизведения максимального значения импульса и его запаздывания, определенные из соотношений (8) и (9).

Таблица 2

Погрешности воспроизведения максимального значения импульса и запаздывание его максимума

$\frac{T_H}{T_0}$	$\delta A_M, \%$	$\delta t_M, \%$
0,5	21	18
1,7	6,1	7,4
5	1,5	1,2

Как следует из табл. 2, только при $\frac{T_H}{T_0} \geq 5$ или при $\omega_{20} \geq \omega_{10} \geq 5\Omega$ погрешность воспроизведения максимального значения импульса не превышает 1,5%, а запаздывание максимума ускорения меньше 1,2% при изменении жесткости крепления акселерометра от $C_{2\text{мин}}$ до $C_{2\text{макс}}$.

Непостоянство условий крепления пьезоакселерометрических преобразователей к объекту при измерении высокочастотных вибраций является источником значительной дополнительной погрешности, достигающей 30%. В режиме измерения ударных процессов искажение амплитуды действующего импульса по той же причине может превышать 20%, а искажение времени достижения максимума — 18%.

Полученные данные говорят о необходимости нормирования и контроля моментов затяжки акселерометрических преобразователей типа ВП-1, ВП-2. Погрешность определения моментов затяжки должна быть не выше 15%.

Контроль получения стабильной клеевой прослойки при креплении преобразователя типа ИС-313 может быть выполнен путем измерения емкости между корпусом преобразователя и поверхностью объекта измерения. Значение жесткости клея можно определить по справочным данным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новицкий П. В. Виброизмерения, Л., ч. II, «Машиностроение», 1960.
2. Reppington D. Instruments and Control systems, XII, V. 35, № 12, 1962.
3. Иорш Ю. И. Виброметрия. М., «Машиностроение», 1963.
4. Рыжов Э. В. Контактная жесткость деталей машин. М., «Машиностроение», 1966.
5. Гаюн В. В., Гусев О. П. Виброметрия, ч. 1, Л., Дом научно-технической пропаганды, 1967.
6. Новиков М. П. Основы технологии сборки машин и механизмов, М., Машгиз, 1962.
7. Кардашов Д. А. Синтетические клеи. М., «Химия», 1965.
8. Пеллинец В. С., Серпухова А. Е. О расчете усилителей пьезоэлектриков, «Автоматика», М., «Наука», № 4, 1966.
9. Stathopoulos G., Electronics Industries. V. 21, N 5, 1962.

Поступила в редакцию
17/XII 1968 г.

А. Ф. БОРДИЛОВСКИЙ

ВНИИМ

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ
АМПЛИТУДЫ ВИБРАЦИЙ

Анализ различных методов показывает, что прямые измерения малых амплитуд вибраций (меньше 5 мкм) производят при помощи интерферометра [1—3]. Погрешность измерения в этих случаях обычно составляет 1—5%. Для амплитуд свыше 10 мкм применяют измерительный микроскоп, абсолютная погрешность у которого не менее 1 мкм.

Ниже приведена таблица, характеризующая возможности измерения вибраций методами, получившими наибольшее распространение.

Таблица

Интерференционные методы измерения амплитуды вибраций	Диапазон измеряемых амплитуд, мкм	Относительная погрешность измерения амплитуды вибраций, %
Исчезновение интерференционных полос [4]	0,1—1,3	1,5—5
Стробоскопическая интерференция [5]	1—5	10—3
Фотоэлектрическая регистрация с последующей фильтрацией по частоте вибраций [6]	0,008—0,1	5—10
Фотоэлектрическая регистрация с модулирующим зеркалом [7]	0,1—1,3	1—2
Фотоэлектрическая регистрация с последующим осциллографированием [8]	0,15—0,5	1—2
Измерительный микроскоп	10—1000	10—0,1

Из приведенной таблицы видно, что в диапазоне от 5 до 20 мкм погрешность измерения составляет 5—20%.

Следует отметить, что погрешность измерительного микроскопа очень трудно уменьшить, поскольку применение объективов с большим увеличением практически ничего не дает, так как при этом соответственно повышаются требования к окуляр-микрометру, оптической щели, юстировке микроскопа [3]. Попытка применить стробоскопическое освещение не привела к значительным результатам [9].

Устранить указанный выше недостаток позволяет метод измерения амплитуды вибраций путем однонаправленного счета числа интерференционных полос, у которого диапазон измеряемых амплитуд такой же, как у измерительного микроскопа, а погрешность на порядок меньше [10].

Метод однонаправленного счета числа интерференционных полос

В ряде работ [6, 7, 11] для измерения амплитуды вибраций применяется двухлучевой интерферометр Майкельсона с монохроматическим источником света. Одно из зеркал интерферометра неподвижно, а другое жестко связано с вибратором. Интерференционную картину проектируют на щель, расположенную параллельно полосам. Ширина щели выбрана таким образом, чтобы через нее одновременно проходил свет только от одной полосы. Фотоэлектрический преобразователь, расположенный после щели, регистрирует фототок, пропорциональный освещенности.

Это устройство может быть применено и в данном методе, но в отличие от известных методов амплитуды вибраций измеряют посредством одно-

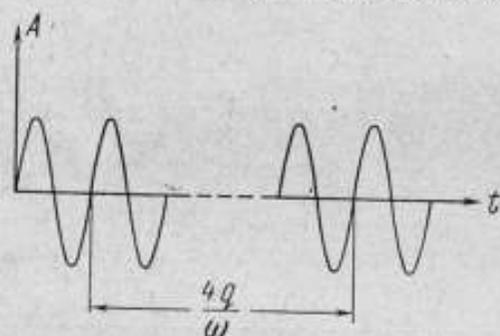


Рис. 1. Устранение влияния переходных процессов пуска и остановки счетчика числа интерференционных полос на погрешность измерения.

направленного счета числа интерференционных полос, прошедших через щель в течение четверти периода колебания [10]. За это время амплитуда вибраций по абсолютной величине изменяется от нуля до максимального значения, или наоборот. Счет числа полос можно производить автоматически при помощи устройств, обеспечивающих достаточное быстродействие, например электронных счетчиков. Необходимо также устройство для точной фиксации начала и остановки счета. Следует отметить, что при измерении амплитуды вибраций подобное устройство может вносить большую систематическую погрешность, связанную с неточной фиксацией момента начала и остановки счета. Для того чтобы повысить точность измерения амплитуды вибраций, устранить систематические погрешности, которые могут внести фиксирующие устройства, необходимо измерять не отдельно взятую амплитуду, а среднее значение амплитуды вибраций, полученное в результате суммирования ряда амплитуд с последующим делением суммы на число слагаемых.

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^q A_i}{q},$$

где A_i — амплитуда вибраций;

q — число суммируемых амплитуд.

В этом случае влияние неточности установки начала и окончания счета уменьшается в q раз (рис. 1). Таким образом, для осуществления метода необходимо задать промежуток времени, равный целому числу периодов, в течение которого необходимо сосчитать количество интерференционных полос, прошедших через щель.

При смещении зеркала, жестко связанного с вибратором, на расстояние, равное половине длины волны монохроматического света, полосы в двухлучевом интерферометре сместятся на один порядок.

Для среднего значения амплитуды вибраций \bar{A} можно написать:

$$\bar{A} = \frac{N\lambda}{8n}, \quad (1)$$

где N — число полос, зарегистрированных счетчиком за n периодов колебаний;

λ — длина волны монохроматического источника света.

1. Быстродействие. Этот метод по сравнению с другими интерференционными методами имеет очень высокую производительность. Например: на частоте 100 гц в течение 1 сек можно измерить 400 амплитуд, на частоте 1000 гц — 4000 амплитуд и т. д.

2. Полная автоматизация процесса измерения. Возможность полной автоматизации процесса измерения позволяет не только увеличить производительность труда, но и повысить точность измерений, устранить влияние субъективных обстоятельств. Можно полностью автоматизировать измерительный процесс без применения дорогостоящих универсальных электронно-вычислительных машин. При вычислении среднего значения амплитуды вибраций по формуле (1), $\frac{\lambda}{8n} = \text{const}$, так как n задается точно. Поэтому всегда можно выбрать n таким, чтобы равенство $\frac{\lambda}{8n} \approx 10^{-k}$ ($k = 1, 2, 3 \dots$) выполнялось с необходимой степенью точности. Для среднего значения амплитуды вибраций имеем $\bar{A} = 10^{-k}N$.

Полученные результаты могут быть записаны автоматически при помощи цифропечатающих машин и выведены для визуальных наблюдений, например на цифровых лампах.

Пример. Источник света — зеленая линия Hg^{188} , $\lambda = 0,5461$ мкм, если $n = 6826$, то $\bar{A} \approx 10^{-5}N$ с погрешностью $2 \cdot 10^{-5}$.

3. Низкая чувствительность к изменению температуры окружающей среды.

Если интерференционное устройство не термостатировано, оно неизбежно подвергается действию теплового дрейфа, в результате чего интерференционные полосы с течением времени смещаются относительно щели. В зависимости от местных условий скорость дрейфа обычно составляет $0,01 \div 0,2 \frac{\text{полос}}{\text{сек}}$ [5, 8]. Влияние дрейфа можно значительно уменьшить, сократив до минимума время измерений. Высокая производительность метода однонаправленного счета числа интерференционных полос позволяет выбрать время измерений порядка одной секунды. Уже этого достаточно для того, чтобы влиянием теплового дрейфа можно было пренебречь, но это влияние дополнительно уменьшается в $2n$ раз, поскольку амплитуды вибраций измеряются непрерывно как при прямом, так и при обратном перемещении вибратора.

Выбор вибратора

Возможности данного метода в значительной степени зависят от формы колебаний, поэтому необходимо тщательно подобрать вибратор, воспроизводящий колебания, в максимальной степени приближающиеся к гармоническим. Ниже будет показано, что в ряде случаев форма колебаний может отличаться от гармонической, однако при градуировке и поверке акселерометров влияние гармоник приводит к большим погрешностям. Введение поправки на гармонические составляющие сопряжено с рядом

трудностей и лишь частично уменьшает погрешность. Поэтому требование гармоничности колебаний вибратора — существенное условие проведения точных измерений параметров вибраций.

Не менее важное требование — отсутствие поперечных составляющих колебаний. Зеркало интерферометра, жестко связанное с подвижной частью вибратора, должно совершать поступательное движение с одной степенью свободы в направлении луча света, падающего на зеркало со светоделительных пластин интерферометра. Максимальное угловое смещение под действием собственных крутильных колебаний должно составлять не более 10—20 угловых секунд. По этой причине некоторые резонансные вибраторы (такие как камертон, поперечно колеблющаяся балка и др.) в данном случае не могут быть применены, несмотря на то, что форма колебаний у них в значительной степени приближается к гармонической.

Примером вибратора, удовлетворяющего поставленным выше требованиям, может быть упругий стержень, в котором возбуждены продольные колебания. Стержневой вибратор с электродинамическим возбуждением типа В-1000 разработан во ВНИИМ [12]. Амплитуды вибраций измерялись интерферометром Майкельсона методами стробоскопической интерференции и исчезновения интерференционных полос [5].

Значительные трудности, связанные с воспроизведением больших амплитуд вибраций, — недостаток стержневых вибраторов. Поэтому во ВНИИМ в течение ряда лет велись разработки электродинамических вибраторов для воспроизведения однокомпонентных колебаний. Были разработаны вибрационные установки типа ВС-300П, ОВУ-1, ОИВУ-2, у которых поперечная составляющая колебаний в диапазоне воспроизводимых частот менее 1% [12, 13], и они могут быть применены при измерении амплитуды вибраций методом однонаправленного счета числа интерференционных полос.

Полоса пропускания фотоэлектрического тракта

Для метода однонаправленного счета числа интерференционных полос характерно значительное изменение скорости прохождения полос через щель в течение одного периода колебаний, поэтому полоса пропускания является важной характеристикой метода, так как выбор ее сильно влияет на правильность измерения. Так, при недостаточно широкой полосе пропускания может возникнуть существенная ошибка при подсчете регистрируемых полос. В свою очередь, слишком широкая полоса пропускания может настолько повысить уровень шумов, что подсчет полос окажется невозможным. Максимальная граничная частота зависит от скорости прохождения интерференционных полос через щель в момент, когда смещение подвижного зеркала интерферометра равно нулю. Верхнюю граничную частоту проще всего характеризовать промежутком времени Δt , в течение которого происходит смещение интерференционных полос на один порядок.

Если

$$\lambda \ll A, \text{ то } \Delta t = \frac{\lambda}{4\lambda f},$$

где f — частота вибраций, $гц$.

Правильный выбор нижней частоты полосы пропускания позволяет уменьшить полосу пропускания и упростить фотоэлектрический усилитель, что дает возможность измерять амплитуды вибраций в инфразвуковом диапазоне частот без применения усилителя постоянного тока.

Необходимо обратить внимание на следующее обстоятельство: результат измерения амплитуды вибраций методом однонаправленного счета числа интерференционных полос всегда меньше амплитуды вибраций на $\frac{\Delta p \lambda}{2}$, где $0 < \Delta p < 1$.

Очевидно при $\Delta p \rightarrow 1$ наблюдается максимальный промежуток времени между счетными импульсами.

Амплитуда, измеренная счетчиком числа интерференционных полос за четверть периода, представляет собой:

$$\frac{p\lambda}{2} = A \sin \omega t_1 \quad (2)$$

в то время как действительное значение амплитуды вибраций (рис. 2) равно:

$$\frac{(p + \Delta p)\lambda}{2} = A \sin \omega t_2, \quad (3)$$

$$\frac{p\lambda}{2} = A - \frac{\Delta p \lambda}{2}, \quad (4)$$

где $\omega t_2 = \frac{\pi}{2}$ (ω — частота первой гармоники);
 p — число целых порядков интерференции, удовлетворяющее равенству (4).

После преобразования имеем:

$$\Delta t_{\max} = 2(t_2 - t_1) < \frac{\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{p}{p+1}}{\omega}.$$

где $f = \frac{\omega}{2\pi}$.

При $p \gg 1$

$$\Delta t \approx \frac{1}{\pi p f}. \quad (5)$$

Таким образом, в предельном случае при $p = 1$ нижняя граничная частота полосы пропускания в 3 раза выше частоты вибраций. При измерении амплитуды вибраций в инфразвуковом диапазоне частот в подавляющем большинстве случаев условие (5) хорошо выполняется. Это обстоятельство дает возможность при измерении амплитуды вибраций диапазона инфранизких частот применять более простые и надежные в работе усилители диапазона звуковых частот. Числовая подстановка показывает, что для измерения амплитуд вибраций порядка десятых долей миллиметра при ускорении до 100 м/сек^2 необходима полоса пропускания фотоэлектрического тракта около 10^6 гц .

Источник света

Требования к монохроматическому источнику света для интерференционных измерений длины изложены в рекомендации международного бюро мер и весов (МБМВ). Такие источники изготовлены и применяются во ВНИИМ в лабораториях измерения длины. В результате экспериментальных исследований источников света было установлено, что световой

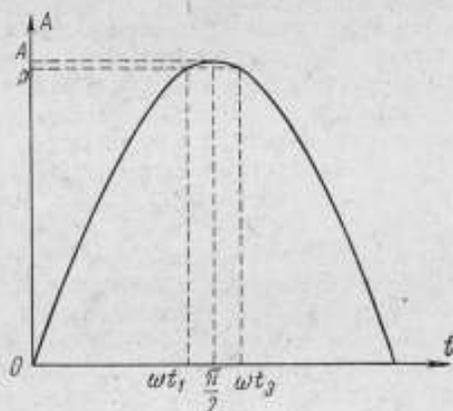


Рис. 2. Выбор нижней частоты полосы пропускания фотоэлектрического тракта.

поток, попадающий на фотоэлектрический преобразователь, составляет 10^{-9} лм, а полоса пропускания не может быть выбрана шире 1000 гц из-за высокого уровня шумов [14].

При измерении амплитуды вибраций требования к уровню шумов менее строгие, чем в случае измерений фотоэлектрическими методами штриховых мер длины. Можно допустить, например, искажений шумами фронтов счетных импульсов, что дает возможность без увеличения светового потока дополнительно расширить полосу пропускания в 2—3 раза. Однако при расширении полосы пропускания с 10^3 до 10^6 гц уровень шумов возрастет в 10^3 раз. Это означает, что для сохранения той же точности измерений необходимо увеличить световой поток источника монохроматического света в 10^3 раз. Изготовить такой источник практически невозможно; при измерении амплитуды вибраций в этом нет необходимости. При соблюдении рекомендуемых условий длина волны излучения зеленой линии Hg^{198} известна с погрешностью $5 \cdot 10^{-8}$, в то время как для измерения амплитуды вибраций с наименьшей погрешностью 0,1% достаточно знать длину волны с точностью до единицы четвертого знака. Это открывает возможность применять в качестве источника монохроматического света высокотемпературные ртутные лампы высокого давления, у которых световой поток в $10^3 \div 10^4$ раз больше, чем у ламп, применяемых при интерференционных измерениях мер длины.

Измерение амплитуды вибраций в случае искажения гармонической формы колебаний

Метод однонаправленного счета числа интерференционных полос применим, главным образом, для измерения амплитуды вибраций гармонической формы. Отступление от этого правила может привести к значительным погрешностям в результатах измерения. На рис. 3 представлен график сложного колебания, в состав которого входят первая и седьмая гармоники. Экстремумы в точках 1 и 3, вызванные 7-й гармоникой, изменяют направление движения вибратора. Такие изменения не может учесть метод однонаправленного счета числа интерференционных полос.



Рис. 3. Влияние гармонических составляющих на погрешность измерения амплитуды вибраций.

A_1 — амплитуда, измеренная счетчиком. A_2 , A_3 — амплитуды сложного колебания и первой гармоники.

му кривой колебаний. Это ограничение амплитуды высших гармоник должны быть настолько малыми, чтобы график движения не содержал дополнительных экстремумов (вида точек 1 и 3 на рис. 3).

Дополнительные экстремумы будут отсутствовать при условиях:

$$F'(t) \geq 0; \left(-\frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2}\right); \quad (6)$$

$$F'(t) \leq 0; \left(\frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \frac{3\pi}{2}\right); \quad (7)$$

где $X = F(t)$ — уравнение движения вибратора.

Рассмотрим колебания, близкие по форме к гармоническим. $F(t)$ может быть представлено рядом Фурье. Члены ряда ограничены, а $F(t)$ — непрерывна при любом t , поэтому ряд может быть почленно продифференцирован:

$$F(t) = A_1 \sin \omega t + \sum_{m=2}^{\infty} A_m \sin(m\omega t + \varphi_m),$$

где m — номер гармоники,

φ_m — фазовый сдвиг между первой и m -й гармониками.

Условия (6.7) можно представить неравенством:

$$\left| \sum_{m=2}^{\infty} mA_m \cos(m\omega t + \varphi_m) \right| \leq |A_1 \cos \omega t|.$$

Таким образом, для решения вопроса о влиянии гармонических составляющих на форму графика колебаний и возможности применения метода однонаправленного счета числа интерференционных полос необходимо провести гармонический анализ с учетом фазовых соотношений между гармониками.

Возможности повышения точности измерений

Выше было показано, что для метода однонаправленного счета числа интерференционных полос характерна систематическая погрешность измерения амплитуды вибраций ΔA , которая не может быть больше дискретной счетной единицы длины $\frac{\lambda}{2}$ (для зеленой линии Hg^{198} $0 < \Delta A < 0,273$ мкм). При измерении достаточно больших амплитуд вибраций такую погрешность можно считать пренебрежимо малой. Однако при измерении малых амплитуд вибраций метод однонаправленного счета числа интерференционных полос может значительно уступать другим интерференционным методам.

Задача измерения дробных порядков интерференции впервые возникла при интерференционных измерениях длины, но найденные решения непригодны для измерения амплитуды вибраций [14, 15, 16]. Методы, основанные на умножении частоты счетных импульсов с последующей фильтрацией гармоник, также неприемлемы ввиду того, что форма сигнала на выходе фотоэлектрического преобразователя представляет собой синусоиду, у которой частота изменяется по гармоническому закону от ω_{\min} до ω_{\max} два раза за период колебания вибратора.

Можно значительно уменьшить погрешность измерения, заменив двухлучевой интерферометр Майкельсона на многолучевой интерферометр Фабри и Перо. При этом сократится диапазон измеряемых амплитуд, но основная трудность состоит в том, что интерферометр Фабри и Перо требует почти полного отсутствия составляющих колебаний, перпендикулярных к основному направлению. Осуществить это требование на вибраторах электродинамического типа практически невозможно.

Уменьшить погрешность измерения амплитуды вибраций в два раза можно путем удвоения числа счетных импульсов. Применение такого метода возможно, потому что удвоение не требует последующей фильтрации. Существует и другая возможность дополнительно уменьшить погрешность измерения амплитуды вибраций в два раза. Для этого счетные импульсы после удвоения надо пропустить через интегральный дискриминатор, уровень срабатывания которого должен составлять около половины напряжения счетного импульса.

Таким образом, дискриминатор пропустит на вход электронного счетчика импульсы, у которых амплитуда напряжения больше половины максимально возможного напряжения счетного импульса U_{\max} , и задержит импульсы меньше $\frac{U_{\max}}{2}$. Такое устройство позволяет, с одной стороны, устранить влияние шумов (если отношение сигнал/шум не хуже 2:1) и повысить устойчивость работы счетчиков, а с другой стороны, абсолютная погрешность измерения амплитуды вибраций дополнительно может быть уменьшена в два раза. В случае применения зеленой линии Hg^{108} это составит $-0,07 \text{ мкм} < A < 0,07 \text{ мкм}$.

Выводы

1. Измерение амплитуды вибраций методом однонаправленного счета числа интерференционных полос дает возможность повысить точность и сократить время измерения, а также полностью автоматизировать измерительный процесс.

2. Измерения этим методом можно производить, если соблюдены следующие условия:

- а) поперечные колебания вибратора составляют не более одного процента от основного;
- б) фотоэлектрический тракт имеет необходимую полосу пропускания;
- в) источник света достаточно мощный для того, чтобы обеспечить малый уровень шумов при широкой полосе пропускания;
- г) график движения подвижного зеркала интерферометра имеет один максимум и один минимум за период колебания вибратора.

3. Диапазон измеряемых амплитуд вибрации методом однонаправленного счета числа интерференционных полос составляет $1 \div 1000 \text{ мкм}$, т. е. значительно больше, чем у известных интерференционных методов.

4. Абсолютная погрешность измерения амплитуды вибраций не превышает $0,1 \text{ мкм}$. Это дает возможность в диапазоне амплитуд вибраций от 5 до 20 мкм проводить измерения с относительной погрешностью не более 2%.

В заключение следует заметить, что повышение точности измерения малых амплитуд вибраций связано с решением проблемы измерения дробных порядков интерференции. Решение этой задачи позволит создать универсальный высокопроизводительный метод измерения амплитуды вибраций с высокой точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щедровицкий С. С. Методы и аппаратура для градуировки и поверки акселерометров. «Измерительная техника», 1958, № 6.
2. Бараш В. Я. Интерференционные методы градуировки виброизмерительной аппаратуры. «Измерительная техника», 1966, № 11.
3. Иорнш Ю. И. Виброметрия. Машгиз, 1963.
4. Osterberg H. J. of opt. soc. Am. v. 22, 1932.
5. Шкальников В. С. Передовой научно-технический и производственный опыт ГОСИНТИ, 1963, № 31—63—447/7.

6. Горелик Г. С. Некоторые микрофазометрические методы в радиофизике и оптике. «Измерительная техника», 1955, № 3.
7. Schmidt V. A., Edelman S., Smith E. R., Jones E., J. of Ac. Soc. Am. 1962, v. 34, N 4.
8. Бараш В. Я. Установка для определения амплитудно- и фазочастотной характеристик виброизмерительной аппаратуры интерференционным методом. «Измерительная техника», 1967, № 4.
9. Эдельман С., Джонс Е., Смит Э. «Машиностроение», 1956, № 4 (перевод с англ.).
10. Бордиловский А. Ф. Авторское свидетельство № 230434. Бюллетень изобретений № 34, 1968.
11. Goldberg J. L. J. of Ac. Soc. Am. 1964, v. 36, № 10.
12. Шкаликов В. С. Точные измерения параметров вибраций. Труды институтов Госкомитета, вып. 76/136, М., Издательство стандартов, 1965.
13. Лассан В. Л., Шкаликов В. С. Исходные методы и средства виброметрии. «Измерительная техника», 1967, № 11.
14. Зорин Д. И., Трофимова Н. В., Шестопалов Ю. Н. Измерение длины штриховых мер счетом интерференционных полос. Труды институтов Госкомитета, вып. 78 (138), Издательство стандартов, 1965.
15. Branin F. H. J. of opt. Soc. Am. 1953, v. 43, N 10.
16. Kohara Smith D. S. The Rev. of Sci Instr. 1959, v. 30, N 8.

Поступила в редакцию
26/1 1969 г.

И. Н. ДОЛИЦКИЙ
ВНИИМ

О МАКСИМАЛЬНО ДОСТИЖИМОЙ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЕ МЕМБРАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

Значительная часть преобразователей давления, в том числе электрических, содержит в качестве упругого элемента плоскую мембрану, закрепленную по контуру. Создание быстродействующих преобразователей ограничивается инерционностью упругого элемента. Определим максимально достижимую собственную частоту упругого элемента указанной конструкции.

Прогиб δ центра круглой мембраны, закрепленной по контуру, определяют по формуле [1]

$$\delta = \frac{Pr^4}{5,86Ed^3}, \quad (1)$$

где P — амплитуда измеряемого давления;
 r, d — радиус и толщина мембраны;
 E — модуль упругости.

Максимальное напряжение в материале мембраны равно:

$$|\sigma| = \frac{2}{3} \frac{Pr^2}{d^2}, \quad (2)$$

При работе должно выполняться условие

$$|\sigma| \leq \sigma_{\text{доп}}. \quad (3)$$

Приближенно собственная частота f_0 круглой мембраны, закрепленной по контуру, может быть выражена формулой [2], имеющей в системе СИ вид

$$f_0 = 0,47 \frac{d}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (4)$$

где ρ — плотность материала мембраны,
 μ — коэффициент Пуассона.

К мембране преобразователя давления предъявляются противоречивые требования. С одной стороны, для повышения f_0 следует уменьшать r и r/d , с другой стороны, r и r/d надо увеличивать для повышения чувствительности. Очевидно, что мембрана, рассчитанная на заданную максимальную f_0 , должна удовлетворять условиям (2) и (3) и иметь прогиб δ , не меньший некоторого минимального значения.

Перечисленные условия могут быть соблюдены, например, следующим образом. Решая совместно формулы (2), (3) и (4), получаем

$$f_0 \approx 0,314 \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}} \cdot \frac{P}{d\sigma_{\text{доп}}}. \quad (5)$$

Нетрудно проверить, что прогибы стальных мембран, рассчитанных на высокие частоты f_0 (десятки килогерц) по формуле (5), весьма малы (единицы микрометров даже при больших давлениях). В этих условиях практически возможны только емкостные преобразователи [3]. Однако они требуют достаточно однородного поля в зазоре, которое искажается вследствие шероховатости образующих плоскостей. Неоднородность поля в зазоре и связанная с ней погрешность нелинейности преобразователя зависят от отношения λ средней высоты неровностей R_a на поверхности мембраны к ширине δ_0 зазора: $\lambda = \frac{R_a}{\delta_0}$. Шероховатость поверхности неподвижной обкладки не учитывается, так как она может быть обработана значительно чище. Далее, максимальная чувствительность емкостного преобразователя достигается при $\frac{\delta}{\delta_0} \rightarrow 1$; примем $\delta = 0,5\delta_0$. Отсюда

$$\delta = \frac{R_a}{2\lambda}. \quad (6)$$

Возводя равенство (2) в квадрат и подставляя полученный результат и выражение (6) в формулу (1), получим

$$\frac{P}{d\sigma_{доп}} = \frac{0,77\lambda\sigma_{доп}}{ER_a}. \quad (7)$$

Подставим это уравнение в (5):

$$f_0 = 0,242 \frac{\lambda\sigma_{доп}}{R_a \sqrt{\rho E (1-\mu^2)}}. \quad (8)$$

Из полученной формулы следует, что «оптимальную» малоинерционную мембрану для емкостных преобразователей можно создать только в результате правильного выбора материала и тщательной обработки поверхности. Попытки произвольного выбора размеров мембраны неизбежно приведут к нарушению какого-либо из вышеуказанных условий (1), (2) или (3). В таблице приведены величины $(f_0)_{max}$ в килогерцах, рассчитанные по формуле (8), для мембран из различных материалов при обработке по 8—10 классам чистоты.

Таблица

Материалы	Чистота обработки		
	$R_a=0,63 \text{ мкм}$ (8-й кл.)	$R_a=0,32 \text{ мкм}$ (9-й кл.)	$R_a=0,16 \text{ мкм}$ (10-й кл.)
Сталь 60С2А	34,7	68,3	136,6
Бериллиевая бронза Бр.Б2	28,4	56	112
Титан ВТ1	25,6	50	100
Сплав АМг6	18,9	37,2	74,4

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. М., Машгиз, 1962.
2. Ананьев И. В. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем. М., Гостехиздат, 1946.
3. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. Л., Изд-во «Энергия», 1966.

Поступила в редакцию
21/X 1968 г.

Н. Н. КОВАНИНА, В. С. ПЕЛЛИНЕЦ.

ВНИИМ

КОМПАРАТОР ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УДАРНЫХ УСКОРЕНИЙ

Специфическая особенность измерения ударных ускорений заключается в необходимости правильного воспроизведения акселерометром кривой, гармонический состав которой характеризуется непрерывным спектром в сравнительно широких пределах [1, 2].

В то же время большинство пьезопреобразователей не обладает амплитудно-частотной характеристикой с достаточной протяженностью горизонтального участка в необходимом диапазоне частот. Это источник первой составляющей погрешности, которая может достигать десятков процентов.

Вторая составляющая погрешности, достигающая значительной величины при больших значениях ударного ускорения, обусловлена нелинейностью амплитудной характеристики, включая специфические для поликристаллических пьезоэлементов статическую нелинейность и гистерезис пьезомодуля [3].

Учет и компенсация этих погрешностей связаны со значительными техническими трудностями.

Одним из наиболее удобных способов уменьшения указанных погрешностей является введение поправок. В этом случае необходим выбор такого метода градуировки измерительных преобразователей, при котором спектр и амплитуда ударного ускорения при градуировке близки к соответствующим характеристикам измеряемых процессов.

Поэтому широко распространенный метод градуировки пьезопреобразователей путем воздействия периодического синусоидального ускорения в точке, соответствующей его максимальному значению, наименее удовлетворителен. Действительно, спектр такого ускорения резко отличается от спектра ударного процесса, а достижимые амплитуды редко превышают $300 \div 500$ g, тогда как ускорения при ударе могут достигать значений, больших на два порядка.

