

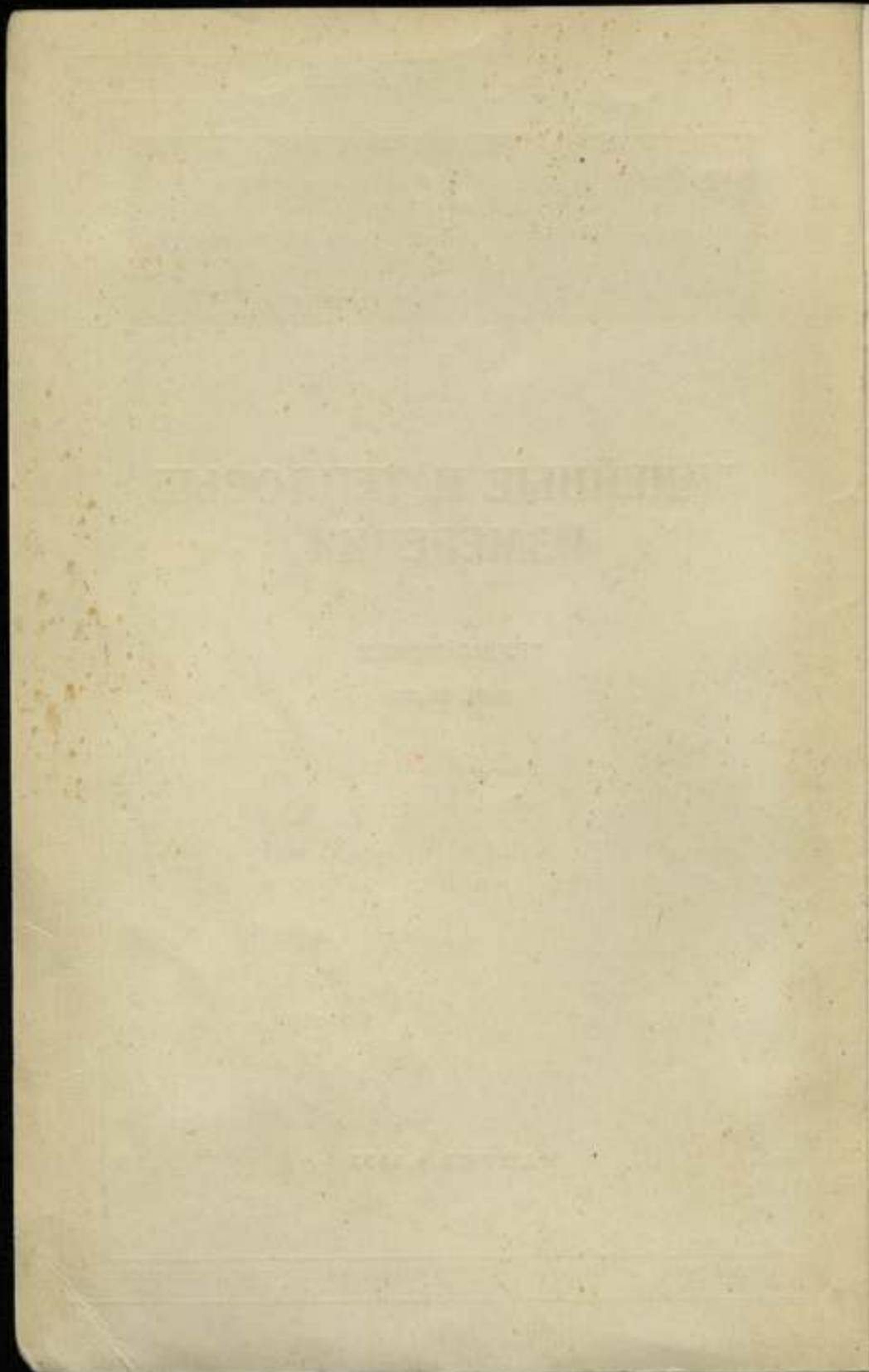
КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМ. Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

ЛИНЕЙНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

ТРУДЫ ВНИИМ

ВЫП. 18 (78)

МАШГИЗ • 1952



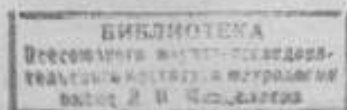
КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

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

ЛИНЕЙНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ
ИЗМЕРЕНИЯ

ТРУДЫ ВНИИМ
вып. 18 (78)

Под редакцией
канд. техн. наук М. П. Павлова



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1952 ЛЕНИНГРАД

В сборнике „Линейные и тепловые измерения“ содержатся статьи, освещающие вопросы расширения пределов измерения и повышения точности мер длины, применяемых в машиностроении, приборостроении и других областях народного хозяйства, под углом зрения обеспечения единства этих мер на всей территории СССР, а также статьи по исследованию ртутных термометров.

Сборник представляет интерес для инженера-конструктора, инженера-технолога и инженера-исследователя, работающих над решением задач, относящихся к проблеме точности в машиностроении и приборостроении.

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
Редакция литературы по машиностроению
Заведующий редакцией инж. Ф. И. Фетисов

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем сборнике трудов Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева приводятся статьи по вопросам линейных и тепловых измерений.

Одним из актуальных вопросов современных линейных измерений является определение разных размеров тел сложной формы. Этому вопросу в сборнике посвящена статья Н. А. Гавевского о методике расчета и поверки некруглых зубчатых зацеплений и статья М. Ф. Гречко о методике измерения червячных фрез.

Несколько статей сборника посвящены исследованию различных отечественных приборов для линейных измерений, как, например, статья П. Д. Рудакова, посвященная исследованию окулярных микрометров, статья М. Ф. Гречко по исследованию интерференционного прибора ПИУ-1 и статья Л. К. Каяка и А. Н. Королевой по исследованию стереокомпаратора.

Работы по линейным измерениям заключаются статьей Л. К. Каяка, подводящей итог современному состоянию эталонной длины.

Работы В. П. Простякова, посвященные тепловым измерениям, относятся к исследованию термометров и представляют интерес для специалистов, связанных с приборостроением в области термометрии.

В сборнике помещена также статья В. Я. Билык, дающая интересные материалы по работам М. В. Ломоносова в области термометрии, устанавливающая приоритет русской науки в этой области знаний.

Редактор

The first part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the work during the year. It is followed by a detailed account of the various projects and the results achieved. The report concludes with a summary of the work done and the plans for the future.

The work has been carried out in accordance with the programme of work approved by the Council of the Institute. It has been a year of hard work and many achievements have been made. The results of the work are set out in the following pages.

The first part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the work during the year. It is followed by a detailed account of the various projects and the results achieved. The report concludes with a summary of the work done and the plans for the future.

The work has been carried out in accordance with the programme of work approved by the Council of the Institute. It has been a year of hard work and many achievements have been made. The results of the work are set out in the following pages.

The first part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the work during the year. It is followed by a detailed account of the various projects and the results achieved. The report concludes with a summary of the work done and the plans for the future.

The work has been carried out in accordance with the programme of work approved by the Council of the Institute. It has been a year of hard work and many achievements have been made. The results of the work are set out in the following pages.

П. Д. РУДАКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИРАЛЬНЫХ ОКУЛЯРНЫХ МИКРОМЕТРОВ

1. Спиральный окулярный микрометр

За последнее время точные измерительные приборы стали снабжаться, взамен винтовых, спиральными окулярными микрометрами. Спиральные микрометры проще в изготовлении и производительней в работе. На рис. 1 схематически

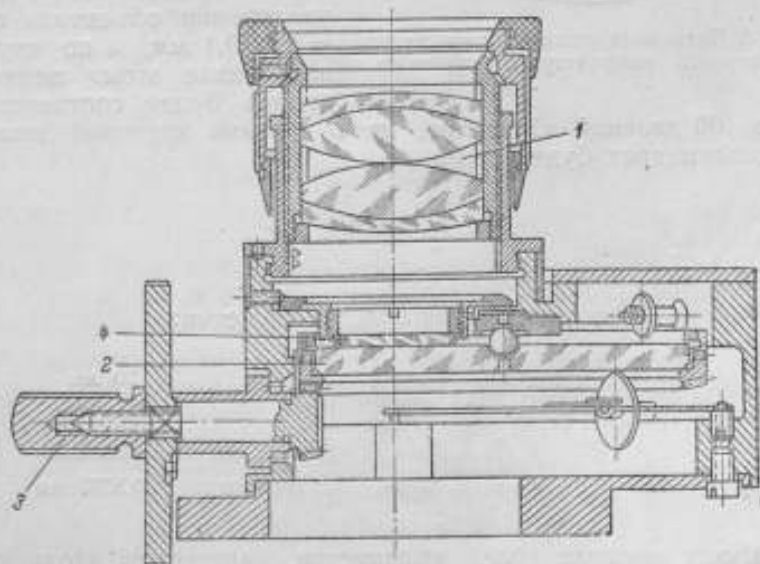


Рис. 1. Схема спирального микрометра.

изображено устройство микроскопа со спиральным микрометром. На один конец тубуса (не показанного на рисунке) микроскопа навинчена оправа с объективом, а на другой—окуляр 1 со спиральным микрометром. Микрометр представляет собой вращающуюся плоскопараллельную стеклянную пластинку 2,

на поверхности которой, обращенной к окуляру, нанесены две эквидистантные спирали Архимеда и круговая шкала (рис. 2).

Стеклопаянная пластинка 2 (рис. 1) вращается от рукоятки 3. На неподвижной пластинке 4 нанесена стрелка и десять равных делений с цифрами 0, 1, 2... 10. Цифры 19, 20 и 21, видимые в окуляре, нанесены на миллиметровой шкале. Шаг спиралей $l = 0,5$ мм, число витков спиралей равно 10. Цена деления в радианах круговой шкалы со 100 делениями $\sigma = \frac{2\pi}{100}$.

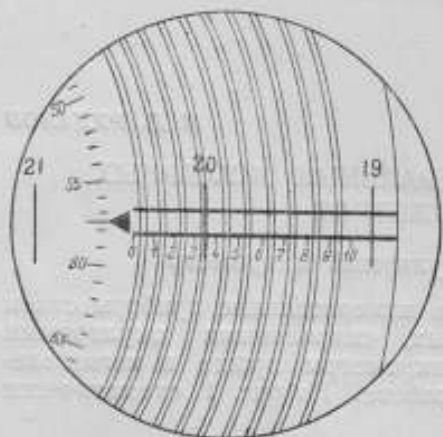


Рис. 2. Подвижная стеклянная пластинка спирального микрометра с указателем.

При повороте спиральной шкалы на один оборот виток спирали переместится на свой шаг $l = 0,5$ мм, что будет соответствовать на миллиметровой шкале (при увеличении объектива $v = 5\times$) $0,1$ мм, а по круговой шкале этому перемещению будет соответствовать 100 делений. Очевидно, цена деления круговой шкалы в миллиметрах будет равна

$$\mu = \frac{l}{n} = 0,001 \text{ мм.} \quad (1)$$

Из рис. 2 уясняется производство отсчетов:

По миллиметровой шкале	20 мм
По шкале десятых долей миллиметра	0,3 мм
По круговой (микронной) шкале	0,0576 мм

Всего . . . 20,3576 мм

Шкала десятых долей миллиметра, нанесенная вдоль оси стрелки, обозначает номер витка от нулевого, когда по микронной шкале установлен отсчет 0. Количеству витков спирали, отсчитанному от нулевого, будет соответствовать количество десятых долей миллиметра.

Из производства отсчетов очевидно, что в конструкции микроскопа со спиральным окулярным микрометром должно быть равенство отдельных шагов и их интервалов на всех участках витков спирали и микронной шкалы.

Преобразовывая условные уравнения (3) и переходя к нормальным уравнениям, будем иметь¹:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= -\frac{1}{n \sin \frac{f}{2}} \sum_{p=0}^{p=n-1} (K - d_{p+1}) \sin \left(\frac{f}{2} + p\sigma \right) \\ b_1 &= \frac{1}{n \sin \frac{f}{2}} \sum_{p=0}^{p=n-1} (K - d_{p+1}) \cos \left(\frac{f}{2} + p\sigma \right) \\ a_2 &= -\frac{1}{n \sin f} \sum_{p=0}^{p=n-1} (K - d_{p+1}) \sin 2 \left(\frac{f}{2} + p\sigma \right) \\ b_2 &= \frac{1}{n \sin f} \sum_{p=0}^{p=n-1} (K - d_{p+1}) \cos 2 \left(\frac{f}{2} + p\sigma \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $p+1$ — номер установки микрометрической шкалы.

Для уменьшения погрешностей наблюдений величине f даем два значения: первое $f = 180^\circ$ — выгодное для определения коэффициентов a_1 и b_1 , и второе $f = 270^\circ$ — выгодное для определения коэффициентов a_2 и b_2 .

3. Горизонтальный компаратор

Для исследования микрометров был использован горизонтальный компаратор, изображенный на рис. 3. Спиральный микрометр 1 с отвинченным окуляром устанавливался и надежно закреплялся специальными планками и винтами на столе 2 компаратора так, чтобы светлый рабочий промежуток шкалы десятых долей миллиметра был ориентирован по ходу компаратора. Наблюдения производились через визирный микроскоп 3. Увеличение микроскопа равнялось $15\times$ (увеличение объектива $2\times$, увеличение окуляра $7,5\times$). В оправе окуляра микроскопа была установлена специальная сетка с тремя штрихами (рис. 4). Расстояния между штрихами рассчитаны так, чтобы одной паре штрихов соответствовало перемещение витка спирали на 50 делений по микрометру, или $\frac{1}{2}$ оборота, а другой — 75 делений, или $\frac{3}{4}$ оборота. Наведения биссектора исследуемого витка спирали на штрихи сетки визирного микроскопа делаются с высокой точностью, так как эти наведения наблюдаются под полным увеличением визирного микроскопа.

¹ Эти формулы взяты из руководства по высшей геодезии проф. Ф. Н. Красовского (часть 1, стр. 149) для винтовых окулярных микрометров.

4. Порядок наблюдений

Убедившись предварительно в небольшой разности в отсчетах по микрометру порядка $\leq 0,5$ деления с прямого и обратного ходов, можно приступить к наблюдениям.

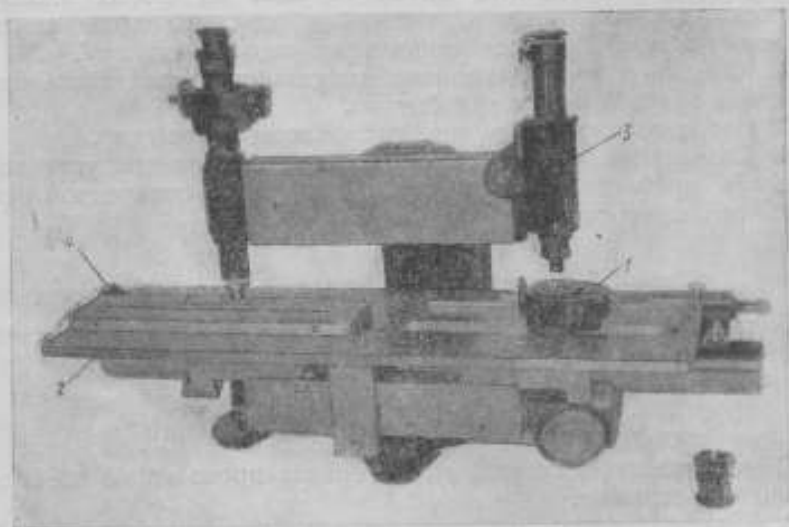


Рис. 3. Общий вид компаратора.

1. Установить по микрометру отсчет 0, делая подводку винтом микрометра, наблюдая в визирный микроскоп 3 (рис. 3).

2. Биссектор исследуемого витка спирали совмещается с правым штрихом сетки микроскопа при помощи грубого и микрометричного перемещения стола компаратора.

3. Затем, вращая винт микрометра, производят точную наводку биссектора исследуемого витка спирали на три штриха сетки визирного микроскопа и снимают соответствующие отсчеты с микрометрической шкалы. Таких наводок для одной установки делалось четыре.

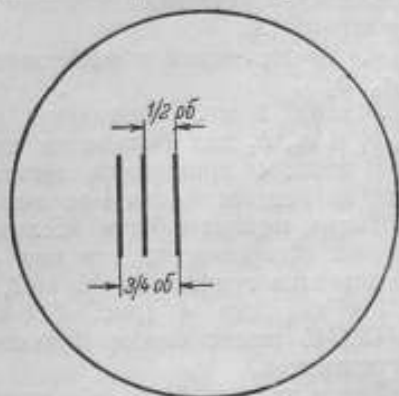


Рис. 4. Схема отсчета.

Далее, по микрометру устанавливались последовательно отсчеты: 10, 20, 30...90 и производились аналогичные наблю-

дения. При каждой новой установке на соответствующие начальные отсчеты биссектор исследуемого витка спирали совмещался с правым штрихом сетки микроскопа при помощи микрометричного винта 4 (рис. 3) стола компаратора.

При исследовании соблюдались следующие правила:

1. Наводка биссектора витка спирали на штрих шкалы микроскопа заканчивалась только с прямого хода винта микрометра вращением винта по ходу часовой стрелки.

2. Каждый оборот стеклянной пластинки заканчивался без перерыва и по возможности быстро.

3. Наблюдения велись при однородном освещении.

4. Стеклянная пластинка окулярного микрометра устанавливалась приблизительно перпендикулярно к оптической оси визирного микроскопа.

5. Материал наблюдений

В табл. 1 показан пример записи материала наблюдений и обработки его для 1-го витка спирали.

6. Обработка результатов наблюдений

Обработка представленного материала произведена по следующей программе.

1. Подсчитываются разности между отсчетами на левый и правый штрихи сетки визирного микроскопа, берутся из них средние значения d_{p+1} для каждой установки.

2. Вычисляется среднее значение разности K для каждого витка спирали.

3. Вычисляются отклонения от средней разности $K - d_{p+1}$ для каждой установки, которые представляют свободные члены уравнений (3).

4. Вычисляются коэффициенты периодического ряда a_1, b_1 и a_2, b_2 .

В табл. 2 и 3 приводятся значения коэффициентов ряда a_1, b_1 и a_2, b_2 для 1-го витка спирали.

В табл. 4 приводится вычисление поправок за периодические погрешности для 1-го витка спирали по формуле 2.

Таким методом были исследованы восемь спиральных окулярных микрометров, из них один фирмы Цейсс. Результат представлен графиками № 1, 2, 3 и 4 (рис. 5—8).

Из графика 4 (рис. 8) видно, что микрометр ОМС-5 № 480046 имеет самые большие поправки за периодические погрешности.

Так и должно быть, ибо этот микрометр имел явный эксцентриситет стеклянной пластинки. Это было обнаружено по круговой контрольной риске, нанесенной на стеклянной пластинке еще до собирания материала наблюдений, и занесено в характеристику исследуемого микрометра. Однако нежелательно

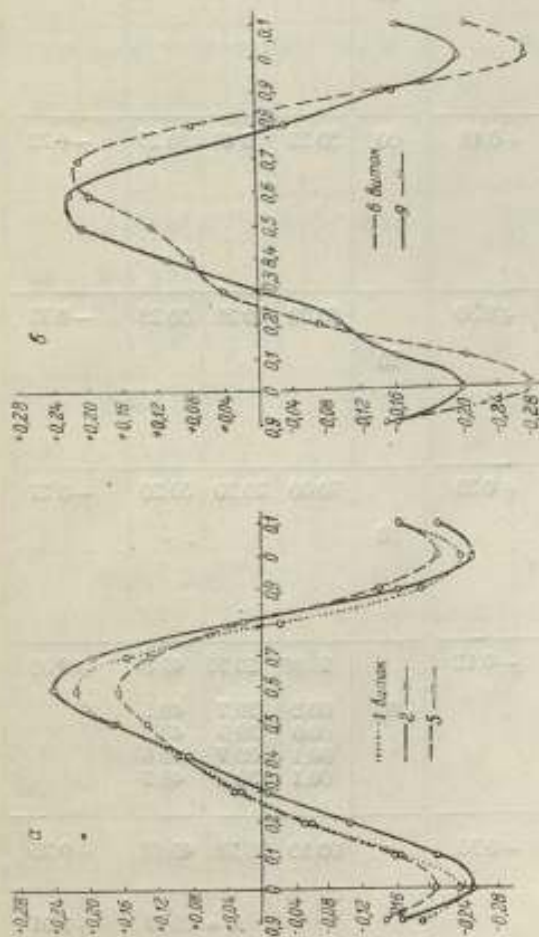


Рис. 5. График (№ 1) поправок за периодические ошибки спирального микрометра ОМС-5 № 480059.



Рис. 6. График (№ 2) поправок за периодические ошибки спирального микрометра ОМС-3 № 480022.

Таблица 1

Пример записи материала наблюдений для 1-го витка
спирали (ОМС-5 № 480059)

8 июля 1948 г. Температура 24°5'. Начало — 14 час. 30 мин. Конец — 16 час. 30 мин.
 $K = 1/2$ оборота

Установка	Правый шаг	Левый шаг	Разность d	$K - d_{p+t}$	Установка	Правый шаг	Левый шаг	Разность d	$K - d_{p+t}$
0	99,8	49,2	49,4		50	.	.	.	
	99,7	49,2	49,5			.	.	.	
	99,8	49,3	49,5			.	.	.	
	99,8	49,2	49,4			.	.	.	
10	99,78	49,22	49,45	+0,48	60	50,22	0,48	50,25	-0,32
	10,0	59,6	49,6		.	.	.		
	9,9	59,6	49,7		.	.	.		
	9,8	59,4	49,6		.	.	.		
	9,9	59,5	49,6		.	.	.		
20	9,90	59,52	49,63	+0,30	70	60,00	10,28	50,28	-0,35
	20,1	69,7	49,6		.	.	.		
	19,9	69,6	49,7		.	.	.		
	19,9	69,6	49,7		.	.	.		
	20,1	69,5	49,4		.	.	.		
30	20,00	69,60	49,60	+0,33	80	70,00	20,20	50,20	-0,27
		
		
		
40	30,08	80,12	50,05	-0,12	90	79,88	29,75	49,87	+0,06
	.	.	.		90,2	39,7	49,5		
	.	.	.		90,0	39,9	49,5		
	.	.	.		90,1	39,7	49,6		
	.	.	.		90,1	39,8	49,7		
	39,98	90,25	50,28	-0,35	90,10	39,78	49,68	+0,25	
	$K = 49,93$								+0,01

$K = 3/4$ оборота

Установка	Правый штрих	Левый штрих	Разность d	$K - d_{p+1}$	Установка	Правый штрих	Левый штрих	Разность d	$K - d_{p+1}$
0	99,8	75,0	75,2		50	
	99,7	75,0	75,3						
	99,8	75,1	75,3						
	99,8	75,1	75,3						
10	90,78	75,05	75,28	+0,26	60	50,22	25,88	75,65	-0,11
	10,0	85,3	75,3	...		...	...
	9,9	85,4	75,5	...		...	...
	9,8	85,3	75,5	...		...	...
20	9,90	85,30	75,40	+0,14	70	60,00	35,72	75,73	-0,19
	20,1	95,7	75,6	...		...	...
	19,9	95,8	75,9	...		...	...
	19,9	95,6	75,7	...		...	...
30	20,00	95,73	75,73	-0,19	80	70,00	45,68	75,68	-0,14
		
		
		
40	30,08	5,80	75,73	-0,19	90	79,88	55,10	75,23	+0,31
		
		
		
	39,08	15,80	75,83	-0,29		90,10	65,25	75,15	+0,39
									$K = 75,54$	-0,01

Таблица 2

Вычисление коэффициентов a_1 и b_1 для $1/2$ оборота

$-\frac{1}{n \sin f/2}$	$K - d_{p+1}$	$(f/2 + p\sigma)$	$\sin(f/2 + p\sigma)$	$-\frac{1}{n \sin f/2} (K - d_{p+1}) \times \sin(f/2 + p\sigma)$	$-\frac{1}{n \sin f/2}$	$K - d_{p+1}$	$(f/2 + p\sigma)$	$\cos(f/2 + p\sigma)$	$\frac{1}{n \sin f/2} (K - d_{p+1}) \times \cos(f/2 + p\sigma)$
-0,1	+0,48	90°	+1,000	-0,048	+0,1	+0,48	90°	0,000	0,000
	+0,30	126°	+0,809	-0,024		+0,30	126°	-0,588	-0,018
	+0,33	162°	+0,309	-0,010		+0,33	162°	-0,951	-0,031
	-0,12	198°	-0,309	-0,004		-0,12	198°	-0,951	+0,011
	-0,35	234°	-0,809	-0,028		-0,35	234°	-0,588	+0,021
	-0,32	270°	-1,000	-0,032		-0,32	270°	0,000	0,000
	-0,35	306°	-0,809	-0,028		-0,35	306°	+0,588	-0,021
	-0,27	342°	-0,309	-0,008		-0,27	342°	+0,951	-0,026
	+0,06	18°	+0,309	-0,002		+0,06	18°	+0,951	+0,006
	+0,25	54°	+0,809	-0,020		+0,25	54°	+0,588	+0,015

$a_1 = -0,204$ $b_1 = -0,043$

Вычисление поправок за периоды

Доля оборота	a_1	$\cos t$	a_2	$\cos 2t$	b_1	$\sin t$
0	-0,204	+1,000	-0,032	+1,000	-0,043	0
1		+0,809		+0,309		+0,588
2		+0,309		-0,809		+0,951
3		-0,309		-0,809		+0,951
4		-0,809		+0,309		+0,588
5		-1,000		+1,000		0
6		-0,809		+0,309		-0,588
7		-0,309		-0,809		-0,951
8		+0,309		-0,809		-0,951
9		+0,809		+0,309		-0,588

Таблица 3

Вычисленные коэффициенты a_2 и b_2 для $2/4$ оборота

	$-\frac{1}{n \sin f}$	$K - d_{p+1}$	$2\left(\frac{f}{2} + p\theta\right)$	$\sin 2\left(\frac{f}{2} + p\theta\right)$	$-\frac{1}{n \sin f} (K - d_{p+1}) \times$ $\times \sin 2\left(\frac{f}{2} + p\theta\right)$	$\frac{1}{n \sin f}$	$K - d_{p+1}$	$2\left(\frac{f}{2} + p\theta\right)$	$\cos 2\left(\frac{f}{2} + p\theta\right)$	$\frac{1}{n \sin f} (K - d_{p+1}) \times$ $\times \cos 2\left(\frac{f}{2} + p\theta\right)$
+0,1	+0,26	270°	-1,000	-0,026	-0,1	+0,26	270°	0,000	0,000	
	+0,14	342°	-0,309	-0,004		+0,14	342°	+0,551	-0,013	
	-0,19	54°	+0,809	-0,015		-0,19	54°	+0,588	+0,011	
	-0,19	126°	-0,809	-0,015		-0,19	126°	-0,588	-0,011	
	-0,29	198°	-0,309	+0,009		-0,29	198°	-0,951	-0,028	
	-0,11	270°	-1,000	+0,011		-0,11	270°	0,000	0,000	
	-0,19	342°	-0,309	+0,006		-0,19	342°	+0,951	+0,018	
	-0,14	54°	+0,809	-0,011		-0,14	54°	+0,588	+0,008	
	+0,31	126°	+0,809	+0,025		+0,31	126°	-0,588	+0,018	
	+0,39	198°	-0,309	-0,012		+0,39	198°	-0,951	+0,037	
$a_2 = -0,032$					$b_2 = +0,040$					

ческие погрешности для 1-го витка

Таблица 4

b_2	$\sin 2t$	$a_2 \cos t$	$a_2 \cos 2t$	$b_2 \sin t$	$b_2 \sin 2t$	Поправка периодической погрешности в делениях микрометра Δ_1
+0,040	0	-0,504	-0,032	0	0	-0,236
	+0,951	-0,165	-0,010	-0,025	+0,038	-0,162
	+0,588	-0,073	+0,026	-0,041	+0,024	-0,054
	-0,588	+0,063	+0,026	-0,041	-0,024	+0,024
	-0,951	+0,165	-0,010	-0,025	-0,038	+0,092
	0	+0,204	-0,032	0	0	+0,172
	+0,951	+0,165	-0,010	+0,025	+0,038	+0,218
	+0,588	+0,063	+0,026	+0,041	+0,024	+0,154
	-0,588	-0,063	+0,026	+0,041	-0,024	-0,020
	-0,951	-0,165	-0,010	+0,025	-0,038	-0,188

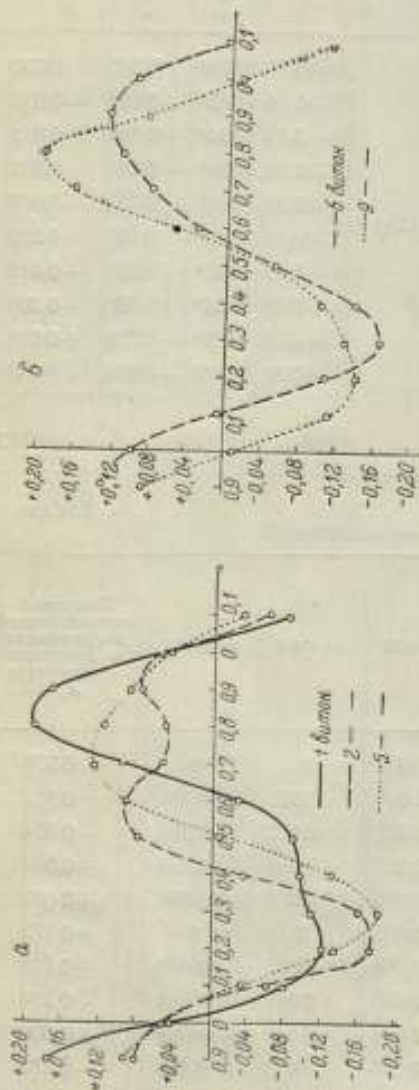


Рис. 7. График (№ 3) поправок за периодические ошибки спирального микрометра Цейсса № 6016.