Применение баллистического метода [4, 5] позволяет получить нужные форму кривой и величину ускорения, что существенно снижает погрешности градуировки. Но при наличии у градуируемого преобразователя пьезоэлектрического гистерезиса, т. е. различной чувствительности на участках нарастания и спадания ускорения, такие градуировки вызовут дополнительно значительные погрешности. По существу этот метод является градуировкой по импульсу ускорения $I = \int_0^T j dt$ с учетом масштаба времени, т. е. по среднему значению чувствительности (j — ускорение, T — длительность процесса).

В результате погрешность градуировки баллистическим методом преобразователей с пьезоэлементом на основе титаната бария для случая

измерения ими ускорения на участке нарастания ударного процесса достигает $15 \pm 25\%$.

Этим объясняется необходимость разработки методов и аппаратуры для градуировки преобразователей в режиме ударного ускорения со спектром и амплитудой близкими к измеряемым преобразователям при эксплуатации.

В данном случае рассматривается вопрос о градуировке преобразователей, предназначенных для измерения ускорения на участке нарастания процесса.

Возможны два принципа градуировки: воздействие на преобразователь ударного ускорения со стабильными и точно известными характеристиками (принцип использования образцовой установки) и сличение с образцовым преобразователем.

Поскольку образцовые установки с заданной формой кривой создать довольно трудно, то необходимо было разработать аппаратуру, использующую принцип сличения показаний градуируемого и образцового преобразователей в нескольких заданных точках переднего фронта ударного процесса.

Для сличения этих показаний необходимы:

1. Ударный стенд, создающий ускорения достаточной амплитуды и длительности (в данном случае не требуется знания точных параметров импульса ускорения).

2. Компаратор, т. е. установка для сравнения чувствительности образцового и градуируемого преобразователей.

3. Образцовый акселерометр, частотный диапазон которого шире, чем у любого из градуируемых преобразователей.

Указанные требования к стенду позволяют использовать существующие установки. В качестве образцового акселерометра применен пьезокварцевый четырехэлементный преобразователь с собственной частотой около 100 кГц и погрешностью не более $1,5 \div 2,5\%$. Для этой цели может быть использован и иной образцовый акселерометр, основная и дополнительная погрешности которого подробно изучены и не превышают указанной выше величины.

В данной работе основное внимание уделено разработке компаратора с высокими эксплуатационными характеристиками и, в частности, сокращению затрат времени на процесс градуировки.

Принцип действия прибора заключается в измерении мгновенного значения напряжения U_x , создаваемого градуируемым преобразователем в момент времени, когда действующее на него ускорение градуировки f_r достигает заранее заданной величины, что определяется по образцовому преобразователю.

Чувствительность градуируемого преобразователя выражают через параметры его усилительного канала и ускорение градуировки f_r .

$$S_{gr} = \frac{U_r (C_{gr} + C_{пр} + C_r)}{f_r K_r}, \quad (1)$$

где S_{gr} — чувствительность градуируемого преобразователя $\frac{nK}{g}$;

U_r — напряжение на выходе усилителя градуируемого преобразователя, в;

$C_{gr}, C_{пр}, C_r$ — емкости входа усилителя, градуируемого преобразователя и калибровки* соответственно, нФ;

K_r — коэффициент усиления градуируемого канала.

* В режиме «измерения» эта емкость подключена параллельно входу усилителя градуируемого преобразователя.

Ускорение градуировки определяют через параметры образцового преобразователя и усилительного канала:

$$j_r = \frac{U_0(C_{\text{вв}} + C_{\text{пв}})}{S_0 K_0}, \quad (2)$$

где U_0 — напряжение на выходе усилительного канала образцового преобразователя, в ;
 $C_{\text{вв}}, C_{\text{пв}}$ — емкости входа усилителя и образцового преобразователя, нф ;
 S_0 — чувствительность образцового преобразователя, $\frac{\text{нК}}{\text{г}}$;
 K_0 — коэффициент усиления канала образцового преобразователя.

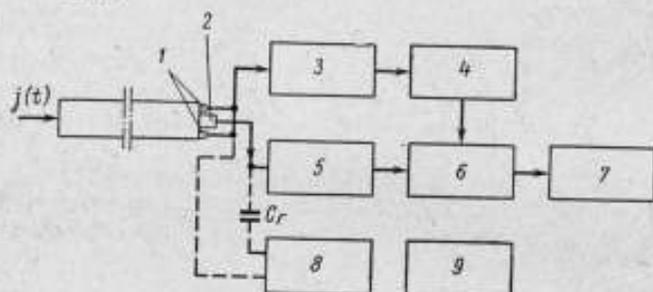


Рис. 1. Блок-схема компаратора:

1 — преобразователь образцового акселерометра; 2 — градуируемый преобразователь, 3 — усилитель образцового преобразователя, 4 — пороговая схема, 5 — усилитель градуируемого преобразователя, 6 — тиристор, 7 — микроамперметр, 8 — блок градуировки, 9 — блок питания.

При калибровке через компенсированный делитель коэффициент усиления канала градуируемого преобразователя равен [6]:

$$K_r = \frac{U_{\text{гк}}(C_{\text{вг}} + C_{\text{пг}} + C_r)}{U_{\text{к}}C_r}, \quad (3)$$

где $U_{\text{к}}$ — напряжение калибровки, подаваемое на делитель, в ;
 $U_{\text{гк}}$ — напряжение на выходе усилителя при калибровке канала градуируемого преобразователя, в ;

С учетом выражений (1), (2), (3) получают

$$S_{\text{гр}} = S_0 \frac{U_{\text{к}}C_rK_0}{U_0(C_{\text{вв}} + C_{\text{пв}})U_{\text{гк}}} U_r = AU_r, \quad (4)$$

где

$$A = S_0 \frac{U_{\text{к}}C_rK_0}{U_0(C_{\text{вв}} + C_{\text{пв}})U_{\text{гк}}},$$

(A — постоянная величина для данного образцового преобразователя и предела измерения компаратора).

Следовательно, шкалу измерительного прибора можно проградуировать в единицах отношения $\frac{\text{нК}}{\text{г}}$, что называют чувствительностью преобразователя.

Блок-схема компаратора приведена на рис. 1. Преобразователи при одновременном действии на них ускорения вырабатывают сигналы, подаваемые на усилители с одинаковыми амплитудно-частотными характеристиками [7]. Пороговая схема настроена на определенное напряжение U_0 , соответствующее ускорению j_r . Когда напряжение на выходе усилителя образцового преобразователя достигнет величины U_0 , тиристор зажимается и шунтирует выход усилительного канала градуируемого преобразователя.

зователя, а пиковый вольтметр [8] фиксирует мгновенное значение напряжения U_r , соответствующего i_r ; после этого напряжение на выходе усилителя падает до нуля.

Принципиальная электрическая схема компаратора приведена на рис. 2. Усилительные каналы однотипны и содержат набор масштабных емкостей для изменения пределов измерения, катодные повторители с высоким входным сопротивлением $L1$ и $L7$, фильтры нижних частот и усилители напряжения $L2$ и $L8$, позволяющие регулировать коэффициенты усиления путем изменения степени отрицательной обратной связи. Идентичные фильтры нижних частот позволяют выравнивать амплитудно-частотные характеристики каналов, благодаря чему устраняется погрешность от несоответствия спектра удара амплитудно-частотным характеристикам преобразователей.

Уровень ускорения i_r , определяемый при назначении преобразователя, выбирают одновременно изменяя в определенном соотношении входные емкости обоих каналов. Входные емкости шунтированы сопротивлениями для сохранения постоянной времени входной цепи на всех положениях переключателя П1. Пороговая схема состоит из опорного диода $D808D2$, нагруженного сопротивлением $R1$, обеспечивающим наиболее резкую отсечку тока при напряжении на схеме, близком к потенциалу пробоя, и усилителя на лампе $L4$. Катодный повторитель $L5$ служит для согласования выхода усилителя с входной цепью тиратрона, которая для повышения помехоустойчивости выбрана сравнительно низкоомной. Для уменьшения времени между срабатыванием пороговой схемы и зажиганием тиратрона коэффициент усиления усилителя $L4$ выбран достаточно большим. При выбранном значении $K=100$ погрешность от запаздывания не превышает 2% для всех расчетных значений крутизны нарастания ускорения.

Усилитель канала градуируемого преобразователя выключают с помощью шунтирования лампы $L8$ по анодной цепи. При этом на входе пикового вольтметра $L11$, $L12$ образуется положительный импульс напряжения U_r ; отрицательный выброс гасится диодом $D6$. Для визуального контроля достаточности ускорения на преобразователях в компараторе введен индикатор горения тиратрона — неоновая лампочка $L10$. Нажимая кнопку $K2$, схему приводят в исходное состояние.

Блок градуировки усиления каналов представляет собой генератор одиночных импульсов фиксированной амплитуды с компенсированным делителем. При замыкании контакта реле $P1$ конденсатор $C2$ через сопротивление $R4$ заряжает конденсатор $C1$. Спустя некоторое время, достаточное для затухания переходных процессов, напряжение на нем достигает потенциала пробоя опорного диода $D5$ и на левом $R2$, $D3$ и правом $R3$, $D4$ плечах моста начинает нарастать напряжение. При этом на выходной диагонали моста возникает напряжение. При достижении потенциала пробоя опорных диодов $D3$ и $D4$ на них устанавливаются постоянные напряжения, а на выходной диагонали — их разность.

Канал образцового преобразователя калибруют поочередно напряжениями срабатывания и несрабатывания пороговой схемы, подаваемыми на его вход. Разница между ними установлена в 3%, что обеспечивает соответствие коэффициента усиления канала K_0 номиналу с погрешностью не более 1,5%.

Канал градуируемого преобразователя калибруют определенным напряжением, поданным на его вход, путем изменения усиления до полного отклонения измерительного прибора пикового вольтметра. Напряжение U_k согласно выражению (3) подают на вход канала через компенсированный емкостный делитель, одно плечо которого содержит емкости гра-

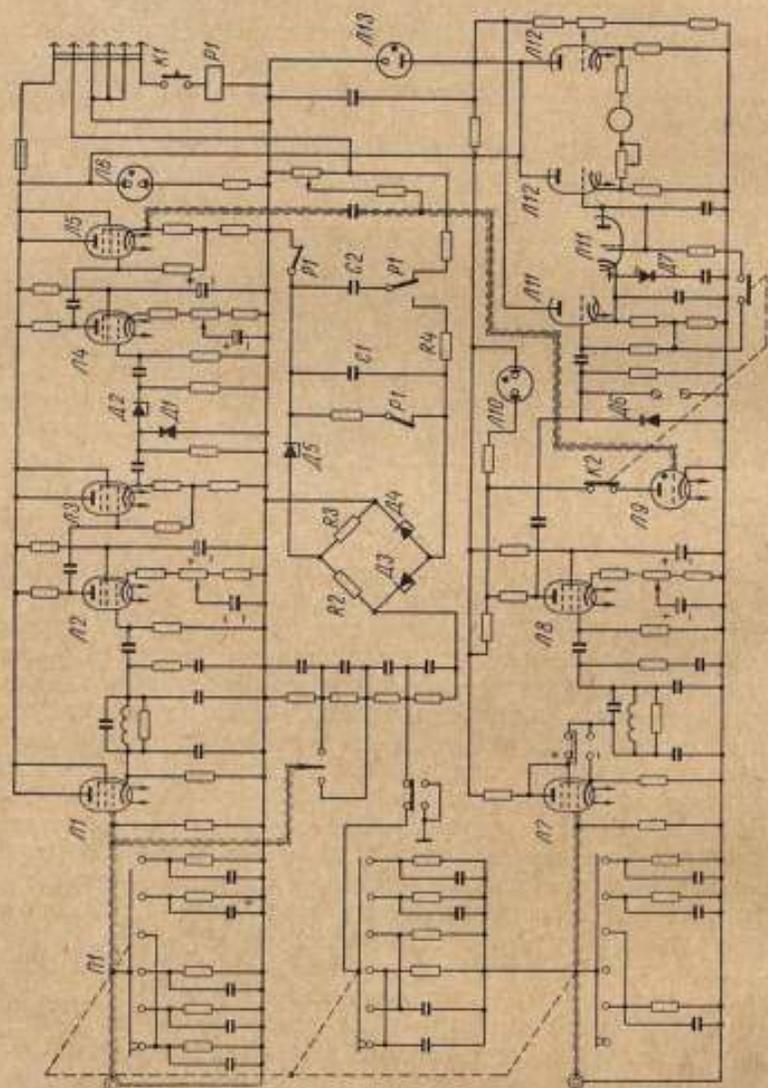


Рис. 2. Принципиальная схема компаратора для градуировки пьезопреобразователей.

дулируемого преобразователя $C_{гр}$ и входа $C_{вв}$. Поэтому напряжение, попадающее на вход, не постоянно, а зависит от емкости преобразователя, что позволяет соответственно менять коэффициент K_r усиления канала для компенсации влияния колебаний емкости градулируемого преобразователя на результат измерения.

Шкалу прибора градуируют в два этапа. Сначала градуируют по напряжению пиковый вольтметр (рис. 3). Напряжение контролируют по вольтметру класса 0,5. При замыкании ртутного ключа K на вход пикового вольтметра поступает импульс напряжения необходимой амплитуды. Каждую оцифрованную отметку шкалы проверяли не менее десяти раз. Среднее квадратическое значение погрешности стрелочного прибора пикового вольтметра не превышало 0,7%, т. е. разброс не более 2%.

Затем градуируют по напряжению компаратор (рис. 4). Сигнал от генератора одиночных импульсов делится между каналами в заданном

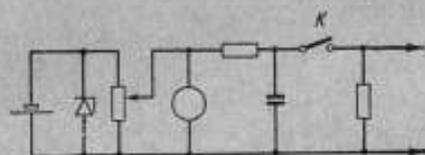


Рис. 3. Схема градуировки пикового вольтметра.

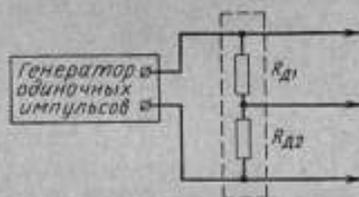


Рис. 4. Схема градуировки компаратора.

соотношении. Если напряжение на входе усилителя образцового преобразователя достигает величины, обеспечивающей срабатывание пороговой схемы, то показания компаратора при равных коэффициентах усиления будут:

$$S_{гр} = S_0 \frac{R_{д1}}{R_{д2}} h,$$

где

$R_{д1}$, $R_{д2}$ — сопротивления делителя;
 h — коэффициент пропорциональности.

Погрешность при переходе от напряжения к количествам электричества определяют сопоставляя емкости $C_{п0}$, $C_{в0}$ и $C_{гр}$ с их расчетными значениями. Эти измерения выполнены с погрешностью не более одного процента. Средняя квадратическая погрешность при градуировке компаратора не превышала 2,5%.

Из-за отсутствия образцовых средств измерения ударных ускорений экспериментальная оценка погрешностей компаратора производилась при градуировке технических преобразователей. Определялась средняя квадратическая погрешность его показаний и результаты градуировки сопоставлялись с данными, полученными независимым методом.

В первом случае в дисперсию погрешности результатов входил разброс показаний компаратора, образцового преобразователя и градулируемых преобразователей. Поэтому дисперсия погрешности самого компаратора меньше полученной при измерениях.

Дисперсию определяли по результатам градуировки 25 однотипных пьезокерамических преобразователей при десятикратных измерениях для каждого. Суммарная средняя квадратическая погрешность сличения составила 6%.

При сопоставлении данных градуировки с результатами, полученными другим независимым от первого методом, расхождение определяется как

суммарными, так и систематическими погрешностями обоих методов, т. е. полученные расхождения значительно превышают погрешность компаратора.

Сравнительную градуировку проводили на 75 пьезопреобразователях. В качестве независимого был выбран метод градуировки по предельному контактному акселерометру. Среднеквадратическое значение расхождения результатов составило 11%.

При расчетной оценке суммарной погрешности компаратора были учтены погрешности, вызванные:

- 1) градуировкой компаратора;
- 2) поперечной чувствительностью градуируемого и образцового преобразователей при наличии поперечной составляющей ускорения;
- 3) сдвигом во времени импульса ускорения между градуируемым и образцовым преобразователями;
- 4) сдвигом во времени вследствие неодинаковых фазо-частотных характеристик усилителей;
- 5) запаздыванием срабатывания пороговой схемы;
- 6) нестабильностью коэффициентов усиления усилителей;
- 7) пиковым вольтметром.

Среднеквадратические расчетные значения погрешности компаратора для различных случаев были в пределах 4,5÷8%. Окончательная погрешность градуировки оценена путем сопоставления расчетной и экспериментальной оценок, упомянутых выше.

Опыт эксплуатации установки показал ее значительные преимущества: сокращение времени градуировки по отношению к другим методам, использование режима ударного ускорения, исключение вычислений, обработки фотоматериалов и возможности субъективных ошибок оператора.

Технические характеристики компаратора

1. Диапазоны измерения чувствительности:

$$0,2 \div 1 \frac{nK}{g}; 1,0 \div 5 \frac{nK}{g}; 4,0 \div 20 \frac{nK}{g}.$$

2. Допустимые значения емкости градуируемых преобразователей:

$$C_{пр} = 500 \div 1500 \text{ пф.}$$

3. Верхняя граница рабочего диапазона частот градуируемых преобразователей — не менее 17 кГц.

4. Ускорения градуировки:

$$300 \text{ и } 1500 \text{ g; } 60 \text{ и } 300 \text{ g; } 40 \text{ и } 200 \text{ g.}$$

5. Погрешность градуировки, кроме значений $j_r = 40 \text{ g}$ и 1500 g , при $S_{gr} = 10 \div 20 \frac{nK}{g}$, не более 4,5%; для остальных режимов и значений — не более 8%.

6. Полярность сигнала градуируемого преобразователя — любая.

7. Допустимая длительность нарастания ускорения до $j_r = 0,2 \div 1 \text{ мсек.}$

8. Полярность образцового преобразователя — положительная.

9. Емкость образцового преобразователя $C_{об} = 220 \text{ пф.}$

10. Чувствительность образцового преобразователя $S_0 = 0,8 \frac{nK}{g}$ (возможны другие значения $C_{об}$ и S_0 , но в этом случае необходимо ввести поправочный множитель к показаниям компаратора).

11. Питание компаратора от сети переменного тока напряжением $220 \text{ в} \pm 5\%$ с частотой 50 Гц.

12. Габариты:

компаратора — 270 × 230 × 380 мм;
блока питания — 270 × 190 × 310 мм.

Выводы

1. Принятые принцип действия и схема компаратора позволили значительно упростить процесс градуировки пьезопреобразователей ударных ускорений и сократить затраты времени на градуировку.

2. Достигнутая точность градуировки с помощью описанного компаратора не уступает точности других установок, работающих в режиме ударного ускорения. Кроме того, выигрыш во времени позволяет увеличивать число повторных градуировок и соответственно уменьшить случайную составляющую погрешности.

3. При наличии образцовых аттестованных пьезоакселерометров возможно повысить точность градуировки до уровня погрешности $2 \div 2,5\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Иориш. Виброметрия, изд. 2. М., Машгиз, 1963.
2. R. R. Vouche. Instruments and Control Systems, v. 34, N 8, p. 1451, 1961.
3. И. А. Глоzman. Пьезокерамика. М., Энергия, 1967.
4. Н. П. Раевский, М. И. Субботин. Измерение линейных ускорений. М., АН СССР, 1961.
5. E. J. Feder, A. M. Gilien. JRE Transactions on Instrumentation, v. 1, N 2, p. 98, 1957.
6. В. С. Пеллинец, Виброметрия. Сб. Московского Дома Научно-технической пропаганды. 1965, стр. 141.
7. В. С. Пеллинец, А. Е. Серпухова. «Автометрия», № 4, 1966, стр. 34.
8. А. И. Гордиенко, И. Д. Копыльцов, В. А. Мионов. Пиковый электрометр. Передовой научно-технический и производственный опыт, вып. 5, М., ГОСИНТИ, 1962.

Поступила в редакцию
19/VII 1967 г.

В. П. ШУМИЛИН
ВНИИМ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ

Современная образцовая и испытательная аппаратура в области виброметрии основывается, главным образом, на применении электродинамических устройств, имеющих ряд преимуществ перед механическими установками [1—3]. Это прежде всего возможность обеспечить широкий

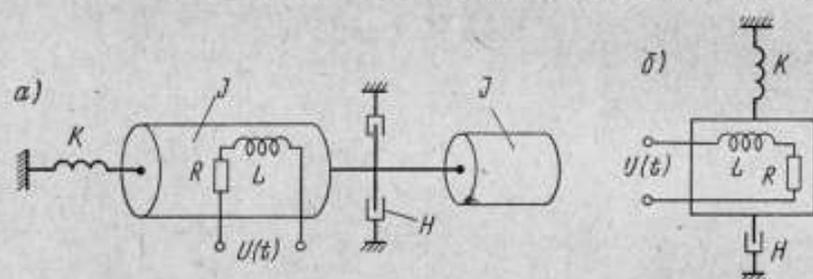


Рис. 1. Принципиальная схема электродинамических вибраторов для воспроизведения колебаний:

а) угловых, б) линейных.

диапазон частот и амплитуд с относительно малыми искажениями формы колебаний. Кроме того, электродинамические устройства позволяют получить амплитудно-частотную характеристику, для которой величина $\frac{d\varphi_0}{d\omega}$ будет наименьшей. В этом случае амплитуда вынужденных колебаний оказывается наименее зависимой от частоты возмущающего момента.

Расчет электродинамических установок складывается из двух частей. Первую составляет расчет механических параметров, вторую — электрических.

Ниже рассмотрена методика расчета.

Принципиальная схема установки дана на рис. 1.

Дифференциальные уравнения при вращательном движении колебательной системы, как следует из рис. 1, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} J\ddot{\varphi} + H\dot{\varphi} + k\varphi &= AI, \\ LI + RI + A\dot{\varphi} &= U. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где J — момент инерции системы;
 k — угловая жесткость подвеса;
 H — коэффициент, учитывающий жидкостное трение в подшипниках;

A — коэффициент электродинамического преобразования ($A = BS\omega$, где B — индукция в зазоре, S и ω — площадь и число витков обмотки подвижной катушки);

R, L — сопротивление и индуктивность цепи подвижной части электродинамического привода.

При поступательном движении система (1) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} + H_1\dot{x} + k_1x &= A_1I, \\ L\dot{i} + RI + A_1\dot{x} &= V. \end{aligned} \right\} \quad (1a)$$

Преобразование уравнений (1) приводит к уравнению третьего порядка вида:

$$\ddot{\varphi} + r\dot{\varphi} + n\varphi + p\varphi = q, \quad (2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{R}{L} + \frac{H}{J}, \\ n &= \frac{k}{J} + \frac{RH}{JL} + \frac{A^2}{JL}, \\ p &= \frac{kR}{JL}, \\ q &= \frac{UA}{JL}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Частное решение уравнения (2) имеет вид

$$\varphi = \varphi_0 \sin(\omega t + \psi) = \frac{q}{\sqrt{\omega^4 + a\omega^2 + b\omega^2 + \frac{r^2(r^2 - a)^2}{4\beta^2}}} \sin(\omega t + \psi), \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} a &= r^2 - 2n \\ b &= n^2 - 2rp \\ \beta &= \frac{rn}{p}. \end{aligned}$$

Коэффициент β определяет степень демпфирования колебательной системы.

Таким образом, если величины $R, L, A, U, J, k, H, \omega$ будут заданы или измерены, то тем самым определятся значения амплитуды вынужденных колебаний φ_0 .

Амплитудно-частотная характеристика $\varphi_0 = f(\omega)$ рассматриваемой системы имеет следующие экстремальные частоты

$$\begin{aligned} \omega_{20} &= \sqrt{-\frac{a}{3} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{3b}{a^2}}\right)}; \\ \omega_{30} &= \sqrt{-\frac{a}{3} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{3b}{a^2}}\right)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Исследование амплитудно-частотной характеристики показало, что она в зависимости от значений параметров a и b (рис. 2) может быть четырех видов:

1. $a < 0, b > 0$ — кривая имеет два экстремума: максимум при $\omega = \omega_{30}$ и минимум при $\omega = \omega_{20}$;

2. $a < 0, b < 0$ — кривая имеет максимум при $\omega = \omega_{20}$;
3. $a > 0, b < 0$ — кривая также имеет только максимум при частоте $\omega = \omega_{20}$;
4. $a > 0, b > 0$ — кривая не имеет вещественных корней.

Формально возможен выбор любой из четырех видов кривых. Однако необходимо принять ту из них, которая является оптимальной при практически возможных значениях параметров a и b .

Рассмотрев семейство характеристик $\frac{b}{r^4} = f\left(\frac{a}{r^2}, \beta\right)$ (рис. 3), находим, что значения этой функции принадлежат, главным образом, второму

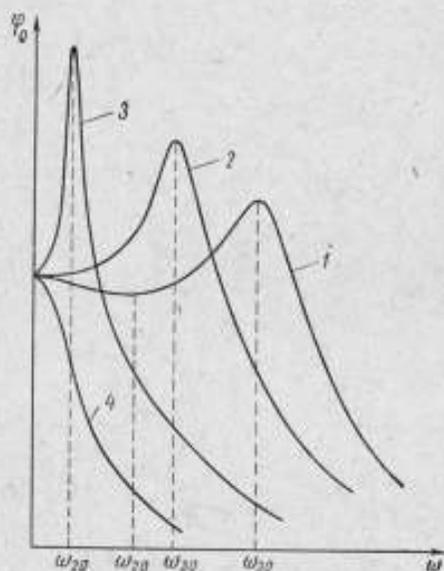


Рис. 2. Возможные виды амплитудно-частотных характеристик электродинамических систем.

Кривые даны при значениях коэффициентов: 1 — $a < 0, b > 0$; 2 — $a < 0, b < 0$; 3 — $a > 0, b < 0$; 4 — $a > 0, b > 0$.

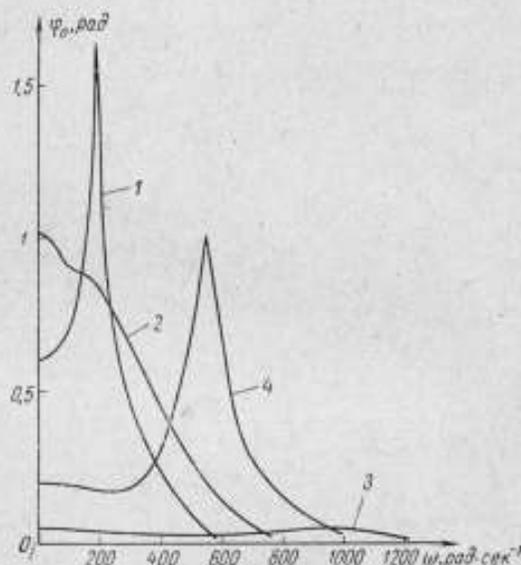


Рис. 3. Семейство амплитудно-частотных характеристик первого вида, соответствующее условиям:

1 — $\varphi_{10} = \varphi_{20}$; 2 — $\varphi_{10} = \varphi_{30}$; 3 — $\varphi_{10} = \varphi_{20}$; 4 — $\varphi_{20} < \varphi_{30}$.

квадранту. Этот квадрант соответствует кривым первого вида; третьему, четвертому и первому квадрантам принадлежат соответственно значения функции, относящиеся к кривым 2, 3 и 4 видов.

Поэтому наибольшие возможности варьирования параметров устройства дают характеристики первого вида, анализ которых дан ниже.

Эти кривые, как указывалось, имеют два экстремума. Оптимальной можно считать ту из них, у которой амплитуды $\varphi_{10}, \varphi_{20}, \varphi_{30}, \varphi_2$, соответствующие экстремальным частотам $\omega_{10}, \omega_{20}, \omega_{30}$ и верхнему пределу рабочего диапазона ω_2 , мало отличаются друг от друга.

Анализ уравнения (4) показал, что равенство $\varphi_{10} = \varphi_{20} = \varphi_{30}$ невыполнимо. Возможно лишь соблюдение условий

$$\varphi_{10} = \varphi_{20}, \quad \varphi_{20} = \varphi_{30}, \quad (6)$$

$$\varphi_{10} = \varphi_{30}, \quad \varphi_{20} < \varphi_{30},$$

соответствующих кривым 1, 2, 3, 4 (рис. 3). Однако отсутствие необходимых материалов, обеспечивающих высокое значение индукции в за-

зоре B , а следовательно, β , не позволяет реализовать первые три условия (6).

Исследуя различные типы электродинамических устройств, пришли к выводу, что реальная оптимальная характеристика $\varphi_0 = f(\omega)$ определяется следующей системой неравенств

$$\left. \begin{aligned} -6,5 < \frac{a}{r^2} < -1 \\ 0 < \frac{b}{r^4} < 7 \\ 1,05 < \beta < 1,5 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Параметры электродинамического устройства определяются решением системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \varphi_2 &= \frac{q}{\sqrt{\omega_2^6 + \frac{a}{r^2} r^2 \omega_2^4 + \frac{b}{r^4} r^4 \omega_2^2 + \frac{r^2 (r^2 - a)^2}{4\beta^2}}} \\ \frac{a}{r^2} &= 1 - 2 \frac{n}{r^2} \\ \frac{b}{r^4} &= \left(\frac{n}{r^2}\right)^2 - 2 \frac{p}{r^2} \\ \beta &= \frac{rn}{p} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Если будут заданы величины ω_2 , φ_2 , $\frac{a}{r^2}$, $\frac{b}{r^4}$, β , то тем самым однозначно определяются остальные параметры r , n , p , q . По уравнениям (3) можно рассчитать значения частных параметров. Система (3) содержит семь неизвестных. Часть из них, определяемая существующей аппаратурой и техническими возможностями, должна быть задана, а часть — вычислена. К первым относятся U , H , J , ко вторым — R , L , A , k .

После этого можно рассчитать мощность электродинамического привода

$$N = \frac{U^2}{\sqrt{R^2 + (\omega_2 L)^2}} \quad (9)$$

Пример расчета. Рассчитать параметры установки для воспроизведения угловых колебаний в диапазоне частот 15—200 *гц* и амплитуд $2,5 \cdot 10^{-4}$ — $2,5 \cdot 10^{-2}$ *рад*, момент инерции поверяемых приборов $J_n = 5 \cdot 10^{-3}$ *кгм*².

Значения $\frac{a}{r^2}$ и β задают, руководствуясь графиком (рис. 4). Указанные величины должны быть максимальными, так как с увеличением $\left|\frac{a}{r^2}\right|$ увеличивается верхний предел частот и амплитуд, а рост β уменьшает $\frac{d\varphi}{d\omega}$. Такими значениями, как следует из графика, будут $\frac{a}{r^2} = -3$, $\beta = 1,2$; тогда $\frac{b}{r^4} = 0,67$.

Подставляя величины $\frac{a}{r^2}$, $\frac{b}{r^4}$, β , ω_2 , φ_2 в систему (8), получим

$$\begin{aligned} r &= 1,05 \cdot 10^2 \text{ сек}^{-1}, \\ n &= 2 \cdot 10^4 \text{ сек}^{-2}, \\ p &= 1,75 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-2}, \\ q &= 5 \cdot 10^5 \text{ рад} \cdot \text{сек}^{-3}. \end{aligned}$$

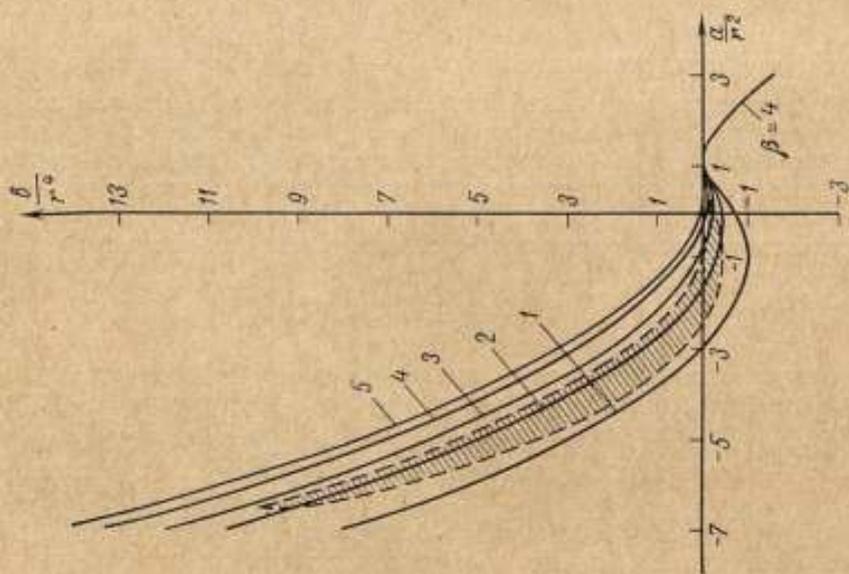


Рис. 4. Семейство характеристик $\frac{\delta}{r^2} = f\left(\frac{a}{r^2}, \beta\right)$.
Кривые соответствуют следующим значениям коэффициента демпфирования: 1 - $\beta = 1$; 2 - $\beta = 1,5$; 3 - $\beta = 2$; 4 - $\beta = 3$; 5 - $\beta = 4$.

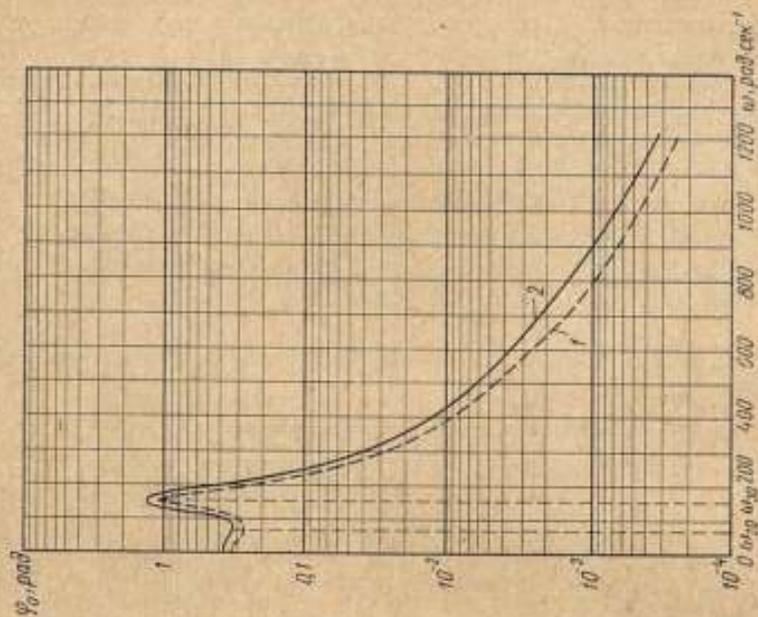


Рис. 5. Расчетная (1) и экспериментальная (2) амплитудночастотные характеристики установки УВУК-3.

Момент инерции установки вместе с поверяемым прибором можно принять $J = 2J_n = 10^{-2} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Величину параметра H точно определяют только экспериментальным путем. Руководствуясь опытными данными, принимают значение

$$H = 10^{-2} \text{ мм/сек}\cdot\text{рад}^{-1}.$$

Величину номинального напряжения U принимают в соответствии с характеристиками существующих усилителей мощности $U = 200 \text{ в}$.

Подстановка значений r, n, p, q, J, H, U в систему (3) дает

$$R = 4,2 \text{ ом},$$

$$L = 4 \cdot 10^{-2} \text{ гн},$$

$$A = 1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 \text{ сек}^{-2} \text{ а}^{-1} \text{ рад},$$

$$k = 175 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 \cdot \text{сек}^{-2}.$$

Тогда согласно уравнению (9) $N \geq 800 \text{ ва}$.

Необходимое значение k получают, применяя рычажно-пружинный или торсионный подвесы, позволяющие получить значения этого параметра в пределах 20—1000 $\text{кг}\cdot\text{м}^2 \text{ сек}^{-2}$.

Приведенный пример расчета относится к созданной во ВНИИМ образцовой установке типа УВУК-3.

Экспериментальное исследование этой установки показало, что действительные значения основных параметров отличаются от расчетных не более, чем на 15%.

Расхождения экспериментальной и расчетной зависимостей $\varphi_0 = f(\omega)$ (рис. 5) имеют порядок 10—20%. Такую погрешность можно считать допустимой для предварительного расчета параметров установки.

Рассмотренная методика расчета электродинамических устройств может быть применена при создании виброметрических установок различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иорш Ю. И. Виброметрия. М., Машгиз, 1963.
2. Шумилин В. П. Измерение параметров угловых колебаний маятниковым методом. Труды институтов Комитета, вып. 85 (145) М.—Л., Издательство стандартов, 1966.
3. Шумилин В. П. Измерение параметров угловых колебаний. «Измерительная техника», 1966, № 5.

Поступила в редакцию
20/V 1967 г.

М. И. КОНДРАТЕНКО

ВНИИМ

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СДВИГА (ПНС) СТРУКТУРИРОВАННЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

(Обзор)

Введение

Прочность структур в дисперсных системах характеризуют обычно двумя величинами [1, 2]: τ_0 — статическое предельное напряжение сдвига (СПНС, эквивалентное пределу упругости при сдвиге), т. е. минимальное касательное напряжение, вызывающее течение типа ползучести; $\tau_{пр}$ — предел прочности на сдвиг, т. е. минимальное касательное напряжение, вызывающее разрушение структуры системы.

Эти две механические характеристики существующих разнообразных структурированных дисперсных систем варьируют в довольно широких пределах.

Все приборы, измеряющие предельные напряжения сдвига упруго-вязко-пластичных тел по виду применяемого в них метода, можно разделить на четыре основные группы.

Первая группа. Внедрение в исследуемую среду тела определенной формы (конуса, усеченного конуса, плоского ножа, клина и т. п.). Мерой СПНС служит максимальная глубина погружения указанного тела.

Вторая группа. Тангенциальное смещение одного слоя исследуемой жидкости относительно другого неподвижного слоя. Мерой τ_0 или $\tau_{пр}$ является усилие, вызывающее сдвиг слоев на определенную величину.

Третья группа. Вращение одной поверхности прибора относительно другой, неподвижной, когда между ними расположена исследуемая среда. Измеряют вращающий момент, вызывающий поворот одной поверхности относительно другой на угол, отвечающий концу упругой деформации, т. е. τ_0 или же наступлению разрушения, т. е. $\tau_{пр}$.

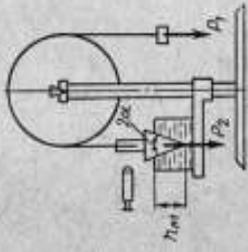
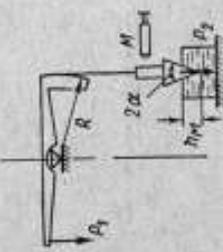
Четвертая группа. Смещение столбика исследуемой среды в капилляре. Мерой ПНС служит давление, вызывающее сдвиг среды на определенную величину, зависящую от рода этой среды.

Ниже рассмотрены метрологические характеристики указанных приборов, обычно называемых пластометрами.

§ 1. Метод внедрения тела в среду

Симметричное тело устанавливают так, чтобы его ось была перпендикулярна поверхности исследуемого вещества, а вершина касалась этой поверхности. Далее тело под действием собственного веса, (а иногда и дополнительной нагрузки) G , погружается в измеряемую среду.

Метод вытравливания тела в среду

Номера позиций	Название прибора	Схема прибора	Уравнение измерения СПНС, τ_0	Погреш. из-за неровн. бланк погруж.	Пределы измерения		Погреш. измер. СПНС, %	Источник сведений
					σ , м	G , м		
1	Пластометр Ребиндера—Семеновичко		$\tau_0 = k \frac{G}{h_0^2}$ $G = P_2 - P_1$	10^{-6}	$0,2 \div 30$	до $5 \cdot 10^4$	5	[3÷6]
2	Пластометр Фукуса—Николасовой		$\tau_0 = k \frac{G}{h_0^2}$ $G = P_2 - P_1$	$3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-3} \div 1$	$5 \div 5 \cdot 10^4$	4	[14]

Номера позиций	Название прибора	Схема прибора	Уравнение измерения СПНС, τ_0	Погреш. измерен. величины погреш.		Пределы изменения нагрузки	Пределы измерения СПНС, τ_0		Погреш. измер. СПНС, %	Источник сведений
				σ , %	δ , мм		τ_0 , мм ²	G , н		
3	Прибор для определения густоты смазки (остаточного напряжения сдвига)		$\tau_0 = k \frac{G}{h_M^2}$	10^{-3}	0,25—2,5	$50-7 \cdot 10^4$	5	ГОСТ 6407—52		
4	Консистометр Геплера (усеченный конус)		$\tau_0 = \frac{4G}{\pi h_M^2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	2,5—500	$4 \cdot 10^3-5 \cdot 10^6$	~ 3			
5	Пластометр Жуковского—Гуткина (плоский нож)		$\tau_0 = \frac{G}{2lh_M}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$G = \text{const}$	$10^2-4 \cdot 10^2$	5	[20, 21]		

Существует две разновидности этого метода.

1. Определяют максимальную глубину погружения h_m , которая связана с τ_0 уравнением:

$$\tau_0 = f [G; h_m; a; b], \quad (1)$$

где a и b — геометрические параметры внедряемого тела.

2. Последовательно измеряют глубину погружения и строят график движения внедряемого тела. Этот график и формула

$$\tau = f [G; h; a; b],$$

(где τ и h — напряжение сдвига и глубина погружения в момент времени t) позволяют построить график зависимости скорости глубины погружения $\frac{dh}{dt}$ от напряжения сдвига τ , т. е., $\frac{dh}{dt} = \varphi(\tau)$, затем экстраполируют его до пересечения с осью напряжений сдвига. Соответствующий отрезок, отсекаемый на этой оси, дает значение СПНС, т. е. τ_0 .

Ниже подробно рассмотрено внедрение конуса. Для других форм внедряемых тел уравнения измерений и ряд характеристик приведены в табл. 1.

1.1. Внедрение конуса

1. Первая разновидность метода [3÷5]. После того как движение конуса прекратится, его уравнение равновесия (рис. 1) будет

$$G = \rho \pi r l,$$

где ρ — вертикальные напряжения, предполагаемые одинаковыми во всех точках боковой поверхности конуса (влияние гидростатического давления отсутствует);

r — радиус направляющей конуса, расположенной на поверхности среды;

l — длина образующей той части конуса, которая погрузилась в контролируемую среду.

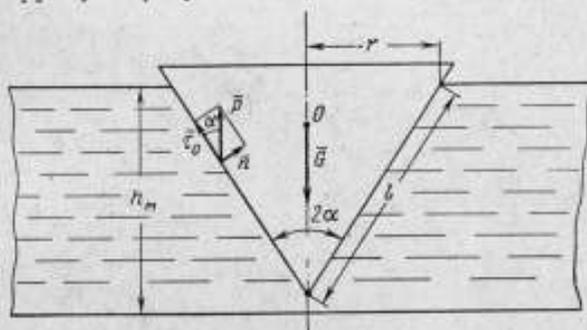


Рис. 1. Внедрение конуса в исследуемую среду.

Поэтому касательные напряжения τ_0 в точках той же поверхности равны:

$$\tau_0 = p \cdot \cos \alpha = \frac{G}{\pi r l} \cdot \cos \alpha = \frac{G \cdot \cos^2 \alpha}{\pi h_m^2 \operatorname{tg} \alpha},$$

или

$$\tau_0 = k \cdot \frac{G}{h_m^2}, \quad (2)$$

где

$$k = \frac{1}{\pi} \cdot \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos^2 \alpha. \quad (3)$$

Исследования, проведенные Агранат Н. Н., привели ее к заключению [6—8], что формулы (2) и (3) можно применять только для структурированных систем с $\tau_0 \leq 100 \text{ н/м}^2$. По-видимому, при больших τ_0 упомянутое выше предположение о постоянстве p для всех точек поверхности конуса недопустимо.

Измерения τ_0 некоторых консистентных смазок (у которых $\tau_0 > 100 \text{ н/м}^2$) были проведены с помощью приборов, основанных на различных принципах. Результаты показали, что значения τ_0 , рассчитанные (при измерениях коническим пластометром) по формулам (2) и (3), оказались в 1,5—2,5 раза больше значений τ_0 , полученных другими пятью приборами, которые между собой дали хорошее совпадение (разброс до 6,0%) значений СПНС [6, 15].

Применение методов построения линий скольжения для решения задачи о вдавливании штампов в упруго-пластичную среду, разработанных Соколовским [9], Ишлинским [10], Генки [11] и Ильюшиным [12], позволили Агранат найти приведенную ниже формулу (4) для определения постоянной k при различных углах конуса при вершине, учитывающую непостоянство p вдоль поверхности конуса:

$$\begin{aligned} \frac{1}{k} = & \pi \operatorname{tg}^2 \alpha \left\{ 2\alpha - 2(\sin \alpha + 1)^2 \ln \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha + 1} + \right. \\ & + \left[1 - \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2} \right) \right] (2 \sin \alpha + 1)^2 \ln \frac{2 \sin \alpha}{2 \sin \alpha + 1} + \\ & + \left[\operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2} \right) - \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{4} + \alpha \right) \right] \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) \ln \frac{2}{\operatorname{ctg} \alpha + 1} + \\ & \left. + \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2} \right) \left[\operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) - (2 \sin \alpha + 1) \right] \right\}, \quad (4) \end{aligned}$$

где 2α — угол при вершине конуса.

Однако опытные исследования, подтверждающие справедливость этой формулы, выполнены только для консистентных смазок, у которых τ_0 лежит в интервале 500—3500 н/м² (табл. 2). Кроме того, эта формула дает результаты, сходящиеся с результатами, полученными другими методами, лишь для конусов с углами в диапазоне $30^\circ \leq 2\alpha \leq 60^\circ$ при глубинах погружения, не превышающих 2÷5 см [6÷8; 13; 14].

Вторая разновидность метода основана на предположении, что глубина погружения конуса в исследуемую среду и тангенциальные напряжения сдвига τ , возникающие на поверхности конуса, изменяются одновременно по закону:

$$\begin{cases} h = h_m (1 - e^{-vt}), \\ \tau = k \frac{G}{h^2}. \end{cases} \quad (5)$$

где v — параметр экспоненты, зависящий от среды.

Откуда:

$$\begin{cases} e^{-vt} = \frac{1}{h_m v} \frac{dh}{dt}, \\ \tau = k \frac{G}{h_m^2 \left(1 - \frac{1}{h_m v} \frac{dh}{dt} \right)^2}. \end{cases}$$

Таблица 2

Сравнительная таблица значений τ_0 , полученных на различных приборах

Приборы	Значения $\tau_0 \times 10^8 \text{ н/м}^2$					
	Синтетический солидол		Смазка 1-13		Пушечная смазка	
	Не пере- мешан	Пере- мешан	Не пере- мешан	Пере- мешан	Не пере- мешан	Пере- мешан
Конический пластометр Ребиндера—Семененко	11,7	5,1	22,9	12,3	30,7	17,9
Пластинчатый пластометр Вейлера—Ребиндера	—	—	24,1	10,4	29,5	—
Конический прибор Д. Тол- стого	—	5,1	23,3	10,8	35,0	17,5
Пластометр плунжерного типа Д. Толстого	11,7	6,0	25,1	11	—	—
Ротационный вискозиметр Воларовича РВ-4	10,5	5,8	21,2	12,5	27,0	19,8
Капиллярный пластометр Симоньяна	—	—	—	10,5	28,0	—

Или, приближенно:

$$\tau \approx k \frac{G}{h_m^2} \left(1 + \frac{1}{h_m v} \frac{dh}{dt} \right)^2.$$

Для достаточно больших промежутков времени:

$$\tau = k \frac{G}{h_m^2} \left(1 + \frac{2}{h_m v} \frac{dh}{dt} \right). \quad (6)$$

Экстраполируя прямую (6) до пересечения с осью напряжений (при этом $\frac{dh}{dt} \rightarrow 0$), получают:

$$\tau = \tau_0 = k \frac{G}{h_m^2}, \quad (2)$$

т. е. тот же результат, что и в первой разновидности метода.

В работах Ямпольского и Ребиндера [4] показано, что при погружении конуса в металлический натрий ($G = \text{const}$), глубина погружения действительно изменяется по закону (5), а между $\frac{dh}{dt}$ и τ существует линейная зависимость на отрезке (0; 3 мм/сек). Кроме того, линейность этой зависимости подтверждена экспериментально Фуксом Г. И. [14].

1.2. Характеристики пластометров, основанных на внедрении тела в исследуемую среду (табл. 1)

Приборы первой группы можно подразделить на три вида:

- а) пластометры, основанные на внедрении конуса в среду (табл. 1, пп. 1, 2, 3);
- б) приборы, действие которых основано на внедрении в среду усеченного конуса (табл. 1, п. 4);
- в) пластометры, основанные на внедрении «плоского ножа», «клина» и др. (табл. 1, п. 5).

Погрешность измерения τ_0 коническими пластометрами достигает 5%. Повышение точности измерения СПНС зависит от точности измерения угла

конуса при его вершине, глубины погружения конуса, улучшения его геометрии, снижения потерь на трение в приборах, повышения качества термостатирования (криостатирования) испытуемого образца и создания изотропности свойства этого образца во всех направлениях (отсутствие пустот, одинаковость плотности, температуры и т. п.).

Конический пластометр Ребиндера—Семененко [3+6; 13+19] широко применялся для измерения τ_0 торфа, глины, консистентных смазок, некоторых металлов и сплавов, строительных растворов (табл. 1, п. 1).

Пластометр Фукса—Николаевой (табл. 1, п. 2) собран на базе весов АДВ-200 и снабжен устройством, обеспечивающим автоматическое освобождение конуса при начале эксперимента. Регистрация глубины погружения с погрешностью ± 3 мкм позволила повысить точность измерения τ_0 ($\sigma_0 = 4\%$). Этот пластометр применяется не только для измерения τ_0 консистентных смазок, но и для любых дисперсных систем, у которых СПНС лежит в диапазоне $5+500$ н/м².

В консистомере Гепплера (усеченный конус) применена магнитная система, обеспечивающая регистрацию глубины погружения конуса с погрешностью ± 2 мкм. Прибор применяют для измерения τ_0 металлов и различного рода фруктовых дисперсий (табл. 1, п. 4).

Пластометр типа «плоский нож» (табл. 1, п. 5) применяют в СССР для измерения СПНС жидких формовочных смесей литейного производства. В США такой прибор называют «shearometer» и применяют для измерения τ_0 глины [21]. Эбонитовая прямоугольная пластинка размерами $158 \times 25 \times 0,8$ мм погружается в среду строго по вертикали. Прибор имеет низкую точность, так как глубина погружения регистрируется с погрешностью $\pm 0,5$ мм. Исследования показали, что τ_0 не зависит от начальной глубины погружения ножа, а прибор применим лишь для «мягких» дисперсных систем ($100 \leq \tau_0 \leq 400$ н/м²). Значения τ_0 , полученные на пластометре «плоский нож» и на других приборах, не сравнивали.

К достоинствам приборов этого типа следует отнести их компактность, простоту устройства и эксплуатации, малые габариты и вес, возможность многократных повторных измерений одного и того же образца. Модификации конических пластометров обеспечивают измерение τ_0 в любом диапазоне.

К недостаткам — чувствительность к вибрации и толчкам, сложность регистрации момента касания вершиной внедряемого тела испытуемого материала, визуальный метод отчета глубины погружения конуса в момент эксперимента. Существенным недостатком является и то, что глубина погружения внедряемого тела в момент кажущегося равновесия (т. е. «остановки» тела) фактически изменяется со временем.

Исследования характеристик приборов позволяют сделать следующие обобщения:

1. Приборы первой группы, основанные на внедрении штампа правильной геометрической формы в исследуемую среду, широко применяются для измерения СПНС дисперсных систем в диапазоне $5+5 \cdot 10^6$ н/м².

2. Наиболее целесообразно применение конических пластометров. При измерении τ_0 дисперсных систем следует учитывать формулы (2) и (3), если $\tau_0 \leq 100$ н/м², и формулы (2) и (4), если $\tau_0 > 100$ н/м².

3. Применение приборов, основанных на внедрении усеченного конуса, шара, плоского ножа, клина, нецелесообразно из-за малой точности измерения τ_0 и неопределенности характера деформации исследуемой среды.

4. Применяя автоматические средства регистрации глубины погружения, можно повысить точность и автоматизировать измерение τ_0 различных дисперсных систем.

§ 2. Метод тангенциального смещения поверхности

Сущность метода заключается в том, что специальными устройствами сдвигают один слой исследуемой среды относительно другого, неподвижного. Измеряют нагрузку, вызывающую сдвиг среды на величину, отвечающую концу упругой деформации, т. е. τ_0 . Эта нагрузка связана с τ_0 уравнением

$$\tau_0 = \psi(G; a_1; b_1; C_1), \quad (7)$$

где a_1, b_1, C_1 — геометрические параметры смещаемого слоя.

Ниже подробно рассмотрено смещение одного слоя среды по отношению к другому с помощью рифленной пластинки. Смещение слоев среды другими формами поверхности осуществлено приборами, схемы и ряд характеристик которых приведены в табл. 3, где приведены уравнения измерения для τ_0 и схемы соответствующих приборов.

2.1. Смещение слоев среды рифленной пластинкой

Рифленную пластинку помещают вертикально в исследуемую среду, а затем прикладывают нагрузку так, чтобы пластинка смещалась в собственной плоскости. После того как равномерно нарастающая нагрузка вызовет сдвиг пластинки на расстояние, отвечающее концу упругой деформации среды, т. е. появлению на поверхности пластинки напряжений τ_0 , регистрируют нагрузку G .

При этом в связи с тем, что проскальзывание пластинки относительно среды не существует, сдвиг происходит между слоями самой среды, а площадь сдвигаемого слоя равна боковой поверхности пластинки. Поэтому:

$$\tau_0 = \frac{G}{2ab}, \quad (8)$$

где a и b — ширина и высота пластинки (толщина пластинки принимается равной 0, или пластинку помещают в среду так, чтобы четыре ее малых грани не располагались бы в исследуемой среде). Впервые смещение пластинки в собственной плоскости в испытуемой среде применил Вейнберг Б. П. [22]. Смещение проводилось в приборе, служащем для измерения вязкости вара, смол, битумов. Прибор был усовершенствован Дудецким [23]; аналогично построен и ленточный вискозиметр Вахгольца и Асбека [24]. Этим же методом высокие вязкости измерял Нуттинг [25].

Однако измерение τ_0 с помощью смещения пластинки в испытуемой среде впервые предложили Вейлер С. Я. и Ребиндер П. А., давшие эмпирическую формулу (8) [26].

Приборы, основанные на смещении пластинки, получили название пластинчатых пластометров.

2.2. Характеристики пластометров, основанных на тангенциальном смещении поверхности (табл. 3).

Приборы этой группы можно подразделить на три вида:

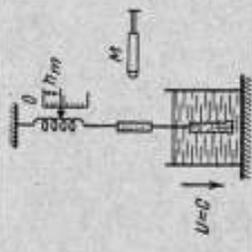
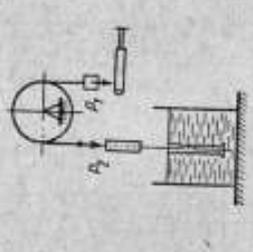
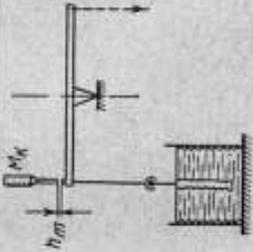
1. Пластинчатые пластометры, или приборы, основанные на плоском смещении одного слоя среды относительно другого (табл. 3, пп. 1—3, 5, 7).

2. Приборы, основанные на тангенциальном смещении цилиндрической поверхности (табл. 3, пп. 4, 6).

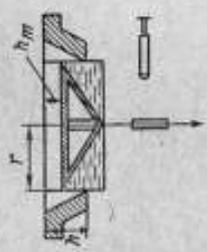
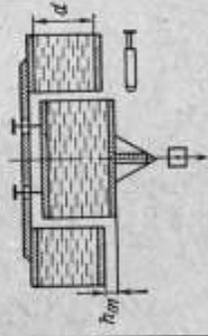
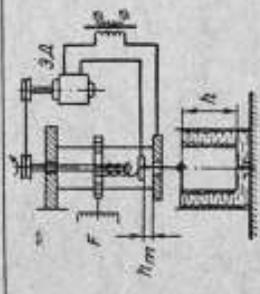
3. Пластометры со смещающимся шариком или другим телом правильной формы (табл. 3, п. п. 8).

Метод тангенциального смещения поверхности

Таблица 3

Номера позиций	Название прибора	Схема прибора	Уравнение измерения СПНС, τ_0	Пределы измерения		Погрешность измерения СПНС $\sigma_{\text{из}}$, %	Источник сведений
				шпинделя $\sigma_{\text{ш}}$, м	мелких грузах G , м		
1	Пластинчатый пластометр (с динамометром) Вейлера—Ребендера		$\tau_0 = k \frac{hm}{2S}$ (k — жесткость динамометра)	10^{-5}	—	7,4	[6, 26, 29]
2	Пластометр Вейлера—Ребендера		$\tau_0 = \frac{P_1 - P_2}{2S} = \frac{G}{2S}$	10^{-5}	—	7,4	[6, 26, 27]
3	Пластометр типа МНИ-2		$\tau_0 = \frac{G}{2S}$	10^{-5}	6—6·10 ⁵	~7	[30, 31]

Продолжение табл. 3

Номера позиций	Название прибора	Схема прибора	Уравнение измерения СПНС, τ_0	Погреш. измер. смещений		Пределы измерения нагрузки G, N	Пределы измерения СПНС $\tau_0, \text{н.м}^{-2}$	Погрешность измерения СПНС		Источник сведений
				$\sigma_{\text{с.м.}}$	$\sigma_{\text{в.}}$, %					
4	Конический прибор Д. Толстого		$\tau_0 = \frac{G}{2\pi r \times (h - h_m)} \times$	10^{-5}	—	более 10^4	6,0	[37]		
5	Пластометр погружного типа Д. Толстого		$\tau_0 = \frac{G}{2\pi d^2}$	10^{-5}	$0,18 \div 45 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^2 - 15 \cdot 10^2$	6,0	[38, 39]		
6	Пластометр Полякова — Солодова		$\tau_0 = \frac{G}{2\pi r h}$	10^{-3}	—	$500 - 10^4$	$\pm 5 \cdot 10 \text{ н.м}^{-2}$	[49]		

Продолжение табл. 3

Номера позиций	Название прибора	Схема прибора	Уравнение измерения СПНС, τ_0	Погреш. измер. СПНС, %		Пределы измерения СПНС		Источники сведений
				$\sigma_{\text{ст. н}}$	$\sigma_{\text{ср. н}}$	С. н.	τ_0 , л. н.²	
7	Пластометр Косьянова — Мухина		$\tau_0 = \frac{G h m}{2 k S}$ <p>k — увеличительное линзы</p>	10^{-5}	—	—	7,0	[40, 41]
8	Вискозиметр со скользящим шариком типа Гепплера		$\tau_0 = \frac{1}{3} R_d \times$ $= \frac{1}{3} R_d \times \frac{(\rho_b - \rho_d) \sin \alpha}{\rho_d}$	10^{-5}	—	до 10^3	50	[50, 51]

В пластинчатом пластометре Вейлера—Ребиндера прямоугольную пластинку из слюды (п. 1) погружают в исследуемую среду и подвешивают к кварцевой или стеклянной пружине. Сосуд с суспензией опускают с постоянной скоростью 3,3 мкм/сек электромотором с приводом. Смещение пластинки регистрируют микроскопом М с окуляр-микрометром или микрофотошкалой, прикрепленной вдоль стеклянной нити подвеса. Установлено, что τ_0 не зависит от размеров пластинок и формы сосуда с исследуемой средой.

На пластометрах Вейлера—Ребиндера измерялось τ_0 глинистых суспензий, золь высокополимеров, консистентных смазок [6—8], золь желатинны и других структурированных дисперсий [26+29].

Однако приборы этого вида пригодны лишь для «мягких» материалов с $\tau_0 < 12 \cdot 10^3$ дн/см²; погрешности регистрации смещения $\sigma_c = 10$ мкм, измерения СПНС — $\sigma_0 \approx 7,4\%$ [6, 28].

Для исследования консистентных смазок создан пластометр МНИ-2 (табл. 3, п. 3), представляющий собой двухплечный рычаг с центральной точкой опоры. На одном из плечей подвешена рифленая пластинка, погруженная в исследуемую среду, а на другом — сосуд, в который поступает вода. Расход воды поддерживают постоянным. Значение смещения пластинки устанавливают и регистрируют микрометром Мк. После того, как левое плечо коснется шпинделя микрометра, электромагнитная система автоматически прекращает нагрузку на пластинку, прекращая поступление воды в сосуд правого плеча [30, 31]. Этот прибор применялся для измерения τ_0 существующих и вновь разрабатывавшихся консистентных смазок. Интервал измерений τ_0 100—10⁶ н/м²; погрешности регистрации деформации среды ± 10 мкм, определения СПНС $\sigma_0 \approx 7,0\%$ [32+34].