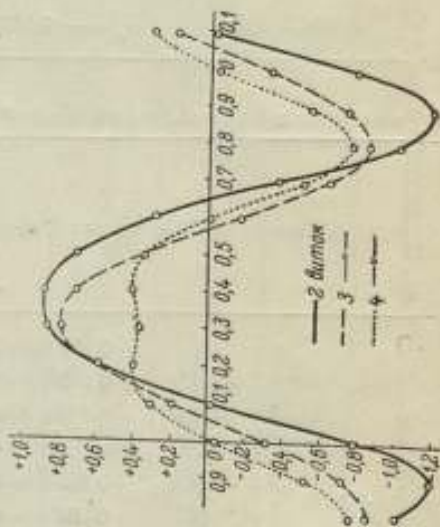


Рис. 8. График (№ 4) поправок за периодические ошибки спирального микрометра ОМС-5 № 480016.

было отказаться от исследования микрометра, так как он представлял значительный интерес по своему явно выраженному эксцентриситету. Бой контрольной риски на стеклянной пластинке был равен 9,5 мк; следовательно, эксцентриситет должен быть равен $\pm 4,8$ мк.

При увеличении объектива $v=5\times$ эксцентриситет $\pm 4,8$ мк скажется на результате наблюдений, как величина $\pm \frac{4,8}{5} = \pm 0,96$ мк $\cong 1,0$ мк; что и подтвердилось наблюдениями.

7. Оценка точности исследования микрометров

Определим погрешности измерений по 1-му способу:

$$m_d = \pm \sqrt{\frac{[r^2]}{v(n-1)}}, \quad (6)$$

$$m'_d = \pm \frac{m_d}{\sqrt{2}}, \quad (7)$$

где m_d — средняя квадратичная погрешность одного измеренного интервала;

n — число измеренных интервалов в группе;

v — число групп;

r — вероятнейшая погрешность одного измеренного интервала (отклонение каждого отдельного измеренного интервала от вероятнейшего его значения своей группы дадут вероятнейшие погрешности этих результатов);

m'_d — средняя квадратичная погрешность отдельного наведения и отсчета.

Погрешность измерений по 2-му способу определяется формулой:

$$m_d = \pm 1,2533 \frac{[|r|]}{\sqrt{H(H-v)}}, \quad (8)$$

где $[|r|]$ — сумма абсолютных величин вероятнейших ошибок;

H — общее число всех измеренных интервалов;

v — число групп.

Взяв полный материал для девяти наблюдений витков спиралей как для $\frac{1}{2}$ оборота, так и для $\frac{3}{4}$ оборота стеклянной пластинки, будем иметь: $n=4$, $v=180$, $H=720$, $[|r|]$ — сумма из 720 чисел, $[r^2]$ — сумма квадратов 720 чисел.

Оценка точности измерений по остаточным погрешностям по F. R. Helmert (3-й способ) основана на следующих соображениях.

Если бы измерения, произведенные нами, не имели случайных погрешностей, то разности поправок за периодические погрешности соответствующего витка спирали в точности рав-

нялись бы свободным членам уравнений (3). В действительности этого нет. Всегда будут остаточные погрешности, определяемые следующим равенством:

$$\varepsilon = d_{p+1} - K + (\Delta B_{p+1} - \Delta A_{p+1}), \quad (9)$$

где ΔB_{p+1} и ΔA_{p+1} — поправки за периодические погрешности витков спиралей, соответствующие отсчетам B и A (из табл. 4);

$d_{p+1} = B - A$ — разность в отсчетах для интервала одной группы.

Для $1/2$ оборота

$$m_{d_1} = \pm \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{v}}; \quad m'_{d_1} = \sqrt{2} m_{d_1} = \frac{\sqrt{4} m_{d_1}}{\sqrt{2}}. \quad (10)$$

Для $3/4$ оборота

$$m_{d_2} = \pm \sqrt{\frac{\sum \varepsilon'^2}{v}}; \quad m'_{d_2} = \sqrt{2} \cdot m_{d_2} = \frac{\sqrt{4} m_{d_2}}{\sqrt{2}}. \quad (11)$$

где ε и ε' — остаточные погрешности;

v — число групп;

m_{d_1} и m_{d_2} — средние квадратичные погрешности измеренного интервала одной группы;

$\sqrt{4} m_{d_1}$ и $\sqrt{4} m_{d_2}$ — средние квадратичные погрешности отдельного измеренного интервала;

m'_{d_1} и m'_{d_2} — средние квадратичные погрешности отдельного наведения и отсчета.

Для девяти наблюдаемых витков спиралей: $v = 90$, $\sum \varepsilon^2$ и $\sum \varepsilon'^2$ — суммы квадратов 90 чисел.

Таблицы вычислений для всех трех способов не помещены в настоящей статье.

8. Оценка точности вычисленных коэффициентов a_1 , b_1 и a_2 , b_2

Из уравнений (5) для $f = 1/2$ оборота и при числе рядов (наблюдаемых витков), равном N_1 , среднее значение a_1^c будет:

$$a_1^c = -\frac{1}{nN_1} \sum_1^{N_1} \sum_{p=0}^{n-1} (K - d_{p+1}) \cos p\sigma; \quad (12)$$

при $f = 3/4$ оборота и числе рядов N_2 :

$$a_2^c = -\frac{1}{nN_2} \sum_1^{N_2} \sum_{p=0}^{n-1} (K - d_{p+1}) \cos 2p\sigma. \quad (13)$$

Для b_1^c и b_2^c формулы останутся те же, только вместо косинусов будут синусы.

Дифференцируя формулы (12) и (13) по $(K - d_{p+1})$, заменяя дифференциалы средними квадратичными погрешностями m_{d_1} ,

и m_{d_2} из уравнений (10) и (11) и взяв квадраты погрешностей, будем иметь:

$$\lambda_{d_1} \varepsilon = \lambda_{0_1} \varepsilon = \pm \sqrt{\frac{m_{d_1}^2}{n^2 N_1} \cdot \sum_{p=0}^{p=n-1} \cos^2 p\sigma} \quad (14)$$

$$\lambda_{d_2} \varepsilon = \lambda_{0_2} \varepsilon = \pm \sqrt{\frac{m_{d_2}^2}{n^2 N_2} \cdot \sum_{p=0}^{p=n-1} \cos^2 2p\sigma}, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} \sum_{p=0}^{p=n-1} \cos^2 p\sigma &= \sum_{p=0}^{p=n-1} \sin^2 p\sigma = \sum_{p=0}^{p=n-1} \cos^2 2p\sigma = \\ &\Rightarrow \sum_{p=0}^{p=n-1} \sin^2 2p\sigma = \frac{n}{2} = 5 \end{aligned}$$

на основании способа наименьших квадратов — из нормальных уравнений для периодических функций.

9. Оценка точности определения периодических поправок

Подставляя формулы (12) и (13) в уравнение (2), дифференцируя полученное выражение по $(K - d_{p+1})$ и взяв квадраты погрешностей, будем иметь:

$$\lambda_d = \pm \sqrt{\frac{m_{d_1}^2}{n^2 N_1} \cdot 5 + \frac{m_{d_2}^2}{n^2 N_2} \cdot 5}. \quad (16)$$

В табл. 5 приводится оценка точности исследования спиральных окулярных микрометров.

10. Вычисление поправок за периодические погрешности без участия ряда Фурье (скоростной метод)

Мы убедились, что изложенный выше метод исследования является вполне надежным как в смысле строгости постановки наблюдений, так и в обработке представленного материала. Но надо признать, что данный метод является лабораторным, ввиду трудоемкости обработки наблюдений. Делая изыскание в направлении упрощения метода обработки материала, автор смог получить коэффициент перехода от наблюдаемых значений $K - d_{p+1}$ к поправкам за периодические погрешности, минуя громоздкие вычисления.

Если наибольшее абсолютное значение свободного члена уравнений $K - d_{p+1}$ разделить на коэффициент $Q = 2,62$, то мы получим наибольшую абсолютную поправку за периодическую

Оценка точности

Наименование микрометров	1-й способ		2-й способ		3-й способ	
	по материалу m'_{D_1}	m'_{D_2} измерения и отсчета	по материалу m'_{D_1}	m'_{D_2} измерения и отсчета	m'_{D_1} группы	m'_{D_2} измерения и отсчета
Цейсс	—	—	—	—	—	—
ОМС-3 № 480022 . . .	$\pm 0^{\circ},14$	$\pm 0^{\circ},10$	$\pm 0^{\circ},14$	$\pm 0^{\circ},10$	$\pm 0^{\circ},07$	$\pm 0^{\circ},10$
ОМС-2 № 480031 . . .	$\pm 0,16$	$\pm 0,11$	$\pm 0,16$	$\pm 0,11$	—	—
ОМС (без номера) . . .	$\pm 0,11$	$\pm 0,08$	$\pm 0,11$	$\pm 0,08$	$\pm 0,08$	$\pm 0,11$
ОМС-5 № 480059 . . .	$\pm 0,11$	$\pm 0,08$	$\pm 0,11$	$\pm 0,08$	$\pm 0,09$	$\pm 0,13$
ОМС-5 № 480046 . . .	—	—	—	—	—	—
ОМС-3 № 480053 . . .	$\pm 0,18$	$\pm 0,13$	$\pm 0,18$	$\pm 0,12$	—	—
ОМС-2 № 480053 . . .	$\pm 0,14$	$\pm 0,10$	$\pm 0,14$	$\pm 0,10$	$\pm 0,09$	$\pm 0,13$

Продолжение табл. 5

Наименование микрометров	3-й способ		Точность вычисления коэффициентов		Точность верных десятичных поправок λ_{D_2}	Исследовано штук
	m'_{D_1} группы	m'_{D_2} измерения и отсчета	$\lambda_{a1} = \lambda_{b1}$	$\lambda_{a2} = \lambda_{b2}$		
Цейсс	—	—	—	—	—	3
ОМС-3 № 480022 . . .	$\pm 0^{\circ},09$	$\pm 0^{\circ},13$	$\pm 0^{\circ},0052$	$\pm 0^{\circ},0057$	$\pm 0^{\circ},0085$	9
ОМС-2 № 480031 . . .	—	—	—	—	—	4
ОМС (без номера) . . .	$\pm 0,10$	$\pm 0,14$	$\pm 0,0060$	$\pm 0,0075$	$\pm 0,0095$	9
ОМС-5 № 480059 . . .	$\pm 0,09$	$\pm 0,13$	$\pm 0,0090$	$\pm 0,0090$	$\pm 0,0130$	5
ОМС-5 № 480046 . . .	—	—	—	—	—	4
ОМС-3 № 480053 . . .	—	—	—	—	—	5
ОМС-2 № 480053 . . .	$\pm 0,08$	$\pm 0,11$	$\pm 0,0071$	$\pm 0,0063$	$\pm 0,0095$	8

Примечание. Точность вычислялась не для всех исследованных микрометров.

погрешность для проверяемого витка спирали, выраженную в делениях микрометра со степенью приближения $\pm 0^{\circ},08$.

В самом деле $|\Delta_{\max}| = \frac{|K - d_{p+1}|_{\max}}{Q}$. Дифференцируя данное выражение по $K - d_{p+1}$ и Q и заменяя дифференциалы их средними квадратичными погрешностями, будем иметь:

$$m_{\Delta}^2 = \left(\frac{1}{Q}\right)^2 m_{d_{p+1}}^2 + \left(\frac{|K - d_{p+1}|_{\max}}{Q^2}\right)^2 m_Q^2. \quad (17)$$

Таблица 6

Отклонение приближенных поправок от их точных значений

Наименование микрометров	$\Delta_{\text{пр}} - \Delta_{\text{точн.}}$				
	№ витка				
	1	2	3	4	5
ф. Цейсс № 6016 . . .	$-0^{\circ},02$	0	—	—	$-0^{\circ},05$
ОМС-3 № 480022 . . .	$+0^{\circ},03$	$+0^{\circ},03$	$+0^{\circ},01$	$+0^{\circ},05$	$+0^{\circ},02$
ОМС-2 № 480031 . . .	$-0^{\circ},05$	0	—	—	$+0^{\circ},07$
ОМС (без номера) . . .	0	0	$+0^{\circ},06$	$-0^{\circ},02$	$+0^{\circ},04$
ОМС-5 ¹ № 480046 . . .	$-0^{\circ},03$	$-0^{\circ},43$	$-0^{\circ},15$	$-0^{\circ},22$	—
ОМС-3 № 480053 . . .	$-0^{\circ},02$	—	—	$+0^{\circ},03$	$-0^{\circ},02$
ОМС-2 № 480053 . . .	$+0^{\circ},03$	$-0^{\circ},04$	$-0^{\circ},07$	$-0^{\circ},02$	$-0^{\circ},01$

Продолжение табл. 6

Наименование микрометров	$\Delta_{\text{пр}} - \Delta_{\text{точн.}}$				
	№ витка				
	6	7	8	9	10
ф. Цейсс № 6016 . . .	$-0^{\circ},01$	—	—	0	—
ОМС-3 № 480022 . . .	$+0^{\circ},02$	$+0^{\circ},05$	$-0^{\circ},01$	$+0^{\circ},02$	—
ОМС-2 № 480031 . . .	—	—	$-0^{\circ},05$	—	—
ОМС (без номера) . . .	$-0^{\circ},02$	$-0^{\circ},04$	$+0^{\circ},02$	$+0^{\circ},04$	—
ОМС-5 ¹ № 480046 . . .	—	—	—	—	—
ОМС-3 № 480053 . . .	$+0^{\circ},02$	—	$+0^{\circ},03$	—	—
ОМС-2 № 480053 . . .	$-0^{\circ},07$	$-0^{\circ},02$	$-0^{\circ},06$	—	—

¹ Микрометр ОМС-5 № 480046 имел очень большой эксцентриситет — (см. выше).

Подставляя числовые значения: $Q = 2,62$, $m_{d_{p+1}} = \pm 0^{\circ},09$, $|K - d_{p+1}|_{\max} \approx 0^{\circ},7$ (для удовлетворительных микрометров, у которых Δ_i не превосходит величины $\pm 0^{\circ},28$), $m_Q = \pm 0,7$ и произведя вычисления, получим $m_{\Delta} = \pm 0^{\circ},08$.

Значение $Q = 2,62$ получено из восьми исследованных микрометров делением $|K - d_{p+1}|_{\max}$ на $|\Delta_i|_{\max}$, определенное по ряду Фурье (табл. 4).

По колебаниям отдельных значений от вероятнейшего его значения определялась средняя квадратичная погрешность m_Q . Всего было 48 значений.

Кроме этого, Q определялось и вторым способом: сумма двух абсолютных наибольших положительных и отрицательных значений $|K - d_{p+1}|$ делилась на сумму двух наибольших положительных и отрицательных значений $|\Delta_i|$, определенных из ряда Фурье. Из второго способа $Q = 2,62$ и $m_Q = \pm 0,7$.

В табл. 6 приводятся отклонения приближенных периодических поправок от точных их значений для всех наблюдаемых микрометров.

Порядок отклонения окончательно убеждает нас в возможности применения эмпирического коэффициента $Q = 2,62$ для определения наибольшей абсолютной поправки за периодическую погрешность, не делая громоздких вычислений. Точный же метод следует рекомендовать как периодический выборочный контроль.

11. Описание прибора, предназначенного для проверки микрометров

На основании 7 (рис. 9) смонтированы подвижный стол 2 и визирный микроскоп 3. На столе укрепляется испытуемый микрометр. Стол имеет микрометрическую подачу от винта 4. Микрометр можно легко установить и ориентировать в нужном положении по отношению визирного микроскопа и хода салазок стола. Объектив и окуляр микроскопа сменные. Сетка визирного микроскопа имеет три штриха (рис. 4). Порядок работы описан в начале статьи.

12. Выводы

1. Основной и доминирующей погрешностью в спиральных окулярных микрометрах является периодическая погрешность в витках спирали Архимеда.

2. Поправки за периодические погрешности у исследованных микрометров одного порядка.

В табл. 7 помещены максимальные колебания поправок для всех наблюдаемых витков спирали.

Выпускаемые заводом спиральные микрометры по метрологическим данным имеют хорошее качество. По качеству оте-

чественные спиральные микрометры не уступают зарубежным образцам, а некоторые из них лучше.

3. Колебания периодических поправок спиральных и винтовых микрометров, выраженные в делениях микрометрической шкалы, приблизительно одного и того же порядка¹.

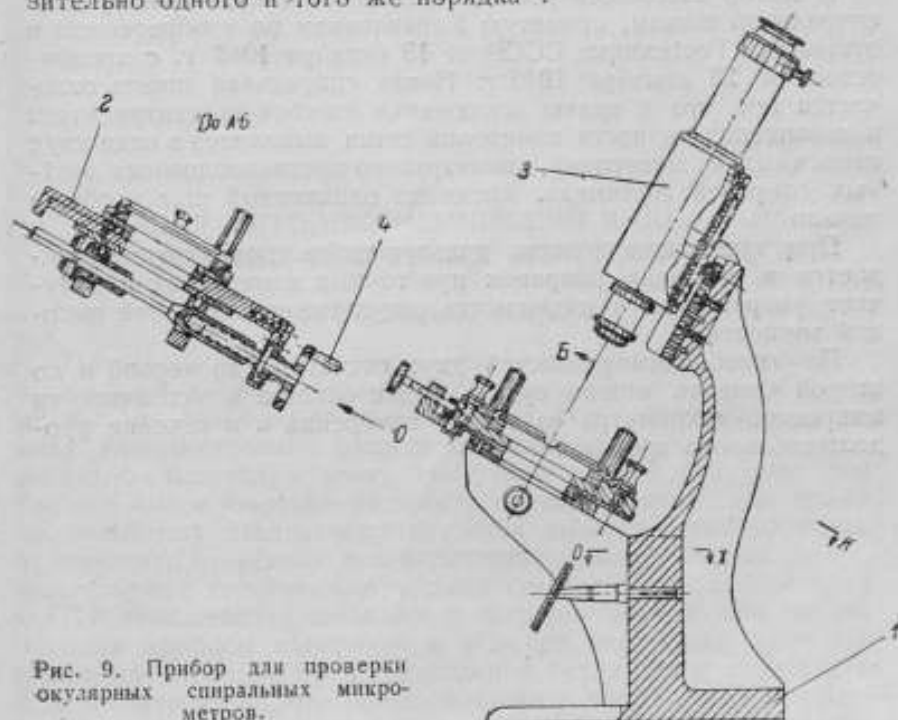


Рис. 9. Прибор для проверки окулярных спиральных микрометров.

Таблица 7

Колебание поправок

Наименование микрометров	Пределы колебаний (в делениях микрометра)		Наименование микрометров	Пределы колебаний (в делениях микрометра)	
	от	до		от	до
ф. Шейс № 6016 . . .	+0,198	-0,179	ОМС (без номера) . . .	+0,201	-0,211
ОМС-3 № 480022 . . .	+0,063	-0,083	ОМС-2 № 480033 . . .	+0,211	-0,207
ОМС-2 № 480031 . . .	+0,126	-0,193	ОМС-5 № 480059 . . .	+0,243	-0,280
ОМС-3 № 480053 . . .	+0,135	-0,095	ОМС-5 № 480046 . . .	+0,836	-1,202

¹ В монографии Долгова П. Н., Смирнова К. Н., Исследование винта окулярного микрометра в астрономо-геодезических инструментах, изд. 1929 г., стр. 58—59, читаем, что винтовой микрометр Бамберга № 15061 имеет колебания от +0,286^{дел} до -0,250^{дел}, а винтовой микрометр Гильдебранда № 62480 от -0,295^{дел} до -0,224^{дел}.

4. Для дальнейшего улучшения метрологических качеств спиральных микрометров надо видоизменить конструкцию: плоскость стеклянной пластинки с нанесенной на нее спиралью Архимеда должна быть обращена к объективу.

5. Автор настоящей работы предлагает новую конструкцию спиральной шкалы, принятую Управлением по изобретениям и открытиям Гостехники СССР от 13 октября 1948 г. с приоритетом от 26 декабря 1946 г. Новая спиральная шкала отличается тем, что с целью исключения ошибки эксцентриситета и повышения точности измерения сетка выполнена в виде двух наносимых на пластинку, диаметрально противоположных двойных спиралей Архимеда, имеющих одинаковый шаг и общее начало.

При такой конструкции пользующийся прибором не нуждается в таблицах поправок при точных измерениях и получает уверенность в надежности результатов измерений высокой точности.

По колебаниям разностей двух отсчетов — по первой и по второй спирали можно судить о достоинстве и устойчивости микроскоп-микрометра за время измерения и в течение продолжительного времени.

ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ПОВЕРКИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ НЕКРУГЛЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

1. Состояние вопроса

Теория некруглых зубчатых колес в наших научно-исследовательских учреждениях разработана достаточно полно, и принципиальная возможность изготовления их в современных условиях машиностроения разрешена также достаточно удовлетворительно. Благодаря этому некруглые колеса получают все более и более широкое распространение, и в настоящее время на некоторых заводах-изготовителях возникла необходимость производить измерение и поверку некруглых зубчатых колес, выпускаемых серийно. Сотрудники измерительных лабораторий и ОТК этих заводов оказались в затруднительном положении, так как вопросы измерения и поверки некруглых зубчатых колес ни в общей, ни в специальной технической литературе еще не затронуты. Это обстоятельство и побудило автора рассмотреть возможность измерения и поверки некруглых колес с использованием уже имеющихся средств измерения обычных круглых колес.

Измерение и поверка некруглых колес вызовут, конечно, большие трудности, чем аналогичные поверки круглых колес; такие трудности являются следствием того, что радиус кривизны центроиды (начальной или делительной кривой) некруглого колеса является величиной переменной и, таким образом, хорды, стягивающие равные по длине дуги такой центроиды, различны. Это обстоятельство влечет за собой и образование различных толщин по хордам зубцов и различных ширин по хордам впадин; кроме того, правый и левый профили каждого отдельного зубца в самом общем случае не симметричны один другому. В итоге трудности измерений размеров отдельных элементов некруглых колес сведутся к необходимости производить дополнительно сложную вычислительную работу для последующей установки измерительных инструментов или приборов для каждого отдельного зубца, впадины или иного элемента некруглого колеса.

2. Краткие сведения о законах построения профилей зубцов некруглых колес

Профиль зубца некруглого колеса (рис. 1) можно рассматривать как огибающую профили зубца зуборезного инструмента, например долбяка, когда его центроиды aa катится без скольжения по центроиде bb (начальной или делительной кривой) некруглого колеса. В теоретических исследованиях о некруглых колесах доказано, что для всякого момента зацепления инструмента и изделия центр кривизны k точки M левого профиля зубца колеса, находящейся в соприкосновении с эвольвентным профилем зубца инструмента, лежит на линии зацепления Mk , проходящей через полюс передачи P_0 , и расстояние от этого центра кривизны k до полюса передачи P_0 не зависит от размеров зуборезного инструмента, а зависит только от величины радиуса кривизны ρ некруглого колеса для полюса передачи P_0 и угла давления α инструмента и выражается простой формулой:

$$P_0k = \rho \sin \alpha. \quad (1)$$

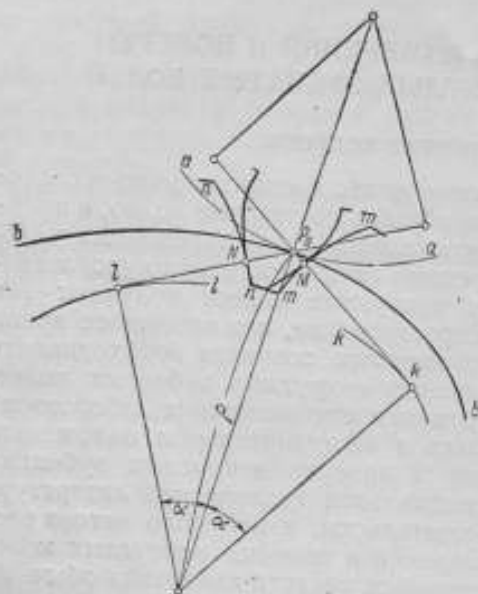


Рис. 1. Геометрия зубца и впадины пары некруглых колес.

Геометрическое место точек k определяет собой эволюту всех левых профилей зубцов некруглого колеса. Геометрическое место точек l определяет собой эволюту всех правых профилей зубцов. Расстояние от полюса передачи P_0 до точки l по аналогии с формулой (1) выражается:

$$P_0l = \rho \sin \alpha. \quad (2)$$

Если уравнение центроиды задано в полярной форме, например,

$$r = f(\theta), \quad (3)$$

то радиус ее кривизны ρ также может быть выражен в полярной форме:

$$\rho = F(\theta) \quad (4)$$

и, следовательно, две эволюты правых и левых профилей зубцов некруглого колеса могут быть также выражены в поляр-

ной форме в самом общем виде, как уравнения:

$$R_{лев.} = \Phi_1(\theta, \alpha); \quad (5)$$

$$R_{пр.} = \Phi_2(\theta, \alpha). \quad (6)$$

Таким образом, эвольвента mm эволюты kk представляет собой левый профиль зуба некруглого колеса и эвольвента nn эволюты ll представляет собой правый профиль зуба некруглого колеса.