Щеголев Г. [35] разработал пластинчатый пластометр. Прибор состоит из кюветы и привода. В кювете располагают рифленую покрытую смазкой пластинку, которую подвешивают к калиброванной пружине. Затем пластинку нагружают при помощи растяжения калиброванной пружины, связанной гибкой нитью со шкивом электродвигателя. Смещение пластинки вызывает замыкание контактов реле, которое и отключает двигатель. Деформацию исследуемой среды измеряют с погрешностью ± 2 мкм с помощью микроскопа МИР-1 в сочетании с винтовым окуляр-микрометром АМ-IX-11. Погрешность измерения τ_0 составляет $\pm 5\%$. Прибор допускает изменение скорости нагружения.

Толстой Д. [36—39] разработал метод горизонтального смещения одной рифленой пластинки относительно другой неподвижной, когда между ними находится слой испытуемого материала и применил его для изучения эффекта пристенного скольжения консистентных смазок. Им же предложены пластометры конического и «плунжерного» типов (табл. 3, пп. 4, 5). Приборы отличаются тем, что создают высококоординатное поле напряжений и просты по устройству. Существенный недостаток этих приборов — влияние подвижной части и исследуемой среды, связанной с ней, что сужает диапазон измерения τ_0 [6, 37]. В приборе можно измерять $\tau_0 > 10^3$ н/м² с погрешностью $\tau_0 \approx 6\%$ при регистрации деформации с погрешностью ± 10 мкм. Приборы применяли для измерения τ_0 консистентных смазок.

Весьма оригинальным является пластометр Касьянова—Мухина [40, 41], являющийся разновидностью пластинчатого пластометра Вейлера—Ребиндера. Прибор оборудован (табл. 3, п. 7) фотоустройством, автоматически регистрирующим зависимость деформации h (смещение пластинки) от времени t , т. е. $h = f_1(t)$. Он позволяет с большой точностью указать на графике значение деформации, отвечающей как τ_0 , так и $\tau_{пл}$.

В приборе осуществлено автоматическое и ручное нагружение пластины. В первом случае деформация регистрируется на фотобумаге, а во втором — визуально с помощью микроскопа. Прибор применялся только для определения τ_0 буровых растворов.

Для измерения вязкости и τ_0 высоковязких систем, таких как битумы, мыла, краски применяли метод продольного смещения одного из коаксиальных цилиндров, между которыми располагалась исследуемая среда [42+45]. В приборе [44] измерялось усилие, вызывающее осевое смещение цилиндрического стержня, помещенного в гладкую стеклянную трубку с испытуемым материалом. Недостатком подобных приборов является появление эффекта пристенного скольжения при высоких напряжениях сдвига.

Толстой Д. применил аналогичный прибор, устранив π -эффект острой винтовой нарезкой на боковой поверхности цилиндрического стержня [38]. Воларович М. совместно с Толстым Д. применили вытягивание шурупа, ввинченного или заплавленного в исследуемую массу с помощью динамометра на 17÷150 н [45].

Маклевский В. и Ребиндер [46] применили в таком же приборе опускающийся равномерно столик, на котором укреплен кювета со средой и ввинченным в нее стержнем, подвешенным к динамометру.

Великовский Д. [47, 48] построил пластометр, основанный на продольном смещении цилиндров, и применил его для измерения τ_0 масел при низких температурах и консистентных смазок при обычных температурах. Прибор представляет собой разновидность рычажных весов, к одному из плеч которого подвешен рифленый цилиндр, погруженный в дисперсную среду, коаксиально второму, неподвижному, а к другому подвешена чаша, куда поступает вода. Смещение коромысла весов при нагружении внутреннего цилиндра вызывает замыкание контакта, зажигание электрической лампочки и снятие нагрузки.

Пластометр Полякова и Солодкова [49] также представляет из себя два коаксиально расположенных цилиндра (табл. 3, п. 6), между которыми находится структурированная дисперсная среда. Внутренний цилиндр подвешен к спиральной цилиндрической пружине, которая прикреплена к гайке, перемещающейся с помощью винта по направляющим. Винт приводится во вращение электромотором. Указатель, связанный с перемещающейся гайкой, регистрирует значение деформации на шкале, показания по которой считываются визуально. Смещение рифленого внутреннего цилиндра вызывает остановку двигателя. Погрешность регистрации смещения 0,1÷0,15 мм. Погрешность определения τ_0 составляет ± 50 н/м². Отклонение от среднего арифметического не превышает 3%. Но значения τ_0 , определенные указанным прибором, отличаются почти на 30% от значений, определенных другими приборами. Пластометр применяли для измерения τ_0 консистентных смазок.

Зуев Ю. С. и Горановский И. Т. применили [50, 51] вискозиметр Геплера [52] для измерения τ_0 (табл. 3, п. 8). Горизонтально расположенный цилиндр заполняют прозрачной упруго-вязко-пластичной средой и помещают в нее стеклянный или металлический шарик. Наклоняют цилиндр к горизонтальной оси и с помощью микроскопа фиксируют начало движения шарика. Мерой СПНС служит угол наклона α , отвечающий концу упругой деформации среды, т. е. τ_0 . Прибор применяли только для измерения τ_0 системы, образующейся при гидролизе сернокислого алюминия (100 мг/дм³) в 0,004 н растворе бикарбоната натрия в присутствии 0,006 н хлористого натрия.

Пластометры со смещающимся шариком или иным телом правильной формы не получили большого распространения.

Однако некоторые вискозиметры, основанные на смещении такого рода тел, могут быть применены также для измерения τ_0 и $\tau_{пл}$. Прибор Риблинга [53], например, без каких-либо конструктивных изменений можно применять для измерения ПНС различных сред. Вискозиметр представляет собой рычажные весы: к левому плечу рычага подвешен «поплавок», представляющий собой цилиндрическое тело с двумя выпуклыми днищами в форме правильных конусов. На одной оси с поплавком расположен сердечник датчика дифференциального трансформатора, связанного со вторичным регистрирующим прибором. К правому плечу подвешена чаша, на которую кладут гири. Прибор применяют для измерения вязкости расплавленных металлов. Измерения τ_0 можно провести следующим образом. Опустить поплавок в исследуемую среду; вывести вторичный прибор на нуль и приложить к правому плечу уравновешенных весов равномерно нарастающую нагрузку. Вторичный прибор вычертит при движении «поплавок» график в координатах «деформация среды — время». По этой кривой можно выделить время δt_0 , отвечающее концу упругой деформации, т. е. τ_0 , и рассчитать значение СПНС по формуле

$$\tau_0 = \frac{dF}{dt} \delta t_0 / S,$$

где S — площадь поверхности «поплавок», m^2 ;
 $\frac{dF}{dt}$ — скорость нарастания нагрузки F $n/сек$.

Погрешность измерения τ_0 на этом приборе может составить один процент.

Основные достоинства приборов этого типа следующие: они создают (кроме пластометра Горановского) однородные поля напряжений, допускают многократные повторные испытания одного и того же образца материала, позволяют измерять τ_0 и $\tau_{пл}$ практически любых упруго-вязко-пластичных сред, обеспечивают измерения ПНС при низких скоростях наложения напряжений.

К недостаткам следует отнести изменение в незначительных пределах скорости наложения напряжений в приборах, низкую надежность регистрации конца упругой деформации, что служит основным источником погрешностей определения τ_0 и $\tau_{пл}$, так как регистрация ПНС происходит либо в зоне упругой деформации, либо после наступления вязкого течения материала.

Исследования консистентных смазок при $20^\circ C$ показали [31, стр. 104], что при изменении скорости наложения напряжений в 3840 раз ПНС изменяется всего в 2,5 раза, а изменения скорости в несколько сот раз практически не влияют на прочностные характеристики смазок. Поэтому приборы второй группы предпочтительнее при измерениях ПНС этих смазок.

Тщательное изучение метрологических характеристик и конструктивных особенностей приборов приводит к следующим общим выводам.

1. Приборы, основанные на тангенциальном смещении поверхности широко применяют для измерения τ_0 и $\tau_{пл}$ дисперсных материалов в диапазоне $0-10^4$ n/m^2 .

2. Для измерения τ_0 и $\tau_{пл}$ «мягких» консистентных смазок и других упруго-вязко-пластичных сред в интервале $0-10^3$ n/m^2 следует применять пластометры Вейлера — Ребиндера.

3. Измерение ПНС сред в интервале 10^2-10^4 n/m^2 следует проводить пластометром МНИ-2. Рабочий диапазон температур прибора — $50^\circ \pm 50^\circ C$; скорость наложения напряжений 33 $n/(m^2 \cdot сек)$; погрешность регистрации ПНС $\sigma_0 = 7\%$.

Метод вращения одной поверхности относительно другой
(ротационный метод)

Номера позиций	Название прибора	Схема прибора	Уравнение измерения СПНС, τ_0	Скорость деформации	Погрешность регистрации нагрузки	Пределы измерения СПНС	Погрешность измерения СПНС	Источник сведений
				$\dot{\epsilon}$, сек^{-1}				
1	Ротационный вискозиметр РВ-7		$\tau_0 = k \frac{(P - P_0)}{k - R_1} = \frac{2\pi(R_2 h - r^2)}$	$5 \cdot 10^{-8} \rightarrow 10^4$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 - 10^4$	7.0	[6], [67]
2	Прибор Гораздовского		$\tau_0 = \frac{R_1 (P - P_0)}{\pi^2 r R_2^2}$		$5 \cdot 10^{-3}$	$5 - 10^4$	0.8	[85]
3	Компенсационный эласто-вискозиметр-3 Тралезникова		$\tau_0 = \frac{k\varphi}{2\pi r h} = \frac{J_p G}{I}$	$5 \cdot 10^{-6} \rightarrow 10^4$		$10^{-3} \rightarrow 10^4$	3.0	[81]
4	Компенсационный вискозиметр		$\tau_0 = \frac{kJ}{4\pi r h}$					[86]

4. Применение высокоточных индукционных и фотоэлектрических датчиков смещений, работающих в комплекте со вторичными приборами, позволит автоматически записать зависимость деформации среды от времени; надежно выделить по графику конец упругой деформации и соответственно повысить точность измерений СПНС на порядок.

§ 3. Ротационный метод

Этот метод заключается в том, что испытуемую упруго-вязко-пластичную среду располагают между двумя коаксиальными поверхностями (например, конус—конус). Одну из этих поверхностей закрепляют, а к другой прикладывают равномерно нарастающий вращающий момент. При отсутствии π -эффекта наступает сдвиг одного слоя среды, увлекаемого поворачивающейся поверхностью, относительно другого ее слоя, связанного с неподвижной поверхностью. Вращающий момент μ_0 регистрируют, когда поворот произошел на угол, отвечающий τ_0 или $\tau_{пр}$ среды. Уравнение измерения τ_0 в этом случае имеет вид:

$$\tau_0 = \xi (M_0, a_1, \dots, a_n), \quad (9)$$

где a_1, \dots, a_n — геометрические и другие параметры поверхности вращения и прибора.

Ниже подробно рассмотрено измерение τ_0 среды с помощью вращения одной цилиндрической поверхности относительно коаксиальной ей другой, когда между ними расположена испытуемая среда. Смещение слоев среды с помощью других форм вращающихся поверхностей осуществлено приборами, схемы и некоторые характеристики которых приведены в табл. 4.

3.1. Смещение слоев среды вращением рифленого цилиндра

Рифленый подвижный цилиндр 1 (рис 2) помещают в испытуемую среду 2 так, чтобы его вертикальная ось вращения OO_1 совпала с осью неподвижного наружного цилиндра 3. С помощью специальных устройств прикладывают к внутреннему цилиндру равномерно нарастающий (или постоянный) вращающий момент μ_n . После того, как этот момент вызовет поворот цилиндра на угол, отвечающий концу упругой деформации среды, т. е. появлению в ней напряжений сдвига, равных τ_0 или $\tau_{пр}$, регистрируют момент μ_0 . При этом считают, что сдвиг происходит (при отсутствии проскальзывания)—между слоями самой среды, а площадь сдвигаемого слоя равна площади боковой поверхности подвижного цилиндра. Поэтому

$$\tau_0 = \frac{\mu_0}{2\pi R h}, \quad (10)$$

где R, h — радиус и высота подвижного цилиндра.

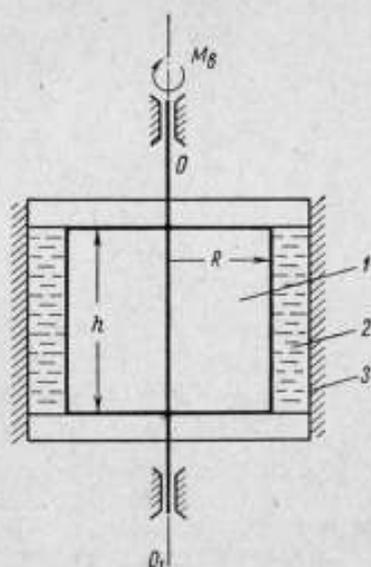


Рис. 2. Схема ротационного пластометра с цилиндрическими поверхностями.

1, 3 — подвижный и неподвижный цилиндры; 2 — упруго-вязко-пластичная среда.

Впервые смещение слоев среды вращением цилиндра, опущенного в нее, применил Шведов Ф. Н. [54—56]. Им исследованы аномалии вязкости и упругие свойства растворов желатинны и на основе этих исследований предложено уравнение течения упруго-вязко-пластичной среды, названное впоследствии уравнением Бингама—Шведова.

Ранее теория ротационного вискозиметра с вращающимся цилиндром для ньютоновских жидкостей была развита Н. П. Петровым [57, 58].

Затем Куэтт [59] построил вискозиметр с вращающимся цилиндром. В приборах Шведова—Куэтта внутренний цилиндр подвешивался к упругой металлической нити и погружался в исследуемую среду коаксиально наружному цилиндру, вращение которого передавалось через среду внутреннему цилиндру. Этот цилиндр поворачивался вокруг своей оси до тех пор, пока момент упругих сил нити подвески не уравновешивался моментом вращения. По углу поворота внутреннего цилиндра судили о вязкости и других характеристиках жидкости, в которую он был погружен.

Многие ротационные приборы, возникшие в последнее время, отличаются большой сложностью, однако они получили широкое распространение [60+66] для измерения реологических характеристик ньютоновских и неньютоновских жидкостей.

Измерение же τ_0 и $\tau_{0н}$ с помощью вращения цилиндра проводил впервые Воларович М. П. [67], давший эмпирическую формулу измерения этих величин (табл. 4, п. 1).

3.2. Характеристики приборов, основанных на вращении одной поверхности относительно другой (табл. 4)

Приборы третьей группы можно подразделить на два вида в зависимости от того, как определяют вращающий момент: по углу закручивания нити подвески внутреннего цилиндра (может быть тело другой формы) или по значениям масс грузов, приводящих систему во вращение при своем падении. Приборы первого вида получили различные названия: ротационные пластовискозиметры, эластовискозиметры, эласторелаксометры и другие (табл. 4, п. 3). Их применяют как для измерения ПНС, так и для различных реологических характеристик сред. Приборы второго вида обычно называют вискозиметрами (табл. 4, п. 1).

Ротационных приборов, служащих только для измерения τ_0 и $\tau_{0н}$, не существует.

В практике применяют различные модификации приборов третьей группы: конус—конус, конус—плоскость, цилиндр—цилиндр, полусфера—полусфера и другие.

В СССР пластовискозиметр типа ПВР-1 [68+70] принят в качестве стандартного прибора для определения СПНС и эффективной вязкости консистентных смазок (ГОСТ 9127—59).

Испытательный узел этого прибора представляет собой два соосных цилиндра, между которыми существует зазор, заполняемый испытуемой смазкой. Внутренний цилиндр приводят во вращение электромотором. Вращение этого цилиндра передается наружному, связанному с динамометром—торсионом. При некоторой скорости вращения внутреннего цилиндра торсион закручивается и напряжение сдвига в смазке достигает значения, характеризующего переход от упругой деформации к пластичной. СПНС рассчитывают по максимальному углу закручивания φ_0 по уравнению

$$\tau_0 = C\varphi_0, \quad (11)$$

где C — постоянная прибора, $n/\text{рад} \cdot \text{м}^2$.

Из-за малой величины зазора между цилиндрами (около 2 мм) в приборах этого типа создается высокая степень однородности поля напряжений в зоне деформации сдвига (97+98%). Прибор позволяет измерять ПНС в интервале $30 \div 5000 \text{ н/м}^2$ при различных скоростях наложения напряжения. Однако, на этом приборе фактически измеряют не τ_0 , а $\tau_{\text{пл}}$, так как скорость деформации велика ($0,4 + 3 \cdot 10^3 \text{ 1/сек}$), что приводит к сильному разрушению структуры среды. По этой же причине приборы Павловского [71], Иванова [72], Харпера [73], Габриша [74], Вельмана [75], Латышева [76], Мак—Кеннеля [77] не пригодны для измерения СПНС. Вместе с тем эти приборы позволяют получить полную реологическую кривую (зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига) и по ней определить динамическое предельное напряжение сдвига — ДПНС. Это значение напряжения, отсекаемое прямолинейным участком кривой при его экстраполяции до оси напряжений, численно равно СПНС системы с полностью разрушенной структурой.

Широко распространены торсионные ротационные приборы типа СНС-1 и СНС-2, применяемые для измерения СПНС глинистых растворов [78, 79]. Здесь, как и в приборе Шведова, приводится во вращение наружный цилиндр. Скорость вращения может изменяться синхронным электромотором с редуктором. На боковой поверхности внутреннего цилиндра, подвешенного на торсионе, имеются продольные риски (рифления) для устранения пристенного скольжения глинистых суспензий. Зазор между цилиндрами может измениться в пределах $0,098 - 0,192 \text{ см}$; максимальная скорость вращения внешнего цилиндра 5 об/сек . На приборе [78] можно измерять τ_0 в пределах от $16 - 20 \text{ н/м}^2$, погрешность измерения τ_0 достигла $\sigma = 6,0\%$.

Аналогично устроен прибор Грина [80]. Скорость вращения внешнего цилиндра изменяется в интервале $5 + 200 \text{ об/мин}$, тогда как число оборотов ротора электромотора остается все время постоянным — 1800 об/мин . Прибор может применяться для измерения ПНС различных сред.

Трапезниковым [81] разработан эластовискозиметр (см. табл. 4, п. 3). Рифленный цилиндр помещен коаксиально в цилиндр с исследуемой средой и подвешен к упругому торсиону. К внутреннему цилиндру прикреплено зеркальце, на которое падает луч света и отражается на шкалу. При равномерном ручном закручивании торсиона наступает момент, когда в среде между цилиндрами напряжение сдвига станет равным τ_0 или $\tau_{\text{пл}}$.

Затем торсион раскручивается. Угол закручивания, отвечающий τ_0 или $\tau_{\text{пл}}$, фиксируют по шкале.

При длине торсиона l , полярном моменте инерции J , модуле сдвига материала торсиона G и угле закручивания φ_0 СПНС определяют по формуле:

$$\tau_0 = \frac{JG\varphi_0}{2\pi r h l}, \quad (12)$$

$$\tau_0 = C\varphi_0.$$

т. е. $\tau_0 = C\varphi_0$,

где r, h — радиус и высота внутреннего цилиндра.

Эластовискозиметр этой модификации может, кроме того, работать так же, как и прибор Шведова—Куэтта.

Погрешность регистрации СПНС составляет приблизительно три процента. Зазор между цилиндрами 1 мм и менее, привод с мотором и коробка скоростей позволяют вращать внешний цилиндр с постоянной угловой скоростью в интервале $10^{-5} - 10^3 \text{ об/мин}$.

За рубежом для исследования реологических характеристик полимеров, масел, красок, асфальтов, расплавов полимеров разработан вискозиметр Гайнца [82]. Этот торсионный прибор с реостатным датчиком измерения крутящих моментов вполне применим и для измерения СПНС и предела прочности на сдвиг в диапазоне $1,0 \div 10^5 \text{ н}\cdot\text{м}^{-2}$. Рабочие диапазоны температур — $60 \div 300^\circ \text{С}$, скоростей деформаций $10^{-2} \div 10^4 \text{ сек}^{-1}$; интервал измерения вязкости $5 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^6 \text{ н}\cdot\text{сек}\cdot\text{м}^{-2}$.

Микропластометр Гобан—Кенеса [83], у которого, как и у эласто-вискозиметра Трапезникова, применили в качестве измерителя крутящих моментов торсион с визуальным оптическим отсчетом, нашел распространение для исследования расплавов полимеров. Интервал рабочих температур — $80 \div 300^\circ \text{С}$, скорость деформаций от 0,2 до 600 сек^{-1} , вязкость в диапазоне $10^{-2} \div 10^5 \text{ н}\cdot\text{сек}\cdot\text{м}^{-2}$, развивает в среде напряжения сдвига от 2 до $3 \cdot 10^4 \text{ н}\cdot\text{м}^{-2}$. Прибор может измерять ПНС в интервале $2 \div 3 \cdot 10^4 \text{ н}\cdot\text{м}^{-2}$.

Торсионный реогониометр Ламмимана и Робертса [84] с индукционным датчиком крутящих моментов также применяли для исследования полимеров в диапазоне температур — $40 \div 350^\circ \text{С}$ при скорости деформаций $10^{-4} \div 10^3 \text{ сек}^{-1}$. Прибор развивает в среде сдвиговые напряжения от $7,9 \cdot 10^{-2}$ до $4 \cdot 10^5 \text{ н}\cdot\text{м}^{-2}$, измеряет вязкость от 10 до $10^7 \text{ н}\cdot\text{сек}\cdot\text{м}^{-2}$ и может измерять ПНС от $8 \cdot 10^{-2}$ до $4 \cdot 10^5 \text{ н}\cdot\text{м}^{-2}$.

Приборы с торсионным типом измерителя крутящих моментов обладают большой чувствительностью, высокой точностью измерения реологических характеристик исследуемых сред и создают в зоне сдвига однородное поле деформаций.

Однако конструкции приборов очень сложны. Заполнение малого зазора между цилиндрами высоковязкими средами без пустот крайне затруднительно. Все это сужает область применения приборов этого вида.

Типичным прибором второго вида, у которого вращающий момент определяют по значениям масс грузов, приводящих систему во вращение при своем падении, является ротационный вискозиметр РВ-7 Воларовича [67] (табл. 4, п. 1) и Оверберга—Ладермана [65].

Прибор нашел применение для измерения ПНС торфа, масел при низких температурах, консистентных смазок и других сред.

Гораздовский [85] разработал прибор для абсолютных реологических испытаний жидких и консистентных материалов (табл. 4, п. 2). Основной частью прибора служит полутор, который расположен в полутороидальной чаше. Между ними образован зазор, заполняемый исследуемым материалом.

Полутор приводит во вращение падающим грузом. Прибор автоматически регистрирует развитие деформаций в среде. Минимальный момент, вызвавший сдвиг полутора на необходимую величину, служит мерой СПНС, определяемого из уравнения измерения.

Соприкосновение полутора со средой на большой площади усредняет свойства этой среды, которые при заполнении чаши бывают не изотропными.

Интервал регистрации ПНС $5 \div 10^4 \text{ н}\cdot\text{м}^{-2}$.

К недостаткам прибора следует отнести: сложность термостатирования среды, отсутствие устройств, обеспечивающих равномерное нарастание вращающего момента.

Прибор можно считать абсолютным, так как все уравнения измерения выведены аналитически. (Погрешность измерения ПНС автором не приводится).

Прибор применяли для измерения ПНС консистентных смазок и других сред.

Исследователями и конструкторами разработаны ротационные приборы для автоматического измерения реологических характеристик неньютоновских жидкостей [61, 62].

Автоматический компенсационный вискозиметр, описанный в работе [86], может послужить прототипом для измерения ПНС в интервале $0 \div 100 \text{ нм}^{-2}$.

Прибор представляет собой вискозиметр типа «Цилиндр—цилиндр» (табл. 4, п. 4). Наружный цилиндр 1 приводится во вращение от электродвигателя ЭД. Это вращение передается через испытываемую среду внутреннему цилиндру 2. Если цилиндр 2 повернется на некоторый угол, то световой поток на фотозлемент 3 уменьшится, что приведет к снижению отрицательного потенциала на сетке триода 4. Вследствие этого анодный ток триода увеличится и датчик 5 противомоментов возвратит систему в исходное состояние. Мерой ПНС может служить анодный ток триода 4. Шкала амперметра 6 в анодной цепи триода может быть проградуирована непосредственно в единицах ПНС.

Основные погрешности у ротационных приборов вызваны:

1. Непостоянством силы трения в подшипниках и других узлах трения.
2. Измерением вращающего момента.

В приборе РВ-7, например, грузы, компенсирующие силы трения, могут быть известны экспериментатору с погрешностью порядка 25%.

В ротационных приборах измерение момента сил с помощью упругого подвеса, градуированного статическим методом, возможно с погрешностью порядка 0,5% [87].

Исследования ротационных приборов показали, что можно сделать следующие общие выводы:

1. Ротационные приборы нашли широкое применение для измерения ПНС различных структурированных дисперсных систем в диапазоне $10^{-3} \div 10^4 \text{ н} \cdot \text{м}^{-2}$. У неразрушенных структур ПНС должны измерять при низких скоростях деформаций, т. е. 10^{-6} сек^{-1} и ниже.

2. Однородные поля напряжений создаются в ротационных приборах при весьма малых зазорах между рабочими поверхностями, что затрудняет заполнение приборов высококонсистентными материалами.

3. Предпочтительными приборами для измерения ПНС сред в интервале $10^{-3} \div 10^4 \text{ н} \cdot \text{м}^{-2}$ являются торсионные ротационные приборы. Погрешность определения ПНС $\sigma_0 = 3,0\%$.

4. Применение автоматических средств регистрации вращающих моментов и углов поворота позволит автоматизировать процесс измерения ПНС сред и повысить точность измерения.

§ 4. Капиллярный метод

Исследуемую среду помещают в капилляр. Прикладывают к столбику среды равномерно-нарастающее давление. При отсутствии проскальзывания вдоль стенок капилляра наступает сдвиг столбика среды по самой среде, связанной со стенками капилляра. Измеряют давление среды p_0 , вызвавшее сдвиг среды на величину, отвечающую концу упругой деформации, т. е. τ_0 (или концу деформации ползучести, т. е. τ_{00}). Это давление связано с τ_0 уравнением:

$$\tau_0 = f_2(p_0; l; d), \quad (13)$$

где l, d — геометрические параметры столбика смещаемой среды.

Ребиндер П. А., Богуславская Н. А. и другие [88; 89] предложили (в случае цилиндрического капилляра) зависимость (14) для определения τ_0

$$\tau_0 = \frac{P_0 r}{2l}, \quad (14)$$

где r — радиус капилляра;

l — длина отрезка капилляра, заполненная исследуемой средой.

Приборы капиллярного типа для измерения τ_0 получили название капиллярных пластометров

В табл. 5 приведены схемы, уравнения измерений и ряд характеристик некоторых капиллярных пластометров.

Санин П. И. [90, 91] разработал капиллярный микропластометр для измерения τ_0 смазочных масел и других нефтепродуктов при низких температурах (табл. 5, п. 1).

Основной частью прибора служит набор тщательно выверенных градуированных капилляров. Горизонтальную часть капилляра диаметром 2 мм заполняли маслом и после термообработки и выдерживания при комнатной температуре помещали в криостат. Повышали давление на масло. В момент смещения столбика масла в капилляре отмечали по жидкостному манометру давление P_0 , вызвавшее сдвиг масла. Затем τ_0 определяли по уравнению измерения Ребиндера.

Термокриостатом служил аппарат Геннинга—Кусакова [92, 93], модернизированный определенным образом. Температуру криостатной жидкости в интервале $0 \div -100^\circ \text{C}$ поддерживали постоянной с погрешностью $\pm 0,05^\circ \text{C}$. Смещение масла в капилляре наблюдали визуально с помощью микроскопа с окуляр-микрометром. Увеличение составило 20.

Длина столбика масла $l = 30$ мм; погрешность регистрации смещения ± 50 мкм. Измерения τ_0 проводили при различных скоростях наложения давления:

$$5 \text{ мм}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ — при } 0 < \tau_0 \leq 128 \text{ мм}^{-2},$$

$$66,3 \text{ мм}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ — при } 128 < \tau_0 \leq 640 \text{ мм}^{-2}.$$

В работе [90] утверждается, что прибор можно применять для измерения τ_0 в диапазоне $0 \div 10^4 \text{ мм}^{-2}$.

Исследования показали, что значения τ_0 в широких пределах не зависят от скорости наложения давления, диаметра капилляра и длины столбика масла, загруженного в капилляр. Погрешность определения τ_0 достигала 10%.

Другой разновидностью капиллярного пластометра является прибор К-2, рекомендуемый ГОСТ 7143—54 для измерения τ_0 консистентных смазок. Этот прибор широко применяют в лабораториях промышленности (табл. 5, п. 2).

Прибор представляет собой разборный рифленный капилляр, заполняемый исследуемой средой.

Давление на испытываемую среду создают расширяющимся от нагревания минеральным маслом и регистрируют манометром. Погрешность регистрации давления 1000 мм^{-2} . τ_0 определяют по формуле (14).

Сорокин [32] исследовал на пластометре К-2 различные консистентные смазки. Он установил, что в этом приборе точной фиксации давления, соответствующего τ_0 , достичь невозможно. Визуально нельзя отметить сдвиг смазки в капилляре раньше, чем столбик смазки сдвинется на $200 \div 300$ мкм, что в $1,5 \div 2$ раза превосходит упругую деформацию всех консистентных смазок. Таким образом, основным недостатком пласти-

Таблица 5

Капиллярный метод

Номера позиций	Название прибора	Схема прибора	Уравнение измерения СПНС, τ_0	Погр. регист. смещения среды σ , мм	Скорость наложения и снятия дна $\text{мм}^{-2} \text{сек}^{-1}$	Пределы измерения СПНС τ_0 , мм^{-2}	Погрешность измерения, СПНС		Источник сведений
							σ_1 , %	σ_2 , %	
1	Капиллярный микропластометр Савина		$\tau_0 = \frac{P_M d}{4l}$ $P_M = P_1 - P_2$	25	5—66,3	до 640	10	[90]	
2	Пластометр Клямова К-2		$\tau_0 = \frac{P_M \cdot 2}{2l}$	200+300	41 и 82	—	7,0	[101, 102] ГОСТ 7143—54	
3	Пластометр капиллярного Симониана		$\tau_0 = \frac{P_M d}{2l}$	25	—	до 10	8,3	[103]	

метра К-2 является то, что регистрация давления, вызвавшего сдвиг смазки, происходит в зоне вязкого течения, т. е. далеко за пределом упругости.