Рассмотрим пример аналитического определения и графического построения эволюты эвольвентных профилей некруглого колеса. Пусть центроида некруглого, логарифмического, колеса задана уравнением:

$$r = r_0 e^{\theta}. \quad (3a)$$

Радиус кривизны такой центриды (рис. 2) в некоторой точке P_0 будет по общему положению дифференциальной геометрии выражаться:

$$\rho = \frac{\frac{2}{3}(r^2 + r'^2)^{3/2}}{r^2 + 2r'r'' - rr''}. \quad (4a)$$

В нашем частном случае $r' = r'' = r_0 e^{\theta} = r$ и формула (4a) упрощается, т. е.

$$\rho = \sqrt{2} r. \quad (4b)$$

Таким образом

$$P_0 k = \rho \sin \alpha = \sqrt{2} r \sin \alpha.$$

При рассмотрении рис. 2 по общему положению тригонометрии получим:

$$R_{лев.} = \sqrt{r^2 + \rho^2 \sin^2 \alpha} - 2r\rho \sin \alpha \cos [2\pi - (\mu + \alpha)],$$

где μ — угол между радиусом-вектором r и касательной к центриде.

В нашем частном случае постоянный угол между радиусом-вектором и касательной определяется:

$$\mu = \arctg r \cdot \frac{d\theta}{dr} = \arctg 1 = \frac{\pi}{4}.$$

Подставив в уравнение, определяющее $R_{лев.}$, значение ρ из формулы (4b) и значение r из формулы (3a), получим:

$$R_{лев.} = r_0 e^{\theta} \sqrt{1 + 2 \sin^2 \alpha} - 2\sqrt{2} \sin \alpha \cos [2\pi - (\mu + \alpha)],$$

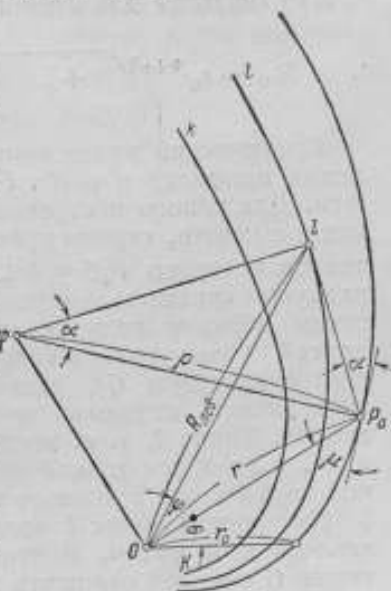


Рис. 2. Построение радиуса кривизны центриды и эволюты профилей зубцов некруглого колеса.

где φ — величина постоянная, определяемая из треугольника P_0OI по общему положению тригонометрии так:

$$\varphi = \arccos \frac{\cos 2\alpha + \sqrt{1 + 2 \sin^2 \alpha - 2\sqrt{2} \sin \alpha \cos [2\pi - (\mu + \alpha)]}}{2\sqrt{1 + 2 \sin^2 \alpha - 2\sqrt{2} \sin \alpha \cos [2\pi - (\mu + \alpha)]}}$$

По аналогии для правого профиля получим:

$$R_{\text{пр.}} = r_0 e^{\theta + \varphi} \sqrt{1 + 2 \sin^2 \alpha - 2\sqrt{2} \sin \alpha \cos [2\pi - (\mu + \alpha)]}$$

Графический метод построения отдельных точек k эволюты левых профилей и точек l эволюты правых профилей не сложен. Для такого построения на радиусе-векторе r центроиды, как на катете, строим прямоугольный треугольник P_0OG , гипотенуза которого $P_0G = \sqrt{2} r$ и является интересующим нас радиусом кривизны центроиды в точке P_0 . Затем на полученном таким образом радиусе кривизны ρ , как на катете, строим другой прямоугольный треугольник с острым углом α (при центре кривизны G), равным углу давления того режущего инструмента, которым предполагается обрабатывать профили зубцов. Точка l , т. е. вершина прямого угла этого треугольника, и является точкой эволюты правых профилей, построенной графически, исходя от заданной точки P_0 на центроиде.

Построение точек k эволюты левых профилей производится аналогичным путем. В этом случае угол α при центре кривизны G следует отложить в направлении вращения не влево, а вправо, как это показано на рис. 1. Тогда точка k окажется расположенной симметрично относительно точки l , а осью симметрии будет радиус кривизны ρ .

Уравнения эвольвент, т. е. кривых, определяющих собою профили зубцов, в настоящей статье применить не придется, и поэтому эти уравнения здесь не приводятся. Необходимо только лишь напомнить об общем свойстве эвольвент одной и той же эволюты, а именно: все левые эвольвенты одной и той же эволюты параллельны друг другу, точно так же все правые эвольвенты одной и той же эволюты параллельны друг другу.

3. Проверка шага по нормали и профилю зубца

Зубцы некруглых колес, изготовленные зуборезным инструментом с эвольвентным профилем, имеют, так же как и в обычных круглых колесах, теоретически равные шаги по нормали. Следовательно, шаги по нормали (основные шаги) некруглых колес можно измерять теми же способами и с применением тех же измерительных инструментов, как и основные шаги круглых колес.

Точно так же не вызовет больших затруднений проверка профилей зубцов некруглых колес посредством тех типов эвольвентомеров, которые допускают применение дисков с размерами, равными соответствующим размерам эволют профилей проверяемых некруглых колес и охватывающих эти диски гибких лент. По такому диску, как по эволюте профилей, и следует производить обкатку линейки эвольвентомера. Необходимо только предусмотреть наличие установочных отверстий и штифтов в проверяемом колесе и диске для скрепления их вместе так, чтобы эволюта колеса и рабочая часть контура диска строго совпадали друг с другом.

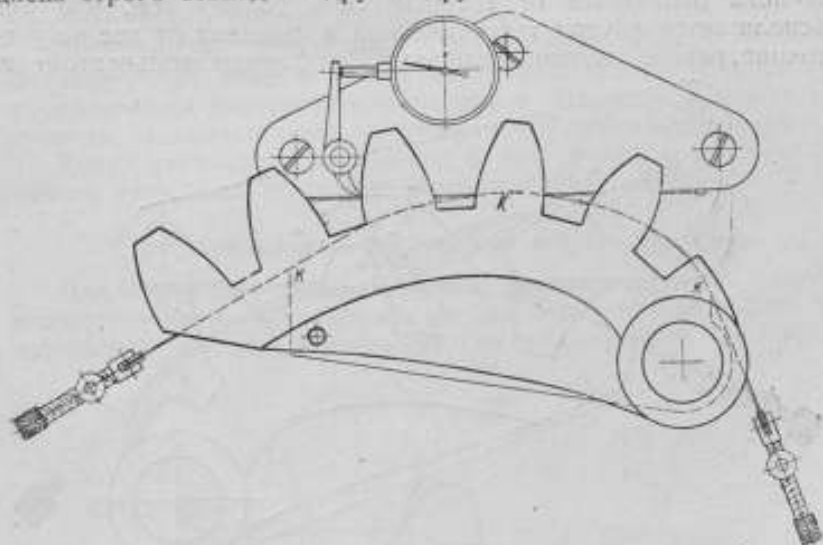


Рис. 3. Схема первого типа эвольвентомера для проверки зубцов некруглого колеса.

Схема одного из простейших типов эвольвентомеров для проверки некруглых колес представлена на рис. 3. Принципиально она не имеет никакого отличия от подобной же схемы проверки эвольвентных профилей зубцов обычных круглых колес, а потому описания ее здесь не дается. Как известно, этот тип эвольвентомеров не является самым совершенным; однако он является наиболее простым, достаточно распространенным и сравнительно легким для изготовления собственными средствами заводов, а потому и может быть применен в первую очередь.

Центрида некруглого колеса, изображенного на рис. 3, задана уравнением в полярной форме

$$r = r_0 e^{\theta}, \quad (3a)$$

где $r_0 = 50,121$ мм и $\theta_0 = 0$.

Теоретический рабочий контур kkk шаблона, соответствующего эволюте левых профилей зубцов, изображенного на рис. 3 сзади поверяемого колеса, определяется из уравнения:

$$R_{лев.} = r_{\varphi} e^{\varphi - \psi} \sqrt{1 + 2 \sin^2 \alpha - 2\sqrt{2} \sin \alpha \cos [2\pi - (\mu + \alpha)]},$$

где $\varphi = 20^\circ = \frac{\pi}{9}$ — угол давления зуборезного инструмента, а угол между радиусом-вектором и касательной $\mu = \frac{\pi}{4}$, как определено выше.

Как и в обычных круглых колесах, практическая кривая kkk шаблона отличается от теоретической только тем, что она располагается внутри теоретической и смещена от нее на расстояние, равное половине толщины гибкой ленты эвольвентомера.

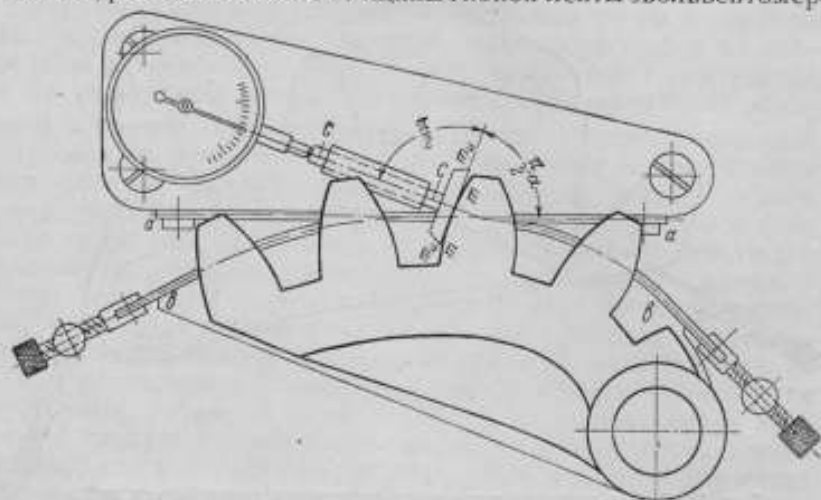


Рис. 4. Схема второго типа эвольвентомера для проверки зубцов некруглого колеса.

Возможно, что еще более удобным типом эвольвентомера для проверки профилей зубцов некруглых колес окажется тип, принципиальная схема которого дается на рис. 4. Для этого типа эвольвентомера потребуется изготовить не два шаблона, соответствующие эволютам левых и правых профилей, а только один, соответствующий центруде некруглого колеса.

Для проверки профилей зубцов обычных круглых колес эвольвентомеры такого типа, насколько известно автору, не применяются. Теоретические обоснования принципа действия такого типа эвольвентомера представляют собой логическое следствие обработки зубцов некруглого колеса по методу обкатки инструментальной рейкой.

Пусть на рис. 4 прямая aa , проходящая через нейтральную ось двух гибких лент, является начальной прямой условной инструментальной рейки, единственный зубец которой оформ-

лен в виде прямолинейной рабочей кромки m_1m_2 , наклоненной относительно начальной прямой aa на угол $\frac{\pi}{2} - \alpha$. Эта прямолинейная кромка жестко связана со стержнем прямоугольного сечения, могущим перемещаться в направлении cc , перпендикулярном этой рабочей кромке.

Если прямая aa будет катиться без скольжения по центроиде bb некруглого колеса, то рабочая кромка m_1m_2 будет катиться со скольжением по левому профилю tt зубца некруглого колеса, как бы имитируя обработку профиля по методу обкатки. Отклонение поверяемого профиля tt зубца от теоретического укажет индикатор.

Практическая кривая bb , т. е. рабочий контур шаблона, отличается от теоретической центроиды только тем, что она располагается внутри теоретической и смещена от нее на расстояние, равное половине толщины гибкой ленты эвольвентомера.

Конструктивное оформление и практическое изготовление такого типа эвольвентомера затруднений не вызовет.

4. Определение постоянной хорды впадины

Для измерения толщины зубца, ширины впадины и других элементов некруглого колеса удобно будет применить вспомогательный метод, основанный на определении постоянной

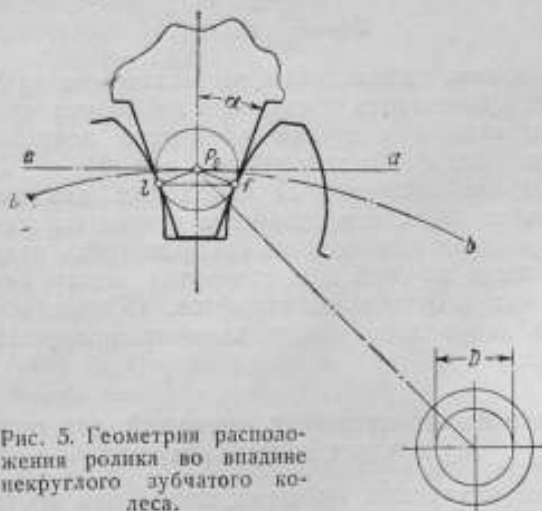


Рис. 5. Геометрия расположения ролика во впадине некруглого зубчатого колеса.

хорды впадины, подобно тому, как это делается и при аналогичных измерениях круглых колес. Геометрическое обоснование этого метода ясно из рассмотрения рис. 5. На нем вычерчен зубец инструментальной рейки с углом профиля α , введенный до соприкосновения во впадину некруглого колеса. В случае, когда колесо изготовлено как не корригированное, центро-

ида bb колеса и начальная прямая aa инструментальной рейки касаются друг друга в точке P_0 (мгновенный полюс передачи), через которую проходит ось симметрии зуба рейки. Из основной теоремы зацепления следует, что касание зубцов рейки и колеса происходит в точках e и f , которые определяются как основания перпендикуляров, опущенных из полюса передачи P_0 на стороны зуба рейки. На рис. 5 видно, что

$$P_0l = \frac{C_p}{2} \cos \alpha, \quad (7)$$

где $C_p = \frac{\pi m}{2}$ — толщина зуба инструментальной рейки, измеренная по ее начальной прямой, выраженная через модуль зацепления (m).

Прямая lf , соединяющая точки соприкосновения l и f зубца рейки с впадиной некруглого колеса, называется, как и в круглых колесах, постоянной хордой, так как для всех впадин одного и того же некруглого колеса подобные рассуждения применимы в одинаковой мере.

Если вместо зубца рейки во впадину колеса вложить ролик, диаметр которого равен $2P_0l$, то центр ролика окажется расположенным как раз на центроиде этого колеса.

Диаметр необходимого ролика определится на основании формулы (7):

$$d = \frac{\pi m}{2} \cos \alpha. \quad (8)$$

Имея два ролика с диаметрами, вычисленными по формуле (8), можно будет производить косвенные измерения толщины зубцов, ширины впадин и других элементов некруглых колес. Об этом будет сказано в дальнейшем в п. 6.

Третий ролик диаметра D необходим для наивозможно плотного помещения его в отверстие ступицы колеса.

Во всех роликах необходимо предусмотреть наличие заостренных кончиков их осей или отверстия вдоль осей для помещения в них заостренных штифтов. Острые кончики осей или штифтов дадут возможность измерять полярные углы центроиды колеса.

5. Методика вычислительных операций для определения отдельных точек центроиды

Центроиды некруглых зубчатых колес при проектировании обычно задаются в полярных уравнениях с полюсами, совпадающими с осями вращения O таких колес.

Пусть центроида некруглого колеса (рис. 6) задана уравнением в полярной форме:

$$r = f(\theta).$$

На центроиде отмечены точки $P_{0_1}, P_{0_2}, P_{0_3}, \dots$, совпадающие с центрами роликов.

Обработка зубцов некруглых колес по методу обкатки зуборезным инструментом определяет собой равенство дуг $P_{0_0}P_{0_1}; P_{0_1}P_{0_2}$ и так далее, т. е.:

$$P_{0_0}P_{0_1} = P_{0_1}P_{0_2} = \dots = \pi m, \quad (9)$$

что представляет собой шаг по центроиде, выраженный через модуль зацепления m .

Это равенство дуг даст возможность вычислить последовательно полярные углы $\theta_1, \theta_2, \dots$. Начальный радиус-вектор r_0 и угол $\theta_0 = 0$ обычно задаются при проектировании.

По известному положению дифференциальной геометрии можно написать:

$$\pi m = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2} d\theta. \quad (10)$$

Это даст возможность составить и решить относительно θ_1 уравнение следующего вида:

$$F(\theta_0, \theta_1) = \pi m. \quad (11)$$

Для вычисления полярного угла θ_2 уравнение (10) будет написано в следующем виде:

$$2\pi m = \int_{\theta_0}^{\theta_2} \sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2} d\theta, \quad (12)$$

что даст возможность составить и решить относительно θ_2 уравнение того же вида, что и уравнение (11):

$$F(\theta_0, \theta_2) = 2\pi m. \quad (13)$$

А в самом общем виде пары уравнений (10) и (11) или (12) и (13) будут иметь вид:

$$n\pi m = \int_{\theta_0}^{\theta_n} \sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2} d\theta, \quad (14)$$

$$F(\theta_0, \theta_n) = n\pi m. \quad (15)$$

Подстановка вычисленных значений $\theta_1, \theta_2, \dots$ в основное полярное уравнение центроиды (3) определит и численные значения радиусов-векторов r_1, r_2, \dots .

Последующие вычисления необходимо будет произвести для определения численных значений хорд $P_{0_0}P_{0_1}; P_{0_1}P_{0_2}; \dots$, в общем случае не равных одна другой.

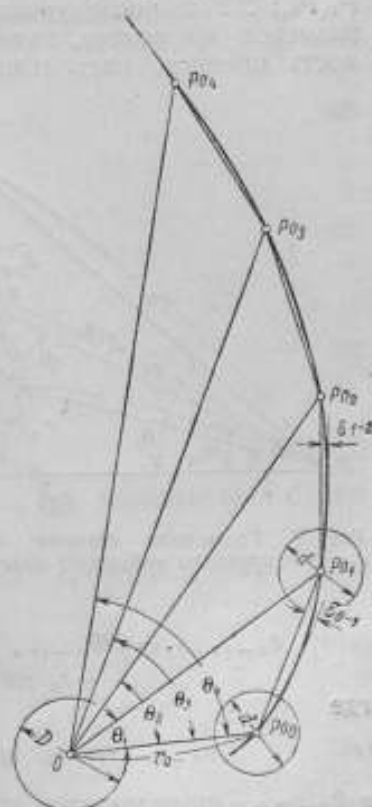


Рис. 6. Геометрия расположения центров тяжести на центроиде некруглого зубчатого колеса.

Размеры этих хорд по известной тригонометрической формуле определяются, например, для хорды $P_{0_1}P_{0_2}$ так:

$$P_{0_1}P_{0_2} = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\theta_2 - \theta_1)} \quad (16)$$

или в самом общем виде:

$$P_{0_n}P_{0_{n+1}} = \sqrt{r_n^2 + r_{n+1}^2 - 2r_n r_{n+1} \cos(\theta_{n+1} - \theta_n)} \quad (17)$$

Вычисленные таким путем теоретические значения полярных углов $\theta_1, \theta_2, \dots$, радиусов-векторов r_1, r_2, \dots и хорд $P_{0_0}P_{0_1}; P_{0_1}P_{0_2}; \dots$ и последующие измерения соответствующих им размеров из колеса, находящегося в поверке, дадут возможность оценить, насколько центроида изготовленного колеса

отличается от теоретической, запроектированной.

Кроме этих указанных здесь вычислений, необходимы еще вычисления высот $\delta_{0-1}, \delta_{1-2}, \dots$ различных сегментов центроиды колеса для последующей поверки высот головок зубцов. Высоты таких сегментов в самом общем случае не равны одна другой.

Для определения высоты сегмента кривой, уравнение которой задано в полярной форме, можно пользоваться нижеприведенными уравнениями:

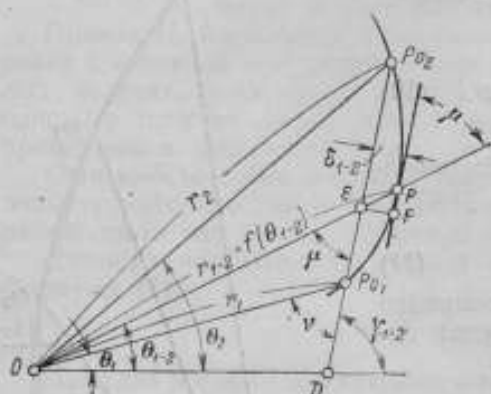


Рис. 7. Геометрия сегмента центроиды некруглого зубчатого колеса.

$$\delta_{n-(n+1)} = f(\theta_{n-(n+1)}) \cdot \sin(\gamma_{n-(n+1)} - \theta_{n-(n+1)}) - r_n \cdot \sin(\gamma_{n-(n+1)} - \theta_n) \quad (18)$$

где

$$\gamma_{n-(n+1)} = \arctg \frac{r_{n+1} \sin \theta_{n+1} - r_n \sin \theta_n}{r_{n+1} \cos \theta_{n+1} - r_n \cos \theta_n} \quad (19)$$

а $\theta_{n-(n+1)}$ определяется как корень уравнения:

$$\operatorname{tg}(\gamma_{n-(n+1)} - \theta_{n-(n+1)}) = \frac{f'(\theta_{n-(n+1)})}{f(\theta_{n-(n+1)})} \quad (20)$$

В общих курсах дифференциальной геометрии выражение для определения высоты сегмента кривой не приводится, поэтому такой вывод дается здесь ниже на основании рассмотренного рис. 7, на котором для упрощения принято $n = 1$.

На рис. 7 касательная FP к центроиде, заданной в полярной форме в виде уравнения $r = f(\theta)$, параллельна хорде $P_{0_1}P_{0_2}$. Искомая высота δ_{1-2} сегмента, отсеченного этой хордой, обозначена через EF .

Из прямоугольного треугольника EPF имеем:

$$\delta_{1-2} = EF = EP \cdot \sin \mu = (r_{1-2} - OE) \sin \mu. \quad (a)$$

Из треугольника ODE имеем:

$$\mu = \gamma_{1-2} - \theta_{1-2}, \quad (b)$$

где

$$\gamma_{1-2} = \arctg \frac{r_2 \sin \theta_2 - r_1 \sin \theta_1}{r_2 \cos \theta_2 - r_1 \cos \theta_1}, \quad (c)$$

а θ_{1-2} — корень уравнения $\operatorname{tg}(\gamma_{1-2} - \theta_{1-2}) = \frac{f(\theta_{1-2})}{f'(\theta_{1-2})}$.

Из треугольника ODE имеем:

$$OE = \frac{OD}{\sin \mu} \sin(\pi - \gamma_{1-2}). \quad (d)$$

Из треугольника ODP_{01} имеем:

$$r_1 = \frac{OD}{\sin \nu} \sin(\pi - \gamma_{1-2}). \quad (e)$$

Из выражений (d) и (e) получаем:

$$OE = r_1 \frac{\sin \nu}{\sin \gamma_{1-2}}. \quad (f)$$

Из треугольника ODP_{01} находим:

$$\nu = \gamma_{1-2} - \theta_1. \quad (g)$$

Объединяя результаты (a), (b), ... (g), окончательно будем иметь:

$$\delta_{1-2} = f(\theta_{1-2}) \sin(\gamma_{1-2} - \theta_{1-2}) - r_1 \sin(\gamma_{1-2} - \theta_1), \quad (18a)$$

где

$$\gamma_{1-2} = \arctg \frac{r_2 \sin \theta_2 - r_1 \sin \theta_1}{r_2 \cos \theta_2 - r_1 \cos \theta_1}, \quad (19a)$$

а θ_{1-2} — корень уравнения:

$$\operatorname{tg}(\gamma_{1-2} - \theta_{1-2}) = \frac{f(\theta_{1-2})}{f'(\theta_{1-2})}. \quad (20a)$$

Выведенное здесь уравнение для определения δ_{1-2} и входящие в его состав γ_{1-2} и θ_{1-2} имеют то же значение, что и уравнения (18), (19) и (20), приведенные раньше в самом общем виде.

6. Измерение размеров отдельных элементов колес

Измерение элементов центроида. Измерения элементов центроида некруглого колеса будут заключаться в проверке размеров ее радиусов-векторов, хорд и полярных углов, показанных, например, на рис. 6.

Измерение радиусов-векторов можно производить как проверку размеров $OP_{0_0} + \frac{D+d}{2}$; $OP_{0_1} + \frac{D+d}{2}$; ...

Измерение хорд можно производить как проверку размеров $P_{0_0}P_{0_1} + d$; $P_{0_1}P_{0_2} + d$; ...

Наконец, измерение полярных углов $\theta_1, \theta_2, \dots$ или углов θ_1 ; $\theta_2 - \theta_1$; $\theta_3 - \theta_2$; ... можно производить, используя заостренные оси роликов, вставленных во впадины и ступицу поверяемого некруглого колеса.

Все эти измерения элементов центроиды в современных условиях оснащения измерительных лабораторий заводов никаких затруднений не вызовут.

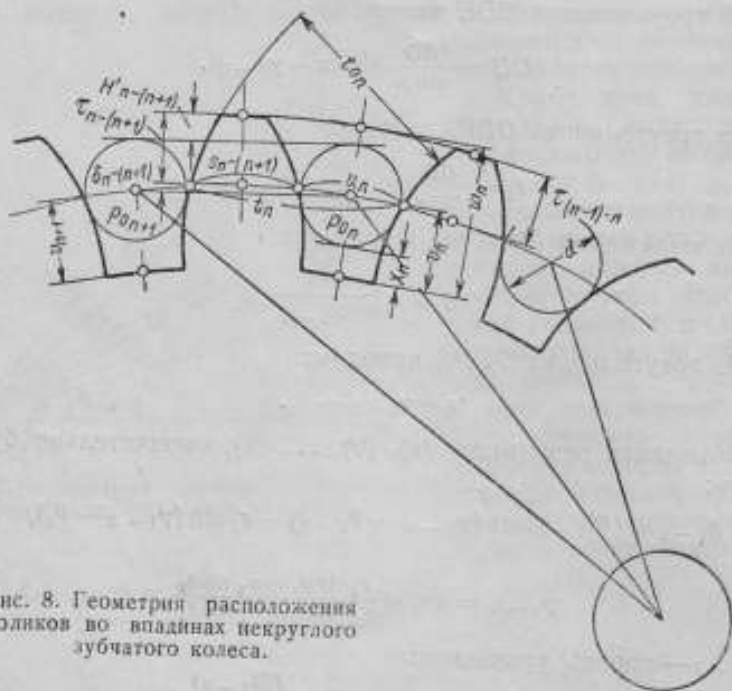


Рис. 8. Геометрия расположения роликов во впадинах некруглого зубчатого колеса.

Измерение элементов зубцов и впадин. Произведенные косвенные измерения хорд центроиды являются одновременно косвенными измерениями и толщины зубца подобно тому, как это делается и для круглых колес.

Получившиеся относительные отклонения размеров каждой хорды от ее теоретических размеров укажут и на соответствующие относительные отклонения от теоретических размеров в толщине этих зубцов по центроиде.

Ширину действительной впадины некруглого колеса можно вычислить, исходя из результата измерения шага по нормали и только что указанного измерения толщины зубца по центроиде. Обратимся к рис. 8. Шаг по нормали t_{0n} измеренный

непосредственно, как сказано в п. 3, определит собой соответствующий ему действительный шаг по центроиде по формуле:

$$t_n = \frac{t_{v_n}}{\cos \alpha}. \quad (21)$$

Толщина зубца $s_{n-(n+1)}$ по дуге центроиды с тем или иным отклонением определится измерением хорды $P_{0n}P_{0n+1}$. Тогда определение действительной ширины впадины u_n по центроиде сведется к вычислению:

$$u_n = \frac{t_{0n}}{\cos \alpha} - s_{n-(n+1)}. \quad (22)$$

Для определения действительной высоты головки $\tau_{n-(n+1)}$ зубца необходимо будет произвести предварительное измерение размера $H'_{n-(n+1)}$, а определение высоты головки сведется к вычислению:

$$\tau_{n-(n+1)} \approx H'_{n-(n+1)} + \frac{d}{2} - d_{n-(n+1)}. \quad (23)$$

Определение глубины впадины некруглого колеса сведется к предварительному измерению зазора x_n между роликом и кривой впадин, что и даст возможность вычислить действительный размер впадины по формуле:

$$v_n = x_n + \frac{d}{2}. \quad (24)$$

Определение полной действительной высоты зубца некруглого колеса сведется к вычислению по формуле:

$$H_{n-(n+1)} = \tau_{n-(n+1)} + \frac{v_n + v_{n+1}}{2}. \quad (25)$$

Определение полной действительной глубины впадины некруглого колеса сведется к вычислению по формуле:

$$w_n = v_n + \frac{\tau_{(n-1)-n} + \tau_{n-(n+1)}}{2}. \quad (26)$$

Пример. Для окончательной ясности методики вычислений теоретических и действительных размеров отдельных элементов некруглых колес приведем численный пример.

Пусть в поверку поступила пара одинаковых некруглых логарифмических колес, изображенных на рис. 9. Полярное уравнение центроиды этих колес задано уравнением:

$$r = r_0 e^{\theta}, \quad (3a)$$

где $r_0 = 50,121$ мм и $\theta_0 = 0$ для каждого колеса. Модуль зацепления m этих колес равен 15 мм, угол давления α зуборезного инструмента равен 20° , диаметр D оси равен 30 мм.

Диаметр двух необходимых роликов определится по формуле:

$$d = \frac{\pi m}{2} \cos \alpha = \frac{\pi 15}{2} \cos 20^\circ; \quad (8a)$$

$$d = 22,41 \text{ мм.}$$

Для определения теоретического значения θ_1 необходимо подставить численное значение r , выраженное уравнением (3a), в уравнение (10), что даст:

$$\pi m = r_0 \sqrt{2} \int_{\theta_0}^{\theta_1} e^\theta d\theta, \quad (10a)$$

откуда получается уравнение вида (11), т. е.:

$$l^{\theta_1} = \frac{\pi m}{r_0 \sqrt{2}} + 1. \quad (11a)$$

Для определения теоретического значения θ_2 необходимо подставить численное значение r , выраженное уравнением (3a), в уравнение (12), что даст:

$$2\pi m = r_0 \sqrt{2} \int_{\theta_0}^{\theta_2} e^\theta d\theta, \quad (12a)$$



Рис. 9. Пара некруглых зубчатых колес в зацеплении.

откуда получается уравнение вида (13), т. е.:

$$l^{\theta_2} = \frac{2\pi m}{r_0 \sqrt{2}} + 1. \quad (13a)$$

Аналогичным путем, пользуясь уравнениями (14), (15) и (3а), можно получить:

$$e^{\theta_3} = \frac{3\pi m}{r_0 \sqrt{2}} + 1; \quad (15a)$$

$$e^{\theta_4} = \frac{4\pi m}{r_0 \sqrt{2}} + 1. \quad (15б)$$

Решения уравнений: (11а) относительно θ_1 , (13а) относительно θ_2 , (15а) относительно θ_3 и (15б) относительно θ_4 с последующей подстановкой численных значений $r_0 = 50,121$ и $m = 15$ мм дадут:

$$\theta_1 = 0,509701 \text{ рад.}$$

$$\theta_2 = 0,845718 \text{ рад.}$$

$$\theta_3 = 1,096747 \text{ рад.}$$

$$\theta_4 = 1,297233 \text{ рад.}$$

$$\theta_1 - \theta_0 = 0,509701 \text{ рад.}$$

$$\theta_2 - \theta_1 = 0,336017 \text{ рад.}$$

$$\theta_3 - \theta_2 = 0,251029 \text{ рад.}$$

$$\theta_4 - \theta_3 = 0,200486 \text{ рад.}$$

Подстановка численных значений e^{θ_1} , e^{θ_2} , ... в основное уравнение центриды (3а) даст соответственно:

$$r_1 = r_0 \left(\frac{\pi m}{r_0 \sqrt{2}} + 1 \right) = 83,441 \text{ мм}$$

$$r_2 = r_0 \left(\frac{2\pi m}{r_0 \sqrt{2}} + 1 \right) = 116,762 \text{ мм}$$

$$r_3 = r_0 \left(\frac{3\pi m}{r_0 \sqrt{2}} + 1 \right) = 150,082 \text{ мм}$$

$$r_4 = r_0 \left(\frac{4\pi m}{r_0 \sqrt{2}} + 1 \right) = 183,403 \text{ мм.}$$

Произведем дальнейшие вычислительные операции для определения теоретических значений размеров $P_{0_0}P_{0_1}$; $P_{0_1}P_{0_2}$; ... Формула (17) для определения размера $P_{0_0}P_{0_1}$ будет написана:

$$P_{0_0}P_{0_1} = \sqrt{r_0^2 + r_1^2 - 2r_0r_1 \cos(\theta_1 - \theta_0)},$$

что после подстановки численных значений r_0 , r_1 , $\theta_1 - \theta_0$ даст:

$$P_{0_0}P_{0_1} = 46,62 \text{ мм.}$$

Подобным же образом получим:

$$P_{0_1}P_{0_2} = 46,90 \text{ мм}$$

$$P_{0_2}P_{0_3} = 46,98 \text{ мм}$$

$$P_{0_3}P_{0_4} = 47,05 \text{ мм.}$$

Последующие вычислительные операции необходимо произвести для определения численных значений δ_{0-1} , δ_{1-2} , ...

Для определения численного значения δ_{0-1} необходимо:

1. По формуле (19) определить γ_{0-1} :

$$\gamma_{0-1} = \arctg \frac{r_1 \sin \theta_1 - r_0 \sin \theta_0}{r_1 \cos \theta_1 - r_0 \cos \theta_0}$$

Подстановка в нее численных значений θ_0 , θ_1 , r_0 и r_1 , определенных выше, даст:

$$\gamma_{0-1} = \arctg 1,8 = 1,03 \text{ рад.}$$

2. Написать уравнение (20) и решить его относительно θ_{0-1} , используя для этой цели уравнение (3а), что даст:

$$\operatorname{tg}(\gamma_{0-1} - \theta_{0-1}) = \frac{f(\theta_{0-1})}{F(\theta_{0-1})} = 1$$

или $\gamma_{0-1} - \theta_{0-1} = \frac{\pi}{4}$ рад.

Тогда $\theta_{0-1} = \arctg 1,8 - \arctg 1 = 0,28$ рад.

3. Подставить результаты пп. 1 и 2 в выражение для определения δ_{0-1} , написанное в виде формулы (18), что даст:

$$\delta_{0-1} = 50,12 \left(e^{0,28} \sin \frac{\pi}{4} - \sin 1,03 \right) \text{ мм}$$

или окончательно $\delta_{0-1} = 3,1$ мм.

Подобным же образом, пользуясь уравнениями (19а), (20а) и (18а), получим численное значение δ_{1-2} . Затем, пользуясь уравнениями 19, 20 и 18, как уравнениями в самом общем виде, получим численные значения высот δ_{2-3} и δ_{3-4} остальных сегментов колеса. В общем итоге получим:

$$\delta_{0-1} = 3,1 \text{ мм}$$

$$\delta_{1-2} = 2,1 \text{ мм}$$

$$\delta_{2-3} = 1,5 \text{ мм}$$

$$\delta_{3-4} = 1,2 \text{ мм}$$

Определять численные значения δ_{0-1} , δ_{1-2} , ... с большей точностью, чем это сделано здесь, нет необходимости, так как теоретический радиальный зазор (в направлении радиусов кривизны центроид) составляет 0,2 м или равен 3 мм.

Контроль размеров центроиды некруглого колеса, как сказано в п. 5, будет сведен к проверке теоретических размеров радиусов-векторов r_0 , r_1 , r_2 , ..., хорд $P_{0a}P_{01}$, $P_{01}P_{02}$, ... и полярных углов θ_1 , θ_2 , θ_3 , ...

Таким образом, непосредственными измерениями будет производиться проверка нижеследующих теоретических размеров:

$$N_0 = r_0 + \frac{D+d}{2} = 76,19 \text{ мм}$$

$$N_1 = r_1 + \frac{D+d}{2} = 109,51 \text{ мм}$$

$$N_2 = r_2 + \frac{D+d}{2} = 142,83 \text{ мм}$$

$$N_3 = r_3 + \frac{D+d}{2} = 176,15 \text{ мм}$$

$$N_4 = r_4 + \frac{D+d}{2} = 209,47 \text{ мм.}$$

Точно так же непосредственными измерениями будет производиться проверка нижеследующих теоретических размеров:

$$L_{0-1} = P_{0_0}P_{0_1} + d = 68,76 \text{ мм}$$

$$L_{1-2} = P_{0_1}P_{0_2} + d = 69,04 \text{ мм}$$

$$L_{2-3} = P_{0_2}P_{0_3} + d = 69,12 \text{ мм}$$

$$L_{3-4} = P_{0_3}P_{0_4} + d = 69,19 \text{ мм.}$$

Определение теоретических размеров углов $\theta_1, \theta_2, \dots$ было произведено ранее, и дополнительных вычислений для проведения непосредственных измерений сейчас не требуется.

Измеряя расстояния L_{0-1}, L_{1-2}, \dots и вычитая из каждого размера, полученного в результате измерений, размер d , а затем сравнивая полученный результат с вычисленными теоретическими значениями $P_{0_0}P_{0_1}; P_{0_1}P_{0_2}; \dots$, мы получим погрешности хорд $P_{0_0}P_{0_1}; P_{0_1}P_{0_2}; \dots$, т. е. получим $\Delta L_{0-1} = \Delta P_{0_0}P_{0_1}; \Delta L_{1-2} = \Delta P_{0_1}P_{0_2}$ и т. д.

Тогда приблизительная относительная погрешность соответствующих средних шагов по центроиде будет выражаться:

$$\frac{\Delta P_{0_0}P_{0_1}}{P_{0_0}P_{0_1}} \approx \frac{\Delta L_{0-1}}{P_{0_0}P_{0_1}}$$

$$\frac{\Delta P_{0_1}P_{0_2}}{P_{0_1}P_{0_2}} \approx \frac{\Delta L_{1-2}}{P_{0_1}P_{0_2}}$$

и так далее, где $P_{0_0}P_{0_1} = P_{0_1}P_{0_2} = \dots = \pi m = 47,124 \text{ мм}$.

Это дает возможность определить абсолютную погрешность каждого шага по центроиде поверяемого логарифмического колеса, т. е. вычислить:

$$\Delta P_{0_0}P_{0_1} \approx 47,124 \frac{\Delta L_{0-1}}{46,62} \text{ мм}$$

$$\Delta P_{0_1}P_{0_2} \approx 47,124 \frac{\Delta L_{1-2}}{46,90} \text{ мм}$$

и так далее, где $\Delta L_{0-1}, \Delta L_{1-2}, \dots$ должны быть выражены в мм.

Кроме определения средних шагов по центроиде, от центра одной впадины до центра другой, измеренные расстояния L_{0-1}, L_{1-2}, \dots дадут возможность определить действительные толщины зубцов по центроиде, т. е. дуги S_{0-1}, S_{1-2}, \dots

Совершенно очевидно, что

$$s_{0-1} = \frac{\widehat{P_{0_0}P_{0_1}} + \Delta P_{0_0}P_{0_1}}{2} = 23,562 \left(1 + \frac{\Delta L_{0-1}}{46,62} \right) \text{ мм}$$

$$s_{1-2} = \frac{\widehat{P_{0_1}P_{0_2}} + \Delta P_{0_1}P_{0_2}}{2} = 23,562 \left(1 + \frac{\Delta L_{1-2}}{46,90} \right) \text{ мм}$$

и так далее, где ΔL_{0-1} , ΔL_{1-2} , ... выражены в мм.

Проверка шага по центроиде от точки пересечения ее с профилем до такой же точки пересечения ее со следующим профилем, т. е. $\widehat{l_{0_1}}$, $\widehat{l_{0_2}}$, ... может быть произведена в виде косвенного измерения соответствующего шага по нормали (основного шага), подобно тому как это делается в обычных круглых колесах, например, шагомером завода „Калибр“ или какой-нибудь иной конструкции.

Последующие вычисления по формуле (21) дадут возможность определить и соответствующий каждому такому измерению шаг по центроиде, т. е.:

$$l_1 = \frac{l_{0_1}}{0,940} \quad (21a)$$

$$l_2 = \frac{l_{0_2}}{0,940} \quad (21б)$$

и так далее, что и является контрольной проверкой шагов по центроиде, независимо от измерения размеров L_{0-1} , L_{1-2} , ...

Толщина зубцов s_{0-1} , s_{1-2} , ... по дуге центроиды с тем или иным отклонением была определена измерением размеров L_{0-1} , L_{1-2} , ... Тогда определение действительной ширины впадины по центроиде применительно к формуле (21) сведется к вычислению:

$$u_1 = \frac{l_{0_1}}{0,940} - 23,562 \left(1 + \frac{\Delta L_{0-1}}{46,62} \right) \text{ мм}$$

$$u_2 = \frac{l_{0_2}}{0,940} - 23,562 \left(1 + \frac{\Delta L_{1-2}}{46,90} \right) \text{ мм}$$

и так далее.

Определение действительной высоты головки τ_{0-1} , τ_{1-2} , ... зубцов применительно к формуле (23) сведется к вычислению:

$$\tau_{0-1} = H_{0-1} + 11,1 - 3,1 = H_{0-1} + 8,0 \text{ мм}$$

$$\tau_{1-2} = H_{1-2} + 11,1 - 2,1 = H_{1-2} + 9,0 \text{ мм}$$

и так далее, где H_{0-1} , H_{1-2} , ... получены непосредственными измерениями (в мм).

Определение глубины впадины применительно к формуле (24) сведется к вычислению:

$$v_1 = x_1 + 11,1 \text{ мм}$$

$$v_2 = x_2 + 11,1 \text{ мм}$$

и так далее, где x_1 , x_2 , ... (в мм) получают непосредственными измерениями.

Определение полной высоты зубца применительно к формуле (25) сведется к вычислению:

$$H_{0-1} = r_{0-1} + \frac{v_1 + v_2}{2},$$

т. е.

$$H_{0-1} = H_{0-1} + \frac{x_1 + x_2}{2} + 19,0 \text{ мм}$$

$$H_{1-2} = H_{1-2} + \frac{x_2 + x_3}{2} + 20,0 \text{ мм}$$

и т. д.

Определение полной глубины впадины применительно к формуле (26) сведется к вычислению:

$$w_1 = v_1 + \frac{r_{0-1} + r_{1-2}}{2},$$

т. е.

$$w_1 = x_1 + \frac{H_{0-1} + H_{1-2}}{2} + 8,5 \text{ мм}$$

$$w_2 = x_2 + \frac{H_{1-2} + H_{2-3}}{2} + 9,3 \text{ мм}$$

и т. д.

7. Механический способ проверки совместной работы некруглых колес

Часто при проверке некруглых зубчатых колес не столь важно бывает знать, каковы размеры отдельных элементов зубцов, сколь проверить правильность передачи вращения от ведущей оси к ведомой, т. е. определить, в какой мере действительный угол поворота ведомой оси отличается от запроектированного теоретического и не получилось ли в какой-нибудь отдельный период зацепления отклонений, больших, чем разрешено соответствующим допуском.

Этот вопрос может быть легко разрешен нижеприведенным методом проверки зацепления некруглых колес с использованием специальных приборов, которые употребляются с этой целью и для обычных круглых колес. На рис. 10 представлена схема одного из таких приборов, применяемых в некоторых измерительных лабораториях и ОТК заводов.

На горизонтальном основании *A* прибора имеются две вертикальные оси *B* и *B*, расстояние между которыми *D* может быть строго отрегулировано для каждой серии проверяемых колес.

На ось *B* плотно надето некруглое колесо *I* и соответствующий ему шаблон *1*, рабочий контур которого *ККК* по очертанию и размерам равен центриде (начальной кривой *КК* колеса *I*). Колесо *I* и шаблон *1* жестко связаны один с другим, так

центроиду или начальную кривую). Большое или меньшее отклонение вычерчиваемой кривой от дуги правильной окружности укажет на соответствующее большее или меньшее отклонение действительного угла поворота ведомого колеса Π от желаемого теоретического для каждого отдельного периода зацепления.

На диаграмме (рис. 11) удобно будет вычертить заранее три кривые: во-первых, дугу правильной окружности 33, соответствующую правильному теоретическому зацеплению; во-вторых, наружную — $лл$ и внутреннюю — $мм$, соответствующие предельным допустимым отклонениям действительного угла поворота ведомого колеса от желаемого теоретического. Повидимому, эти наружная и внутренняя кривые в самом общем случае не будут являться дугами окружностей, концентричных средней дуге, так как допуски на отклонение придется назначать не одинаковые для всех значений угла поворота ведомого колеса, а в какой-нибудь зависимости от переменного передаточного числа или угла поворота ведущего колеса.

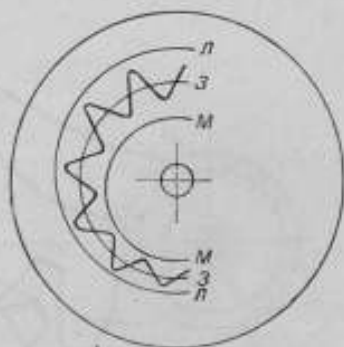


Рис. 11. Диаграмма зацепления пары некруглых зубчатых колес.

Чтение диаграммы, характеризующей зацепление некруглых колес, затруднений не вызовет, так как их следует понимать так же, как и аналогичные диаграммы для круглых колес.

Само собой разумеется, что первоначальную установку колес и шаблонов следует производить так, чтобы в плане центры колес и рабочие контуры шаблонов строго совпадали. Для этого в конструкции некруглых колес, изготавливаемых серийно или в массовом количестве, необходимо предусмотреть установочные отверстия p (рис 10), чтобы при установке колес для проверки эти отверстия попадали на установочные штифты в торцах втулок, сидящих на осях B и B .

8. Полумеханический способ проверки совместной работы некруглых колес

Если измерительная лаборатория или ОТК завода-изготовителя не располагает приборами для механической проверки совместной работы или зацепления пары некруглых колес, то в этом случае можно воспользоваться полумеханическим способом с применением сравнительно несложного приспособления. Принципиальная схема действия такого приспособления ясна при рассмотрении рис. 12, где оно изображено в плане.

На горизонтальном основании A приспособления имеются две вертикальные оси B и B' , расстояние между которыми D может быть строго отрегулировано для каждой серии поверяемых колес. С колесами I и II , находящимися в зацеплении, соединены диски 1 и 2 , имеющие деления для отсчета углов их поворота. При вращении некруглых колес вместе с каждым из них будут вращаться и диски 1 и 2 . Кроме того, на осях B и B' сидят неподвижные диски $1'$ и $2'$ с нониусными шкалами для более точного отсчета углов поворота некруглых колес и связанных с ними дисков 1 и 2 .

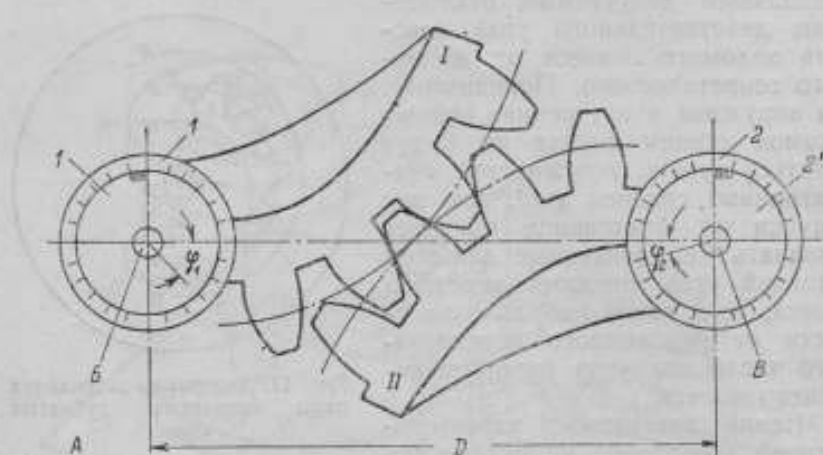


Рис. 12. Схема простейшего приспособления для проверки зацепления некруглых зубчатых колес.

Имея таблицу вычисленных, теоретических, углов поворота φ_2 ведомого колеса II в зависимости от углов поворота φ_1 ведущего колеса I , можно будет узнать, насколько действительные углы поворота ведомого колеса отличаются от запроектированных теоретических.

Конструктивное оформление приспособления по рис. 12 затруднений не вызовет.

9. Заключение

1. Несмотря на сложности измерения отдельных элементов зубцов некруглых колес, такие измерения в современных условиях оснащенности измерительных лабораторий и ОТК заводов производить вполне возможно.

2. Оценку совместной работы некруглых зубчатых колес, изготовленных отдельными парами или небольшими сериями, можно производить по методу проверки расположения их центров.

3. Для проверки совместной работы некруглых колес, изготовляемых большими сериями и тем более в массовых количествах, рационально будет применить механический или полумеханический способы.

В заключение автор считает своим долгом поблагодарить доцента Ленинградского политехнического института имени М. И. Калинина — канд. техн. наук Ф. Л. Литвина, любезно предоставившего в распоряжение автора свои материалы о некруглых зубчатых колесах. Эти материалы легли в основу изложенной методики измерений и проверки зацепления некруглых колес.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЦЕПЛЕНИЯ НЕКРУГЛЫХ КОЛЕС

Введение. В настоящее время в машиностроении все шире применяются некруглые зубчатые колеса. Это связано с тем, что некруглые колеса обладают рядом преимуществ перед круглыми. Так, они позволяют уменьшить массу и габариты передач, а также обеспечивают более равномерное распределение нагрузки по зубьям. Однако при этом возникают сложности в изготовлении и измерении таких колес. Поэтому в данной работе рассматриваются методы измерения и проверки зацепления некруглых колес.



В заключение автор считает своим долгом поблагодарить доцента Ленинградского политехнического института имени М. И. Калинина — канд. техн. наук Ф. Л. Литвина, любезно предоставившего в распоряжение автора свои материалы о некруглых зубчатых колесах. Эти материалы легли в основу изложенной методики измерений и проверки зацепления некруглых колес.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ПРИБОРА ТИПА ПИУ-1

Лаборатория измерения длины в машиностроении ВНИИМ исследовала интерференционный прибор № РЗ тип ПИУ-1 для проверки плоскопараллельных концевых мер длины, разработанный инж. И. Т. Уверским и изготовленный Московским инструментальным заводом „Калибр“.

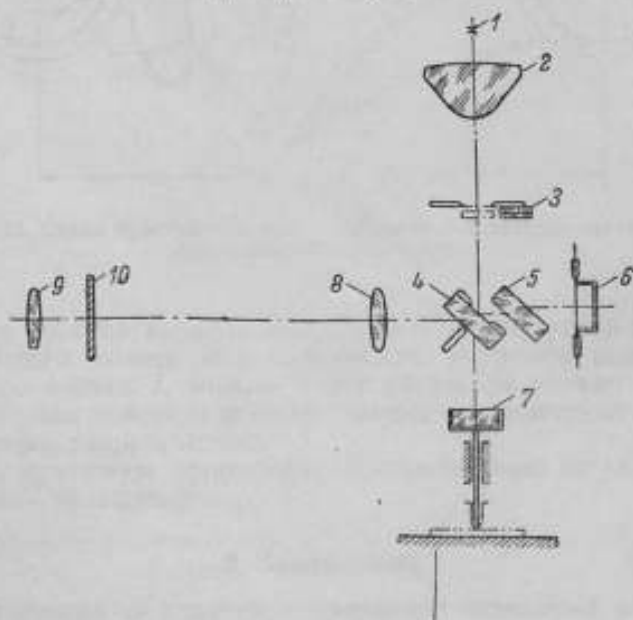


Рис. 1. Оптическая схема прибора.

Основными деталями прибора (рис. 1) являются: источник белого света 7, конденсированная асферическая линза 2, монохроматический интерференционный фильтр 3, разделительная пластина особой конструкции 4, стеклянный плоскопараллельный компенсатор 5, основное зеркало 6, зеркало измерительного

стержня 7, объектив трехкратного увеличения 8, окуляр десятикратного увеличения 9, стеклянная пластина со шкалой 10. Конденсор 2 собирает белый свет электрической лампочки 1 и направляет его непосредственно или через светофильтр 3 на распределительную пластину 4, которая служит для одновременного наблюдения двух зеркал 6 и 7, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях и освещаемых посредством пластины 4 одним источником света; рабочей поверхностью этой пластины свет разделяется на две ветви: одна направляется на зеркало 6, другая проходит к зеркалу 7, при этом одинаковые оптические условия для обеих ветвей создаются с помощью компенсатора 5.

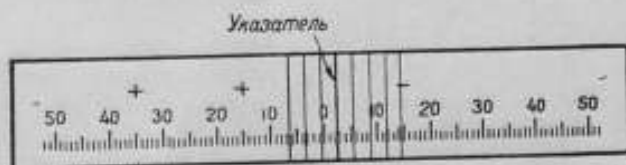


Рис. 2. Положение интерференционных полос во время отсчета.

Свет, отраженный зеркалами, возвращается к пластине 4 и при небольшой разности хода, соединяясь, интерферирует, а затем частично проходит в микроскоп, направленный на оба зеркала интерферометра.

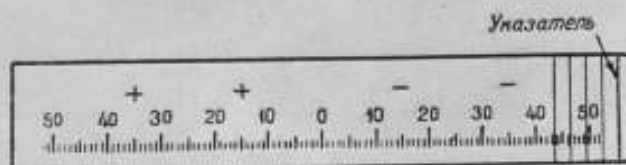


Рис. 3. Исходное положение интерференционных полос.

В микроскопе интерференционная картина проектируется объективом 8 на шкалу 10 и вместе со шкалой рассматривается через окуляр 9.

Черная ахроматическая полоса интерференции белого света, направленная вдоль штрихов шкалы, служит подвижным указателем для этой шкалы (рис. 2).

После градуировки или проверки цены деления шкалы светофильтр выключается, и черная интерференционная полоса (указатель) устанавливается в исходное для эксплуатации прибора положение (рис. 3).

Интерферометр установлен на вертикальной стойке, состоящей из основания 1, угольника 2, каретки 3, втулки 4, поршня 5, к которому присоединяется сменный стол (рис. 4).

Каретка вместе с интерферометром плавно перемещается по направляющим угольника кремальерой 6 в интервале 150 мм и в установленном положении стопорится винтами 7.

Трение каретки регулируется винтами 8, поджимающими планку 9.