На значения СПНС, определяемые этим прибором, накладываются силы вязкого течения. В связи с таким влиянием погрешность регистрации СПНС достигает $\pm 10\%$.

Исследования упруго-вязко-пластичных тел с помощью капиллярных вискозиметров проводили Курнаков [94], Арвесон [95], Виноградов и Павлов [96], Фукс Г. И. [97], Варенцов [98, 99], Великовский [100] и другие [101, 102].

Измерения τ_0 консистентных смазок капиллярными пластометрами проводили также Климов [102], Агранат [6], Симонян [103].

Пластометр Симоняна (табл. 5 и 3) представляет из себя два цилиндра: один заполняют смазкой 1, второй, меньшего диаметра, — некоторой жидкостью. В качестве дна второго цилиндра служит упругая мембрана 2, его полость связана с жидкостным манометром.

Регистрируют максимальное давление жидкости P_0 в цилиндре, являющееся мерой СПНС консистентной смазки, столбик которой именно при этом давлении сдвинется на некоторую величину.

Предельное напряжение сдвига τ_0 вычисляют по уравнению измерения

$$\tau_0 = \frac{p_0 d}{4l}.$$

где d — диаметр мембраны.

Прибор применяли также для измерения τ_0 торфа.

Существенными недостатками прибора являются узость диапазона измерения СПНС, отсутствие термостатных устройств и средств, автоматически регистрирующих смещение исследуемой среды, низкая точность определения τ_0 ($\sigma_0 \approx 8\%$).

Изучение капиллярных пластометров показало следующее:

1. Эти приборы не получили широкого распространения. Однако пластометр К-2 применяют при технических измерениях τ_0 консистентных смазок.

2. Капиллярные пластометры обладают низкой точностью ($\sigma_0 \approx 10\%$); загрузка приборов высококонсистентными средами затруднительна; визуальный метод регистрации деформаций является главным источником погрешностей измерения СПНС.

3. Пластометры капиллярного типа следует применять при низкотемпературных исследованиях сред, которые при нормальных температурах являются текучими.

Заключение

Анализируя четыре рассмотренные выше метода измерения ПНС, можно сделать общий вывод.

Разные методы и приборы, основанные на одном и том же принципе, дают результаты, расходящиеся в пределах до 9,0%, что значительно превосходит возможные погрешности непосредственно самих измерений ПНС.

Наиболее рациональным следует считать метод, основанный на измерении усилий при тангенциальном смещении одной поверхности среды относительно другой.

При этом методе воспроизводится движение среды, в соответствии с которым сформулировано определение ПНС и потому измерения наиболее близки к абсолютным.

Кроме того, приборы, основанные на этом методе, дают наилучшую воспроизводимость результатов измерений и легко допускают необходимую автоматизацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сегалова Е. Е., Ребиндер П. А. Коллоидный журнал, т. 10 № 3, стр. 223, 1948.
2. Ребиндер П. А., Сегалова Е. Е. ДАН СССР, т. 71, № 1, стр. 85, 1950.
3. Ребиндер П. А., Семенов Н. А. ДАН СССР, т. 64, № 6, стр. 835, 1949.
4. Ямпольский Б. Я., Ребиндер П. А., «Коллоидный журнал», т. 10, № 6, стр. 466, 1948.
5. Ребиндер П. А., Поспелова К. А. Конспект общего курса коллоидной химии, изд. МГУ, 1950.
6. Агранат Н. Н. Сравнение методов измерения ПНС авиационных и др. консистентных масс. Автореф. дисс. Московский авиационный Орден Ленина институт им. С. Орджоникидзе, М., 1956.
7. Агранат Н. Н., Воларович М. П., «Коллоидный журнал», т. 19 № 1, стр. 3, 1957.
8. Агранат Н. Н., Широков М. Ф. «Коллоидный журнал», т. 19, № 1, стр. 9, 1957.
9. Соколовский В. В. Теория пластичности. М., Гостехиздат, 1950.
10. Ишлинский А. Ю. «Журнал прикладной математики и механики», т. 8, стр. 3, 1944.
11. Генки Г. В сб. «Теория пластичности» под ред. Ю. Н. Работнова, Л.—М. 1948.
12. Ильющин А. А. Пластичность. М., Гостехиздат, 1948.
13. Воларович М. П., Марков С. Н. «Заводская лаборатория», 17, № 12, стр. 1461, 1951.
14. Фукс Г. И., Николаева Н. И. «Заводская лаборатория», т. 29, № 11, стр. 1339, 1963.
15. Великовский Д. С. Нефтяное хозяйство, № 2, стр. 35, 1950.
16. Воларович М. П. «Коллоидный журнал», т. 9, № 5, стр. 325, 1947.
17. Воларович М. П., Гораздовский Т. Я. «Коллоидный журнал», т. 11, № 1, стр. 12, 1949.
18. Багров А. А. «Коллоидный журнал», т. 28, № 2, стр. 179, 1966.
19. Федотов А. И., Чураев Н. В. «Коллоидный журнал», т. 28, № 2, стр. 295, 1966.
20. Жуковский С. С., Гуткин А. М. «Коллоидный журнал», т. 28, № 1, 1966.
21. Шацов Н. И. Бурение нефтяных скважин. М.—Л., т. 1, стр. 38, 1948.
22. Вейнберг Б. П. Журнал русско-физико-химического общества, ч. физическая, т. 44, № 9, стр. 514, 1912.
23. Дудецкий В. Д. Журнал русско-физико-химического общества № 9, стр. 519, 1913.
24. Wachholtz F, Asbeck W. K., «Koll. Z.» т. 93, стр. 280, 1940; т. 94, стр. 66, 1941.
25. Nutting, Proc. A. S. T. M., т. 21, стр. 1162, 1921.
26. Вейлер С. Я., Ребиндер П. А. ДАН СССР, т. 49, № 5, стр. 354, 1945.
27. Серб-Сербина Н. Н., Вестник АН СССР, № 5, стр. 101, 1947.
28. Вейлер С. Я. «Заводская лаборатория», т. 14, № 4, стр. 432, 1948.
29. Арон Б. Я., Ребиндер П. А. ДАН СССР, т. 52, № 3, стр. 235, 1946.
30. Авчина С. А., Каракаш С. И., Карпинин Б. Н. Труды МИНХ и Г. П. им. И. М. Губкина, вып. 32, изд-во «Химия», 1960, стр. 141.
31. Великовский Д. С., Поддубный В. Н., Вайншток В. В., Готовкин Б. Д. Консистентные смазки, изд-во «Химия», М., 1966, стр. 100.
32. Сорокин Г. И. Солеонды на синтетическом омыляемом сырье. Автореф. дисс., МИНХ и ГП им. И. М. Губкина, М., 1955.
33. Вайншток В. В. Санирующие и алюминиевые мыла, как модификаторы структур литневых консистентных смазок. Автореф. дисс., МИНХ и ГП им. И. М. Губкина, М., 1962.
34. Фукс И. Г. Литневые смазки с наполнителями. Их свойства и применение. Автореф. дисс., МИНХ и ГП им. И. М. Губкина, М., 1966.
35. Щеголев Г. Г., Толмачев А. М., Трапезников А. А. «Заводская лаборатория», № 5, стр. 625, 1959.
36. Голстой Д. М., «Коллоидный журнал», т. 9, № 6, стр. 450, 1947; т. 10, № 2, стр. 133, 1948.

37. Толстой Д. М. ДАН СССР, т. 77, № 5, стр. 847, 1951.
38. Толстой Д. М. ЖФК, т. 5, № 5, стр. 548, 1934.
39. Вадарович М. П., Лошакова К. П. «Коллоидный журнал», т. 8, № 3, стр. 127, 1946.
40. Касьянов Н. М. Исследование реологических свойств новых промывочных жидкостей, применяемых в бурении. Автореф. дисс., МИНХ и ГП им. И. М. Губкина, М., 1960.
41. Касьянов Н. М., Мухин Л. К. Известия высших учебных заведений, серия «Нефть и газ», М., № 8, 1959.
42. Segel M., Physik Z., 4, 443, 1903.
43. Тамман G., Z. Phys. Chem., 17, 28, 1889.
44. Roschettino A. Nuovo Cimento, 8, 77, 1914.
45. Воларович М. П., Толстой Д. М. «Коллоидный журнал», т. 6, № 5, стр. 409, 1940.
46. Макневский В. Б., Ребиндер П. А. ДАН СССР, т. 26, № 1, стр. 48, 1940.
47. Великовский Д. С. Консистентные смазки, свойства, и ведение в технологию, М.—Л., Гостоптехиздат, 1945.
48. Великовский Д. С. Труды первой конференции по трению и износу в машинах, изд-во АН СССР, т. 1, стр. 394, 1939.
49. Поляков А. И., Солодов С. Н. «Заводская лаборатория», т. 19, № 1, стр. 113, 1953.
50. Зуев Ю. С. «Коллоидный журнал», т. 12, № 10, стр. 36, 1950.
51. Горновский И. Т. «Заводская лаборатория», № 8, стр. 840, 1953.
52. Золотых Е. В. Вывод основной формулы для вискозиметра с наклонной трубкой. «Измерительная техника», № 44, 1962.
53. Риблинг. Приборы для научных исследований (ежемесячный журнал американского института физики), русский перевод, № 5, 1963.
54. Воларович М. П. «Коллоидный журнал», т. 16, № 3, стр. 227, 1954.
55. Schwedoff F., Je de physik, 8 (2), 341, 1889; 9 (2), 34, 1890.
56. Воларович М. П., Леви С. М. «Коллоидный журнал», т. 18, стр. 129, 1956.
57. Петров М. П. «Инженерный журнал», № 27, стр. 1+4, 1883.
58. Воларович М. П. Труды II Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, Т. 3, стр. 5, 1949.
59. Suicette M. Ann de chim. et phys., (6), 21, 433, 1890.
60. Воларович М. П. Труды Совещания по вязкости жидкостей и коллоидных растворов, т. 2, изд-во АН СССР, 1944.
61. Воларович М. П., Лазовская Н. В. «Коллоидный журнал», т. 28, № 2, стр. 198, 1966.
62. Белкин И. М., Крашенинников С. К. «Заводская лаборатория», т. 31, № 2, стр. 185, 1965.
63. Гуревич М. М. «Коллоидный журнал», т. 21, № 2, стр. 164, 1959.
64. Philipproff W., Gaskins F. H. J. Polymer Sci, 21, 98, 205, 1956.
65. Overberg R. J., H. Leaderman. J. Res. Nat. Bur. standarts, 65 c, 1, 9, 1961.
66. Fung L. H. J. Polimer sci., 46, 148, 409, 1960.
67. Воларович М. П. «Заводская лаборатория», т. 11, № 9, стр. 831, 1945.
68. Виноградов Г. В., Павлов В. П. ДАН СССР, т. 114, стр. 995, 1957.
69. Осокина Д. Н., Гзовский М. В., Виноградов Г. В., Павлов В. П., «Коллоидный журнал», т. 22, стр. 434, 1960.
70. Павлов В. П., Виноградов Г. В. Аннотация работ по химии и технологии нефти и газа за 1956 г. Изд-во АН СССР, 1957.
71. Rawlowski J. Chem.—Ingr—Fechn., 26, 12, 786, 1956.
72. Иванов П. А. «Заводская лаборатория», т. 23, № 4, стр. 457, 1957.
73. Harper J. C. Rev. Sci. Instr., 32, 4, 425, 1961.
74. Gabrysh A. F., G. Rec. H. Eyring, N. McKil, I. Kutler. Frans. Sos. Rheol. 5, 67, 1961.
75. Weltman R. N., Kuhns P. W. Lubricat. Eng., 13, 1, 43, 1957.
76. Латышев К. Новости нефтяной и газовой техники, № 3, стр. 11, 1961.
77. Mckennell R. Analyt. Chem., 32, 11, 458, 1960.
78. Филатов Б. С. «Коллоидный журнал», т. 16, № 3, стр. 141, 1954.
79. Мискарли А. К., Зелменская В. Я., Гасанова Т. Г., «Азербайджанский химический журнал», № 3, 1939.
80. Green H., Industrial Rheology and Reological Structures, London—New York, 1949.
81. Трапезников А. А. Вестник АН СССР, 30, № 6, стр. 70, 1960.
82. Heinz W. Materialpruff., 2, 9, 345, 1960.
83. Keres A. I. Polymer Sci, 22, 102, 409, 1956.

84. Lamhman K. A., Roberts I. E. Lab. Practice, 10, 11, 816, 1961.
85. Гораздовский Т. Я. «Заводская лаборатория», т. 17, № 3, стр. 373, 1951.
86. Hartmann—Braun A. G. Mess. und Regeltechnik, Rotations—Viskosimeter, Frankfurt, (1961).
87. Степанов Л. П. Измерение вязкости жидкостей. М., 1966, стр. 37.
88. Ребиндер П. А., Богусловская Н. А., Макиевский В. Б. Труды совещания по вязкости жидкостей и коллоидов. Изд. АН СССР, т. 2, стр. 173, 1944.
89. Макиевский В. Б., Ребиндер П. А. «Журнал физической химии», т. 14, стр. 1509, 1940.
90. Санин П. И. «Заводская лаборатория», т. 16, № 7, стр. 819, 1950.
91. Труды Совещания по низкотемпературным свойствам нефтепродуктов. М., Гостехиздат, 1949.
92. Техника физического эксперимента. Под ред. А. Ф. Иоффе, ГИЗ, М.—Л., стр. 47, 1929.
93. Кусаков М. М. Известия АН СССР. ОТН № 10—11, стр. 673, 1944.
94. Курнаков Н. С., Жемчужный С. Ф., ж. РФХО (часть химическая), т. 45, стр. 1004, 1914.
95. Arveson M. H. Ind. Eng. Chem, 24, 71, 1932; 26, 628, 1934.
96. Виноградов Г. В., Павлов В. П. Низкотемпературные свойства нефтепродуктов. М., Гостехиздат, 1949.
97. Фуке Г. И., Мечковская Т. А. «Заводская лаборатория», т. 15, № 4, стр. 430, 1949.
98. Варенцов В. П. Труды совещания по вязкости жидкостей и коллоидных растворов, т. 1, стр. 197, 1941.
99. Варенцов В. П. Теория и практика производства консистентных смазок, Гостехиздат, стр. 43, 1939.
100. Великовский Д. С. Труды первой конференции по трению и износу в машинах, изд. АН СССР, т. 1, стр. 394, 1939.
101. Виноградов Г. В., Климов К. И. ЖТФ, т. 18, стр. 3, 1948.
102. Климов К. И. «Заводская лаборатория», т. 21, № 4, стр. 491, 1955.
103. Симонян А. А. Торфяная промышленность. № 10, стр. 24, 1953.

Поступила в редакцию 15/XI 1968 г.

М. И. КОНДРАТЕНКО
ВНИИМ

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТОМЕТРА МНИ-2, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СДВИГА КОНСИСТЕНТНЫХ СМАЗОК

Консистентные смазки (КС) представляют собой структурированные тиксотропные дисперсии твердых загустителей в жидкой среде, которую составляют различные масла нефтяного, растительного и синтетического

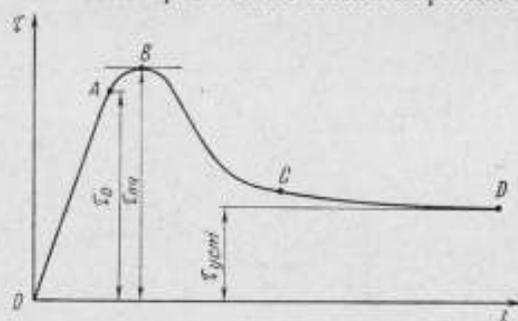


Рис. 1. Зависимость напряжения сдвига τ от деформации l при $\frac{dv}{dx} = \text{const}$.

OA, AB, BC, CD — области упругой деформации, ползучести, лавинного разрушения структурного каркаса и пластической деформации соответственно.

происхождения [1, 2, 3]. Загустителями служат мыла жирных кислот, твердые углеводороды, а также некоторые виды глин, пигментов и тугоплавких продуктов [1, 4, 5, 6]. Структура КС определяется формой и размерами дисперсных частиц и способностью их вступать во взаимосвязь с образованием сплошного структурного каркаса, в ячейках которого удерживается вязкая дисперсионная среда. Подтверждением тому, что КС имеют структурный каркас [7], а следовательно, обладают и упругими свойствами подобно твердым монолитным

телам служит типовой график зависимости напряжения сдвига τ от деформации l , изображенной на рис. 1. Великовский Д. С. исследовал процесс деформации товарных смазок и построил обобщенный график зависимости скорости их течения (градиента скорости сдвига) от действующего напряжения сдвига (рис. 2) [8]. Как видно из графика, при малых напряжениях сдвига ($\tau < \tau_0$) структурный каркас смазки испытывает обратимые упругие деформации сдвига. Масло (дисперсионная среда) в ячейках структурного каркаса играет при этом чисто пассивную роль, так как перемещается внутри его в полном соответствии с изменением формы каркаса. Упругие деформации структурного каркаса внешне проявляются как упругие деформации образца в целом. Снятие нагрузок на участке Oa возвращает КС в исходное состояние.

На участке aa_1 (рис. 2) происходит течение смазки, называемое «ползучестью» структурного каркаса, протекающее без нарушения его целостности. Наблюдаются лишь внутрикристаллические смещения, а также

смещения целых элементов каркаса друг относительно друга без нарушения физико-химических связей между ними. Ввиду того, что все разрушенные связи практически восстанавливаются мгновенно, скорость течения $\frac{de}{dt}$ (или $\frac{dv}{dx}$, что то же) смазка на этом участке пропорциональна действующему напряжению $\tau - \tau_0$, а само течение подчиняется закону Бингама—Шведова

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{de}{dt}; \quad (\tau_0 \leq \tau \leq \tau_{пр}), \quad (1)$$

где η — релаксационная вязкость (вязкость ползучести) структуры, неразрушенной или успевающей полностью тиксотропно восстановиться.

τ_0 — статическое предельное напряжение сдвига СПНС);

$\tau_{пр}$ — предел прочности консистентной смазки на сдвиг.

Течение в области ползучести осуществляется с градиентами от 10^{-9} до 10^{-8} сек $^{-1}$.

Подавляющее большинство консистентных смазок, получивших широчайшее распространение в различных отраслях промышленности и транспорта, составляют смазки, которые в процессе эксплуатации подвергаются статическим и динамическим нагрузкам, способным вызвать напряжения, превышающие прочностные характеристики τ_0 и даже $\tau_{пр}$. У неразрушенных предварительно смазок $\tau_0 < \tau_{пр}$, а у разрушенных $\tau_0 \approx \tau_{пр}$. Измерение этих величин и их разделение возможно на высокочувствительных приборах.

Статическое предельное напряжение сдвига и предел прочности на сдвиг имеют огромное научное и практическое значение. Напряжение τ_0 характеризует «прокачиваемость» смазок по трубопроводам, а также потери напора при этом. СПНС смазок определяет дополнительные энергетические потери при трогании с места, выполнении необходимых маневров двигателей и различного рода механизмов, в которых применяются эти смазки. Правильный подбор КС по значениям τ_0 приводит к повышению КПД двигателей и механизмов.

По изменению значений τ_0 судят о течении технологического процесса изготовления КС, состоянии структурного каркаса, о вариации прочностных свойств смазки в зависимости от времени.

Статическое предельное напряжение сдвига позволяет подразделять смазки по сортам и областям применения.

Значения τ_0 характеризуют способность некоторого объема смазки удерживаться в негерметизированных узлах трения, не выдавливаясь и не сбрасываясь под действием приложенных нагрузок и возникающих в этих узлах инерционных сил [9, 10].

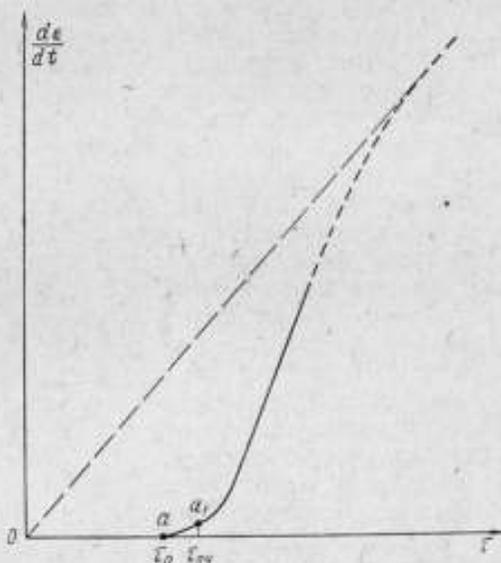


Рис. 2. Принципиальный обобщенный график зависимости скорости деформации от действующего напряжения для упруго-вязко-пластичных смазок.

Именно τ_0 позволяет указать температуру перехода КС из упруго-вязко-пластичного состояния в текучее и наметить верхний температурный предел применения смазки в подшипниках и других узлах трения. Верное значение τ_0 данной смазки позволяет построить правильную реологическую ее модель и всесторонне изучить свойства КС [11, 12].

Прочностные характеристики всего многообразия существующих дисперсных систем (упруго-вязко-пластичных) изменяются в довольно широких пределах. В связи с этим и разработан ряд приборов, отличающихся назначением, устройством и точностью измерения τ_0 как важнейшей из реологических величин. Многие из этих приборов применяются для измерения τ_0 и $\tau_{\text{тек}}$ консистентных пластичных смазок. Все приборы, измеряющие СПНС структурированных дисперсий, можно подразделить на четыре основные группы, основанные на одном из следующих методов:

- 1) внедрении в исследуемую среду образцового штампа определенной формы (конус, усеченный конус, плоский нож, шарик и др.);
- 2) тангенциальном смещении одной поверхности относительно неподвижной другой при расположении исследуемой массы между ними;
- 3) вращении одной поверхности относительно другой (неподвижной), когда между ними расположена испытываемая среда;
- 4) смещении столбика исследуемой структурированной системы в капилляре.

Исследования конструктивных особенностей, технических и метрологических характеристик, существующих приборов * показали, что новый образцовый пластометр, предназначенный для проверки капиллярного пластометра типа К-2 (ГОСТ 7143—54), конического пластометра (ГОСТ 6407—52) и пластовискозиметра ПВР-1 (ГОСТ 9127—59) следует создавать на базе прибора МНИ-2.

Этот прибор обладает следующими достоинствами:

- 1) прост по устройству и несложен в обслуживании;
- 2) разрешает измерять τ_0 и $\tau_{\text{тек}}$ предварительно неразрушенных и полностью разрушенных структур;
- 3) создает в зоне сдвига смазки однородное поле напряжений;
- 4) позволяет измерять прочностные характеристики при малых скоростях деформаций (10^{-2} — 10^{-3} сек $^{-1}$);
- 5) регистрирует деформацию смазки с погрешностью ± 10 мкм;
- 6) автоматически снимает нагрузку при достижении в КС статического предельного напряжения сдвига;
- 7) создает равномерно нарастающую нагрузку, прилагаемую к сдвигаемым слоям КС;
- 8) позволяет создавать неизменные напряжения сдвига в исследуемой среде ($\tau = \text{const}$);
- 9) поддерживает температуру испытываемой среды с погрешностью $\pm 1,5^\circ \text{C}$;
- 10) допускает автоматизацию измерений τ_0 ;
- 11) испытательный узел загружается и разгружается легко и просто.
- 12) небольшие конструктивные изменения в приборе позволят также измерять СПНС любых пластичных консистентных смазок.

Исследования, проведенные над смазками, показали, что при изменении скорости нагружения сдвигаемых слоев в 3840 раз, предел текучести смазок при 20°C изменяется всего в 2,5 раза [7, стр. 104], а изменения скорости наложения напряжений в несколько сот раз не изменяют СПНС.

* См. стр. 112.

Поэтому τ_0 и $\tau_{\text{пл}}$ измеряют при одной скорости наложения напряжений, что характерно и для прибора МНИ-2. Кроме того, Агранат [13, 14, 15] показала, что значения СПНС консистентной смазки, найденные на различных приборах, отличающихся методом его измерения, практически совпадают (погрешность совпадения 6%).

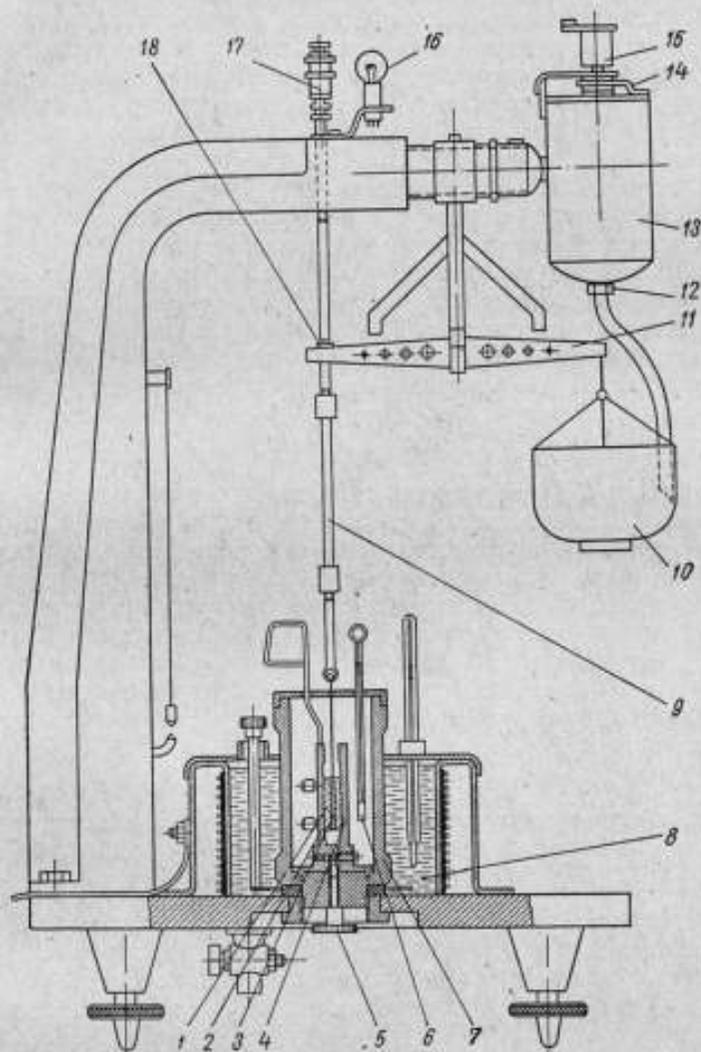


Рис. 3. Общий вид пластометра МНИ-2.

1 — испытательный узел; 2, 3, 4 — рифленые пластинки; 5 — винт; 6 — термометр; 7 — стакан; 8 — база; 9 — подвеска; 10 — чаша; 11 — рычаг весов; 12 — спускное отверстие; 13 — резервуар для воды; 14 — рычаг; 15 — электромагнитное реле; 16 — электролампочка; 17 — микрометр; 18 — платиновый контакт.

Ниже изложены результаты исследования конструктивных особенностей, метрологических свойств прибора МНИ-2, а также уточненная методика работы на этом приборе.

Устройство пластометра показано на рис. 3. Испытательный узел 1 загружают смазкой, которая располагается между тремя рифлеными пластинками 2, 3, 4, скрепляют винтом пластины 2 и 4 и устанавливают

в стакане 7. Чтобы узел 1 не сдвигался при эксперименте, его прикрепляют винтом 5 к основанию прибора. Среднюю пластинку 3 узла соединяют с подвеской 9 переменной длины. Повышают температуру консистентной смазки до необходимой и выдерживают при этой температуре в течение 30 мин. Затем устанавливают допустимую деформацию сдвига пластинки 3, отводя шпindel микрометра 17 от платинового контакта 18, расположенного на левом плече коромысла весов. Открывают рычагом 14 спускное отверстие 12 резервуара для воды. При этом в чашку 10, подвешенную к правому плечу рычага 11 весов, поступает вода, которая и нагружает пластинку 3 испытательного узла, погруженную в КС. Чтобы скорость наложения напряжений была неизменной, в резервуаре 13 поддерживают постоянный уровень воды. Как только напряжение сдвига, возникшее между слоями смазки, достигнет τ_0 , произойдет сдвиг пластинки на установленное значение. В это время зажжется лампочка 16, питающаяся током от специального понижающего трансформатора. Ток при этом протекает через шпindel микрометра, коромысло, призму опоры, обмотку электромагнитного реле 15, которое притягивает якорь и закрывает спускное отверстие 12 резервуара 13, отсекая нагрузку на пластинку. Статическое предельное напряжение сдвига принимают равным отношению веса воды F в чашке 10 к удвоенной площади S большой грани пластинки (две других малых грани не находятся в смазке): $\tau_0 = \frac{F}{S}$. Температура в стакане 7, где расположен испытательный узел со смазкой, поддерживается теплоносителем, заполняющим баню 8. При измерениях в области положительных температур баня заполняется водой или глицерином; в области отрицательных — смесью спирта с твердой углекислотой. В первом случае баню нагревают энергией электрического тока, подводимого от автотрансформатора типа ЛАТР-1 к спирали кожуха бани. Экспериментатор непрерывно наблюдает за температурой по термометру 7, корректируя ее изменением электрического напряжения автотрансформатора. Во втором случае необходимую температуру поддерживают, добавляя криостатную смесь.

Подготовка консистентной смазки к проведению измерений статического предельного напряжения сдвига (и предела прочности на сдвиг)

Статическое предельное напряжение сдвига КС зависит от предварительной подготовки и времени выдерживания ее после этой подготовки. Поэтому прежде, чем приступить к измерению СПНС, следует подвергнуть смазку разрушению в специальной мешалке, аналогичной прилагаемой к пластометру типа К-2 (ГОСТ 7143—54), принятому в Советском Союзе в качестве стандартного прибора для определения τ_0 консистентных смазок. Разрушают смазку десятью ударами поршня мешалки. Затем ее загружают в испытательный узел прибора МНИ-2 и для исключения тиксотропных превращений и получения неразрушенной структуры, изотропной во всех направлениях, выдерживают при комнатной температуре в течение суток.

При измерениях τ_0 на любом из приборов должна быть полная уверенность, что исследования проводятся не в зоне напряжений, лежащих в упругой области. Вместе с тем значение деформации смазки не должно быть и слишком большим, чтобы опыт не проходил в зоне лавинного разрушения структурного каркаса, а тем более, — в зоне пластичного течения смазки, т. е. чтобы вязкое сопротивление дисперсионной среды не искажало значений определяемой величины СПНС.