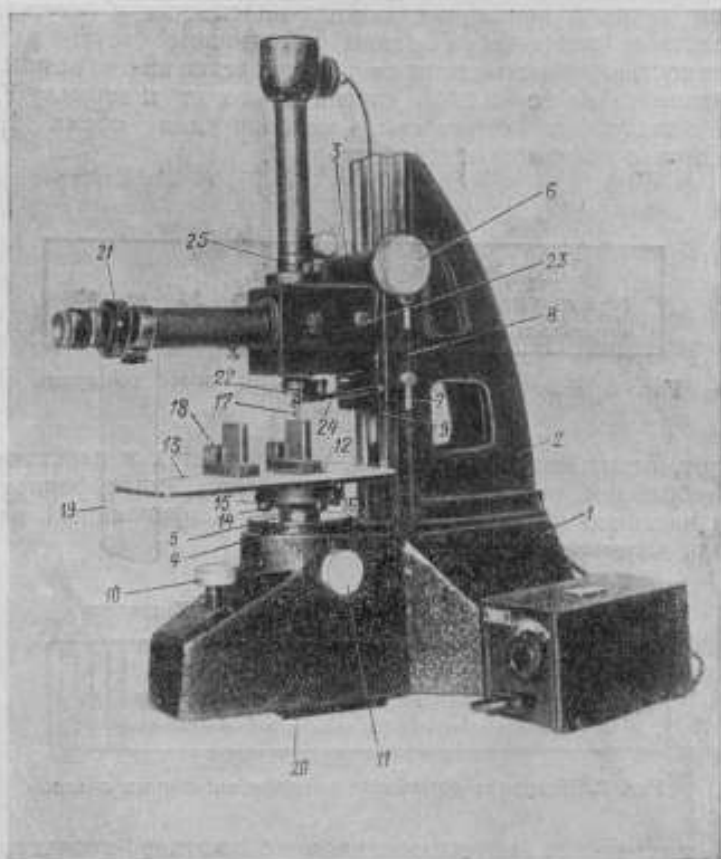


Рис. 4. Общий вид прибора.

Поршень легко и плавно перемещается во втулке посредством микровинта 10 не менее чем на 6 мм и в установленном положении стопорится винтом 11. Имеется ребристый стол 12 с плоскими измерительными поверхностями и вспомогательный стол с накладкой 13, расположенной ниже измерительных поверхностей ребристого стола на 0,03—0,08 мм.

Вспомогательный и ребристый столы укрепляются на поршне одновременно винтами 14 через шайбы 15. При этом ребристый стол может юстироваться винтами 16 с целью совме-

ния оси симметрии среднего ребра с осью измерительного наконечника. Смещение не должно превышать 0,1 мм. Прибор снабжается сферическим измерительным наконечником 17, движками 18, ширмой 19 и амортизатором 20. Вес прибора 45 кг.

Градировка шкалы производится путем совмещения произвольно выбранного количества интерференционных полос (интервалов) в фильтрованном свете с соответственным количеством делений шкалы, которое определяется по формуле:

$$n = \frac{\lambda \cdot K}{2l},$$

где λ — длина световой волны, пропускаемая светофильтром;
 n — количество делений шкалы, в которое нужно уложить K интерференционных полос (интервалов), чтобы получить требуемую цену деления шкалы i .

Приводим рекомендуемые И. Т. Уверским значения K при $\lambda = 0,558 \text{ мк}$.

Цена деления шкалы в мк	K	Цена деления шкалы в мк	K
0,02	4	0,1	12
0,05	8	0,2	16

Изменяя ширину интерференционных полос микровинтом 23 и перемещая шкалу винтом 27, совмещают интервал K полос с намеченным интервалом n делений шкалы.

При этом полосы устанавливают параллельно штрихам шкалы микровинтом 24.

Светофильтр выключают поворотом ручки 25, измерительный стержень опускают до упора и черную полосу (указатель) устанавливают в исходное положение (рис. 3) упорным кольцом 22 (рис. 4).

Длина световой волны λ в максимуме пропускания светофильтра равна $0,558 \pm 0,002 \text{ мк}$.

Предельная погрешность определения λ равна 0,003 мк.

Предельная погрешность градуировки шкалы:

а) при цене деления 0,02 мк равна 0,011 мк;

б) при цене деления 0,2 мк равна 0,090 мк.

Измерительное усилие $200 \pm 20 \text{ Г}$.

Изменение измерительного усилия в интервале показаний прибора не превышает 1 Г.

Наибольшая вариация отсчета:

а) при цене деления 0,02 мк равна 0,015 мк

б) при цене деления 0,2 мк равна 0,03 мк.

При цене деления 0,1 мк предельная погрешность показаний равна 0,05 мк.

Исследование точности измерения на интерференционном приборе типа ПИУ-1 Московского инструментального завода „Калибр“ проводилось в лаборатории измерения длины в машиностроении по следующей программе.

1. Определение стабильности показаний во времени на разных пределах измерений.

2. Определение точности измерения в зависимости от установки различной цены деления различными наблюдателями.

3. Определение точности сличения концевых мер на приборе типа ПИУ-1 и на приборе для абсолютных интерференционных измерений.

1. Определение стабильности показаний во времени на разных пределах измерений при цене деления шкалы 0,05 мк

Результаты определения приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что показания прибора меняются с течением времени, что указывает на отсутствие стабильности. Температура оставалась постоянной в пределах $\pm 0,02^\circ \text{C}$.

Таблица 1

Номинальный размер концевых мер в мм	Интервал времени между отсчетами в часах	Максимальные отклонения от номинального размера мер в мк
1	0	0
1	1	+0,15
1	2	+0,20
1	3	+0,22
1	4	+0,22
1	5	0
1	6	+0,025
1	7	-0,025
5	4	-0,15
10	6	-0,10
20	6	-0,15
100	3	-0,05

2. Определение точности измерения в зависимости от установки различной цены деления различными наблюдателями

Для определения точности измерений на приборе типа ПИУ-1 при различной цене деления шкалы было произведено измерение концевых мер номинального размера 5 и 20 мм на приборе ПИУ-1 и приборе для абсолютных интерференционных измерений.

Таблица 2

Номинальный размер концевых мер в мм	Цена деления шкалы в мк	Отклонение от номинального размера для 1-го наблюдателя в мк	Отклонение от номинального размера для 2-го наблюдателя в мк	Среднее отклонение номинального размера в мк
5	0,02	+0,140	+0,140	+0,140
5	0,05	+0,140	+0,110	+0,125
5	0,10	+0,140	+0,140	+0,140
5	0,20	+0,140	+0,140	+0,140
20	0,02	-0,074	-0,069	-0,072
20	0,05	-0,075	-0,080	-0,078
20	0,10	-0,070	-0,060	-0,065
20	0,20	-0,066	-0,060	-0,063

Результаты измерения приведены в табл. 2.

Отклонения, приведенные в табл. 2, являются средними из десяти измерений для каждого наблюдателя.

Из табл. 2 следует, что максимальные расхождения между результатами измерений отдельных двух наблюдателей при различной цене деления шкалы прибора не превышают 0,03 мк.

3. Определение точности сличения концевых мер на приборе ПИУ-1 и на приборе для абсолютных интерференционных измерений

Для определения погрешности измерения средней длины и плоскопараллельности на приборе ПИУ-1 были взяты плоскопараллельные концевые меры длины 1-го разряда, измеренные абсолютным интерференционным методом.

Меры были выбраны с таким расчетом, чтобы можно было определить погрешности прибора типа ПИУ-1 на всех пределах измерений.

Результаты исследований приведены в табл. 3.

20% из общего количества мер, приведенных в табл. 3, проверены на плоскопараллельность.

Результаты измерений плоскопараллельности концевых мер на приборе ПИУ-1 и на приборе для абсолютных интерференционных измерений совпадают.

Из табл. 3 следует, что расхождения между результатами измерений концевых мер, измеренных абсолютным интерференционным методом, и результатами измерений на приборе типа ПИУ-1 не превышают предельных допустимых погрешностей определения средней длины ОСТ 85000-39 для концевых мер 3-го разряда.

Таблица 3

Номинальный размер концевых мер в мм	Отклонение от номинального размера, полученное на приборе ПИУ-1, в мк	Отклонение от номинального размера, полученное абсолютным интерференционным методом, в мк	Расхождение между измерениями на приборе ПИУ-1 и приборе для абсолютных интерференционных измерений, в мк
1,005	+0,12	+0,11	+0,01
1,02	+0,25	+0,16	+0,09
1,03	+0,00	+0,01	-0,01
1,04	+0,02	-0,06	+0,08
1,05	-0,02	-0,03	+0,01
1,06	+0,13	+0,09	+0,04
1,07	+0,05	-0,05	+0,10
1,08	+0,17	+0,12	+0,05
1,09	+0,12	+0,10	-0,07
1,10	+0,23	+0,21	+0,02
2	+0,15	+0,17	-0,02
2,5	+0,08	+0,15	-0,07
3	0,00	+0,06	-0,06
3,5	+0,09	+0,09	0,00
4	0,00	-0,03	+0,03
4,5	-0,15	-0,13	-0,02
5	+0,01	-0,03	+0,04
5,5	+0,06	+0,05	+0,01
6	+0,11	+0,13	-0,02
6,5	+0,02	+0,02	0,00
7	-0,15	-0,17	+0,02
8	+0,03	+0,09	-0,06
8,5	+0,12	+0,11	+0,01
10	-0,05	-0,09	+0,04
20	+0,01	0,00	+0,01
50	-0,19	-0,29	+0,10
100	+0,41	+0,45	-0,04

4. Выводы

На основании проведенных исследований и сравнения результатов измерений на приборе типа ПИУ-1 и на приборе для абсолютных интерференционных измерений следует считать, что прибор ПИУ-1 пригоден для проведения поверок концевых мер по 3-му и 4-му разрядам и может вполне заменить технический интерференционный метод.

Расхождение результатов определения отклонений от плоскопараллельности концевых мер на приборе ПИУ-1 и приборе для абсолютных интерференционных измерений не превышает допустимых погрешностей для мер 3-го и 4-го разрядов согласно ОСТ 85000-39.

Исследованный прибор удобен в работе, весьма мало подвержен воздействию тряски, не требует трудоемкой работы по притиранию мер к основным пластинкам, сокращает расходы на последние.

К числу недостатков прибора следует отнести:

- 1) нестабильность нулевой установки;
- 2) изменение наклона интерференционных полос при длительной работе (массовых поверках);
- 3) необходимость снимать микроскоп при выходе изображения светящейся нити электролампочки из поля зрения.

После внесения изменений в конструкцию необходимо увеличить выпуск приборов для оснащения ими всей поверочной системы Комитета и заводских лабораторий, поверяющих концевые меры длины.

М. Ф. ГРЕЧКО

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ КОНТАКТНЫМ ПРИСПОСОБЛЕНИЕМ

1. Описание приспособления

Контактное приспособление для измерения наружных и внутренних размеров на универсальном микроскопе было предложено впервые в 1934 г. научным сотрудником лаборатории калибров ВНИИМ М. Л. Бржезинским. Заводом „Эталон“ в

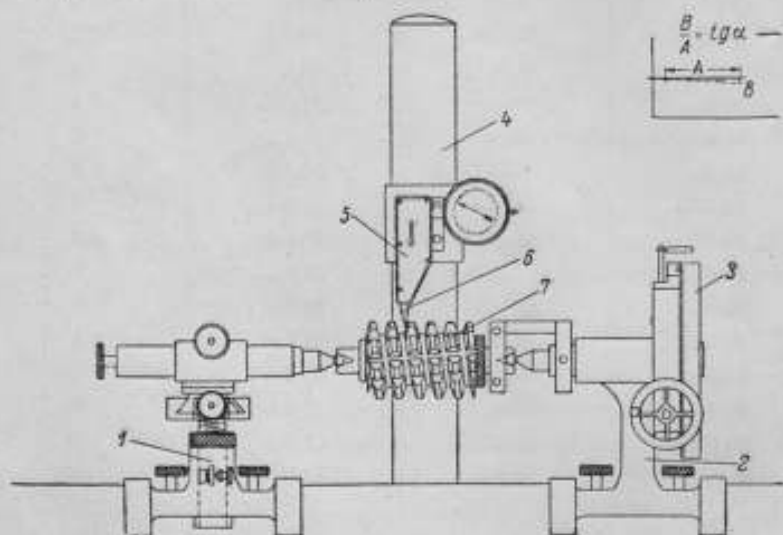


Рис. 1. Контактное приспособление и стол с поворотным и подвижным центрами для измерения червячных фрез.

1934 г. была изготовлена опытная установка, с помощью которой производились измерения элементов червячных фрез для Кировского завода. Чертеж этой установки приводится на рис. 1. Приспособление такого же рода было выпущено фирмой Цейсс спустя 7 лет, в 1941 г.

Таким образом, приоритет в области применения контактного метода для наружных и внутренних измерений на универсальном микроскопе принадлежит Советскому Союзу (лаборатории мер длины ВНИИМ).

Приспособление (рис. 1) состоит из двух бабок 1, 2 с центрами, закрепленными на столе универсального микроскопа, и кронштейна 5 с измерительным наконечником и индикатором, закрепленного на колонке 4. Центр правой бабки может вращаться вокруг своей оси при помощи червячной пары; угол поворота отсчитывается по лимбу 3. Центр левой бабки перемещается вертикально при помощи винтовой пары. Измеряемая фреза, установленная в центрах, поворачивается вокруг своей оси на требуемый угол. Ось фрезы устанавливается на требуемый угол в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Измерительный наконечник 6 приспособления приводят в контакт с измеряемой фрезой, перемещая стол микроскопа; положение измерительного наконечника фиксируют по индикатору, а положение стола микроскопа — по шкале. Таким образом, используя отсчетное устройство универсального микроскопа и специальное приспособление, можно производить измерение контактным методом таких элементов, как шаг по оси и нормали, накопленная ошибка шага, угол профиля фрезы, угол подъема канавки, окружной шаг и т. д.

2. Подготовка прибора к измерению

На направляющие универсального микроскопа (рис. 2) установлена делительная бабка 2 на место левой бабки микроскопа (приспособление к универсальному микроскопу).

На переднюю часть станины микроскопа, перпендикулярно к фрезе, на площадку с отверстиями устанавливается стойка ортотеста 3, в которой крепится направляющая 4 с шариковым наконечником и рычажной передачей от измерительного наконечника. Цена деления шкалы ортотеста 5 один микрон.

Перед началом измерения фрезы необходимо определить радиальное биение по наружному диаметру оправки, на которую плотно насаживается измеряемая червячная фреза 10. Определение биения производится следующим образом.

В центрах устанавливается оправка. Индикатор подводится к оправке и передвигается далее, пока стрелка не установится против нулевого деления шкалы. При помощи делительной бабки 2 вращаем оправку вокруг своей оси и наблюдаем отклонение стрелки индикатора. Разность между максимальным и минимальным отсчетом определяет величину биения, которая не должна превышать 10% от допустимого радиального биения. В противном случае оправка должна быть заменена другой, отвечающей вышеуказанным требованиям.



Рис. 2. Универсальный микроскоп с оптическим контактным приспособлением и делительной бабкой.



Рис. 3. Универсальный микроскоп с оптическим контактным приспособлением и делительной бабкой в процессе измерения фрезы.

После этого определяется конусность оправки.

Затем в центрах делительной бабки и бабки микроскопа устанавливается насаженная на оправку измеряемая фреза 10.

3. Оптическое контактное приспособление

На оправке объектива центрального микроскопа (рис. 2) укрепляется при помощи накидной гайки специальное оптическое контактное приспособление 6 с измерительным наконечником 7, на конце которого имеется шарик. Измерительный наконечник связан с зеркалом, расположенным под углом 45° к оптической оси микроскопа. Зеркало отражает биссектор, заключенный в корпусе приспособления и освещаемый лампочкой. При отклонении наконечника в ту или иную сторону от среднего положения изображение биссектора приспособления будет перемещаться относительно креста окулярной сетки микроскопа 8.

Резкость изображения биссектора на окулярной сетке регулируется поворотом оправы 1 (рис. 3). Наконечник под действием пружины может передвигаться вправо или влево от центрального положения. Переключение направления действия пружины производится поворотом кольца с накаткой 2.

Оптическое контактное приспособление может работать при контакте с одной и другой стороны зуба и устанавливается в направлении продольного и поперечного перемещения каретки. Установка контактного приспособления производится перемещением микрометрических винтов 9 или 11 (рис. 2) до того положения, когда средний штрих центрального микроскопа будет находиться строго в биссекторе сетки приспособления (рис. 4).

Оптическое контактное приспособление может быть использовано при измерениях на универсальном и инструментальном микроскопах.



Рис. 4. Установка контактного приспособления в исходное положение.

4. Определение приведенной действующей ошибки

Профиль зубьев в процессе нарезания образуется вдоль линии зацепления заготовки с червячной фрезой. Поэтому все ошибки изготовления червячной фрезы приводятся к одной так называемой "приведенной" ошибке, действующей вдоль потенциальной линии зацепления червячной фрезы с нарезаемым зубчатым колесом. На основании этого измерение приведенной действующей ошибки должно производиться вдоль этой же потенциальной линии зацепления (рис. 5). Линия зацепления эвольвентной червячной фрезы с эвольвентным зубчатым коле-

сом представляет собой прямую, лежащую в плоскости, касательной к основному цилиндру фрезы. В случае отсутствия погрешности изготовления фрезы все боковые режущие кромки должны лежать на поверхности основного эвольвентного червяка.

Для измерения приведенной действующей ошибки на уни-

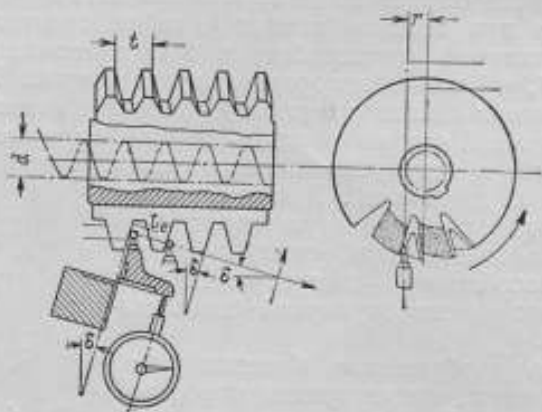


Рис. 5. Схема измерения вдоль потенциальной линии зацепления.

версальном микроскопе с делительной бабкой вращательное движение фрезы должно осуществляться согласованно с поступательным движением измерительного наконечника, перпендикулярно к оси фрезы, согласно следующей зависимости:

$$l_e = \pi \cdot m \cdot \cos \alpha; \quad a = l_e \cdot \sin \alpha,$$

т. е. при одном обороте фрезы стол микроскопа должен переместиться по оси фрезы на величину шага l_e , а каретка перпендикулярно оси на a (рис. 6).

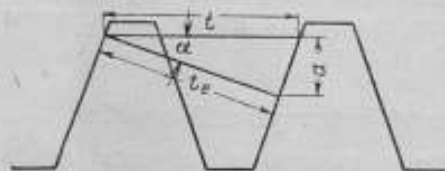


Рис. 6. Схема измерения шага.

Так как при измерении на микроскопе измерительный наконечник не имеет возможности перемещаться в направлении линии зацепления, то при измерении действующей ошибки вдоль линии зацепления необходимо при переходе от зуба к зубу давать измерительному щупу не только поступательное

движение вдоль оси, но и движение, перпендикулярное оси, на величину a , определяемую из соотношения:

$$a = l_c \cdot \sin \alpha,$$

где l_c — шаг по линии зацепления,
 α — угол зацепления.

Таким образом, на универсальном микроскопе с центральной бабкой и контактным оптическим приспособлением может быть осуществлено измерение тех элементов, для которых у специального универсального прибора Л. Лева предусматривается очень сложное приспособление для винтового движения фрезы.

5. Пример измерения действующей ошибки червячной фрезы

Фреза правая; $m = 5$ мм, $z = 9$ мм, $\alpha = 20^\circ$, $l_c = 14,753$ мм, $a = 5,046$ мм. Установив наконечник оптического контактного приспособления у вершины зуба 3 (рис. 3) на максимум, фиксируем положение по продольному 4 и поперечному 5 микроскопам, а также по микроскопу 8 делительной бабки 7.

Затем вращением маховичка 6 делительной бабки на величину $360^\circ : 9 = 40^\circ$ подводим следующий зуб к шарикому наконечнику и перемещаем стол на величину $\frac{l_c}{z} = \frac{14,760}{9} = 1,639$ мм. Перемещаем наконечник поперечным движением каретки с центральным микроскопом на величину $\frac{a}{z} = \frac{a}{9}$, т. е. на 0,561 мм, и так от зуба к зубу. Для полного определения действующей ошибки однозаходной фрезы требуется произвести измерение в пределах около двух полных оборотов фрезы; при этом измерения начинаются у головки зуба и оканчиваются у ножки зуба.

6. Измерения прямолинейности профиля и угла

Измерение прямолинейности режущей кромки профиля и угла α может производиться тригонометрическим методом, т. е. путем измерения сторон треугольника. Практически на универсальном микроскопе с оптическим контактным приспособлением это измерение выполняется следующим образом.

Перемещая стол микроскопа с зажатой в центрах фрезой, приводим щуп в контакт с боковой стороной профиля фрезы у головки зуба; поворотом маховичка 6 (рис. 3) находим по показаниям оптического контактного приспособления максимальное положение наконечника на режущей кромке и в этом положении фиксируем отсчеты по продольному 4 и поперечному 5 микроскопам. Далее перемещаем фрезу в направлении оси на величину x (рис. 7), определяемую из уравнения:

$$x = b \operatorname{tg} \alpha.$$

Значение b определяется в зависимости от числа измеряемых точек на боковой стороне зуба (примерно через 1 мм); затем перемещаем щуп в направлении, перпендикулярном оси, на величину b и снова поворотом маховичка b , найдя максимальное показание на режущей кромке, производим отсчеты и т. д. В зависимости от модуля, берем примерно восемь точек.

Если при этом показания оптического контактного приспособления будут отличны от нуля, то имеет место отклонение



Рис. 7. Схема измерения прямолинейности профиля и угла.

профиля от прямолинейности. Величину этого отклонения определяем по шкале микроскопа λ (рис. 3).

Измерение угла профиля производится теми же приемами, но в этом случае достаточно взять две точки у вершины

зуба и у основания, т. е. по заданному значению одного из катетов, например $b = 8$ мм (рис. 7), определить значение другого катета x ; отношение их и даст угол $\text{tg } \alpha$.

Пример. Находим значение x по разности отсчетов продольного микроскопа λ (рис. 3) в начале и в конце измерения:

$$x = 116,667 - 113,754 = 2,913 \text{ мм.}$$

Значение b (для данного модуля фрезы) принимаем равным 8 мм.

$$\text{tg } \alpha = \frac{x}{b} = \frac{2,913}{8} = 0,36413$$

$$\alpha = 20^{\circ}00'30''.$$

7. Радиальное биение фрезы по наружному диаметру

Для определения радиального биения фрезы по наружному диаметру нужно наконечник индикатора привести в контакт с фрезой на наружной окружности в середине зуба; вращая фрезу в направлении, противоположном направлению резания, и одновременно перемещая фрезу по направлению оси на величину $\frac{l}{z}$, где l шаг по оси, а z — число канавок, определяют наибольшее отклонение в пределах одного оборота фрезы, затем по всей длине фрезы.

8. Измерение осевого и нормального шага

Измерение осевого шага фрезы по левой стороне при помощи оптического контактного приспособления производится установкой на максимум шарика наконечника на режущую кромку фрезы вращением маховичка b (рис. 3). Перемещением про-

дольной каретки при помощи микрометрического винта устанавливаем средний штрих центрального микроскопа в биссектор оптического контактного приспособления. Производим отсчет по шкале продольного микроскопа 4 и поперечного микроскопа 5. Затем, перемещая фрезу, подводим левую сторону следующего витка к шарiku оптического контактного приспособления и, установив вращением маховичка 6 максимум, перемещаем стол окончательно микрометрическим винтом 10 так, чтобы средний штрих центрального микроскопа расположился в биссекторе оптического контактного приспособления, и производим отсчет по микроскопу 4.

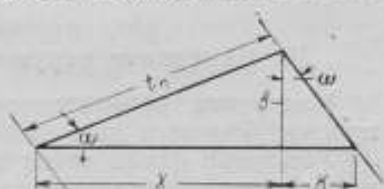


Рис. 8. Схема измерения осевого шага.

Разность отсчетов даст величину проекции шага по нормали на ось, т. е. в результате измерения мы получим катет x треугольника, изображенного на рис. 8. Отсюда имеем:

$$k = x \operatorname{tg}^2 \omega,$$

где ω — угол подъема канавки. Значение же осевого шага можно получить из расчета шага по оси:

$$t = x + x \operatorname{tg}^2 \omega = x(1 + \operatorname{tg}^2 \omega) = \frac{x}{\cos^2 \omega}.$$

Пример. $x = 90,327 - 74,655 = 15,672$ мм. Для вычисления осевого шага необходимо подставить полученные значения в вышеприведенную формулу:

$$t = 15,672(1 + 0,00434) = 15,740 \text{ мм.}$$

Измерение нормального шага производится так же, как и осевого шага, но значение нормального шага находится из расчета по формуле:

$$t_n = \frac{x}{\cos \omega} = \frac{15,672}{0,99784} = 15,705 \text{ мм.}$$

9. Измерение радиальности передней поверхности зуба

Измерение радиальности передней поверхности зуба фрезы в линейном значении производится вертикальным перемещением центрального микроскопа. Для этого необходимо, чтобы поверхность ножа и поверхность передней грани зуба при наблюдении в микроскоп были в одном фокусе. Затем производится отсчет по делительной бабке; поворачивая при помощи маховичка 6 (рис. 3) фрезу на 90° и закрепив делительную бабку в таком положении, производим измерение. Установив шарик наконечника приспособления на 1 мм от края головки зуба на передней поверхности, производим отсчет по продольному

микроскопу. Затем, перемещая наконечник через 1 мм каждый раз производим отсчеты. Разность первого и последнего отсчетов даст величину наибольшего отклонения на измеренной длине, разность отсчетов через 1 мм укажет отклонение в соответствующих точках.

10. Измерение окружного шага винтовых канавок

Измерение производится также при помощи описанного приспособления и делительной бабки.

Установка фрезы такая же, как и при измерении радиальности передней поверхности зуба.

Шарик оптического контактного приспособления устанавливается около ножки зуба так, чтобы во время вращения фрезы шарик не оказался в промежутке между зубьями. Производится отсчет по продольному микроскопу 4 (рис. 3) и отсчет по делительной бабке. Поперечным перемещением микроскопа совместно с оптическим контактным приспособлением средний штрих центрального микроскопа устанавливается в биссекторе приспособления и производится отсчет по микроскопу 5 (рис. 3). Затем продольным перемещением наконечник выводится из канавки, и фреза поворачивается маховичком 6 (рис. 3) на $360 : z$ (где z — число канавок); после этого наконечник вводится в следующую канавку на предыдущий отсчет по микроскопу 4, и средний штрих центрального микроскопа снова устанавли-

Таблица 1

Результаты измерения окружного шага винтовых канавок

Отсчет по делительной бабке в градусах	Отсчет по поперечному микроскопу в мм	Разность отсчетов в мм	Накопленная ошибка в мк	Наибольшая накопленная ошибка в мк
230	49,172	+ 79	+ 79	+ 193 - (-21) = 214
190	49,251	- 81	- 2	
150	49,170	+ 195	+ 193	
110	49,365	- 33	+ 160	
70	49,332	- 5	+ 155	
30	49,327	- 11	+ 144	
350	49,316	- 9	+ 135	
310	49,307	- 68	+ 67	
270	49,239	- 88	- 21	
230	49,151	-	-	

вается в биссектор; производится отсчет по микроскопу 5 и так по всем канавкам фрезы.