Лучшим был бы случай, когда деформация l смазки точно отвечала бы ($l = l_0$) достижению в ней напряжения, равного τ_0 . Чтобы отыскать такое значение l_0 деформации l , следует установить (экспериментально) графическую зависимость напряжения сдвига τ от деформации l смазки. Устанавливая последовательно различные значения деформации (изменением зазора между шпинделем микрометра 17 и платиновым контактом 18 (рис. 3) пластометра МНИ-2), определяют напряжение сдвига в смазке и строят график зависимости $\tau = f(l)$, т. е. напряжения сдвига от длины пути, проходимого средней пластинкой испытательного узла. Измеряют на графике минимальную деформацию l_0 , отвечающую точке перехода от прямой (зона упругой деформации) к кривой. Именно этот путь l_0 и соответствует быстрому переходу от увеличивающихся значений напряжений сдвига с увеличением деформации к независящим от нее, т. е. к постоянным значениям $l_{пр}$, отвечающим достижению в смазке, напряжений, соответствующих пределу прочности на сдвиг $\tau_{пр}$.

На пластометре МНИ-2 испытывались смазки: литиевые, пластические, кальциевые и на смешанных мылах. При этом установлено, что в интервале температур 15—25° С для исследованных смазок значения l_0 лежат в пределах от 60 до 120 мкм (табл. 1). На рис. 4 в качестве примера приведена графическая зависимость $\tau = f(l)$ для литиевой смазки ЦИАТИМ-201 при температуре 25° С с изменением деформации от 10 до 120 мкм. Скорость наложения напряжений составила при этом ≈ 39 н/м² сек.

Отличительная особенность пластометра МНИ-2 в том, что на нем можно регистрировать значения деформации с погрешностью ± 10 мкм. Это позволяет с большой (сравнительно) точностью устанавливать значения l_0 смазок.

Чтобы исключить случай, когда τ_0 измеряют в зоне упругой деформации, следует устанавливать ее значения, превышающие l_0 на 10%. В этом случае существует полная уверенность, что измерения проводят в точках, максимально приближенных сверху к l_0 . Следовательно, погрешность измерения τ_0 на приборе МНИ-2 будет в этом случае минимальной.

В пластометре К-2 τ_0 регистрируют после смещения исследуемой смазки на 300 мкм [1, 3]. Это значительно превышает максимальную упругую деформацию рассматриваемых смазок. Вследствие чего значения τ_0 , определенные на приборе К-2, получаются сильно преувеличенными [1].

Предельное напряжение сдвига τ_0 (или $\tau_{пр}$) зависит от скорости наложения напряжений [16]: чем она ниже, тем меньше устанавливаемое экспериментально значение τ_0 . Прибор МНИ-2 дает возможность осуществлять постоянную скорость наложения напряжений (39 н/см²·сек). Площадь пластинки, помещенной в смазку, составляет 6,2 см².

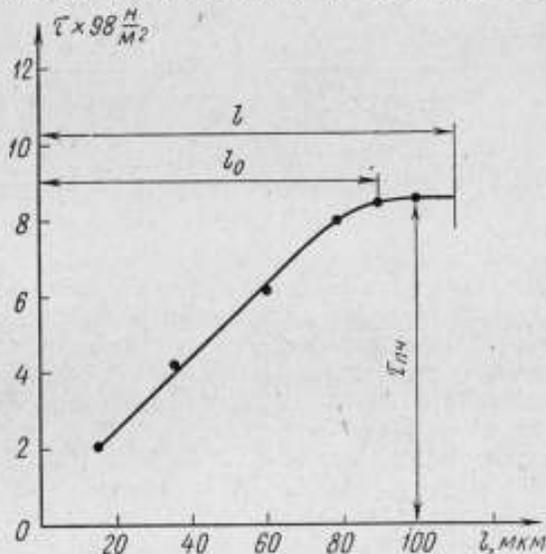


Рис. 4. Зависимость $\tau = f(l)$ при $t = 25^\circ$ С для смазки ЦИАТИМ-201.

Значения деформаций, отвечающих СПНС

Таблица 1

Род смазки	Марки смазки	ГОСТ	Деформация ϵ_0 , отвечающая СПНС $\mu\text{м}$	Погрешность определения ϵ_0 , $\mu\text{м}$
Пластичная	ПВК	10586—63	90	10
	СХК	11059—64	120	10
	ГОИ-54П	3276—63	60	10
Кальциевая	Л-УС-2	1033—51	120	10
	УС-1	1033—51	120	10
На смешанных мылах	1-13	1631—65	120	10
Литиевая	ЦИАТИМ-201	6267—59	100	10

Источники погрешностей при измерении предельных напряжений сдвига (τ_0 и $\tau_{\text{пл}}$) на пластометре МНИ-2

Источниками погрешностей измерения τ_0 и $\tau_{\text{пл}}$, одинаково подготовленных образцов смазок на любом из пластометров, являются влияние температуры, эффект пристенного скольжения (π — эффект), неточное знание значений деформации смазки и нагрузки, наличие воздушных вкраплений в смазке, геометрические размеры сдвигаемой поверхности. В пластометре МНИ-2 кроме перечисленных существуют еще следующие погрешности:

1. Погрешность срабатывания электромагнитного реле, отсекающего нагрузку на смазку.

2. Погрешность, связанная с выходом части сдвигаемой пластинки из исследуемой смазки при многократных измерениях τ_0 на одном и том же образце, находящемся в испытательном узле.

3. Эффект увлечения смазки вместе со смещаемой пластинкой.

Эти погрешности подразделяются на случайные и систематические.

Случайные погрешности

1. Температурная погрешность.

Эта погрешность является систематической, если известен закон изменения температуры образца смазки в приборе, но в условиях эксперимента температура случайно изменяется на несколько градусов. Вместе с тем исследования показали, что СПНС консистентных смазок зависят от их температуры. Такими исследованиями занимались Виноградов Г. В., Климов К. И., Гвоздев М. М. [17—20], Сорокин Г. И. [1], Фукс И. Г. [3] и другие.

На рис. 5 представлена зависимость статического предельного напряжения сдвига τ_0 жирового и синтетического солидолов от температуры t , т. е. $\tau_0 = \varphi(t)$. Изменение температуры Ярославского жирового солидола на $\pm 1^\circ \text{C}$ в интервале температур $-20 \div +50^\circ$ дает в среднем изменение значений τ_0 на $\pm 6,5 \text{ н/м}^2$, что при измерениях τ_0 при комнатных температурах ведет к появлению относительной погрешности $\pm 3,3\%$. Изменение же температуры от -20 до -40°C составляет в среднем изменение значений СПНС для этого солидола уже $\pm 147 \text{ н/м}^2$. Тогда случайные колебания температуры на $\pm 1^\circ \text{C}$ при измерениях τ_0 смазки с температурой -40°C приводят к появлению относительной погрешности $\pm 4\%$.

Агранат Н. Н. [13] провела измерения СПНС консистентных смазок различными методами при колебаниях температуры на $\pm 1,5^\circ \text{C}$ от среднекомнатной, причем не учитывала температурных изменений τ_0 , что привело к неверной оценке СПНС смазок, а следовательно, и погрешностей измерений.

Во время исследований прибора МНИ-2 случайные колебания температуры смазки после принятых дополнительных мер составили $\pm 0,5^\circ \text{C}$, поэтому погрешность измерения для солидолов, обусловленная этими колебаниями, достигла $\pm 0,96\%$ при температуре 20°C .

2. Погрешность, вызванная л-эффектом.

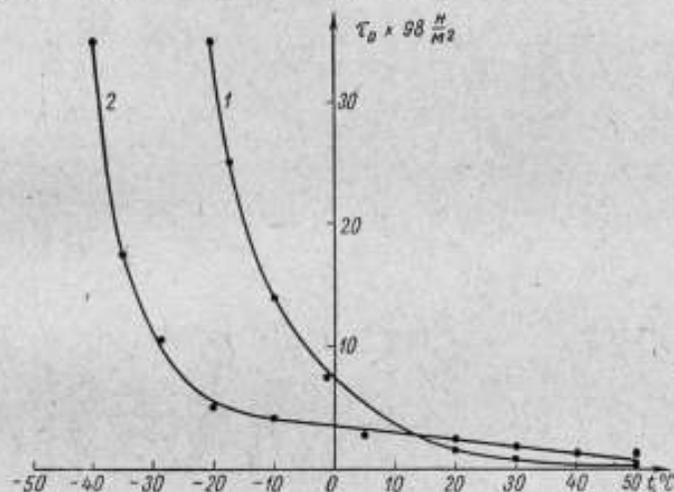


Рис. 5. Зависимость статического предельного напряжения сдвига смазки от температуры.

1 — Дрогобычский синтетический солидол; 2 — Ярославский жировой солидол.

Предельное напряжение сдвига (ПНС) может быть сильно искажено вследствие смещения смазки вдоль гладкой стенки чувствительного элемента (например, пластинки), помещенного в испытуемую смазку. Это явление получило название эффекта пристенного скольжения или л-эффекта. Его роль при оценке механических свойств консистентных смазок подробно исследована в работах Толстого Д. М. [21, 22], Синицына В. В. [23]. Следует иметь в виду, что л-эффект уменьшает значения ПНС.

В пластометре МНИ-2 для устранения влияния этого эффекта пластинки испытательного узла, между рабочими поверхностями которых располагается смазка, выполнены рифлеными. В связи с этим погрешность от л-эффекта сведена к минимуму и входит в общий комплекс других случайных погрешностей.

Погрешность, вызванная неточным установлением деформации

На приборе МНИ-2 значение деформации можно устанавливать и регистрировать с погрешностью ± 10 мкм. Поэтому, чтобы попасть за предел упругости и максимально точно приблизиться к нему сверху, устанавливались на приборе деформации l больше l_0 на 10%. Напряжение сдвига, измеряемое при этом, было близко к СПНС. Невозможность установить деформацию точнее, чем на ± 10 мкм объясняется, в частности,

появлением электрической дуги между контактом 18 и шпинделем микрометра 17 (см. рис. 3), когда расстояние между ними уменьшалось до 10 мкм.

Пробой воздуха вызывал случайные преждевременные срабатывания электромагнитного реле, отсекающего нагрузку на сдвигаемые слои смазки. Эта погрешность, судя по графику $\tau = f(I)$ для смазки ЦИАТИМ-201, может достигать нескольких процентов. Применение схемы измерения, исключающей появление пробоя воздуха и допускающей регистрацию деформации с погрешностью ± 1 мкм, позволило бы уточнить значение I_0 , исключить случайные погрешности его определения и повысить, следовательно, точность измерения.

Погрешность, вызванная запаздыванием срабатывания электромагнитного реле

Данная погрешность резко искажала значения τ_0 смазок. Если запаздывание отсечки нагрузки составило всего лишь 1 сек, то нагружающая масса увеличивалась в среднем на 2,4 г, что при измерениях τ_0 жирового

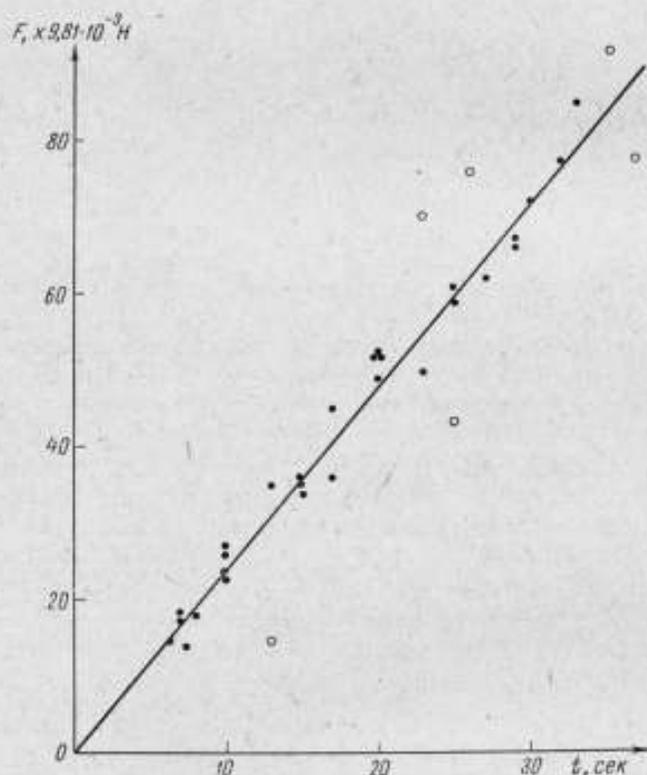


Рис. 6. График зависимости изменения нагрузки на смазку от времени.

солидола приводило к появлению относительной погрешности до 11%, а в опыте со смазкой СХК — до 1%. Естественно, что в эксперименте с солидолом столь большая погрешность вполне обнаруживалась и полученное значение достаточно обоснованно отбрасывалось. Но в случае с «жесткими» смазками (например, СХК) описанное явление не может быть легко обнаружено и оценено, поэтому и служит причиной кажущегося увеличения СПНС.

Для исключения выбросов параллельно с проведением эксперимента строился график зависимости изменения нагрузки на смазку от времени (рис. 6). Точки, обозначенные на графике O представляют собой заведомые выбросы.

Погрешность, вызванная (после загрузки испытательного узла) воздушными вкраплениями в смазке

Воспроизводимость значений СПНС исследуемой смазки от узла к узлу определяется воздушными пузырьками в плоскостях, вдоль которых совершается сдвиг. Взвешивание испытательного узла до и после загрузки смазкой показало, что масса последней колеблется от загрузки к загрузке на $200+300$ мг. Это может служить в некоторой мере подтверждением тому, что в КС есть пустоты. Они уменьшают эффективную площадь сдвига слоя смазки и приводят к уменьшению значений СПНС, так как экспериментатор по-прежнему находит его делением нагрузки сдвига на расчетную площадь пластинки. Для исключения этой погрешности необходимо заполнять испытательный узел таким образом, чтобы устранить появление воздушных вкраплений в КС. Появление воздушных пузырьков, их размеры носят случайный характер, поэтому и погрешность, вносимая в значения СПНС указанным явлением — случайная. Ее можно уменьшить, тщательно перемешивая смазку или пропуская ее через мелкую сетку перед загрузкой в прибор, а также хорошим заполнением испытательного узла.

Систематические погрешности

1. Погрешность, вызванная уменьшением площади сдвига.

На пластометре на одном и том же узле проводились измерения СПНС при пяти-шестикратных последовательных нагружениях и снятиях нагрузок на смазку, заправленную в данный узел. При такой методике измерения получается хорошая воспроизводимость значений τ_0 .

При разовом измерении СПНС подвижная пластинка узла несколько выходит из смазки, вследствие чего площадь сдвига уменьшается. Значение погрешности при каждом следующем нагружении зависит от значения упругой деформации смазки и порядкового номера эксперимента. Эта погрешность поддается учету и носит систематический характер. Для исключения указанной погрешности τ_0 следует определять по формуле:

$$\tau_0 = \frac{F_n}{b [h - (n-1) l_0]}$$

где F_n — нагрузка, сдвигающая пластинку в n -ом эксперименте, н;

b — ширина пластинки, м;

h — высота пластинки, м;

l_0 — упругая деформация, м.

2. Погрешность, вызванная эффектом увлечения смазки вместе со смещаемой пластинкой

Исследования показали, что при смещении пластинки 3 (рис. 7) узла 1, сдвиг смазки, расположенной между пластинками 2 и 3; 3 и 4, совершается по сечениям AB и CD . Между этими сечениями располагается около половины объема смазки данного узла. Вес смазки, увлекаемой пластинкой при ее смещении вверх, колеблется в пределах от 0,01 до 0,015 н, что при площади сдвига $6,2$ см² искажает значения СПНС исследуемой

смазки на $16,2 \div 24 \text{ н/м}^2$. Для жирового солидола, например, увеличение СПНС происходит на $16,2 \text{ н/м}^2$, а для смазок более плотных (ПВК, СХК, 1—13 и др.) — даже на 24 н/м^2 . Если не вводить поправку, то при измерениях СПНС смазки ЦИАТИМ-201 это приводит к появлению относительной погрешности около

2,8%, а смазки СХК—0,6%.

Для введения поправки проводят следующие операции. Измеряют силу, вызвавшую сдвиг пластинки на заданное значение l_0 деформации. Делят значение силы на фактическую площадь сдвига в данном эксперименте. Определяют кажущееся значение $\tau_{ок}$. Затем, после 5÷6 последовательных определений СПНС на данном испытательном узле, осторожно вынимают среднюю пластинку вместе со слоем смазки и определяют вес G увлеченной смазки. Делят этот вес на площадь сдвига $b [h - (n - 1) l_0]$. Полученное значение, взятое со знаком минус и дает поправку $\Delta\tau_0$ на указанный эффект: $\Delta\tau_0 = -\frac{G}{b[h - (n - 1) l_0]}$. Ее складывают с кажущимся значением СПНС, полученным при каждом из последовательных экспериментов на данном узле.

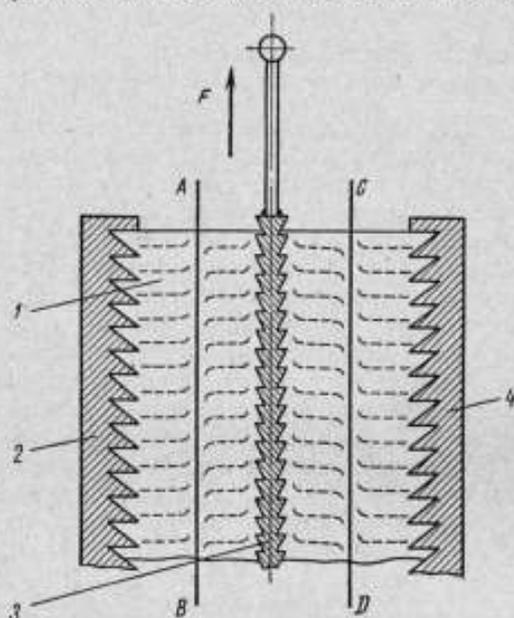


Рис. 7. Схема кинетики увлечения смазки вместе со сдвигающейся пластинкой.

1 — испытательный узел; 2—4 — неподвижные пластины; 3 — сдвигающаяся вверх пластинка.

Экспериментальные значения СПНС смазок после исключения систематических погрешностей

Смазку разрушали десятью ударами поршня в мешалке, пропускали ее затем через «тонкую сетку», заправляли смазкой испытательный узел и выдерживали в течение суток.

После этого устанавливали узел в прибор, выдерживали при температуре опыта 30 мин и измеряли СПНС, исключая после каждого эксперимента систематические погрешности. Результаты измерения табл. 2 были обработаны методом дисперсионного анализа (24). Внутрисерийная и межсерийная дисперсии определены по формулам:

$$S_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{v=1}^{n_i} (\tau_{0iv} - \bar{\tau}_{0i})^2}{N - k};$$

$$S_a = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (\bar{\tau}_{0i} - \bar{\tau}_0)^2}{k - 1},$$

где i — номер серии измерений;
 k — число серий измерений для данной смазки;

Таблица 2

Значения СПНС, полученные при многократных измерениях на одном и на разных испытательных узлах

Название смазки и условия проведения эксперимента	Номер серии	$\tau_{\text{ср}} \times 10^8$ н/мм ²					Среднее арифметическое в серии	Общее среднее значение	Относительная средняя квадратическая погрешность, %	
		Номер измерения в серии								
		1	2	3	4	5				
Жировой солидол УС-1, $l = 120$ мкм, $t = 20^\circ \text{C} \pm 0,5^\circ \text{C}$	1	3,63	3,40	3,70	3,49	3,80	3,60	3,44	7,3	
	2	3,30	3,20	3,50	3,35	3,60	3,39			
	3	3,80	3,00	3,00	3,35	3,39	3,39			
	4	3,00	3,45	3,45	3,48	3,50	3,38			
	5	4,46	3,15	3,80	3,77	3,80	3,60			
	6	3,00	3,00	3,35	3,45	3,45	3,25			
Смазка 1-13, $l = 90$ мкм, $t = 25 \pm 0,5^\circ \text{C}$	1	15,56	15,97	15,63	17,38	17,11	16,30	16,30	2,4	
ЦИАТИМ-201, $l = 120$ мкм, $t = 25 \pm 0,5^\circ \text{C}$	1	8,27	8,05	8,30	8,80	8,98	8,48	8,48	2,0	
ГОИ-54п, $l = 120$ мкм, $t = 25 \pm 0,5^\circ \text{C}$	1	8,12	9,02	7,82	7,35	8,03	8,01	8,01	8,09	6,4
	2	7,35	7,98	8,01	8,80	8,75	8,18	8,18		
СХК, $l = 120$ мкм, $t = 25 \pm 0,5^\circ \text{C}$	1	37,87	38,36	36,36	37,52	39,25	37,90	38,00	3,9	
	2	37,62	35,26	40,76	38,99	38,79	38,20			
	3	36,15	38,33	37,90	38,00	38,60	37,90			

v — номер измерений соответствующей серии;
 n_i — число измерений в i -й серии;
 N — полное число измерений СПНС для данной смазки,

причем $N = \sum_{i=1}^k n_i$;

τ_{0iv} — значение СПНС в v -ом измерении i -й серии;

$\bar{\tau}_{0i} = \frac{\sum_{v=1}^{n_i} \tau_{0iv}}{n_i}$ — среднее арифметическое значение результата измерений в i -й серии;

$\bar{\tau}_0 = \frac{\sum_{i=1}^k \bar{\tau}_{0i} n_i}{N}$ — средневзвешенное значение СПНС всего числа измерений для данной смазки.

Предполагали, что в нашем случае систематические погрешности исключены. Критерием этого допущения служит функция

$$F_k = \left(\frac{S_a}{S_r} \right)^2.$$

Доверительную вероятность приняли равной 0,988.

Так как оказалось, что $F_k < 0,998$, то за значения СПНС смазки принимали $\bar{\tau}_0$.

Дисперсию отклонений от средневзвешенного значения СПНС рассчитывали по формуле:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{v=1}^{n_i} (\tau_{0iv} - \bar{\tau})^2}{N - 1},$$

а среднюю квадратичную погрешность — по формуле:

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

Относительная средняя квадратичная погрешность определена по формуле

$$\sigma_{\text{отн}} = \frac{\sigma}{\bar{\tau}_0} 100 \ %.$$

Именно по этой погрешности оценивали предельную погрешность прибора.

Повышение точности измерения СПНС связано с созданием образцовых приборов, поддерживающих температуру смазки во время эксперимента с погрешностью $\pm 0,1^\circ \text{C}$, регистрирующих деформацию l_0 соответствующей СПНС с погрешностью ± 1 мкм. В настоящее же время на пластометрах регистрируют, как правило, предел прочности на сдвиг.

Применение высокоточных индукционных и фотоэлектрических датчиков смещений, работающих в комплексе со вторичными регистрирующими приборами, позволит автоматически записать зависимость деформации от времени, надежно выделить по графику l_0 и соответственно повысить точность измерений СПНС на порядок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокин Г. И. Солидолы на синтетическом опыляемом сырье. Автореферат диссертации. Московский нефтяной институт им. И. М. Губкина, М., 1955.
2. Вайншток В. В. Свинцовые и алюминиевые мыла как модификаторы структуры литиевых консистентных смазок. Диссертация, Московский институт нефтехимической и газовой промышленности им. И. М. Губкина, М., 1962.

3. Фукс И. Г. Литиевые смазки с наполнителями, их свойства и применение. Диссертация, МИИХ и ГП им. И. М. Губкина, М., 1966.
4. Бонер К. Дж. Производство и применение консистентных смазок. М., Гостоптехиздат, 1958.
5. Черножуков Н. И., Крейн С. Э., Лосиков Б. В. Химия минеральных масел. Изд. 2-ое, М., Гостоптехиздат, 1955.
6. Черножуков Н. И., Крейн С. Э. Окисляемость минеральных масел. Изд. 3-е, М., Гостоптехиздат, 1955.
7. Великовский Д. С., Поддубный В. Н., Вайншток В. В., Готовкин Б. Д. Консистентные смазки. М., изд-во «Химия», 1966.
8. Великовский Д. С. Текучесть консистентных смазок. «Коллоидный журнал», т. 16, № 6, 1954, стр. 406.
9. Климов К. И., Вакуров П. С. Новости нефтяной техники, серия «Нефтепереработка», 1955, № 6, стр. 37.
10. Климов К. И. Труды Второй Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, т. 4, изд-во АН СССР, 1951, стр. 416.
11. Рейнер М. Реология. М., изд-во «Наука», 1965.
12. Эйрих Ф. Реология. М., изд-во ИЛ, 1962.
13. Агранат Н. Н. Сравнение методов измерения предельного напряжения сдвига авиационных и других консистентных смазок. Диссертация, Московский ордена Ленина авиационный институт им. С. Орджоникидзе. М., 1955.
14. Агранат Н. Н., Воларович М. П. О вычислении предельного напряжения сдвига дисперсных систем в опытах с коническим пластометром. Коллоидный журнал, т. 19, 1957, № 1, стр. 3.
15. Агранат Н. Н., Широков М. Ф. Теория метода определения предельного напряжения сдвига дисперсных систем погружением конуса. Коллоидный журнал, т. 19, № 1, 1957.
16. Гуревич М. М. О возможности определения статического напряжения сдвига на приборе СНС при различных скоростях наложения напряжений. «Заводская лаборатория», т. 1, 1956, № 11.
17. Виноградов Г. В., Климов К. И. Труды Второй Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, т. III, изд-во АН СССР, 1943, стр. 311.
18. Виноградов Г. В., Климов К. И. Реологические свойства кольцевых смазок. Журнал технической физики, т. 18, 1948, стр. 3.
19. Климов К. И. «Заводская лаборатория», т. 21, 1955, № 4.
20. Виноградов Г. В., Павлов В. П., Климов К. И., Гвоздев М. М. О реологических свойствах бентонитовых псевдогелей. Доклады АН СССР, т. 84, 1952, № 2.
21. Толстой Д. М. Об эффекте пристенного скольжения дисперсных систем. Происхождение, размеры и значение эффекта. Коллоидный журнал, т. 9, 1947, № 6.
22. Толстой Д. М. Об эффекте пристенного скольжения дисперсных систем. Методика изучения эффекта и предварительные экспериментальные результаты. Коллоидный журнал, т. 10, 1948.
23. Свицици В. В. Вязкостные свойства и пристенное скольжение пластических смазок. Диссертация, М., ИИ АН СССР, 1954.
24. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. Изд-во «Наука», М., 1965.

Г. С. БОГОМОЛОВ, А. Н. ЗВЕРЕВА, Ю. А. МАЙОРОВ, А. В. СМИРНОВ
ВНИИМ

АВТОМАТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ЗАКАЛКИ ОБРАЗЦОВЫХ МЕР ТВЕРДОСТИ

Для автоматической закалки мер твердости из инструментальной и конструкционной стали во ВНИИМ сконструирована экспериментальная установка, исследование работы которой позволило определить кон-

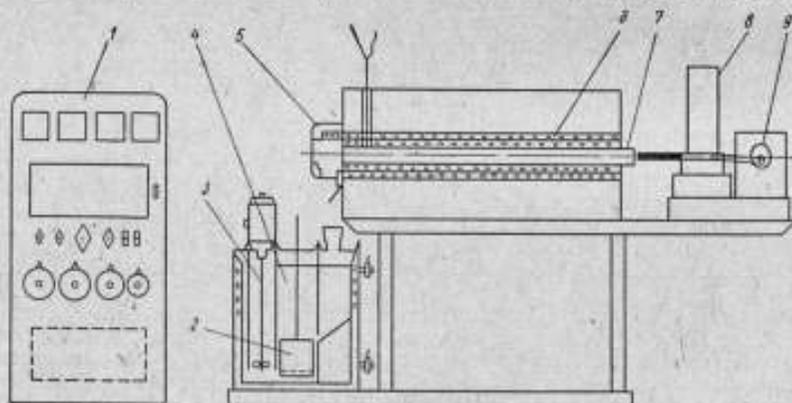


Рис. 1. Схема экспериментальной установки ВНИИМ:

1 — пульт управления; 2 — выгрузной поддон; 3 — механические мешалки; 4 — бак для закалки; 5 — выходная подогревающая головка; 6 — спиральная обмотка из проволоки; 7 — муфта; 8 — бункер; 9 — толкатель.

структивные особенности ее узлов. Это дало возможность создать специальному конструкторскому бюро по разработке автоматических средств измерения масс и приборов испытательной техники (СКБИМИТ г. Иваново) промышленную установку для образцовых мер твердости $40 \times 60 \times 10$ мм.

В установке ВНИИМ (рис. 1) меры твердости из бункера 8 перемещают толкателем 9 по щелевому муфелю 7 из нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т. Для перемешивания закалочной жидкости в баке 4 предусмотрены две механические мешалки 3. На установке закачивали меры твердости размером $42 \times 62 \times 12$ мм из стали марок У10А и 45, структура которых была подготовлена термической обработкой на зернистый перлит.

Установлен следующий оптимальный режим работы: температура нагрева под закалку 835° , выдержка 45 мин, закалка в 4%-ном растворе NaOH в воде при 10° С, отпуск мер твердости при 160 — 130° в термостате два часа, шлифовка до чистоты $\nabla 9$ сопровождалась старением при 140° С и продолжалась полтора часа в термостате.

Результаты многочисленных экспериментов показали, что меры твердости на установке закаливались неравномерно. Разброс твердости составлял от 1,3 до 2,0 ед HRC для мер твердости из стали У10А при твердости 65 ± 5 и до 2,5 ед HRC для мер твердости из ст. 45 при твердости HRC 45 ± 5 . Мерой разброса явилась разность между максимальной и минимальной твердостью при нанесении восьми уколов на меру твердости. Центр меры твердости имел большую твердость, чем края. На мерах наблюдались три кольцевые зоны одинаковой твердости с наибольшим разбросом между крайними. Кроме того, на отдельных мерах твердости были обнаружены пятна.

В результате проведенных исследований были установлены основные причины зонального разброса твердости, приводящие к общему разбросу и пятнистости твердости.

Исследование распределения температур по длине муфеля показало, что максимум нагрева находится в точке, удаленной от выходного конца муфеля на $\frac{1}{3}$ длины. Время прохождения мер твердости в охлаждающей жидкости было недостаточным для завершения мартенситного превращения, которое заканчивалось уже при соприкосновении одной из поверхностей меры с дном бака, что и приводило к пятнистой закалке.

Как показал опыт, мешалки в баке необходимы, конструкция и расположение бункера удачные. Однако были выявлены и недостатки плавного продвижения мер твердости по муфелю: они задерживались и иногда даже зависали на выходе из печи. Это могло быть устранено толкательным механизмом для перемещения мер твердости. Установлено, что для устранения окисления при нагревании меры твердости в печь необходимо ввести защитную атмосферу.

Эти недостатки, выявленные на экспериментальной установке ВНИИМ, были устранены при конструировании и испытании промышленной установки (рис. 2) в СКБИМИТ.