Результаты измерения окружного шага винтовых канавок приведены в табл. I.

11. Измерение толщины зуба

Измерение толщины зуба на заданном диаметре можно производить обычным проекционным методом с последующим пересчетом результатов измерения. Фреза, установленная в центре микроскопа, поворачивается вокруг оси до тех пор, пока кромка вершины зуба не расположится в плоскости осевого сечения; эта установка с достаточным приближением может быть выполнена с помощью измерительного ножа, который устанавливается на опорной площадке каретки микроскопа и наблюдается одновременно с кромкой вершины зуба (по одинаковой резкости кромки зуба и лезвия ножа определяется плоскость осевого сечения). Зафиксировав положение каретки микроскопа по вершине зуба, перемещают стол в поперечном направлении на заданное расстояние от диаметра выступов. В этом положении боковая кромка зуба фрезы несколько сместится с плоскости осевого сечения, тогда поворотом фрезы в центрах добиваются резкого изображения боковой кромки на том участке, который пересекается средним штрихом окулярной сетки. После этого производится измерение толщины зуба на заданном расстоянии от вершины его. В результате измерения таким методом мы получим значение проекции толщины зуба на осевую плоскость в нормальном сечении, толщина же зуба в сечении, нормальном к винтовой линии, определится из расчета по формуле:

$$S_n^r = \frac{S_{np}}{\cos \omega}.$$

12. Измерение конусности фрезы по наружному диаметру и по буртикам

Измерение производится по всей длине фрезы. Установив индикатор по наружному диаметру в нулевое положение при помощи делительной бабки, приводят фрезу во вращательное движение в направлении, обратном направлению резания. При этом одновременно перемещается стол с таким расчетом, чтобы с измерительным наконечником соприкасалась вершина каждого зуба фрезы в своей средней части. Разность показаний по шкале индикатора между начальной и конечной точками по всей длине фрезы даст значение конусности.

Измерение производится при помощи делительной бабки и индикатора, на направляющую трубку которого надевается наконечник.

13. Измерение торцевого биения

Во избежание лишних установок и перестроек прибора определение биения по торцам рекомендуется производить после определения биения по буртикам. Измерение производится с помощью индикатора со специальной насадкой с шариковым наконечником, который подводится к торцевой плоскости фрезы и передвигается далее до установки стрелки индикатора в нулевое положение.

Вращая фрезу с помощью делительной бабки, замечают наибольшее отклонение по шкале индикатора.

Измерение на универсальном микроскопе с индикатором облегчает работу (не так быстро устают глаза, не портится зрение), и сокращается время на измерение.

14. Измерение величины радиальной затыловки

Для измерения радиальной затыловки по наружной окружности шарик наконечника приводится в контакт с наружной окружностью на середине зуба. Индикатор устанавливается на нуль. Отсчет производится по продольному и поперечному микроскопам. Затем вращением маховичка *b* (рис. 3) фреза поворачивается на $3^{\circ}6'$, т. е. на $\frac{1}{100}$ оборота изделия. Стол микроскопа передвигается на величину, равную $\frac{t_n}{100}$. Каретка перемещается микрометрическим винтом до тех пор, пока ортотест снова не установится на нуль.

Производится отсчет по микроскопу *5*. Разность отсчетов показаний поперечного микроскопа при первом и втором отсчетах даст значение фактической величины радиальной затыловки в $\frac{1}{100}$ оборота фрезы.

15. Измерение радиального биения фрезы

Радиальное биение фрезы по наружному диаметру определяется при помощи индикатора и делительной бабки. Индикатор устанавливается в нулевое положение посередине головки зуба на наружном диаметре фрезы. Затем, переместив стол на величину $\frac{t_c}{z}$, вращают маховичок *b* (рис. 3) на $\frac{360^{\circ}}{z}$ и по ортотесту производится отсчет и т. д., до полного оборота фрезы.

16. Измерение угла подъема винтовой канавки фрезы

Устанавливаем вершину первого полного зуба фрезы и кромку ножа универсального микроскопа в одной плоскости путем фокусирования и производим отсчет по микроскопу *7* (рис. 2) делительной бабки *2*; в данном случае отсчет равен

160°15'. Повернув фрезу маховичком бабки 2 в направлении резания на 90°, производим отсчет, равный 250°15'. Снимаем верхний осветитель микроскопа и устанавливаем контактное приспособление 6 так, чтобы наконечник 7 прилегал к передней поверхности зуба на делительной окружности; перемещаем стол микроскопа и устанавливаем вначале грубо, а затем микрометрическим винтом 11 контактное приспособление в нулевое положение, как показано на рис. 4.

Производим отсчет по продольному микроскопу. Отсчет равен 126,324 мм.

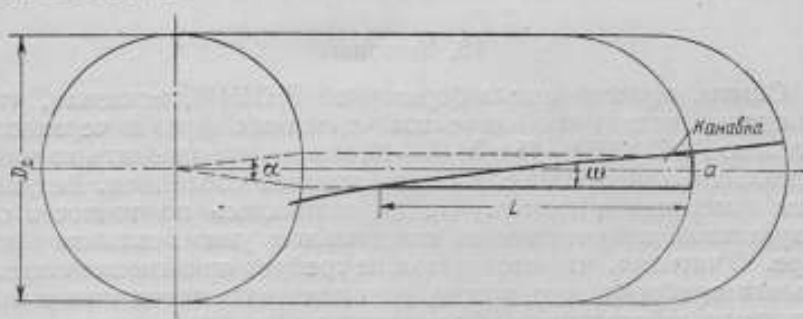


Рис. 9. Схема определения угла подъема винтовой канавки.

Вращая фрезу в обратном направлении, перемещаем стол до установки шарика наконечника контактного приспособления на середину пятого зуба по делительной окружности; затем, вращая фрезу в направлении резания, устанавливаем контактное приспособление в нулевое положение, как указано выше. Производим отсчеты: 243°57' по микроскопу делительной бабки и 62,324 мм — по продольному микроскопу.

Определяем угол ω подъема винтовой канавки (рис. 9) по формуле:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{\pi D_1 \alpha}{360^\circ L},$$

где D_1 — диаметр по делительной окружности, равный 76,2 мм (ГОСТ 3346—46);

α — угол поворота бабки, равный 250°15' — 243°57' = 6°18';

L — перемещение стола от первого до середины пятого зуба фрезы, равное 126,324 — 62,324 = 64 мм.

Производя подсчеты, получим $\operatorname{tg} \omega = 0,06542$, откуда $\omega = 3^\circ 45'$.

17. Измерение фрезы в нормальном сечении

Для измерения элементов фрезы в нормальном сечении как на универсальном микроскопе, так и на инструментальном рекомендуется сделать: 1) подъемный левый центр, 2) специальные наконечники с шариками на концах и 3) каленую оправку со шлифованными центрами.

Допустимое биение оправки не должно превышать 0,1 радиального биения фрезы по наружному диаметру. Оправка должна быть по длине в пределах шкалы (примерно 190 мм) для быстроты и удобства установки центров; если оправка более 200 мм, установка усложняется. Измерение производится в нормальном сечении, по которому производилось изготовление профиля фрезы. Подняв левый центр и сфокусировав по правому и левому профилю первый и последний зуб, производят затем измерение шага, профиля и угла теми же методами, как и при измерении в осевом сечении.

18. Выводы

Опыты, проведенные лабораторией ВНИИМ, показали, что измерение отдельных элементов червячных фрез и червяков, согласно ГОСТ 2973—45 и 3346—46, можно производить на универсальном микроскопе с контактным приспособлением. Результаты измерения в этом случае не отличались по точности от результатов, полученных на специальном универсальном приборе. Учитывая, что этот метод не требует применения специальных приборов, его можно рекомендовать заводским и поверочным лабораториям, большинство которых имеет универсальный микроскоп с приспособлениями.

Дальнейшее конструктивное совершенствование (отсчетное устройство для вертикального перемещения центрального микроскопа), которое вносится заводом-изготовителем в универсальный микроскоп, позволит расширить пределы измерения и ускорить процесс измерения червячных фрез и червяков.

Л. К. КАЯК

СОСТОЯНИЕ ЭТАЛОНОВ ДЛИНЫ

Точное приборостроение и машиностроение предполагают наличие высокоразвитой техники измерений. Многообразные научные исследования, ведущиеся во всех отраслях народного хозяйства страны, также предъявляют повышенные требования к технике измерений. Особенно возросли эти требования за последние годы — годы значительного прогресса отечественной промышленности.

В отношении линейных измерений эти требования относятся не только к расширению пределов измерений, но и к повышению их точности.

В качестве примера возрастающих требований промышленности можно указать на ряд работ лаборатории мер длины, выполненных в послевоенные годы. Например, одному из московских заводов станкостроения для успешного решения некоторых производственных задач оказалось необходимым иметь образцовые штриховые меры длиной в один метр, поверенные через каждый миллиметр шкалы с точностью, приближающейся к метрологической.

Выполнение возрастающих требований науки и промышленности не может быть обеспечено без соответствующего повышения точности передачи единицы длины от основного государственного эталона к образцовым и рабочим мерам, которая осуществляется посредством рабочих эталонов, сличаемых, с одной стороны, с основным государственным эталоном, а с другой стороны — с образцовыми и рабочими мерами. Для этого необходимо не только поддержание эталонов длины в должном состоянии, но и повышение точности их сличения.

Великая Отечественная война 1941—45 гг. нарушила годами установившийся во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии порядок сличения эталонов длины. Обстоятельства военного времени заставили не только вывезти из Ленинграда почти все эталоны длины, но демонтировать и частично вывезти компараторы. Регулярные сличения эталонов длины тем самым были прекращены.

Регулярные сличения эталонов длины лабораторией были возобновлены в 1945 г. За прошедшее время были произведены два раза сличения всей группы платино-иридиевых эталонов.

Сличения 1950 г. дали следующие значения разностей длин сличаемых эталонов при температуре 0°С:

$$\text{№ 11—№ 28} = -1,09 \text{ мк.}$$

Результаты сличений 1950 г. оказались весьма близкими к данным 1949 г. На основании сличений 1949 и 1950 гг. для вторичного эталона длины платино-иридиевого метра № 11 установлено уравнение:

$$\text{метр № 11} = 1 \text{ м} - 0,35 \text{ мк} + (8,621 \pm 0,00180) l \text{ мк.}$$

В табл. 1 приводятся результаты произведенных нами, а также и прежних сличений платино-иридиевых эталонов длины метров № 28 и 11.

Данные этой таблицы свидетельствуют о постоянстве в пределах точности компараторных измерений длины государственных эталонов метров № 28 и № 11.

Таблица 1

Год сличений	Разности длин эталонов при 0°С № 11—№ 28 в мк	Год сличений	Разности длин эталонов при 0°С № 11—№ 28 в мк
1889	-1,01	1946—1947	-1,31
1931	-0,98	1948	-1,07
1937—1938	-1,17	1949	-1,03
1939	-1,14	1950	-1,09

Таким образом, одно из главных условий организации современного производства машин и приборов на основе принципа взаимозаменяемости (постоянство единицы длины—метра) за время Отечественной войны выполнялось.

Л. К. КАЯК и А. Н. КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕРЕОКОМПАРАТОРА СКС-1 № 480002

В 1949 г. группа образцовых приборов лаборатории мер длины ВНИИМ пополнилась новым отечественным прибором — стереокомпаратором.

Стереокомпаратор предназначен для поверок шкал точных измерительных приборов, и поэтому до введения его в действие он был предварительно исследован.

Так как поверка стереокомпаратора по техническим условиям была произведена непосредственно после сборки прибора лабораторией самого завода, то мы ограничились только выполнением поверок, необходимых для аттестации прибора в качестве образцового.

При исследовании стереокомпаратора были выполнены следующие работы:

- 1) изучение шкал оптических микрометров правого и левого микроскопов стереокомпаратора;
- 2) изучение подразделений эталонной шкалы стереокомпаратора;
- 3) определение точности измерений на стереокомпараторе.

1. Описание стереокомпаратора

Стереокомпаратор СКС-1 представляет собой стереоскопический оптический прибор (рис. 1) для измерения шкал длиной до 200 мм.

Определение поправок подразделений шкал, т. е. отклонений их действительной длины от номинального значения, на стереокомпараторе производится сравнением с образцовой шкалой стереокомпаратора методом продольного компарирования.

Штрихи образцовой и поверяемой шкал, устанавливаемых соответственно над левым и правым микроскопами, рассматриваются наблюдателем в бинокулярную часть прибора одновременно обоими глазами, и наблюдатель в совмещенном поле зрения обоих микроскопов видит рельефное, стереоскопическое совмещенное изображение штрихов сравниваемых обеих шкал. Для получения лучшего стереоскопического эффекта в поле зрения как левого, так и правого микроскопов имеются три

пары стереоскопических марок, которые наблюдатель видит также совмещенными.

Если изображения нулевых штрихов образцовой и поверяемой шкал предварительно были установлены между марками левого и правого микроскопов и наблюдатель в бинокулярную часть прибора видит их совмещенное изображение в плоскости средней пары стереоскопических марок, то при наличии отклонений в длине интервалов между последующими соответственными штрихами обеих шкал изображения этих штрихов не будут совмещены и не будут совпадать с плоскостью средних

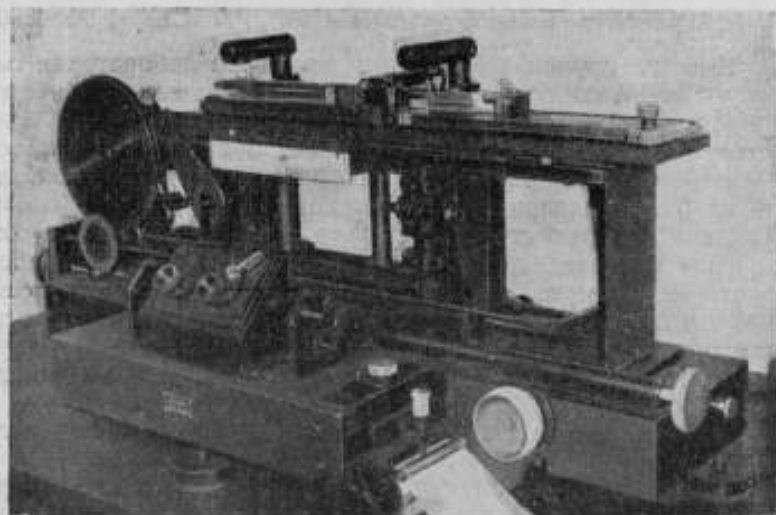


Рис. 1. Общий вид стереокомпаратора СКС-1.

стереоскопических марок. Наклоном плоскопараллельной пластинки микроскопа стереокомпаратора перемещают изображение одного из штрихов до тех пор, пока совмещенное изображение штрихов, перемещающееся по глубине, не совпадет с плоскостью средних марок. Угол наклона плоскопараллельной пластинки определяет величину погрешности положения поверяемого штриха. Численное значение этой погрешности определяется отсчетом по шкале оптического микрометра, которая видна в верхней части поля зрения (рис. 2). Одно деление оптического микрометра соответствует смещению штриха на $0,1 \text{ мк}$. Отсчеты по шкале производят, оценивая десятые доли делений шкалы на глаз до $0,01 \text{ мк}$. Точность измерений на стереокомпараторе достигается высокая, благодаря высокой чувствительности глаза к перемещению изображения штрихов по глубине и применению для измерений оптических микрометров. Способность глаза человека резко ощущать разницу

расстояний по глубине между точками изображений на сетине еще более усиливается наличием в ходе лучей каждого микроскопа специальных стереоскопических марок.

При измерении образцовая и поверяемые шкалы устанавливаются на столиках стереокомпаратора так, чтобы оси их лежали на одной прямой. Изображения начальных штрихов шкал устанавливаются между средними стереоскопическими марками и совмещаются с их плоскостью. При отсутствии отклонений между длинами соответствующих интервалов шкал совмещенные изображения всех последующих штрихов будут находиться все время в плоскости стереоскопических марок.

В случае неравенства поверяемых интервалов шкал изображения штрихов, как уже указывалось, будут расходиться, и для их совмещения с плоскостью средних марок необходимо будет пользоваться оптическими микрометрами.

Стереокомпаратор (рис. 1) состоит из следующих основных частей: 1) основания, 2) каретки с двумя столиками, 3) двух микроскопов с осветителями, 4) коррекционного и регистрирующего механизмов.

Дальше мы ограничимся только самым кратким описанием основных частей прибора.

Основание прибора представляет собой массивную металлическую площадку с закрепленной на ней жесткой станиной. В нижней части основания имеются три регулировочных подъемных винта, при помощи которых прибор устанавливается по круглому уровню в горизонтальное положение. В верхней части станины имеются точные направляющие, по которым перемещается каретка. Внутри корпуса прибора закреплены два его микроскопа.

Каретка прибора состоит из двух столиков, связанных собой инварной лентой. Поэтому расстояние между столиками при незначительных колебаниях температуры остается практически неизменным. Каретка перемещается по направляющим станины на шарикоподшипниках плавно, без заеданий и рывков, при помощи ленты и червячной передачи. Быстрое или медленное перемещение каретки производится при помощи специальных рукояток. При медленном перемещении

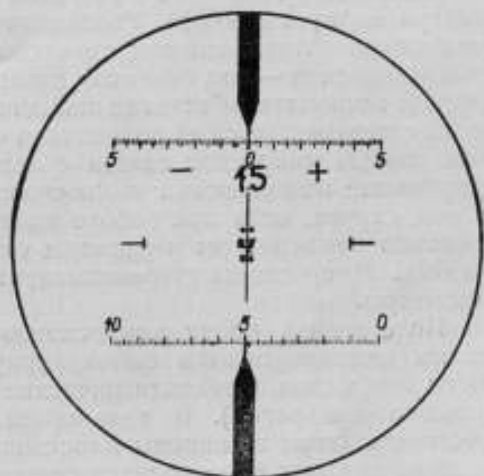


Рис. 2. Поле зрения микроскопов стереокомпаратора

каретки производится точная установка столиков над микроскопами прибора. Столики имеют посередине, по всей своей длине, прорези, в которые входят объективы микроскопов.

Левый столик каретки предназначается для установки на нем образцовой шкалы, а правый столик — для установки поверяемой шкалы. Каждый из столиков имеет регулировочные устройства для установки шкал по фокусу, по азимуту и по длине. Столики имеют также приспособления для закрепления шкал и по одному термометру, смонтированному в тело столика.

Микроскопы стереокомпаратора установлены внутри корпуса прибора. Увеличение микроскопов $119\times$. Левый микроскоп установлен под столиком образцовой шкалы, а правый микроскоп — под столиком поверяемой шкалы. Левый микроскоп закреплен на станине неподвижно, а правый микроскоп может перемещаться на роликах по особой направляющей. Так как правый микроскоп связан с левым инварными тягами, то расстояние между осями микроскопов остается неизменным и в том случае, если при работе произошли незначительные изменения температуры и размеры самой станины прибора изменились. Микроскопы стереокомпаратора имеют оптические микрометры.

Поле зрения обоих микроскопов рассматривается наблюдателем одновременно в бинокулярную часть прибора. Объективы микроскопов телецентрические (в заднем фокусе их установлена диафрагма). В ходе лучей каждого микроскопа стереокомпаратора помещены плоскопараллельные пластинки, наклоном которых производится смещение изображений штрихов. Правый микроскоп имеет одну такую пластинку. Левый микроскоп имеет две пластинки. Одна из пластинок левого микроскопа служит для исключения погрешностей образцовой шкалы стереокомпаратора. Это достигается автоматически наклоном пластинки при помощи рычага, штифт которого скользит по коррекционному диску. Соответствующий отсчет производится по нижней шкале поля зрения (рис. 2). Вторая пластинка, наклон которой также перемещает изображение штрихов образцовой шкалы, предназначена для установки нулевого положения, т. е. совмещения изображения начального штриха с плоскостью средних стереоскопических марок. Эта пластинка может быть использована и для измерения отклонений между штрихами. Величина измеряемого отклонения определяется отсчетом по круговой шкале, нанесенной на черном диске. Эта шкала видна в левой части прибора.

В правом микроскопе плоскопараллельная пластинка, наклон которой вызывает перемещение изображения штриха поверяемой шкалы, служит для измерения величины отклонения поверяемого интервала шкалы (между начальным штрихом и наблюдаемым штрихом) от соответствующего интервала образцовой шкалы. Пределы измерения при помощи этого оптиче-

ского микрометра ± 5 мк. Отсчеты производятся по шкале, которая находится в микроскопе и наклоняется вместе с плоскопараллельной пластинкой. Шкала видна вверху поля зрения.

Наклоны плоскопараллельных пластинок оптических микрометров микроскопов осуществляются при помощи специальных передач (конические шестерни, шкивы и струна в правом микроскопе; шестерни и червячная передача — в левом).

На стереокомпараторе могут поверяться не только стеклянные шкалы, но и шкалы, нанесенные на металлической поверхности.

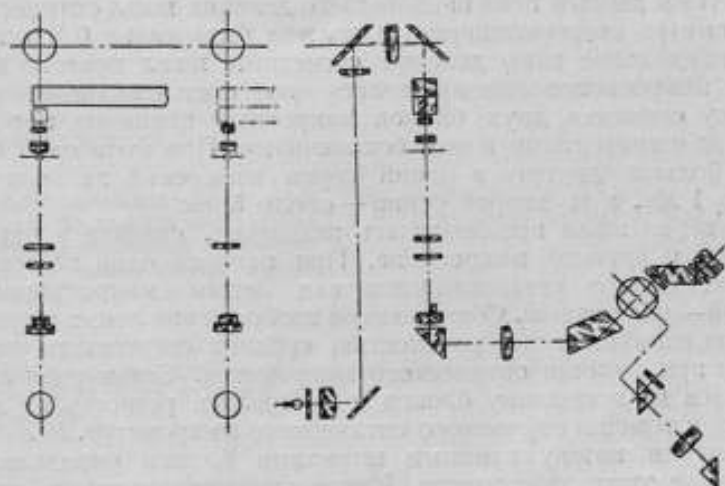


Рис. 3. Оптическая схема стереокомпаратора СКС-1.

Для этого предусмотрена возможность наблюдения штрихов шкал как в проходящем, так и в отраженном свете. На рис. 3 показана оптическая схема микроскопов и осветителя при работе в проходящем свете.

Коррекционный механизм стереокомпаратора дает возможность автоматически вводить поправки на погрешности образцовой шкалы. Он состоит из коррекционного диска, по которому скользит штифт рычага наклона плоскопараллельной пластинки левого микроскопа.

При работе с отключенным коррекционным диском в результате измерения должны вводиться поправки исходной шкалы. Регистрирующий механизм установлен на основании прибора с правой стороны и состоит из двух барабанов (наматывающего и сматывающего), на которые наматывается бумажная лента.

Барабаны связаны с валиком механизма перемещения каретки прибора и поэтому перемещение бумажной ленты строго согласовано с движением шкалы.

Над барабанами перемещается связанная с механизмом измерительной рукоятки игла. Наблюдатель, совместив изображение штрихов с плоскостью средних марок, прокалывает бумажную ленту нажатием на головку с иглой.

2. Исследование оптических микрометров микроскопов стереокомпаратора

Основной задачей при исследовании оптических микрометров как у левого, так и у правого микроскопов было определение действительного значения цены делений отсчетных шкал. По расчетным данным цена наименьшего деления шкал оптического микрометра стереокомпаратора должна быть равна $0,1 \text{ мк}$.

Определение цены деления отсчетных шкал правого и левого микроскопов производилось по предложенному нами методу сличения двух блоков микронных концевых мер 1-го разряда с притертыми к ним боковичками. При этом один блок был больше другого в одной серии измерений на величину около 1 мк , а во второй серии — около 5 мк .

Проверка шкал производилась раздельно, сначала у одного, а затем у другого микроскопа. При проверке один из сравниваемых блоков устанавливался над левым микроскопом, а второй — над правым. Совмещенное изображение левых штрихов блоков совмещалось с плоскостью средних стереоскопических марок при помощи оптического микрометра. Затем стол перемещался на всю длину блоков и измерялась разность их длин уже при помощи изучаемого оптического микрометра. Величина отклонения между правыми штрихами блоков определялась по шкале этого микрометра. Измерения производились двумя наблюдателями по 8—12 приемов каждым наблюдателем. Разности длин блоков измерялись при двух притирках, причем повторные измерения производились на разных участках поверяемой шкалы, для чего перед установкой изображений левых штрихов блоков в плоскости стереоскопических марок исследуемый микрометр устанавливается не в нулевое положение, а на различных отсчетах шкал.

В табл. 1 приводятся результаты определения цены деления оптических микрометров.

В результате произведенных измерений были получены следующие средние значения цены деления отсчетных шкал оптических микрометров стереокомпаратора № 480002:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Для левого микроскопа} \\ \text{(шкала черного диска)} \quad \delta_1 = 0,0884 \text{ мк} \\ \\ \text{Для правого микроскопа} \\ \text{(шкала в поле зрения} \\ \text{правого окуляра)} \quad \delta_2 = 0,0924 \text{ мк} \end{array} \right\} \quad (1)$$

Таблица 1

Вывод средних значений цены деления шкал оптических микрометров

Метод определения цены деления	Левый микроскоп			Правый микроскоп		
	Измеренная на стереокомпараторе длина в делениях шкалы	Действительная длина в мк	Значение цены деления в мк	Измеренная на стереокомпараторе длина в делениях шкалы	Действительная длина в мк	Значение цены деления в мк
Действительная длина получена по данным интерференционных измерений	58,5	5,008	0,0856	53,9	5,008	0,0929
Действительная длина определена по данным интерференционных измерений и измерений на однометровом компараторе	60,3 10,0	4,90 0,95	0,0812 0,0950	54,9 10,0	4,90 0,95	0,0892 0,0950
По разностям длин подразделений рабочих эталонов дециметров	—	—	0,0918	—	—	—
Среднее . .	—	—	0,0884	—	—	0,0924

Таким образом, нами были обнаружены значительные отклонения действительной цены деления отсчетных шкал от их номинального значения 0,1 мк. При сличении шкал, разности длин соответственных интервалов которых малы, погрешности, вызываемые этим, будут незначительны, но при измерении значительных разностей длин порядка 1 мк и более учет значений (1) совершенно обязателен.

3. Изучение подразделений эталонной шкалы стереокомпаратора

Измерение на стереокомпараторе производится методом продольного компарирования путем сравнения интервалов поверяемой шкалы с соответствующими интервалами образцовой шкалы, являющейся исходной мерой при измерении на стереокомпараторе. Точность результатов измерений на стереокомпараторе в значительной мере определяется точностью его эталонной шкалы.

Поэтому эталонная шкала стереокомпаратора ВНИИМ, предназначенного в качестве прибора для поверки образцовых шкал, должна быть поверена с наиболее высокой степенью точности. Поправки этой шкалы должны быть определены с той же степенью точности, что и подразделения рабочих эталонов, так как согласно поверочной схеме образцовые шкалы должны поверяться сличением с рабочими эталонами длины. Эту шкалу, в отличие от других образцовых шкал, мы называем эталонной шкалой.

Известно, что рабочие эталоны дециметра изучены через каждый миллиметр своей шкалы только в интервале 0—10 мм (первый сантиметр). В противоположность этому исходная шкала стереокомпаратора должна быть изучена через каждый миллиметр шкалы по всей своей длине. Необходимость этого вызывается как самим процессом измерений на стереокомпараторе, так и значительным ускорением последующих поверочных работ на стереокомпараторе.