Меры твердости из бункера 6 толкатель 4 перемещает в горизонтальную трехсекционную электропечь 8 с муфелем 9 из стали 1Х18Н9Т и затем через направляющую 11. Меры твердости выталкиваются в закалочный бак 1. Транспортер 15, выполненный из стальных пластин с отверстиями, выносит меры твердости на площадку 3, где они остаются при завороте ленты. Электропечь 8 скомпонована из двух электропечей типа ТИ-1250 каждая мощностью 3,6 квт. Чтобы устранить подстывание мер твердости в торце печи вмонтирована электроплитка 10; патрубок 13 образует водяной затвор.

Электрическая схема предусматривает автоматическое позиционное регулирование температуры посредством электронного автоматического потенциометра типа ЭПВ-02 М. Температура поддерживается постоянной в секциях печи регуляторами напряжения. Периодичность подачи мер твердости в зону печи, а следовательно, и время их нагрева регулирует реле времени. Приборы управления сконцентрированы на отдельном щите; установка питается напряжением 380/220 в. На этой установке было закалено более 30 опытных партий мер твердости из стали марок У10А и 45. Время прохождения каждой меры твердости в зоне нагрева 17 мин, температура в печи 800°C (температура муфеля 810°C). Периодичность выхода мер твердости из печи 40 сек, производительность 90 шт. в час. Закалочная среда — десятипроцентный раствор поваренной соли в воде, температуру которой 20° регулируют радиатором 14 с холодной водой. Для равномерности закалки закалочную среду перемешивают крыльчатками, насаженными на стальной вал. После закалки производили отпуск в механизированной масляной ванне при 170°C в течение шести часов.

После шлифования отпущенных мер твердости до чистоты поверхности $\nabla 9$ и размагничивания меры твердости проверяли обычно в восьми точках на приборе типа ТК-2. При проверке противоположной стороны меры для исключения влияния на разброс твердости нанесенных уколов в качестве опоры применяли рамку, на которую опирались края плиток.

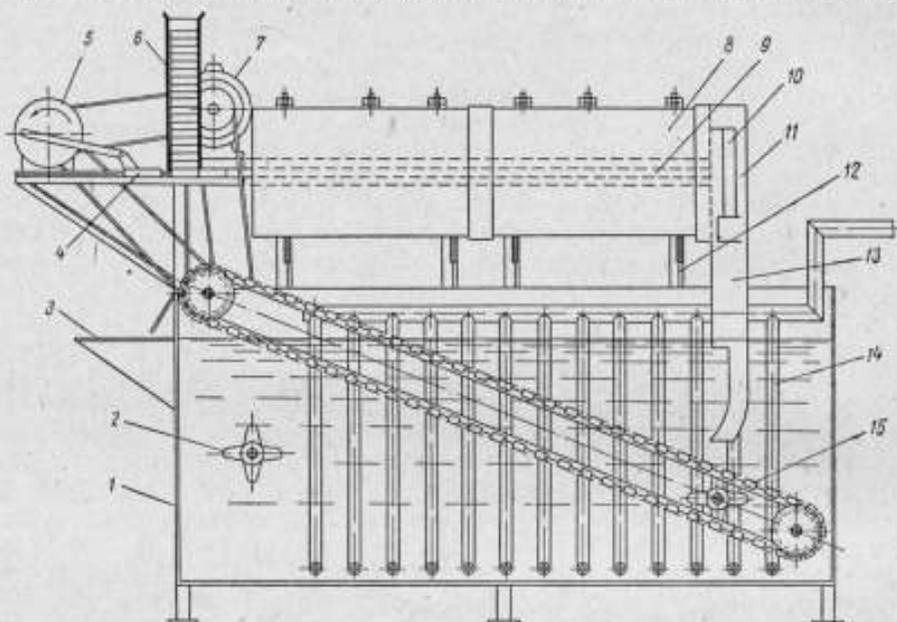


Рис. 2. Схема промышленной установки СКВИМТ:

1 — бак для закалки; 2 — узел циркуляции закалочной среды; 3 — приемный стол; 4 — толкатель; 5 — толкающий механизм с узлом поддержки времени; 6 — бункер; 7 — электродвигатель; 8 — электропечь; 9 — муфель; 10 — электроплитка; 11 — кожух с подогревом; 12 — сегментная опора; 13 — патрубок; 14 — радиатор охлаждения закалочной среды; 15 — транспортер.

Микроструктура после закалки — мелконгольчатый мартенсит с мелкими рассеянными зернышками цементита.

Результаты длительных испытаний промышленной установки

Количество обработанных мер твердости	1612
Среднее значение HRC	61,6
Среднее значение Δ HRC	1,5
Процент выхода плиток как образцовых мер	
I-го разряда	5,0
II-го разряда	46,0
вне разряда	49,0

В процессе экспериментов при нанесении на поверхность мер твердости до 400 уколов выяснилось, что многие меры твердости имеют единичные мягкие пятна на одной или на обеих сторонах.

Как показал анализ работы на установке, основными причинами разброса твердости и мягких пятен при закалке мер твердости являются их окисление при нагреве в электропечи и несовершенство охлаждающей закалочной системы, т. е. недостаточно длинный путь в жидкости и малая циркуляция закалочной среды. Поэтому в конструкцию установки были внесены следующие изменения:

1. Установлены капельницы на входе и выходе муфеля для подачи в печь гидролизного этилового спирта для создания в нагревательном пространстве безокислительной среды (рис. 2).

Результаты изготовления опытных партий

Количество мер твердости	Марки стали	Режим закалки	Режимы отпуска		Шкала твердости, НР	Сторона меры, лежащая на сетке транспортера			Сторона меры, обращенная к раствору						
			температура нагрева, °С	время выдержки, мин		Средняя твердость	Средний разброс твердости	Распределение годовых мер твердости по разрядам, %	Средняя твердость	Средний разброс твердости	Распределение годовых мер твердости по разрядам, %				
						1	II	брак	1	II	брак				
768	У10А	800	170	6	С	62,4	0,5	30,0	46,0	24,0	62,1	0,4	30,0	48,0	22,0
90	У10А	800	170	6	С	63,0	0,4	40,0	45,0	15,0	63,1	0,5	38,0	47,0	15,0
190	Ст.45	845	300	3	С	48,2	0,7	33,0	45,0	22,0	48,5	0,8	32,0	47,0	21,0
200	Ст.45	845	530	4	С	24,4	1,0	31,0	46,0	23,0	24,6	1,1	30,0	46,0	24,0
192	Ст.45	845	720	2	В	95,4	1,1	40,0	40,0	20,0	95,6	0,9	38,0	43,0	15,0
90	У10А	800	290	6	А	78,5	0,5	35,0	50,0	15,0	77,0	0,6	36,0	52,0	12,0

Примечание: время нагрева меры твердости 25 мин; время старения 2 ч; чистота поверхности $\nabla 9$; закалка производилась в 10%-ном растворе.

2. На выходном конце патрубка 13 укреплен пластинчатая пружинка, удлиняющая путь прохождения меры твердости в жидкости.

3. Пластинчатый дырчатый транспортер закалочного бака заменен сеточным из проволоки $\varnothing 1,5$ мм с размером ячейки 40×40 мм.

4. Циркуляция закалочной среды стала более интенсивной при направлении тепловых потоков снизу вверх.

5. Увеличено время нагрева меры твердости под закалку до 25 мин.

На усовершенствованной установке были закалены опытные партии мер твердости из сталей марок У10А и 45 для получения различной твердости. Режимы обработки мер твердости были те же, что и раньше.

Как видно из таблицы, меры твердости из стали У10А и 45, закаленные на различные твердости на автоматической установке СКБ ИМИТ после ее усовершенствования дают средний процент выхода годных — 79. Средний процент выхода по HRC 65 ± 5 из полосового проката стали У10А составляет 76, а из ковального металла — 85. Следует отметить, что образцовые меры твердости, изготовленные при ручной закалке, дали выход годных — 67%. Автоматическая установка увеличивает выход годной продукции на 12% и позволяет обслужить установку только одним рабочим. Производительность установки 90 шт. мер твердости в 1 ч, потребляемая мощность 7,2 кв.

Поступила в редакцию
10/V 1967 г.

Ю. И. ТРУБНЯКОВ

ВНИИМ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ЦЕЛЛУЛОИДНЫХ ОБРАЗЦАХ

Аналитическое решение плоско-напряженных задач для деталей и конструкций из полимеров в настоящее время не всегда возможно.

Сложность состоит в том, что для полимеров нет линейной зависимости между напряжениями и деформациями, и полимеры обладают способностью деформироваться во времени без роста нагрузки.

Следовательно, решение этих задач может быть полным лишь в том случае, когда учитывается время загрузки детали.

Все возрастающее число экспериментов, усовершенствование техники и методики исследования делают весьма полезным стандартизацию этой области механики.

Введение единых методик определения параметров напряжений и деформаций позволит получать стабильные решения конкретных задач.

В настоящей работе описаны три основных этапа исследований плоской задачи: определение некоторых механических характеристик материала образцов; фиксирование полей напряжений и деформаций в образцах.

Механические характеристики целлулоида

Исследование, непосредственно, поля напряжений в прозрачных диэлектриках в настоящее время возможно только поляризационно-оптическим методом. Один из самых распространенных материалов при изготовлении моделей для этого метода — целлулоид. Деформирование целлулоида, как и всякого другого полимера, развивается своеобразно. При нагружении образца деформация происходит в результате изменения средневременного расстояния между каждой парой атомов (узлов цепи), т. е. из-за тех же внутренних причин, что и упругая деформация металлов. Кроме того, в полимерном материале деформация растет во времени при постоянной нагрузке. Это происходит вследствие изменения конформаций цепи макромолекулы полимера, которые ориентируются вдоль направлений главных деформаций. Несмотря на большую энергию связи звеньев друг с другом, макромолекулу можно характеризовать различной пространственной конфигурацией, меняющейся в процессе деформирования. Как известно, отдельные звенья макромолекулы связаны между собой силами главных валентностей. Взаимодействие молекул между собой осуществляется вандерваальсовыми силами, которые намного слабее сил главных валентностей. В областях отдельных узлов звеньев существуют валентные силы с такими же

узлами соседней молекулы. В недеформируемом теле система макромолекул может считаться уравновешенной.

Описанная выше схема строения полимера объясняет его способность к сравнительно высоким обратимым деформациям, при которых еще не происходит фазового перехода.

Исследование механических характеристик целлулонда проводилось при одноосном напряженном состоянии: $\sigma_1 > 0$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

Построение традиционных для металлов экспериментальных кривых в координатах напряжение — деформация не характеризует всех механических характеристик полимера, так как рост деформаций существенно зависит от скорости нагружения. Это обусловлено своеобразием структуры полимерного материала, а также тепловым движением макроцепей, т. е. способностью «разворачивать макроцепи» постепенно в зависимости от создаваемого напряжения σ .

Увеличение относительной деформации (ϵ) целлулонда во времени (t) при постоянном напряжении показано на рис. 1.

Экспериментальные кривые растяжения целлулоидного образца постоянной нагрузкой во времени удовлетворительно аппроксимируются эмпирической зависимостью вида:

$$\epsilon_t = a + bt^n, \quad (1)$$

где ϵ_t — относительная деформация к моменту времени t ;

$$a = f'(\sigma_1, T^\circ)$$

$$b = f''(\sigma_1, T^\circ)$$

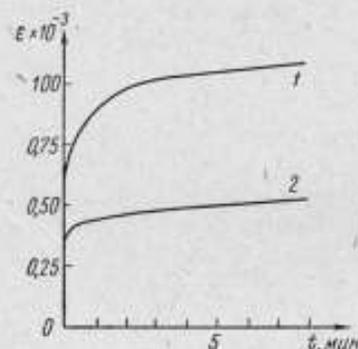


Рис. 1. Рост деформации в целлулоидном образце, находящемся под постоянной нагрузкой:

1 и 2 — рост деформации вдоль и поперек листа соответственно.

— коэффициенты для одноосного напряженного состояния;

T° — температура, при которой проводили испытания;

n — показатель степени для целлулоида — 0,25.

Как видно из рис. 1 и зависимости (1), начальная мгновенная деформация и темп роста запаздывающих деформаций характеризуются соответственно коэффициентами a и b .

Если принять гипотезу о строении и механизме деформирования высокополимеров, то зависимости (1) можно придать определенный физический смысл.

Коэффициент a характеризует изменение межатомных и межмолекулярных расстояний, b — интенсивность разворачивания цепей макромолекул в направлении главного напряжения. Мгновенной ориентации не происходит из-за того, что макромолекулы находятся в состоянии теплового движения. Определив из эксперимента величины коэффициентов a и b , несложно получить значение модуля упругости E_t первого рода к моменту времени t :

$$\Delta l = \frac{Pl}{E_0 F} (1 + \mathcal{E}t^n) = \frac{Pl}{E_t F};$$

$$E_t = \frac{E_0}{1 + \mathcal{E}t^n}, \quad (2)$$

где: $E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon}$ — начальный модуль первого рода;

$\mathcal{E} = \frac{b}{a}$ — число эластичности;

Δl — абсолютная деформация образца;
 P — нагрузка;
 F — площадь поперечного сечения образца.

Указанный математический аппарат применим для целлулоида в области малых деформаций и времен (время испытаний не более 30 мин.). В данном случае, это вполне оправдано, так как большинство моделей поляризации оптического метода нагружают таким образом, что возникающие деформации не превосходят 1,5%, и наиболее интенсивное изменение поля напряжений происходит в начальные моменты времени.

Применяется обычно листовой заводской целлулоид. Целлулоид двухлетней давности может обладать механической анизотропией (рис. 1). Для проверки из одной части листа вырезают образцы, ориентированные взаимно перпендикулярно друг к другу. Каждую пару образцов подвергают осевому растяжению постоянной нагрузкой и определяют рост деформаций во времени при одних и тех же напряжениях. Изотропность материала определяется равенством коэффициентов a и b вдоль и поперек листа для одних и тех же напряжений.

Анизотропию можно объяснить следующим образом. В процессе изготовления целлулоидную массу формируют в куб. Напряжения, возникающие под действием его собственного веса, вызывают деформацию, которая ведет к ориентации молекулярных цепей. При застывании целлулоида эта ориентация «замораживается». Затем куб разрезают на листы, которые уже обладают начальной механической анизотропией.

Для придания целлулоиду изотропности его подвергают отжигу в водной ванне. Неодинаковая продолжительность отжига придает материалу различные механические свойства. При повышении температуры увеличиваются амплитуды колебательных движений звеньев макромолекул, а это приводит к нарушению начальной ориентации. На рис. 2 показано изменение величин E_0 и b для одних и тех же напряжений целлулоида одной партии, но после различных продолжительностей отжига.

Чтобы приблизительно определить время отжига, удобно сопоставить величины E_0 и b (1, 2) для образцов, ориентированных нормально друг к другу. Продолжительность отжига, обеспечивающую изотропность материала, автор статьи определял, отжигая образцы от 20 мин. до 12 час.

При решении изотропных задач следует обращать серьезное внимание на исследование механических характеристик модели для обнаружения анизотропности. Иначе напряженное состояние в модели не будет соответствовать решаемому. Подобие кривых роста деформации целлулоида и ползучести сталей при высоких температурах дает возможность моделировать плоско-напряженное состояние в металлах на целлулоиде. На моделях, выполненных из целлулоида, можно моделировать установившуюся и квазуставившуюся ползучести [2, 3, 4].

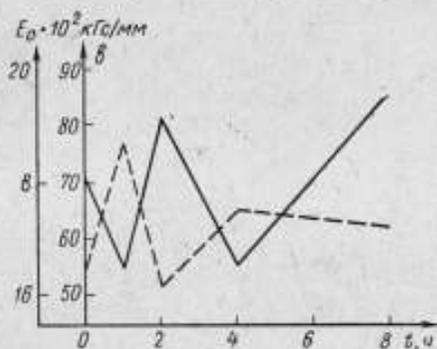


Рис. 2. Изменение начального модуля упругости E_0 и коэффициента b , характеризующего темп роста запаздывающих деформаций, в зависимости от продолжительности отжига (сплошной линией обозначено E_0 , пунктирной — b).

При постоянных нагрузках и температурах рост деформации материалов описывается такими же уравнениями, как и для металлов:

$$\varepsilon_{ij} = l_{ij} + \varphi(t) f^{**}(T) s_{ij}, \quad (3)$$

$$i, j = 1, 2, 3, \dots$$

где: ε_{ij} — деформация к моменту времени t ;

l_{ij} — мгновенная деформация;

s_{ij} — девиатор напряжения;

T — интенсивность касательных напряжений;

$T = \sqrt{0,5 s_{ij} s_{ij}}$ (по повторяющимся в одном члене индексам производится суммирование).

Физика механизма деформирования полимеров и металлов различна, однако математический аппарат описания деформации формально один и тот же. Сравнивая зависимости (1) и (3), можно заметить:

$$bt^n = \varphi(t) f^{**}(T) s_{ij},$$

где: $b = f^{**}(T) s_{ij}$ — для постоянной температуры.

Тогда зависимость (1) приобретает более общий вид:

$$\varepsilon_t = f^*(s_{ij}, T^\circ) + f^{**}(T) s_{ij} f^*(T^\circ).$$

При моделировании конкретных задач функцию $f^{**}(T)$ для моделируемого и моделирующего материалов следует аппроксимировать одинаковыми зависимостями, так как это существенно влияет на распределение напряжений. Применим экспоненциальный закон [3, 4]:

$$f^{**}(T) = \exp(cT),$$

где c — постоянная материала для данной температуры.

Для небольших интервалов напряжений:

$$\text{где} \quad f^{**}(T) = T^{m-1},$$

где m — постоянная материала для данной температуры или «показатель ползучести».

При линейной «ползучести» связь между деформацией ползучести и напряжениями линейна.

И, наконец, правомерность моделирования ползучести обусловлена тем, что поле напряжений не зависит от упругих постоянных [5].

Исследование поля напряжений при начальных упруго- или чисто-пластических деформациях при ползучести поляризационно-оптическим методом

Методика исследования поля напряжений во времени — фотоползучесть [2, 4] не позволяет моделировать ползучесть при начальных упруго- или чисто-пластических деформациях. Вместе с тем, существует методика исследования упругопластических задач [6] — фотопластичность, которая не позволяет исследовать процесс во времени.

Растягиваемый гладкий целлулоидный образец просвечивают дважды монохроматическим поляризованным светом с длинами волн λ_1 и λ_2 . При этом измеряют разность хода световых волн δ_1 и δ_2 .

Порядки полос интерференции:

$$m_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad m_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2}.$$

Разность порядков полос:

$$m_1 - m_2 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} - \frac{\delta_2}{\lambda_2}.$$

Выражение для дисперсии двойного лучепреломления по Менху [7] определяется:

$$D = 1 - \frac{m_1 \lambda_1}{m_2 \lambda_2},$$

где D — величина дисперсии.

При равенстве величины дисперсии нулю в просвечиваемом образце возникает условная пластическая деформация. Условной ее называют потому, что в полимерах «текучесть» вызывается другими причинами, чем в металлах.

В упругой области разность полос интерференции пропорциональна разности главных напряжений:

$$m_1 - m_2 = Ah(\sigma_1 - \sigma_2),$$

где A — коэффициент пропорциональности для данного материала, зависящий от длин волн и температуры;

h — толщина образца.

При переходе в пластическую область деформирования пропорциональность нарушается

$$m_1 - m_2 + \Delta m = Ah(\sigma_1 - \sigma_2),$$

где Δm — отклонение от пропорциональности.

Экспериментально для данного соотношения главных напряжений получено [6]:

$$\Delta m = NhD,$$

где N — коэффициент пропорциональности:

$$N = N \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right).$$

Значение N может быть выражено через отношение главных напряжений следующим образом:

$$N = K \left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right),$$

где K — постоянная для данного материала.

Причем $K = N$ (при $\sigma_2 = 0$).

Тогда

$$\Delta m = KhD \left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right).$$

Таким образом, начало пластических деформаций ($D = 0$) характеризуется началом отклонения зависимости $(m_1 - m_2) - (\sigma_1 - \sigma_2)$ от линейной, а в случае одноосного растяжения

$$(m_1 - m_2) - \sigma_1.$$

Так можно получить напряжение, обеспечивающее начальные пластические деформации.

После несложных преобразований получаем:

$$m_1 - m_2 + KhD = Ah(\sigma_1 - \sigma_2) + KhD \frac{\sigma_2}{\sigma_1}. \quad (4)$$

В работе [6] экспериментально доказано, что величина дисперсии двойного лучепреломления является вполне определенной функцией от величины интенсивности напряжения (рис. 3).

Экспериментально определяется функциональная связь между дисперсией и разностью интенсивности нормальных напряжений и предела текучести.

$$\begin{aligned}\sigma_i - \sigma_s &= f(D); \\ \sigma_i &= \sigma_s + f(D) = M,\end{aligned}\quad (5)$$

где σ_i — интенсивность нормальных напряжений;

σ_s — напряжения, соответствующие нулевой дисперсии.

Решая уравнения (4) и (5) относительно главных напряжений, получают:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_2}{2} + \sqrt{M^2 - \frac{3}{4}\sigma_2^2}.$$

(Знак перед корнем выбирают из условия $\sigma_1 > \sigma_2$).

$$\begin{aligned}A^2 h^2 \sigma_1^4 + Ah [(m_1 - m_2) - N] \sigma_1^3 + [N^2 + (m_1 - m_2)^2 + \\ + (m_1 + m_2)N - 2A^2 h^2 M^2] \sigma_1^2 + AhM [(m_1 - m_2) - N] \sigma_1 + \\ + M^2 [A^2 h^2 M^2 - [(m_1 - m_2) + N]^2] = 0.\end{aligned}$$

Ползучесть в данном случае можно рассматривать как ряд фиксированных упруго- или чистоупругих состояний. Используя при этом

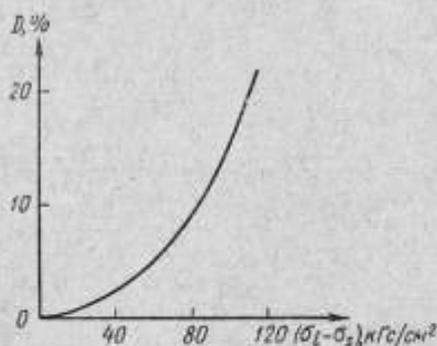


Рис. 3. Изменение дисперсии двойного лучепреломления целлюлозы в зависимости от интенсивности напряжений.

методику фотоупругости, следует учитывать влияние оптического крипа, который сказывается на величине δ_1 и δ_2 . Интенсивность изменения величины разности световых волн во времени при постоянной нагрузке зависит от величины напряжения и пьезооптического типа материала. Иначе говоря, скорости изменения δ_1 и δ_2 равны:

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \psi'(t); \\ \delta_2 &= \psi''(t).\end{aligned}$$

Однако приведенная методика исследования ползучести довольно громоздка и в определенном интервале напряжений дает значительную погрешность. В настоящей работе исследована комбинированная методика. При этом определялись напряжения, соответствующие началу «пластических» деформаций и семейство изохронных кривых. В координатах разность хода световых волн — разность главных напряжений для исследуемых моментов времени. Затем загружали соответственно модель и измеряли в исследуемых точках разность хода, относя их к соответствующим временам. Компоненты главных напряжений разделяют обычными методами фотоупругости, не базирующимися на линейном законе Гука.

По описанной методике были исследованы напряжения в полосках с надрезами, находящиеся в стадии неустановившейся ползучести [10, 11].

Метод мелких сеток для исследования поля деформаций во времени

Мелкие сетки (8) позволяют наиболее полно определять линии равных перемещений. Зная толщину линии недеформируемой сетки σ , и расстояние между изобазами (линии равных перемещений), характеризуемых в проходящем свете как линии одинакового затемнения, несложно подсчитать величину усредненной деформации на промежутке между соседними изобазами. Для более точного определения деформации необходимо измельчение сеток, пределом чего является разрешающая способность фотоэмульсии. Автором были получены сетки с толщиной черной и прозрачной полос 0,02 мм. Кроме того, увеличение точности достигается методикой начальных угловых сдвигов сетки, нанесенной на модель по отношению к сетке—шаблону, которая не подвергается деформированию [12].

Для метода мелких сеток очень удобно пользоваться типовой установкой ППУ-5 (ППУ-7) [9] со снятыми поляризатором и анализатором.

Для крепления сетки-шаблона было выполнено приспособление, крепящееся к стойкам нагружающего устройства и позволяющее устанавливать сетку—шаблон вплотную к плоской исследуемой модели, ориентированной под заданным углом. Картины изобаз (рис. 4) получали фотографированием в соответствующие моменты времени.

На рис. 5 показана эта же картина, изображенная схематически. Рассмотрим возникновение муара, сложив параллельные полосы (вместо сеток). Причем линии шаблона наклонены на угол α по отношению к линиям модели. Соотношение толщины, просвета и темной полосы равной единице. При этом в проходящем свете еще до деформации будет возникать характерный муаровый узор (рис. 4).

Очевидно, что псевдоизобазы будут образовываться по тупым углам ромбов (рис. 4, 5). Подобная картина наблюдалась бы при равномерной деформации:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \text{const}, \quad \gamma_{xy} = \text{const},$$

где ϵ_x, ϵ_y — относительные деформации вдоль осей X и Y ,
 γ_{xy} — сдвиговая деформация в плоскости осей XY .

Таким образом, угловое смещение сеток характеризует фиктивную начальную деформацию U_ϕ . Для определения относительной деформации вдоль какой-то оси, необходимо измерить расстояние между изобазами вдоль этой оси. Рассмотрим рис. 5 подробно. Отрезок DM характеризует

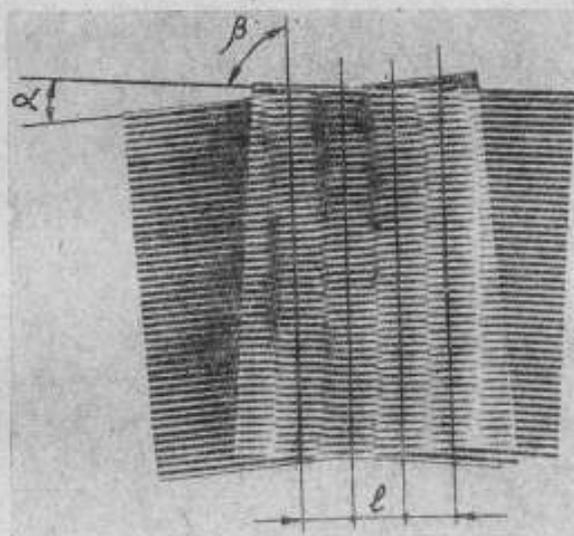


Рис. 4. Муаровый эффект при начальном угловом смещении полос.

расстояние между псевдоизобазами вдоль оси Y , а DP — вдоль оси X .

$$DM = DK + KM$$

$\triangle CKD$:

$$DK = \frac{CK}{\operatorname{tg} \alpha}; \quad CK = 2\delta_y; \quad DK = \frac{2\delta_y}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

$\triangle MND$:

$$DM = \frac{MN}{\sin \alpha}; \quad MN = 2\delta_y; \quad DM = \frac{2\delta_y}{\sin \alpha}.$$

$$KM = DM - DK = \frac{2\delta_y}{\sin \alpha} - \frac{2\delta_y}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

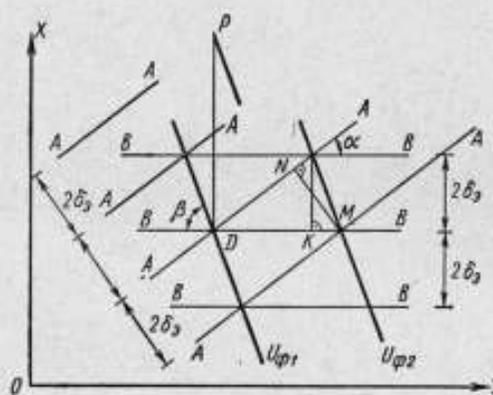


Рис. 5. Схема псевдоизобаз при начальном угловом смещении сеток.

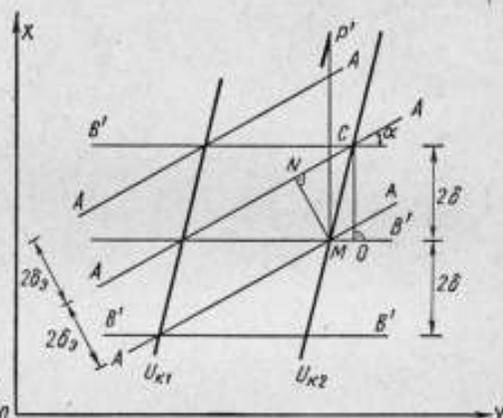


Рис. 6. Схема псевдоизобаз в процессе деформации.

$\triangle CKM$:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{CK}{KM} = \frac{2\delta_y}{\frac{2\delta_y}{\sin \alpha} - \frac{2\delta_y}{\operatorname{tg} \alpha}} = \frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha}.$$

Окончательно имеем:

$$DM = \frac{2\delta_y}{\sin \alpha};$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha}.$$

Деформация вдоль оси Y будет характеризоваться полосами, перпендикулярными изображенным на рис. 5. Если угол $\alpha > \frac{\pi}{2}$, то псевдоизобазы изменят знак угла наклона от вертикали. Таким образом, изображенная на рис. 5 схема, позволяет определять деформацию вдоль оси X . Для этого следует определить расстояние между псевдоизобазами вдоль оси X . Из $\triangle MDP$ (P — точка пересечения \perp к BB' с псевдоизобазой $U_{\phi 2} = \text{const}$).

$$DP = MD \cdot \operatorname{tg} \beta = \frac{2\delta_3}{\sin \alpha} \cdot \frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha} = \frac{2\delta_3}{1 - \cos \alpha};$$

$$\epsilon_{x\phi} = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{2\delta_3}{DP} = 1 - \cos \alpha.$$

Таким образом, определена начальная фиктивная деформация вдоль оси X . Эту же деформацию вдоль оси Y аналогично определяют из линий, перпендикулярных изображенным на рис. 5.

$$\epsilon_{y\phi} = 1 - \cos \alpha.$$

Теперь определим конечные деформации, т. е. после приложения к образцу растягивающих усилий.

В процессе деформации сетка, нанесенная на образец, несколько вытянется (рис. 6). Изобазы примут другое положение U_k . На рис. 6 это новое положение охарактеризовано углом β' между изобазой и вертикалью.