В качестве эталонной шкалы стереокомпаратора СКС-1 № 480002 была выбрана двухсотмиллиметровая шкала № 18776, изготовленная из оптического стекла (сорт F 7) фирмой Цейсс. Эта шкала имеет следующие габаритные размеры: длина 216 мм, ширина 16 мм, толщина 11 мм.

Нижняя плоскость шкалы матовая. Температурный коэффициент удлинения шкалы № 18776 по данным завода принимался равным $10,19 \cdot 10^{-6}$.

Шкала № 18776 имеет покровное стекло толщиной 11 мм.

На столе стереокомпаратора шкала устанавливается так, чтобы штрихи ее рассматривались через толщу покровного стекла.

Шкала № 18776 имела аттестат фирмы Цейсс, и коррекционный диск стереокомпаратора № 480002 для шкалы № 18776 был изготовлен по данным этого аттестата.

Мы считали необходимым изучить подразделения эталонной шкалы стереокомпаратора, исходя из рабочих эталонов длины, не принимая во внимание данных, по сути дела, случайного аттестата Цейсса, тем более, что значения поправок фирмой Цейсса даны с погрешностью ± 1 мк.

Работа по изучению шкалы № 18776 поэтому состояла из двух этапов:

1) сличение шкалы № 18776 с рабочими эталонами-дециметрами $D 76$, $D 36$ и $D 40$;

2) калибровка миллиметровых подразделений шкалы № 18776.

4. Результаты сличения эталонной шкалы № 18776 с рабочими эталонами длины дециметрами $D 36$, $D 76$ и $D 40$

Сличение шкалы № 18776 с рабочими эталонами-дециметрами $D 40$, $D 36$ и $D 76$ производилось как на стереокомпараторе, так и на однометровом универсальном компараторе.

С рабочими эталонами были сличены все сантиметровые подразделения шкалы, а также миллиметровые подразделения первого и одиннадцатого ее сантиметров.

Общая длина интервалов 0—100 мм и 100—200 мм шкалы № 18776 была сличена, кроме того, со стомиллиметровой плоскопараллельной концевой мерой, измеренной абсолютным интерференционным методом. Это сличение производилось компараторным методом „боковичков“ на линейной измерительной машине, которая использовалась как продольный компаратор.

При сличении шкалы № 18776 с дециметрами на стереокомпараторе штрихи шкалы рассматривались через толщу покровного стекла в проходящем свете, а штрихи дециметров — через стеклянный кубик, установленный над объективом микроскопа, в отраженном свете.

Таблица 2

Сводная таблица результатов сличения шкалы № 18776 с рабочими эталонами дециметра

Поверх- ные интервалы в мм	Поправки подразделений шкалы № 18776, полученные при сличении шкалы на СКС-1, в мк			Поправки подразделений шкалы № 18776, полу- ченные при сличении шкалы на одномерной универсальной компара- торе, в мк		Поправки шка- лы № 18776, по- лученные при сличении шкалы с дециметрами на СКС-1 и одномер- ным универ- сальном компа- раторе
	D 26	D 40	D 76	D 36	D 40	
0—1	-0,22	+0,46	+0,04	—	—	+0,14
0—2	-0,29	-0,38	-0,11	—	—	-0,05
0—3	-0,17	+0,32	-0,21	—	—	-0,02
0—4	-0,24	+0,17	-0,21	—	—	+0,11
0—5	-0,02	-0,07	-0,29	—	—	-0,19
0—6	-0,17	-0,25	-0,03	—	—	-0,10
0—7	-0,01	+0,22	+0,03	—	—	+0,05
0—8	-0,05	+0,07	+0,14	—	—	+0,09
0—9	+0,42	-0,06	+0,36	—	—	+0,29
0—10	+0,16	+0,26	-0,06	+0,22	-0,28	+0,02
0—20	+0,74	+0,11	+0,37	+0,28	+0,09	+0,33
0—30	+0,24	+0,05	+0,57	-0,07	+0,41	+0,38
0—40	+0,78	+0,26	+0,95	+0,45	+0,70	+0,72
0—50	+0,98	+0,62	+0,55	+0,10	+0,84	+0,53
0—60	+1,01	+0,30	+1,21	+0,56	+0,97	+0,92
0—70	+1,09	+0,18	+0,97	+0,95	+0,77	+0,84
0—80	+0,83	-0,39	+0,49	-0,69	+0,73	+0,47
0—90	+0,81	-0,17	+1,19	+1,02	+0,92	+0,88
0—100	+0,45	+0,09	—	+0,82	+1,13	+0,62

Таблица 3
Сводная таблица результатов сличения интервала (100—200) мм шкалы № 18776 с рабочими эталонами дециметра

Поверхность интервала в мм	Поправки шкалы, полученные при сличении ее с дециметром на компараторе, в мк		Поправки шкалы, полученные при сличении ее с дециметрами на стереокомпараторе, в мк		Поправки шкалы, полученные при сличении общей длины шкалы с дециметром на компараторе, в мк			Поправки шкалы № 18776, в мк	
	D 36	D 40	D 36	D 40	D 36	D 40	D 60		D 76
100—110	-0,69	-0,98	-	-	-	-	-	-	-0,83
100—120	-0,23	-0,41	-	-	-	-	-	-	-0,32
100—130	+0,29	+0,40	-	-	-	-	-	-	+0,34
100—140	+0,38	+0,15	-	-	-	-	-	-	+0,25
100—170	-0,05	+0,36	-	-	-	-	-	-	+0,16
100—160	-0,09	+0,28	-	-	-	-	-	-	+0,09
100—170	-0,05	-0,05	-	-	-	-	-	-	-0,05
100—180	-0,14	+0,03	-	-	-	-	-	-	-0,06
100—190	-0,15	+0,37	-	-	-	-	-	-	+0,11
100—200	-0,25	-0,01	-0,36	-0,44	-0,53	-0,02	-0,31	-0,72	-0,30

Средняя квадратичная погрешность значения поправки общей длины равна $S = \pm 0,015$ мк.
Средняя квадратичная погрешность значений поправки подразделений равна $S = \pm 0,14$ мк.

Так как ширина штрихов у шкалы № 18776 заметно больше, чем у эталонов дециметра, то совмещение изображений штрихов оказалось затруднительным, и точность полученных результатов вследствие этого снижалась. В последующем, при окончательном выводе значений поправок шкалы № 18776, это учитывалось введением соответствующего веса.

Температура измерялась до начала и после окончания приема измерений по двум термометрам, закрепленным на столе стереокомпаратора.

Сличение подразделений шкалы № 18776 с рабочими эталонами дециметра на однометровом универсальном компараторе производилось также методом продольного компарирования. Для этого малая ванна компаратора была снята и на ее место был установлен стол для продольного компарирования. Сличаемые шкалы и дециметры устанавливались на этом столе на подставки, имеющие приспособления для фокусировки мер. Для того чтобы улучшить освещенность штрихов шкалы, под шкалу подкладывалось зеркало. В дальнейшем с той же целью была изготовлена специальная подставка, и штрихи шкалы рассматривались в проходящем свете. Температура во время сличений измерялась при помощи дифференциальных термометров, зажимы которых были закреплены на столе продольного компаратора.

Окончательные значения поправок подразделений шкалы № 18776 по результатам ее сличений с рабочими эталонами-дециметрами $D 36$, $D 40$ и $D 76$ на стереокомпараторе и универсальном компараторе были вычислены как среднее взвешенное. Результаты вычисления приводятся в сводных табл. 2 и 3.

5. Калибровка шкалы № 18776

Для калибровки шкалы № 18776 из большого числа различных методов нами был выбран метод калибровки с вспомогательной шкалой. Этот метод дает наиболее точные результаты и наряду с довольно простыми приемами обработки результатов калибровки позволяет оценить погрешности результатов наблюдений. Интервалы шкалы между штрихами, для которых при калибровке определяются поправки, называются главными промежутками.

В принятом нами методе калибровки производится сравнение главных промежутков изучаемой шкалы со всеми интервалами вспомогательной шкалы, содержащими целое число главных промежутков. При этом способе калибровки определяются поправки не только главных промежутков изучаемой шкалы, но и поправки сравнивавшихся с ними интервалов вспомогательной шкалы.

Так как измерения на стереокомпараторе могут быть произведены с большой точностью и с меньшей затратой времени,

Таблица 4

Программа наблюдения при калибровке

Серия наблюдений	Сличаемые интервалы		Серия наблюдений	Сличаемые интервалы			
	Шкала № 490495	Шкала № 18776		Шкала № 490495	Шкала № 18776		
I	0-1	0-1	V	4-5	0-1		
	0-2	0-2		4-6	0-2		
	0-3	0-3		4-7	0-3		
	0-4	0-4		4-8	0-4		
	0-5	0-5		4-9	0-5		
	0-6	0-6		4-10	0-6		
	0-7	0-7					
	0-8	0-8					
	0-9	0-9					
	0-10	0-10					
II	1-2	0-1	VI	5-6	0-1		
	1-3	0-2		5-7	0-2		
	1-4	0-3		5-8	0-3		
	1-5	0-4		5-9	0-4		
	1-6	0-5		5-10	0-5		
	1-7	0-6					
	1-8	0-7					
	1-9	0-8					
	1-10	0-9					
	III	2-3		0-1	VII	6-7	0-1
2-4		0-2	6-8	0-2			
2-5		0-3	6-9	0-3			
2-6		0-4	6-10	0-4			
2-7		0-5					
2-8		0-6					
2-9		0-7					
2-10		0-8					
IV		3-4	0-1	VIII		7-8	0-1
		3-5	0-2			7-9	0-2
	3-6	0-3	7-10		0-3		
	3-7	0-4					
	3-8	0-5					
	3-9	0-6					
	3-10	0-7					
					IX	8-9	0-1
						8-10	0-2
		X	9-10	0-1			

то решено было все измерения при калибровке шкалы № 18776 провести на самом стереокомпараторе. Для этого пришлось несколько видоизменить как самый метод калибровки, так и программу наблюдений.

Так как микроскопы стереокомпаратора неподвижны, то при калибровке мы имели возможность перемещать только изучаемую шкалу. Но поскольку шкала № 18776 имеет длину

где $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{11}$ — неизвестные поправки положения штрихов измеряемой шкалы, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ — неизвестные поправки интервалов вспомогательной шкалы, $a_1, a_2, a_3, \dots, a_{10}, b_1, b_2, \dots, b_{10}, k_1, k_2$ и l_1 — свободные члены начальных уравнений, известные нам из результатов измерений, полученных при сличении соответствующих интервалов шкал.

Система уравнений (2) содержит в себе 11 неизвестных поправок штрихов главных промежутков изучаемой шкалы и 10 неизвестных поправок интервалов вспомогательной шкалы, а всего, таким образом, 21 неизвестную величину.

Обычно принимают погрешность нулевого штриха изучаемой шкалы $x_0 = 0$. Поправка же общей длины вспомогательной шкалы λ_{10} должна быть известна из предварительных сличений. Общее число неизвестных поэтому сокращается до 19.

Используя все 55 составленных при калибровке начальных уравнений для определения только 19 неизвестных, мы повысили точность определения неизвестных, хотя свободные члены начальных уравнений, являющиеся результатом измерений, и содержат в себе погрешности.

Решение системы начальных уравнений (2) производилось по способу наименьших квадратов в специальных вычислительных схемах.

Всего нами было проведено три калибровки сантиметровых подразделений. Между отдельными калибровками производилась заново установка и регулировка обеих шкал. Между первой и второй калибровками шкалы переставлялись с одного столика на другой.

Средняя квадратичная погрешность начальных уравнений вычисляется по формуле:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-m}},$$

где v — остаточные погрешности начальных уравнений;
 n — число начальных уравнений;
 m — число неизвестных.

Остаточные погрешности начальных уравнений определялись, как разности между их свободными членами, полученными из измерений и вычисленными по начальным уравнениям после подстановки в них найденных при калибровке значений неизвестных.

Средняя квадратичная погрешность начальных уравнений оказалась равной:

$$\begin{aligned} 1\text{-я калибровка } \sigma &= \pm 0,075 \text{ мк} \\ 2\text{-я калибровка } \sigma &= \pm 0,081 \text{ мк} \\ 3\text{-я калибровка } \sigma &= \pm 0,070 \text{ мк} \end{aligned}$$

Средняя квадратичная погрешность начальных уравнений при калибровке миллиметровых подразделений в среднем равна $\sigma = \pm 0,08 \text{ мк}$.

Для дальнейших вычислений мы принимали значение средней квадратичной погрешности начальных уравнений калибровки как миллиметровых, так и сантиметровых подразделений шкалы равным $\sigma = \pm 0,08$ *мк*.

Средние квадратичные погрешности найденных при калибровке значений неизвестных вычислялись по формуле (3)

$$S_{\lambda_i} = \sigma_i Q_i, \quad (3)$$

где Q_i — коэффициенты, обратно пропорциональные корню квадратному из веса P_{λ} неизвестного.

Так как значения неизвестных при решении нормальных уравнений определяются различным весом, то и коэффициенты для этих неизвестных будут неодинаковы. Эти коэффициенты равны:

$$\left. \begin{array}{ll} Q_{\lambda_1} = 0,763 & Q_{\lambda_6} = 0,412 \\ Q_{\lambda_2} = 0,652 & Q_{\lambda_7} = 0,371 \\ Q_{\lambda_3} = 0,577 & Q_{\lambda_8} = 0,339 \\ Q_{\lambda_4} = 0,519 & Q_{\lambda_9} = 0,316 \\ Q_{\lambda_5} = 0,463 & \end{array} \right\} \quad (4)$$

Соответственно этому средние квадратичные погрешности S определения неизвестных λ для шкалы № 18776 будут равны:

$$\left. \begin{array}{ll} S_{\lambda_1} = \pm 0,06 \text{ мк} & S_{\lambda_6} = \pm 0,03 \text{ мк} \\ S_{\lambda_2} = \pm 0,05 \text{ мк} & S_{\lambda_7} = \pm 0,03 \text{ мк} \\ S_{\lambda_3} = \pm 0,05 \text{ мк} & S_{\lambda_8} = \pm 0,03 \text{ мк} \\ S_{\lambda_4} = \pm 0,04 \text{ мк} & S_{\lambda_9} = \pm 0,03 \text{ мк} \\ S_{\lambda_5} = \pm 0,04 \text{ мк} & \end{array} \right\} \quad (5)$$

Таковы погрешности калибровки подразделений шкал. Полная же средняя квадратичная погрешность определенных калибровкой поправок шкалы № 18776 вычислялась по эмпирической формуле (6):

$$S = \pm (a + b \cdot 10^{-6}L), \quad (6)$$

где a — погрешность калибровки, а b — коэффициент, зависящий от погрешности определения исходной для калибровки общей длины шкалы. (Проф. Баринов В. А., Современное состояние эталонов длины и методы точного измерения длины, ВНИИМ, 1941.)

Принятая нами в качестве исходной действительная длина интервала 100—200 *мм* шкалы № 18776 была определена со средней квадратичной погрешностью $\pm 0,08$ *мк*.

Приняв по данным (5) среднюю квадратичную погрешность калибровки в среднем равной $\pm 0,04$ *мк*, формулу (6) напомним в виде

$$S = \pm (0,04 + 0,04 \cdot 10^{-6}L) \text{ мк}.$$

Таким образом, средняя квадратичная погрешность определения поправок сантиметровых подразделений при калибровке шкалы № 18776 будет равна $\pm 0,06$ мк.

Средняя квадратичная погрешность поправок сантиметровых подразделений шкалы № 18776, определенных как среднее из результатов трех калибровок, будет в $\sqrt{3}$ раза меньше и будет равна $S_{см} = \pm 0,03$ мк.

Средняя квадратичная погрешность поправок миллиметровых подразделений, определенных по результатам однократной калибровки и вычисленных относительно начального штриха шкалы с учетом поправки предыдущего сантиметрового подразделения, вычислялась по формуле:

$$S_{мм} = \sqrt{S_{см}^2 + S_{калибр}^2} = \pm 0,05 \text{ мк.}$$

Таблица 5

Сводная таблица результатов, полученных при изучении подразделений шкалы № 18776 для интервала 0—100 мм

Интервалы шкалы в мм	Поправки шкалы № 18776, полученные в результате ее сличения с дециметрами на стереокомпараторе и компараторе, в мк	Поправки шкалы № 18776, полученные в результате сличения ее со стоимиллиметровой шкалой на стереокомпараторе, в мк	Поправки шкалы № 18776, полученные в результате сличения ее со стоимиллиметровой мерой, с боковичками на измерительной машине, в мк	Поправки шкалы № 18776 в мк
0—1	+0,14	-0,26	—	-0,13
0—2	-0,05	-0,44	—	-0,31
0—3	-0,03	-0,31	—	-0,22
0—4	+0,11	-0,32	—	-0,18
0—5	-0,19	-0,32	—	-0,28
0—6	-0,16	-0,41	—	-0,31
0—7	+0,06	-0,18	—	-0,10
0—8	+0,09	0,00	—	+0,03
0—9	+0,29	-0,01	—	+0,09
0—10	+0,02	-0,02	—	-0,01
0—20	+0,33	+0,12	—	+0,19
0—30	+0,38	+0,20	—	+0,26
0—40	+0,72	+0,50	—	+0,53
0—50	+0,53	+0,30	—	+0,38
0—60	+0,92	+0,43	—	+0,59
0—70	+0,84	+0,62	—	+0,69
0—80	+0,47	+0,38	—	+0,41
0—90	+0,88	+0,66	—	+0,73
0—100	+0,62	+0,76	+0,51	+0,70

Так как при калибровке нами были определены поправки подразделений шкалы № 18776 только для ее интервала 100 — 200 мм, то для определения поправок подразделений первой половины шкалы было проведено сличение подразделений интервала 0 — 100 мм шкалы № 18776 со стомиллиметровой шкалой, поправки которой известны из калибровки. Сличение производилось на стереокомпараторе двумя наблюдателями, двенадцатью приемами.

Окончательные значения поправок подразделений шкалы № 18776 были получены как среднее взвешенное из результатов сличения ее с рабочими эталонами-дециметрами *D* 76, *D* 36 и *D* 40 и из результатов калибровки и результатов сличения ее со стомиллиметровой шкалой.

В сводных табл. 5 и 6 приводятся эти окончательные результаты только для сантиметровых подразделений.

Средние квадратичные погрешности приведенных в табл. 5 и 6 значений поправок шкалы определяются величиной порядка $\pm 0,04$ мк. Предельные погрешности полученных нами при изучении эталонной шкалы № 18776 результатов не превышают величины $\pm 0,15$ мк.

Таблица 6

Сводная таблица результатов, полученных при изучении интервала 100 — 200 мм шкалы № 18776

Поверяемые интервалы в мм	Поправки шкалы № 18776, полученные сличением с рабочими эталонными дециметрами и концевой мерой на компараторе СКК-1 и измерительной машине в мк	Поправки шкалы № 18776, полученные в результате калибровки на стереокомпараторе, в мк	Поправки подразделений шкалы в мк	Поправки подразделений шкалы относительно нулевого штриха в мк
100—110	-0,33	-0,43	-0,48	+0,22
100—120	-0,32	-0,07	-0,10	+0,60
100—130	+0,34	+0,13	+0,15	+0,85
100—140	+0,26	-0,02	+0,01	+0,71
100—150	+0,16	-0,14	-0,11	+0,59
100—160	+0,09	+0,06	+0,06	+0,76
100—170	-0,05	+0,01	0,00	+0,70
100—180	-0,06	-0,14	-0,12	+0,57
100—190	+0,11	-0,01	0,00	+0,70
100—200	-0,30	-0,23	-0,26	+0,44

Полученные нами значения поправок для шкалы № 18776 значительно отличаются от данных аттестата Цейсса.

На рис. 4 показаны кривые поправок шкалы № 18776 по данным ВНИИМ и фирмы Цейсс.

Явно систематический характер обнаруженных расхождений между этими кривыми поправок, по нашему мнению, может быть объяснен прежде всего изменением длины стеклянных шкал. В некоторой мере эти расхождения могут быть объяснены и наличием расхождений между исходными данными ВНИИМ и Цейсс.

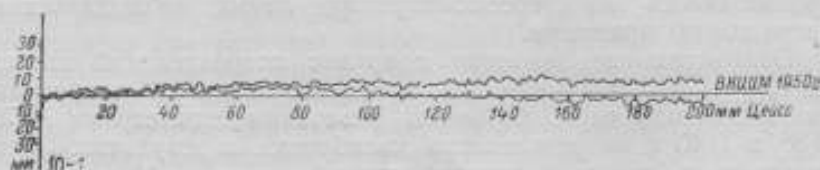


Рис. 4. График поправок эталонной шкалы № 18776 стереокомпаратора СКС-1 № 480002.

Наконец, только в самой малой степени, о чем говорит и сходство кривых поправок, эти расхождения могут быть объяснены погрешностями измерений.

6. Оценка точности измерения на стереокомпараторе СКС-1 № 480002

Для оценки точности результатов измерений на стереокомпараторе нами было использовано не только весьма обширное число произведенных уже на стереокомпараторе измерений, но и некоторые дополнительные исследования.

Основными источниками погрешностей при измерении на стереокомпараторе являются погрешности определения поправок эталонной шкалы стереокомпаратора, погрешности совмещения изображений штрихов со стереоскопическими марками, погрешности температурные, погрешности установки шкал и погрешности, вызываемые различием оптических систем правого и левого микроскопов. Если первые два вида погрешностей являются погрешностями случайного характера, то другие два источника вызывают погрешности систематического характера.

Для определения погрешности совмещения изображений штрихов были произведены многократные наблюдения несколькими наблюдателями с помощью как правого, так и левого компенсаторов. Так как точность совмещения штрихов зависит от того, насколько одинаковы наблюдаемые штрихи по своей ширине, то наблюдения производились для различных пар штрихов.

В табл. 7 приводятся результаты вычисления средней квадратичной погрешности совмещения изображений штрихов со стереоскопическими марками для десяти рядов многократных совмещений различных пар наблюдаемых штрихов.

Погрешность совмещения штрихов зависит, таким образом, от ширины и качества сличаемых штрихов. При сличении штри-

Таблица 7

Средние квадратичные погрешности совмещения изображений штрихов со стереоскопическими марками

Средняя квадратичная погрешность совмещения штрихов в мк	Сличение двух стеклянных шкал со штрихами шириной 5-6 мк	Сличение двух металлических шкал со штрихами толщиной 3-4 мк	Сличение стеклянной шкалы с металлической шириной штрихов 6 и 3 мк
$\sigma_{\text{мин}}$	$\pm 0,03$	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$
$\sigma_{\text{ср}}$	$\pm 0,06$	$\pm 0,08$	$\pm 0,18$
$\sigma_{\text{макс}}$	$\pm 0,10$	$\pm 0,13$	$\pm 0,35$

хов различной ширины эта погрешность значительно возрастает.

Результаты измерений на стереокомпараторе должны быть одинаковы независимо от того, каким микрометром мы пользовались при измерении. Однозначность показаний оптических микрометров правого и левого микроскопов была проверена сличением двух шкал двумя сериями приемов. В первой серии приемов мы пользовались правым оптическим микрометром, а во второй серии — левым.

В табл. 8 приведены результаты измерения разности двух интервалов обоими оптическими микрометрами. Расхождения между результатами наблюдений не исключаются учетом соответствующих значений цены деления шкал оптических микрометров.

Таблица 8

Результаты измерения разности двух интервалов обоими микрометрами

№ приема	Левый оптический микрометр		Правый оптический микрометр	
	Результаты измерения разности двух интервалов на СКС-1 3-мк наблюдателями		Результаты измерения разности двух интервалов на СКС-1 3-мк наблюдателями	
	в делениях шкалы	в мк	в делениях шкалы	в мк
1	-6,28	-5,55	-5,59	-5,17
2	-6,03	-5,33	-5,60	-5,17
3	-6,23	-5,51	-5,46	-5,05
4	-6,20	-5,48	-5,51	-5,09
5	-6,23	-5,51	-5,54	-5,12
6	-6,18	-5,46	-5,53	-5,11
	Среднее . .	-5,47	-	-5,12

При описании стереокомпаратора уже говорилось, что над левым микроскопом должна устанавливаться исходная мера, т. е. образцовая шкала стереокомпаратора, а над правым — поверяемая. В этом случае поправки поверяемой шкалы определяются соответствующими отсчетами по шкале одного из оптических микрометров с их знаками.

При перемене местами поверяемой и исходной шкал мы должны бы получить те же значения погрешностей, но уже с обратными знаками. Совпадение результатов измерений по абсолютной величине так же, как и совпадение результатов измерений правым и левым микрометрами будет свидетельствовать об отсутствии значительных, влияющих на точность измерений расхождений оптических систем правого и левого микроскопов.

В табл. 9 приводятся результаты сличений стеклянной шкалы с дециметром $D 36$, полученные сначала при одном положении поверяемой и исходной шкал, а затем после перемены шкал местами.

Расхождения между результатами измерений при одном и другом положениях шкал не превосходят обычных расхождений между двумя рядами измерений. Средняя квадратичная погрешность разностей двух рядов измерений в этом случае (не исключая систематической погрешности) оказалась равной $\pm 0,14$ мк, тогда как обычно эта погрешность определяется величиной порядка $\pm 0,17$ мк.

Несмотря на это, необходимо иметь в виду, что в данном случае мы имеем дело с погрешностью систематического характера и для ее исключения необходимо при соответственных измерениях производить перестановку шкал. При измерении на стереокомпараторе возможны также и значительные личные погрешности, достигающие величины 1 мк.

Установка сличаемых шкал с перекосами в вертикальной и горизонтальной плоскостях затрудняет процесс совмещения изображений штрихов и вызывает дополнительные погрешности.

Перекосы шкал в горизонтальной плоскости вызовут погрешности второго порядка малости, так как сличение производится методом продольного компарирования с соблюдением принципа Аббе.

Перекос шкал в вертикальной плоскости затрудняет фокусировку шкал, совмещение штрихов с марками, а поэтому и вызывает погрешности в результатах измерения. При установке шкалы на столике стереокомпаратора по фокусу на всем ее протяжении будут иметь место только погрешности, вызываемые уже параллаксом за счет глубины самой фокусировки.

Эта погрешность может быть подсчитана по формуле:

$$\Delta = a' \operatorname{tg} \alpha,$$

где a' — глубина изображения у микроскопов стереокомпаратора, равная примерно 0,9 мк, а α — апертурный угол ми-

Таблица 9

Результаты сличения стеклянной шкалы с дециметром D 36 при различных положениях шкал

Сличаемые интервалы в мм	Измеренные разности длин сличаемых интервалов в мк		Разность результатов
	Шкала установлена на левом столике, а дециметр — на правом	Шкала установлена на правом столике, а дециметр — на левом	
0—1	+0,30	—0,46	—0,16
0—2	+0,42	—0,57	—0,15
0—3	+0,84	—1,00	—0,16
0—4	+1,31	—1,41	—0,10
0—5	+1,37	—1,32	+0,05
0—6	+1,32	—1,15	+0,17
0—7	+1,64	—1,38	+0,26
0—8	+1,89	—1,74	+0,15
0—9	+2,08	—1,80	+0,19
0—10	+1,68	—1,57	+0,11
0—20	+2,62	—2,39	+0,23
0—30	+3,49	—3,25	+0,24
0—40	+5,02	—4,80	+0,22
0—50	+6,54	—6,33	+0,21
0—60	+8,46	—8,41	+0,05
0—70	+9,20	—9,02	+0,18
0—80	+9,34	—9,28	+0,06
0—90	+11,14	—11,45	—0,31
0—100	+12,79	—13,25	—0,46

кроскопов стереокомпаратора. Свободное отверстие объектива микроскопов стереокомпаратора равно 5 мм, фокусное расстояние объектива равно 12,5 мм, поэтому

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{5}{2 \cdot 12,5} = 0,20$$

и соответственно этому $\Delta = 0,2$ мк. В среднем, таким образом, эта погрешность, при условии тщательной установки шкалы фокусировкой не превысит величины $\pm 0,1$ мк.