Из $\triangle DNM$:

$$DM = \frac{NM}{\sin \alpha}; \quad NM = 2\delta_3; \quad DM = \frac{2\delta_3}{\sin \alpha}.$$

Восстановим перпендикуляр к $B'B'$ в точке M . Пересечение этого перпендикуляра с изобазой U_{k1} даст точку P' , $\triangle P'MD$

$$MP' = DM \cdot \operatorname{tg} \angle P'DM; \quad \angle P'DM = 90^\circ - \beta.$$

$$MP' = \frac{2\delta_3}{\sin \alpha} \cdot \operatorname{ctg} \beta';$$

$$\epsilon_{xk} = \frac{2\delta_3}{MP'} = \frac{2\delta_3}{2\delta_3 \operatorname{ctg} \beta'} \cdot \sin \alpha = \frac{\sin \alpha}{\operatorname{ctg} \beta'}.$$

Действительная деформация выразится разностью конечной и фиктивной деформаций:

$$\epsilon_{xd} = \epsilon_{xk} - \epsilon_{x\phi} = \frac{\sin \alpha}{\operatorname{ctg} \beta'} + \cos \alpha - 1.$$

Меняя начальный угол наклона сеток α с последующей обработкой, можно значительно повысить точность определения перемещений исследуемой области плосконапряженного образца. Описанная методика была использована для определения поля деформаций в ослабленном сечении растягиваемой полосы с глубокими надрезами, находящимися в стадии неустановившейся ползучести [11].

Одновременное использование поляризационно-оптического метода и мелких сеток позволит экспериментально определять изменения поля напряжений и независимо от него деформации при ползучести на образцах, выполненных из целлюлоида.

ЛИТЕРАТУРА

1. Работнов Ю. Н. Ползучесть конструкций. Л., Изд-во «Наука», 1966.
2. Бугаков И. И. Применение поляризационно-оптического метода исследования напряжений при неупругих деформациях. В сб. «Поляризационно-оптический метод исследования напряжений», Изд-во ЛГУ, 1966.
3. Бугаков И. И. Ползучесть целлюлоида при простом нагружении. Журнал прикладной механики и технической физики, № 2, 1963.
4. Бугаков И. И. Исследование метода фотоползучести. В сб. «Исследования по упругости и пластичности», ЛГУ, 1961.

5. B u d i a n s k y, B. «Extension of Michell's theorem to problem of plasticity and creep». Quart. appl. math. vol. 16, N 3, 1958.

6. Н е т р е б к о, В. П. К вопросу о решении плоских упруго-пластических задач методом фотопластичности. В сб. «Поляризационно-оптический метод исследования напряжений», ЛГУ, 1966.

7. M ö n c h E. Die Dispersion der Doppelbrechung bei Zelluloid als Plastizitätsmaß in der Spannungsoptik. Zs. angew. Phys. Bd. 6. N. 8, 1954.

8. С о к о л о в М. И. Исследование поля деформаций методом мелких сеток. «Энергомашиностроение», № 11, 1963.

9. Э д е л ь ш т е й н, Е. И. Приборы научно-исследовательского института математики и механики ЛГУ для исследования напряжений поляризационно-оптическим методом. В сб. «Поляризационно-оптический метод исследования напряжений», ЛГУ, 1960.

10. Т р у б н я к о в Ю. И. Исследование ползучести тонких пластин, ослабленных мелкими надрезами, на целлулоидных моделях. «Известия вузов». Машиностроение, 1967, № 12.

11. Т р у б н я к о в, Ю. И. Исследование ползучести тонкой пластины, ослабленной глубокими надрезами. «Известия вузов» Машиностроение, № 3, 1968.

12. Т р у б н я к о в Ю. И., О с т р о в с к и й Г. М. Метод определения поля деформаций в плоских моделях. «Измерительная техника», 1968, № 3.

Поступила в редакцию
27/IX 1967 г.

РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ
В СБОРНИКЕ

517.9:531.7

Оптимальная система условных уравнений совместных
измерений нескольких величин

Б. В. Васильев, Е. Ф. Долинский

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118/(178), 1971 г., стр. 5—14.

Статья посвящена вопросу оценки систем условных уравнений с точки зрения получения минимально возможной дисперсии оценок совместно измеряемых величин при неизменной точности исходных данных. Показано, что в качестве оценки можно использовать величину углов между векторами-столбцами матрицы условных уравнений или чисел обусловленности матриц нормальных уравнений. Указанные величины можно использовать при планировании совместных измерений для получения оптимальной системы условных уравнений. При этом необходимо планировать получение такой системы условных уравнений, у которой векторы-столбцы имеют углы, по возможности близкие к прямым, или матрица системы нормальных уравнений лучше обусловлена, т. е. значение чисел обусловленности минимально. Таблиц 2, иллюстраций 2.

УДК 531.76.088

Об оценке динамических погрешностей измерения
нарастающих ускорений

*А. Ю. Львович, В. С. Пеллинец,
В. С. Сабангев, М. П. Юшков*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118(178), 1971 г., стр. 15—22.

В статье показано, что звенья, образующие измерительное устройство, разделяются на два вида: колебательные системы с одной степенью свободы и дифференцирующие усилители. Найдены точные выражения для погрешности измерения линейно нарастающего ускорения, а также приближенные формулы с оценкой степени приближения для звеньев 1 и 2-го видов, а также для их различных комбинаций.

В большинстве случаев погрешность, начиная со времени установления P , характеризуют постоянным сдвигом измеряемого процесса во времени.

Библиографий 2, иллюстраций 4.

УДК 531.781.088

Оценка общей погрешности динамометров и датчиков силы

Л. М. Максимов

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118 (178), 1971 г., стр. 23—30.

Отмечено отсутствие общепринятой методики оценки погрешностей силоизмерительных приборов и недостаточность их оценки, учитывающей какую-либо одну частную погрешность. Пред-

ложена методика оценки общей погрешности измерений динамометрами и датчиками силы общего назначения с условными шкалами. Эта оценка основана на конкретном анализе всех основных частных погрешностей приборов. Даны ориентировочные законы распределения частных погрешностей, относящиеся к приборам данного типа и их применению.

Библиографий 5, иллюстраций 6.

УДК 531.781.088

Точность интерполяции показаний образцовых динамометров 1-го разряда

Л. М. Максимов

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118(178), 1971 г., стр. 31—40.

Изложена методика оценки погрешностей интерполяции показаний динамометров с нелинейными градуировочными характеристиками. Предложен метод линейной интерполяции, обеспечивающий возможность точной интерполяции по протяженности всей шкалы динамометра. Соответствующие погрешности для динамометров 1-го разряда не превышают 0,02%.

Таблиц 3, библиографий 3, иллюстраций 4.

УДК 531.7 : 531.781.089.52

Влияние инерционности маятникового силоизмерителя испытательных машин на механические характеристики материалов

Б. А. Вандышев, Ф. С. Савицкий

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118(178), 1971 г., стр. 41—56.

В работе приведена теоретическая и экспериментальная оценки влияния инерционности маятникового силоизмерителя на результаты измерения характеристик механических свойств материалов при испытаниях на растяжение, производимых на машинах УМ-5А и ГМС-20. Значения погрешности, вычисленные аналитически, согласуются с экспериментальными результатами.

Таблиц 3, библиографий 8, иллюстраций 12.

УДК (620.163.3 + 620.17) : 621.3.017.004.13

Исследования потерь энергии при ударных испытаниях

Ф. С. Савицкий

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118(178), 1971 г., стр. 57—60.

Предложен метод определения потерь энергии при ударных испытаниях образцов на растяжение, изгиб и твердость. Метод обоснован исследованиями баллистического копра, которыми установлено, что при одинаковых значениях ударного импульса

потери энергии одинаковы для отраженного упругого и проходящего упруго-пластического ударов.

Таблиц 1, библиографий 4, иллюстраций 2.

УДК 531.787.089.6

Установка типа УПМ-6000 для поверки манометров

*Г. И. Лоскутов, Ю. В. Могилин
и Г. И. Полухин*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118(178), 1971 г., стр. 61—64.

Статья содержит описание принципа действия и особенностей конструкции созданной во ВНИИМ установки типа УПМ-6000, предназначенной для проверки манометров.

Библиографий 2, иллюстраций 3.

УДК 531.787—984 : 533.536.5

Определение температурной поправки при измерении низких давлений газов

М. И. Дрига

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118 (178), 1971 г., стр. 65—73.

В статье изложен метод расчета отношения низких давлений при различных температурах в манометре и в вакуумной камере, сообщающихся друг с другом через короткую трубку (диафрагму). Множитель, выражающий это отношение давлений, является функцией температур камеры и манометра и вводится в уравнение измерения давления высокоразреженного газа в качестве температурной поправки, учитывающей термо-молекулярную разность давлений в манометре и в камере.

Иллюстраций 3, библиографий 3.

УДК 681.26.089.6

Метод исследования и юстировки равноплечих весов по периоду колебаний

С. И. Торопин

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118 (178), 1971 г., стр. 74—78.

В статье кратко изложен новый метод исследования и юстировки равноплечих весов по периоду колебаний, позволяющий определить момент инерции коромысла относительно его оси колебания, величину просвета между призмами и расстояние от центра тяжести коромысла до его оси колебания.

Библиографий 4.

УДК 531.768

**О влиянии жесткости крепления измерительного
акселерометрического преобразователя на результат
измерения**

Е. А. Барков

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118 (178), 1971 г., стр. 79—86.

Представление в статье акселерометрических преобразователей в виде системы с двумя степенями свободы позволило рассмотреть влияние на частотные характеристики акселерометрических преобразователей изменения их жесткости крепления к объекту измерения.

В качестве примера при гармоническом колебании объекта расчет подъема частотной характеристики выполнен для трех типов пьезоакселерометрических преобразователей.

Приведено решение реакции двухмассовой системы на действие импульса вида смещенной косинусоиды. Расчеты выполнены для высокочастотного акселерометрического преобразователя при трех значениях отношения длительности импульса к периоду собственных колебаний акселерометрического преобразователя.

Установлено, что непостоянство условий крепления пьезоакселерометрического преобразователя к объекту при измерении высокочастотных вибраций и импульсных ускорений является источником значительной погрешности, достигшей 30%.

Таблиц 2, иллюстраций 7, библиографий 9.

УДК 534.322.08: 534.511.1

Интерференционный метод измерения амплитуды вибрации

А. Ф. Бордиловский

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118 (178), 1971 г., стр. 87—95.

В работе излагается метод измерения амплитуды вибраций путем однонаправленного счета числа интерференционных полос. Описаны преимущества данного метода перед существующими. Рассмотрен вопрос о влиянии гармонических составляющих на точность измерения амплитуды вибраций. Приведены погрешности метода.

Таблиц 1, библиографий 16, иллюстраций 3.

УДК 531.787.2

**О максимально достижимой собственной частоте мембранных
элементов преобразователей давления**

И. Н. Долицкий

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118 (178), 1971 г., стр. 96—97.

В статье рассмотрен вопрос о создании малонерционных мембранных элементов, сохраняющих достаточную чувствительность к давлению. На примере емкостных преобразователей

показано, что максимальное значение собственной частоты мембраны, имеющей заданный минимальный прогиб, определяется только выбором материала и чистотой, обработки поверхности и не зависит от размеров мембраны. Приведены расчетные формулы.

Таблиц 1, библиографий 3.

УДК 531.713.089.6.

Компаратор для градуировки пьезопреобразователей ударных ускорений

Н. Н. Кованина, В. С. Пеллинец

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118 (178), 1971 г., стр. 98—105.

В статье описан компаратор для градуировки преобразователей методом сличения с показаниями образцового акселерометра при 1—2 фиксированных уровнях ускорения на переднем фронте ударного процесса.

Принцип действия заключается в измерении пикового значения усиленного сигнала, прерванного в момент, когда показания образцового преобразователя достигают заданного значения.

Отсчет по шкале производится в единицах чувствительности градуируемого преобразователя. Дано описание методики и схема калибровки трактов компаратора; приведены данные испытаний. Компаратор имеет три поддиапазона; пределы измерений от 0,2 до 20 μg при емкости преобразователя 500 + 1500 μf ; длительность градуировочного удара 0,2—1 мсек; значения ускорений, при которых производится градуировка 40, 60, 200, 300, 1500 g . Погрешность градуировки 4,5% в средней части диапазона и 8% — на границах.

Компаратор обеспечивает высокую производительность работы.

Иллюстраций 4, библиографий 8.

УДК 534.232.092.74.001.24

Методика расчета электродинамических вибраторов

В. П. Шумилин

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118 (178), 1971 г., стр. 106—111.

Статья дает теорию и методику расчета электродинамических преобразователей. Расчет позволяет определить оптимальные электрические и механические параметры устройства, выбрать вид и рассчитать амплитудно-частотную характеристику.

Рассматриваемая методика расчета применяется при создании колебательных систем в диапазоне 5—500 гц . В качестве иллюстрации в статье дан расчет установки для воспроизведения угловых колебаний (УВУК)-3.

Экспериментальные исследования показали, что расчетные и действительные параметры отличаются не более, чем на 10—20%.

Иллюстраций 4, библиографий 3.

УДК 620.176.08

Методы и приборы для измерения предельных напряжений сдвига (ПНС) структурированных дисперсных систем

М. И. Кондратенко

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118 (178), 1971 г., стр. 112—137.

В статье рассмотрены современные методы для измерения статического предельного напряжения сдвига и предела прочности на сдвиг (ПНС) упруго-вязко-пластичных сред. Проведена типизация методов измерения ПНС, рассмотрены разновидности метода внедрения конуса в исследуемую среду; приведены схемы приборов, уравнения измерения ПНС и метрологические характеристики приборов, основанных на рассмотренных методах. Статья содержит справочный и библиографический материал большой научной ценности. Изучение методов и приборов проводилось для разработки образцовых приборов и единообразия измерения ПНС в стране.

Таблиц 5, библиографий 103, иллюстраций 2.

УДК 539.214.07 : 621.892

Исследования пластометра МНИ-2, применяемого для измерения предельных напряжений сдвига консистентных смазок

М. И. Кондратенко

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118 (178), 1971 г., стр. 138—151.

В статье обобщены значения статического предельного напряжения сдвига (СПНС) и предела прочности на сдвиг консистентных смазок.

Показано также, что пластометр МНИ-2, применяемый для измерения этих характеристик, обладает рядом преимуществ перед другими приборами идентичного назначения. Исследованы источники погрешностей измерений на пластометре МНИ-2; разработана методика для исключения систематических и уменьшения случайных погрешностей измерения; приведены экспериментальные значения СПНС полученных на рассматриваемом приборе различных консистентных смазок. Исследования проводились для изыскания путей разработки образцовых приборов и создания единообразия измерений пределов напряжений сдвига в стране.

Таблиц 2, библиографий 24, иллюстраций 7.

УДК 620.178 : 62—52

Автоматическая установка для закалки образцовых мер твердости

*Г. С. Богомолов, А. Н. Зверева,
Ю. А. Майоров, А. В. Смирнов*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118 (178), 1971 г., стр. 152—156.

В статье описана созданная во ВНИИМ конструкция опытной автоматической установки для закалки мер твердости.

После исследования ее на Ивановском заводе испытательных приборов была построена установка с рядом конструктивных улучшений.

Исследование и освоение этой модернизированной установки позволило производить закалку мер твердости, значительно уменьшить брак. Кроме того, применение такой установки дало возможность механизировать трудоемкий рабочий процесс.

Таблиц 1, иллюстраций 2.

УДК 678.544.2 : 539.376

**Исследование плоского напряженного состояния
на целлюлозных образцах**

Ю. И. Трубинов

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области механических измерений, вып. 118 (178), 1971 г. стр. 157—166.

Рассмотрена возможность формального моделирования ползучести металлов на моделях, выполненных из целлюлозы. Это обусловлено тем, что кривые роста деформации целлюлозы при постоянной нагрузке и температуре и кривые ползучести металлов при высокой температуре аппроксимируются одностепенными уравнениями.

Поле деформаций в целлюлозных моделях определяется методом мелких сеток (метод муаров). Для повышения точности результатов сетки-шаблоны и сетки-свидетели сдвигают на произвольный угол до начала деформирования. Это повторяют несколько раз с последующим усреднением.

Поле напряжений определяется поляризационно-оптическим методом. В основу этой методики положены свойства целлюлозы к дисперсии двойного лучепреломления, позволяющие находить псевдопластические деформации, и к оптическому крипу, при помощи которого моделируется ползучесть.

СОДЕРЖАНИЕ

	Предисловие	3
✓	Б. В. Васильев, Е. Ф. Долинский. Оптимальная система условных уравнений совместных измерений нескольких величин	5
✓ 4281	А. Ю. Львович, В. С. Пеллинец В. С. Сабанеев, М. П. Юшков. Об оценке динамических погрешностей измерения нарастающих ускорений	15
✓	Л. М. Максимов. Оценка общей погрешности динамометров и датчиков силы	23
✓	Л. М. Максимов. Точность интерполяции показаний образцовых динамометров 1-го разряда	31
	Б. А. Вандышев, Ф. С. Савицкий. Влияние инерционности маятникового силоизмерителя испытательных машин на механические характеристики материалов	41
	Ф. С. Савицкий. Исследования потерь энергии при ударных испытаниях	57
✓ 7682	Г. И. Лоскутов, Ю. В. Могилев, Г. И. Полухин. Установка типа УПМ-6000 для поверки манометров	61
✓	М. И. Дрига. Определенные температурной поправки при измерении низких давлений газов	65
✓	С. И. Торопин. Метод исследования и юстировки равноплечих весов по периоду колебаний	74
✓	Е. А. Барков. О влиянии жесткости крепления измерительного акселерометрического преобразователя на результат измерения	79
✓	А. Ф. Бордиловский. Интерференционный метод измерения амплитуды вибраций	87
✓	И. Н. Долицкий. О максимально достижимой собственной частоте мембранных элементов преобразователей давления	96
✓	Н. Н. Кованна, В. С. Пеллинец. Компаратор для градуировки пьезопреобразователей ударных ускорений	98
✓	В. П. Шумилин. Методика расчета электродинамических вибраторов	106
✓	М. И. Кондратенко. Методы и приборы для измерения предельных напряжений сдвига (ПНС) структурированных дисперсных систем (обзор)	112
✓	М. И. Кондратенко. Исследования пластометра МНИ-2, применяемого для измерения предельных напряжений сдвига консистентных смазок	138
✓	Г. С. Богомолов, А. Н. Зверева, Ю. А. Майоров, А. В. Смирнов. Автоматическая установка для закалки образцовых мер твердости	152
✓	Ю. И. Трубицкий. Исследование плоского напряженного состояния на целлюлоидных образцах	157
	Рефераты статей, опубликованных в сборнике	167

**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Труды метрологических институтов
Выпуск 118 (178)

Редактор *Н. Н. Александрова* Техн. редактор *З. Г. Вагер*
Корректор *Е. Я. Фарберова*

Сдано в набор 29/VI 1969 г. Подписано в печать 15/II 1971 г. Формат бумаги 70×108/16,
печ. л. 10,8, 13,2 уч.-изд. л. Тираж 2000 экз. Цена 1 р. 23 к. М-28574. Заказ 841.

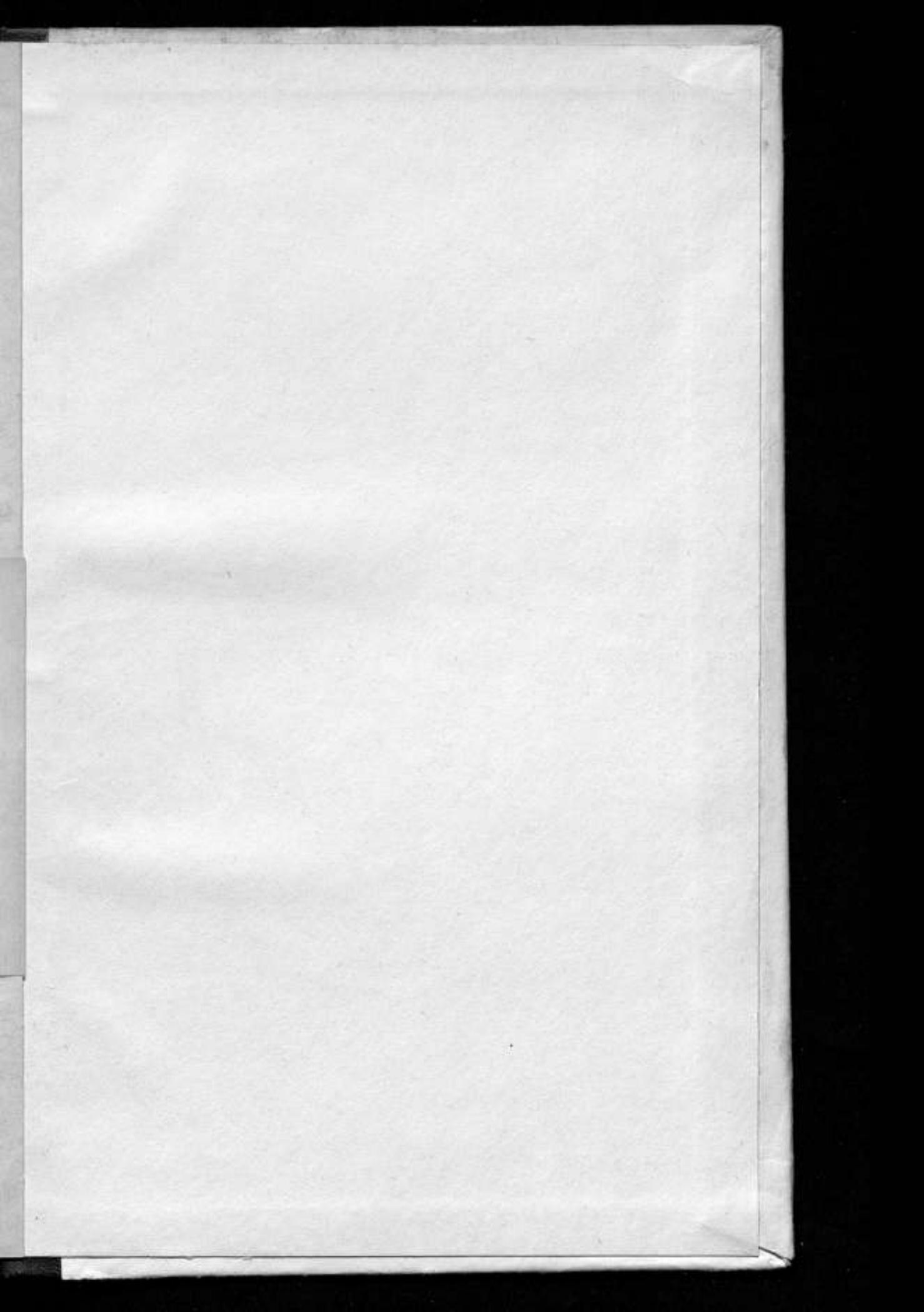
Издательство стандартов
Москва, К-1, ул. Щусева, 4.

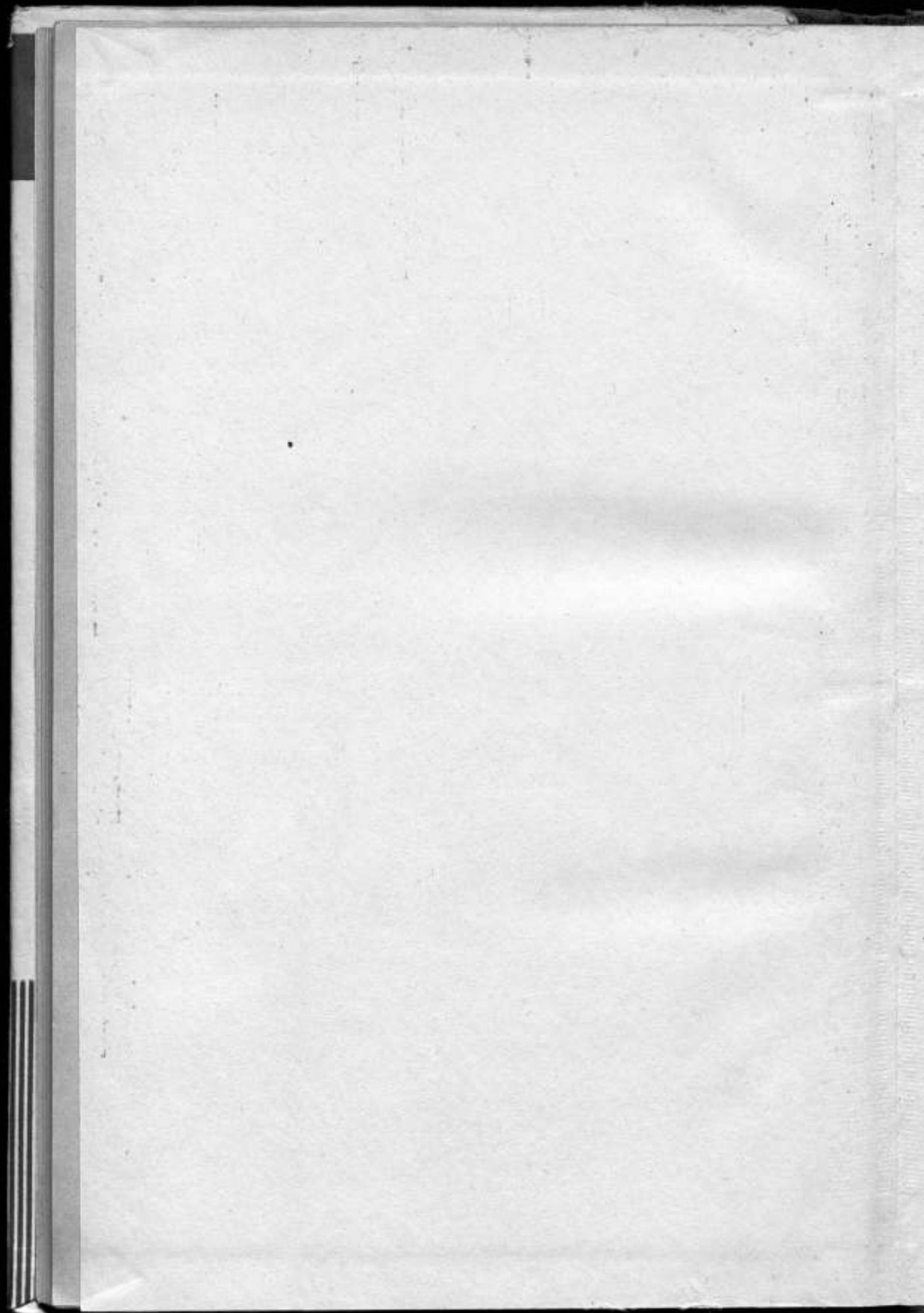
Ленинградская типография № 6 Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР

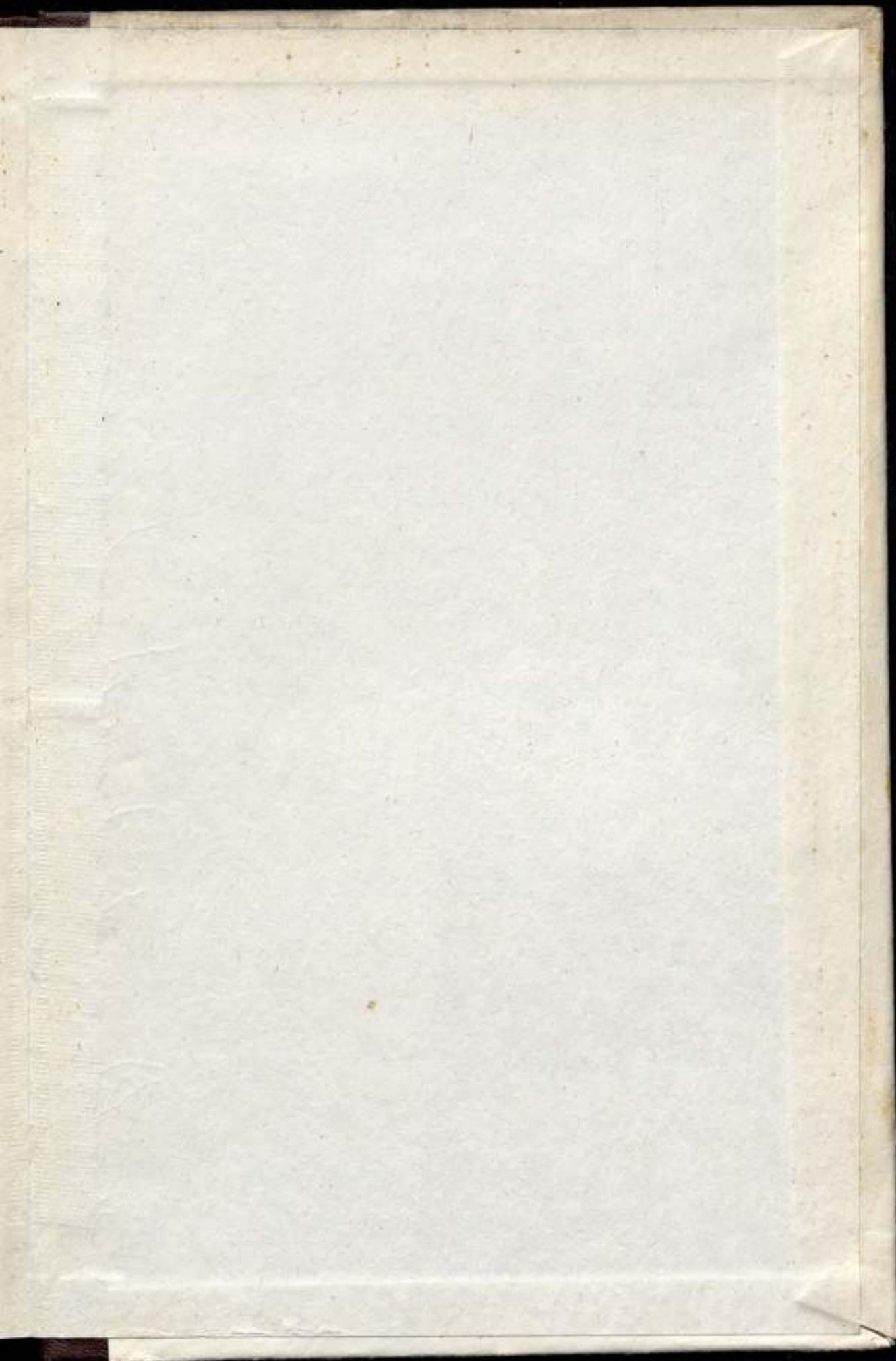
Ленинград, С-144, ул. Монсеенко, 10

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
33	8-я сверху	x^2	x_2
43	11-я снизу	кинематической	кинетической
69	16-я >	$Q \cong \frac{(0,98)^{6401}}{0,02} = 49z_0$	$Q \cong \frac{1 - (0,98)^{0,6401}}{0,02} z_0 = 49z_0$
94	17-я сверху	$-0,07 \text{ мкм} < A < 0,07 \text{ мкм}$	$-0,07 \text{ мкм} < \Delta A < 0,07 \text{ мкм}$
108	8-я >	(рис. 3)	(рис. 4)







1 р. 23 к.