Температурные погрешности при сличении шкал сравнительно невелики, так как шкалы имеют малую длину; измерения обычно производятся при температуре, близкой к $+20^\circ \text{C}$; температурные коэффициенты шкал примерно одинаковы и в результаты измерений вводятся соответствующие поправки. Тем не менее, если полагать, что температура измерения отличается от $+20^\circ \text{C}$ на $\pm 1^\circ$, температурные коэффициенты удли-

нения шкал известны с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ и измерение температуры производится с погрешностью $\pm 0,1^\circ$, то температурные погрешности при сличении шкал длиной 200 мм могут достигнуть величины $\pm 0,2$ мк.

Суммируя по закону накопления средних погрешностей измерений рассмотренные нами погрешности и считая, что систематические погрешности применением соответствующей методики измерений исключены, мы можем подсчитать величину возможной средней квадратичной погрешности результатов измерения на стереокомпараторе. Эта погрешность будет равна:

$$\sigma = \sqrt{|0,2|^2 + |0,1|^2 + |0,1|^2} = \pm 0,24 \text{ мк.}$$

Вычисленная нами величина погрешности измерений хорошо согласуется с погрешностями, вычисленными при обработке результатов измерений, произведенных уже на стереокомпараторе. Погрешности результатов измерений при этом вычислялись различными способами.

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений на стереокомпараторе была вычислена по разностям двойных измерений по формуле (7):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}, \quad (7)$$

где d — разность двойных измерений;
 n — число разностей.

Для этого были использованы как результаты сличений эталонов дециметра, так и результаты сличений двух стеклянных шкал. Вычисление средней квадратичной погрешности ряда измерений по разностям двойных измерений производилось как для случая сличения двух стеклянных шкал одним наблюдателем, так и для случая сличения двух стеклянных шкал двумя наблюдателями.

Систематические погрешности из разностей при этом не исключались.

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений по результатам для первого наблюдателя равна $\pm 0,15$ мк, для второго наблюдателя $\pm 0,20$ мк и по разностям измерений двух наблюдателей $\pm 0,25$ мк.

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений была вычислена также по остаточным погрешностям при сличении двух стеклянных шкал № 18776 и № 19364 шестью приемами. Было обработано около сорока рядов измерений. Средняя квадратичная погрешность ряда измерений в среднем равна $\pm 0,18$ мк.

Наконец, было проведено вычисление средней квадратичной погрешности ряда измерений по остаточным погрешностям при сличении двух металлических шкал, когда наблюдения про-

изводятся в отраженном свете. В этом случае средняя квадратичная погрешность в среднем равна $\pm 0,2$ мк.

На основании произведенных нами расчетов и вычислений средней квадратичной погрешности ряда измерений по результатам измерений на стереокомпараторе можно сделать вывод, что по своей величине эта погрешность определяется величиной порядка $\pm 0,2$ мк.

Так как при проверке образцовых шкал на стереокомпараторе производится не менее четырех рядов измерений, то средняя квадратичная погрешность результата измерений будет равна $\pm 0,1$ мк.

Принимая во внимание погрешности значений поправок эталонной шкалы и перехода к предельным погрешностям

Таблица 10

Результаты взаимного сличения рабочих эталонов дециметров D 36, D 40, D 76 на стереокомпараторе СКС-1

Сличаемые интервалы в мм	Разность (D 36—D 76), измеренная различными наблюдателями на СКС-1, в мм	Разность (D 76—D 40), измеренная различными наблюдателями на СКС-1, в мм	Разность (D 40—D 36), измеренная различными наблюдателями на СКС-1, в мм	Сумма (D) разностей, приведенных в графах 2, 3, 4, в мм	дс
0—1	0	-0,27	+0,42	+0,15	0,0225
0—2	-0,35	-0,05	+0,59	+0,19	0,0361
0—3	-0,36	0	+0,30	-0,06	0,0036
0—4	-0,47	+0,80	-0,12	+0,21	0,0441
0—5	-0,80	+1,25	-0,48	-0,03	0,0009
0—6	-0,89	+1,40	-0,46	+0,05	0,0025
0—7	-0,77	+1,10	-0,31	+0,02	0,0004
0—8	-1,13	+1,78	-0,47	+0,18	0,0324
0—9	-1,35	+2,40	-0,83	+0,22	0,0484
0—10	-1,99	+2,83	-0,76	+0,08	0,0064
0—20	-4,05	+5,74	-1,46	+0,23	0,0529
0—30	-5,00	+8,73	-3,63	+0,10	0,0100
0—40	-5,57	+11,24	-5,53	+0,14	0,0196
0—50	-6,41	+12,88	-6,27	+0,20	0,0400
0—60	-6,48	+14,97	-8,15	+0,34	0,1156
0—70	-6,37	+17,33	-10,48	+0,48	0,2304
0—80	-6,74	+19,45	-12,33	+0,38	0,1444
0—90	-6,51	+20,58	-13,98	+0,10	0,0100
0—100	-6,59	+21,39	-14,33	-0,03	0,0009

измерений, мы можем считать, что эти предельные погрешности при поверке шкал на стереокомпараторе не превысят величины $\pm 0,3$ мк.

О высокой точности измерений на стереокомпараторе говорят и результаты взаимного сличения эталонов дециметра.

При помощи стереокомпаратора в 1950 г. было произведено взаимное сличение рабочих эталонов-дециметров $D36$, $D40$ и $D76$.

Сумма трех разностей длин ($D36 - D40$), ($D40 - D76$) и ($D76 - D36$) должна быть равна нулю, но так как эти разности являются результатами измерений, то их сумма не равна нулю, и мы получим ряд случайных погрешностей.

С помощью формулы:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{3n}}, \quad (8)$$

где δ — случайные погрешности;

n — число сличавшихся интервалов, — нами была вычислена средняя квадратичная погрешность ряда измерений при определении этих разностей.

В табл. 10 приводятся результаты взаимного сличения дециметров $D36$, $D40$ и $D76$. Средняя квадратичная погрешность измеренных разностей равна $\pm 0,12$ мк.

7. Выводы

Приведенные результаты исследования стереокомпаратора СКС-1 № 480002 дают возможность сделать следующие выводы.

1. Примененный в приборе новый принцип измерения малых разностей длин при помощи оптических микрометров и использование стереоэффекта полностью себя оправдали.

2. Средняя квадратичная погрешность ряда измерений на стереокомпараторе не превосходит величины $\pm 0,25$ мк, что говорит о полной пригодности стереокомпаратора для поверки образцовых шкал.

3. Возможность проведения на стереокомпараторе калибровки шкал позволила изучить все подразделения эталонной 200-миллиметровой шкалы № 18776 прибора с высокой степенью точности. Поправки подразделений шкалы № 18776 определены со средней квадратичной погрешностью $\pm 0,05 - \pm 0,07$ мк.

4. Установлено, что сличение однотипных шкал с одинаковой толщиной штрихов производится с большей точностью, чем сличение шкал разного типа и со штрихами различной толщины.

5. При сравнении результатов поверки четырех стеклянных шкал с данными аттестатов Цейсса между ними были обнаружены значительные (до $+1,5$ мк) расхождения систематиче-

ского характера. Вероятной основной причиной этих расхождений является изменчивость длины стеклянных шкал во времени.

б. При исследовании стереокомпаратора были обнаружены и некоторые недостатки в конструкции и изготовлении прибора. К этим недостаткам прежде всего следует отнести: меньшую чувствительность левого оптического микрометра по сравнению с правым, применение струны-канатика для поворота плоскопараллельной пластинки в правом микроскопе, малое предметное расстояние микроскопов, что не позволяет производить сличение шкал Н-образного и корытообразного сечения, несовершенство крепления шкал, приспособленного только для одного типа шкал, низкую точность термометров, различие оптических систем правого и левого микроскопов, неодинаковую освещенность поля зрения у правого и левого микроскопов.

ВНУТРЕННЕЕ ДАВЛЕНИЕ В ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ РТУТНО-СТЕКЛЯННЫХ ТЕРМОМЕТРАХ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПОКАЗАНИЯ ТЕРМОМЕТРА

1. Введение

В газонаполненных термометрах пространство над столбиком ртути в капилляре заполняется азотом так, что внутреннее давление газа в нем при комнатной температуре делается равным атмосферному. Исключение составляют высокоградусные термометры (400° С, 500° С), в которых искусственным образом создается повышенное давление, и контактные термометры, наполненные водородом, в которых давление при комнатной температуре не превышает 0,5 атм.

При работе термометра внутреннее давление газа меняется: чем ближе подходит мениск ртути к верхнему концу капилляра, тем большим оно становится.

Величину внутреннего давления газа легко подсчитать для любого положения мениска, если известна его величина в каком-либо положении столбика ртути: пусть при положении столбика ртути $A-A$ внутреннее давление равно p_0 , а до конца капилляра остается объем, равный n_0 градусов. Подсчитаем давление p при положении столбика ртути $B-B$, если известно, что объем $B-B$ до конца капилляра равен n градусов.

Столбик газа над мениском прогревается незначительно, а потому при подсчете давления можно воспользоваться законом Бойля-Мариотта:

$$p_0 n_0 = p n$$

или

$$p = \frac{p_0 n_0}{n} \quad (1)$$

Внутреннее давление вызывает снижение показаний термометра, и цель настоящей работы — подсчитать величину снижения, выяснив, от каких параметров оно зависит.

2. Исследование причин снижения показаний термометра

Прежде чем перейти к изложению материала, уточним понятия снижения показаний термометра Δt и внутреннего давления p .

За величину снижения показания термометра Δt принимается разность показаний вакуумного термометра и такого же термометра с внутренним давлением p . За внутреннее давление p принимается давление газа, находящегося над столбиком ртути; давление самого столбика ртути не принимается в расчет, так как оно почти одинаково как в вакуумном, так и газонаполненном термометрах.

Величина Δt под действием меняющегося внутреннего давления p связана: 1) с сжимаемостью ртути, 2) с деформацией стеклянной оболочки резервуара термометра.

Если обозначить Δv видимое изменение объема, то

$$\Delta v = \Delta_1 v + \Delta_2 v,$$

где $\Delta_1 v$ — величина изменения объема ртути под действием давления p ;

$\Delta_2 v$ — изменение объема стеклянной оболочки резервуара термометра под действием давления p .

Поделив это равенство на емкость капилляра, соответствующую одному градусу, получим:

$$\Delta t = \Delta_1 t + \Delta_2 t, \quad (2)$$

где $\Delta_1 t$ — снижение, связанное с сжимаемостью ртути;

$\Delta_2 t$ — снижение, связанное с деформацией стеклянной оболочки термометра.

3. Сжимаемость ртути

Сжимаемость ртути можно подсчитать по известной формуле:

$$\Delta_1 v = \alpha p v,$$

где α — коэффициент сжимаемости для ртути, равный $3,810 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{кг}$;

v — объем резервуара стеклянного ртутного термометра.

Существует зависимость между емкостью резервуара v и объемом l , соответствующим одному градусу:

$$v = \frac{1}{\beta_{рт} - \beta_{ст}} l,$$

где $\beta_{рт}$ — термический коэффициент объемного расширения ртути;

$\beta_{ст}$ — термический коэффициент объемного расширения стекла;

$\beta_{рт} - \beta_{ст}$ — видимый коэффициент расширения ртути в стекле, следовательно

$$\Delta_1 v = \frac{\alpha}{\beta_{рт} - \beta_{ст}} p l,$$

но

$$\frac{\Delta v}{l} = \Delta_1 t$$

и

$$\Delta_1 t = \frac{a}{\beta_{\text{рт}} - \beta_{\text{ст}}} p. \quad (3)$$

Для термометров, изготовленных из стекла по ГОСТ 1224—41 (тип 16^{III}),

$$\frac{1}{\beta_{\text{рт}} - \beta_{\text{ст}}} = 6300,$$

но тогда

$$\Delta_1 t = 6300 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} p$$

или

$$\Delta_1 t = 2,4 \cdot 10^{-2} p. \quad (3a)$$

Таким образом, для термометров из стекла типа 16^{III} при давлении в 10 атм $\Delta_1 t = 0,25^\circ$, а для того чтобы $\Delta_1 t$ достигло 1° , давление p должно быть равным 40 атм. $\Delta_1 t$, как мы увидим ниже, имеет меньшее значение, чем $\Delta_2 t$, но при подсчете снижения им пренебрегать не следует.

4. Деформация стеклянной оболочки резервуара термометра

Подсчет величины деформации стеклянной оболочки резервуара термометра сделаем для резервуара цилиндрической формы, как наиболее часто встречающейся. Для упрощения будем считать дно резервуара и шайбу плоскими и пренебрежем изменением их формы.

Следует также отметить, что приведенные ниже рассуждения относятся к отоженным термометрам, так как наличие поверхностных напряжений на оболочке резервуара может изменить величину ее деформации.

Подсчитаем, какие напряжения вызовет внутреннее давление p . Оболочка резервуара будет подвергаться добавочному равномерно распределенному давлению p . Давления на дно резервуара и шайбу будут стремиться деформировать резервуар по поперечному сечению; давления на боковые стенки — по образующим цилиндра.

Пусть d — внутренний диаметр резервуара,

a — толщина стенок,

H — длина резервуара,

F_1 — силы, растягивающие резервуар вдоль образующих. Тогда

$$F_1 = p \frac{\pi d^2}{4},$$

а площадь, воспринимающая эту силу,

$$S = \frac{\pi (d + 2a)^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} = \pi a (d + a).$$

Таким образом, напряжение

$$N_1 = \frac{F_1}{S_1} = \frac{\rho d^2}{4a(d+a)}$$

или

$$N_1 = \frac{p \frac{d}{a}}{4 \left(1 + \frac{d}{a} \right)} \quad (4)$$

Силы F_2 , растягивающие резервуар перпендикулярно к образующим, найдем из условия равновесия разрезанного диаметральной плоскостью резервуара:

$$p \cdot d \cdot H = 2F_2,$$

т. е.

$$F_2 = \frac{p d H}{2},$$

а площадь, воспринимающая эту силу,

$$S_2 = aH,$$

следовательно

$$N_2 = \frac{F_2}{S_2} = \frac{p d H}{2aH}$$

или

$$N_2 = \frac{p}{2} \cdot \frac{d}{a} \quad (4a)$$

Полученные значения N_1 , N_2 зависят от p и $\frac{d}{a}$, но не зависят от длины резервуара.

Напряжением N_3 , перпендикулярным к N_1 и N_2 , работающим в основном на сжатие стенок резервуара, и соответствующей ему деформацией пренебрегаем из-за малости N_3 и a по сравнению с N_1 , N_2 и $d_1 H$.

Изменение линейных размеров H и L резервуара термометра может быть представлено следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \Delta H &= H \left(\frac{N_1}{E} - \sigma \frac{N_2}{E} \right) \\ \Delta L &= L \left(\frac{N_2}{E} - \sigma \frac{N_1}{E} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где E — модуль Юнга, для стекла 16^{III} равный $0,74 \cdot 10^8$ кг/см²;

¹ Матвеев М. К., Клейменов Р. В., Расчеты по технологии стекла. Гослиттехиздат, 1938.

σ — постоянная Пуассона, для стекла 16^{мн} равная 0,227. Подставив значения N_1 , N_2 из (4) и (4а) в формулы (5) и заменив L на πd , получим:

$$\Delta H = \frac{Hp}{E} \left[\frac{\frac{d}{a}}{4 \left(1 + \frac{1}{\frac{d}{a}}\right)} - \sigma \frac{d}{2a} \right]$$

$$\Delta L = \frac{\pi dp}{E} \left[\frac{1}{2} \frac{d}{a} - \sigma \frac{\frac{d}{a}}{4 \left(1 + \frac{1}{\frac{d}{a}}\right)} \right]. \quad (6)$$

Вследствие деформаций объем резервуара должен увеличиться на

$$\Delta_2 v = v - v_0,$$

где

$$v_0 = \frac{\pi d^2}{4} \cdot H = \frac{L}{4\pi} H;$$

$$v = \frac{(L + \Delta L)^2}{4\pi} (H + \Delta H),$$

L — длина окружности, но тогда

$$\Delta_2 v = \frac{(L + \Delta L)^2}{4\pi} (H + \Delta H) - \frac{L^2}{4\pi} H = \frac{\Delta H (L + \Delta L)^2}{4\pi} + H \frac{2L\Delta L + (\Delta L)^2}{4\pi}$$

$$\Delta_2 v = \frac{1}{4\pi} [L^2 \Delta H + 2L\Delta L \Delta H + \Delta H (\Delta L)^2 + 2HL\Delta L + H(\Delta L)^2].$$

Отбросим все слагаемые выше первого порядка по отношению к ΔL и ΔH из-за их сравнительной малости, и в первом приближении

$$\Delta_2 v = \frac{L}{4\pi} (L\Delta H + 2H\Delta L) = \frac{d}{4} (\pi d \Delta H + 2H\Delta L).$$

Подставив значения ΔH и ΔL из (6), получим:

$$\Delta_2 v = \frac{d}{4} \left\{ \frac{\pi d Hp}{E} \left[\frac{\frac{d}{a}}{4 \left(1 + \frac{1}{\frac{d}{a}}\right)} - \sigma \frac{d}{2a} \right] + \frac{2H\pi dp}{E} \left[\frac{d}{2a} - \sigma \frac{\frac{d}{a}}{4 \left(1 + \frac{1}{\frac{d}{a}}\right)} \right] \right\}$$

или

$$\Delta_2 v = \frac{\pi d^2}{4} H \frac{p}{E} \frac{d}{a} \left[\frac{1 - 2\sigma}{4 \left(1 + \frac{1}{\frac{d}{a}}\right)} + 1 - \frac{\sigma}{2} \right],$$

но $\frac{\pi d^2}{4} H = v$ — объем резервуара термометра, следовательно

$$v = \frac{1}{\beta_{pr} - \beta_{cr}} l \quad \text{и} \quad \Delta_2 v = \frac{p l}{E(\beta_{pr} - \beta_{cr})} \frac{1}{a} \left[\frac{1-2\sigma}{4 \left(1 + \frac{1}{\frac{d}{a}}\right)} + 1 - \frac{\sigma}{2} \right].$$

Поделив левую и правую части на объем одного градуса l , получим:

$$\Delta_2 l = \frac{1}{\beta_{pr} - \beta_{cr}} \frac{p}{E} \frac{d}{a} \left[\frac{1-2\sigma}{4 \left(1 + \frac{1}{\frac{d}{a}}\right)} + 1 - \frac{\sigma}{2} \right].$$

Эту формулу можно упростить, если взять в разложении первые два члена:

$$\frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{d}{a}}} = 1 - \frac{1}{\frac{d}{a}} + \frac{1}{\left(\frac{d}{a}\right)^2} + \frac{1}{\left(\frac{d}{a}\right)^3} + \dots,$$

тогда

$$\Delta_2 l = \frac{5-4\sigma}{4E(\beta_{pr} - \beta_{cr})} p \cdot \frac{d}{a}. \quad (7)$$

Таким образом, можно считать, что снижение показания, связанное с деформацией цилиндрического резервуара, прямо пропорционально внутреннему давлению p , диаметру резервуара d , обратно пропорционально толщине стенок a и зависит от физических характеристик $\frac{5-4\sigma}{4E(\beta_{pr} - \beta_{cr})}$ стекла, из которого изготовлен термометр.

Для стекла типа 16^{III} формула (7) имеет вид

$$\Delta_2 l = 0,896 \cdot 10^{-2} \frac{d}{a} p. \quad (7a)$$

Выведенные формулы являются первым приближением $\Delta_2 l$, из которых, однако, ясно видна физическая сущность явления.

Чем больше $\frac{d}{a}$, тем лучшие приближения дают выведенные формулы. Более точная формула будет выведена в следующем параграфе.

5. Вывод более точной формулы для величины деформации цилиндрического резервуара термометра

Доказано, что в случае плоского напряженного состояния тонкостенного цилиндра, находящегося под действием внутреннего давления p и внешнего P , смещение u удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right) = 0,$$

и приращение объема в результате деформаций:

$$\Delta v = v \left[\frac{3}{3\lambda + 2\mu} \cdot \frac{pr^2 - PR^2}{R^2 - r^2} + \frac{R^2(p - P)}{\mu(R^2 - r^2)} \right], \quad (8)$$

где μ — модуль сдвига;

R — внешний радиус цилиндра;

r — внутренний радиус цилиндра;

a — толщина стенки цилиндра.

λ и μ связаны с E и σ следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \\ \sigma &= \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Преобразуя уравнения (9), легко найдем, что

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \sigma)},$$

а

$$3\lambda + 2\mu = \frac{E}{1 - 2\sigma}. \quad (9a)$$

Подставив в уравнение (8) полученные значения μ и $3\lambda + 2\mu$, получим

$$\Delta v = v \left[\frac{3(1 - 2\sigma)}{E} \cdot \frac{pr^2 - PR^2}{R^2 - r^2} + \frac{2(1 + \sigma)R^2(p - P)}{E(R^2 - r^2)} \right].$$

Деформация резервуара термометра $\Delta_2 v$, влияющая на изменение показаний термометра, есть

$$\Delta^* v - \Delta' v,$$

где $\Delta' v$ — деформация резервуара под действием давлений $p = 0$; P ;

$\Delta^* v$ — деформация резервуара под действием давлений p ; P .

Очевидно, что

$$\Delta_2 v = \Delta^* v - \Delta' v = \frac{vp}{E(R^2 - r^2)} [3(1 - 2\sigma)r^2 + 2(\sigma + 1)R^2],$$

звменим $r = \frac{d}{2}$, $R = \frac{d + 2a}{2}$, $v = \frac{1}{\gamma} l$,

где $\gamma = \beta_{рт} - \beta_{ст}$ — видимый коэффициент расширения ртути в стекле, тогда

$$\Delta_2 v = \frac{lp}{\gamma E \left[\frac{(d + 2a)^2}{4} - \frac{d^2}{4} \right]} \times$$

$$\times \left[3(1 - 2\sigma) \frac{d}{4} + \frac{d^2}{2} (\sigma + 1) - 2(\sigma + 1) da + 2(\sigma - 1) a^2 \right]$$

или

$$\Delta_2 v = \frac{lp}{\gamma E (d + a) a^2} \left[\frac{5 - 4\sigma}{4} d^2 + 2(\sigma + 1) da + 2(\sigma - 1) a^2 \right];$$

поделив числитель и знаменатель на $a \cdot d$, получим:

$$\Delta_2 v = \frac{lp}{\gamma E \left(1 + \frac{1}{\frac{d}{a}}\right)} \left[\frac{5-4\sigma}{4} \cdot \frac{d}{a} + (\sigma+1) + 2(\sigma+1) \frac{1}{\frac{d}{a}} \right],$$

используя разложение

$$\frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{d}{a}}} = 1 - \frac{1}{\frac{d}{a}} + \frac{1}{\left(\frac{d}{a}\right)^2} - \dots$$

и поделив левую и правую части на l — емкость одного градуса, будем иметь:

$$\begin{aligned} \Delta_2 l &= \frac{\Delta_2 v}{l} = \frac{5-4\sigma}{4\gamma E} \cdot \frac{d}{a} p + \frac{3+12\sigma}{4\gamma E} p + \\ &+ \frac{5-4\sigma}{4\gamma E} \cdot \frac{1}{\frac{d}{a}} p - \frac{5-4\sigma}{4\gamma E} \cdot \frac{1}{\left(\frac{d}{a}\right)^2} p + \dots + \\ &+ (-1)^{n+1} \cdot \frac{5-4\sigma}{4\gamma E} \cdot \frac{1}{\left(\frac{d}{a}\right)^n} p + \dots \end{aligned}$$

или

$$\Delta l = \frac{p}{\gamma E} \left(\frac{5-4\sigma}{4} \frac{d}{a} + \frac{3+12\sigma}{4} + \frac{5-4\sigma}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{\left(\frac{d}{a}\right)^n} \right). \quad (10)$$

Таким образом, ранее выведенная формула (7) есть первый член полученного ряда.

Практический интерес представляют лишь первые два члена ряда, так как для большинства термометров $\frac{d}{a} > 8$ и ошибка в вычислении по двум членам не превышает 1%.

Следовательно, можно считать, что

$$\Delta_2 l = \frac{p}{\gamma E} \left(\frac{5-4\sigma}{4} \frac{d}{a} + \frac{3+12\sigma}{4} \right). \quad (11)$$

Для стекла по ГОСТ 1224-41 (16^{III}) формула (11) примет вид:

$$\Delta_2 l = 0,896 \cdot 10^{-2} \frac{d}{a} p + 1,22 \cdot 10^{-2} p, \quad (11a)$$

а для стекла 59^{III}, у которого значение постоянной Пуассона $\sigma = 0,201$, а модуль Юнга $E = 0,726 \cdot 10^9$ кг/см²,

$$\Delta_2 l = 0,876 \cdot 10^{-2} \frac{d}{a} p + 1,13 \cdot 10^{-2} p. \quad (11б)$$

Для характеристики влияния изменения давлений обычно вводят коэффициенты внутреннего и внешнего давлений, числовые величины которых определяют опытным путем³. Приве-

³ Попов М. М., Термометрия и калориметрия, 1934 г.

денные выше формулы дают возможность выразить значения величин этих коэффициентов через E , σ , γ , $\frac{d}{a}$ и найти связь между ними.

Этот вопрос будет рассмотрен в следующем параграфе с целью:

а) выяснения влияния конструктивных особенностей термометров с цилиндрическим резервуаром на величину изменения показаний термометра в случае меняющихся внутреннего и внешнего давлений;

б) выяснения связи между коэффициентами внутреннего и внешнего давлений.

6. Коэффициенты внутреннего и внешнего давлений

Принято называть коэффициентами (внешнего β_e и внутреннего β_i) давления изменение показаний термометра, вызванное изменением внешнего (внутреннего) давления на 1 мм ртутного столба.

Размерности β_i и β_e выражаются в градус/мм рт. ст. Величина коэффициента β_e целиком определяется деформацией резервуара под действием внешнего давления, равного 1 мм рт. столба. Из формулы (8) легко получить

$$\Delta t = -\frac{P}{\gamma} \cdot \frac{5-4\sigma}{4E} \left[\frac{d}{a} + 3 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{\left(\frac{d}{a}\right)^n} \right].$$

Знак минус показывает, что получится не снижение, а повышение показаний; положив $P=1$ кг, будем иметь значение Δt при изменении давления на 1 кг, но так как $P=1$ кг = 735,56 мм рт. столба, то

$$\beta_e = -\frac{13595 \cdot 10^{-3}}{\gamma} \cdot \frac{5-4\sigma}{4E} \left[\frac{d}{a} + 3 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{\left(\frac{d}{a}\right)^n} \right].$$

Величина коэффициента β_i определяется деформацией резервуара и сжимаемостью ртути. Используя выведенные формулы (10) и (3), можно написать:

$$\beta_i = \frac{13595 \cdot 10^{-3}}{\gamma E} \left[\frac{5-4\sigma}{4} \cdot \frac{d}{a} + \frac{3+12\sigma}{4} + \frac{5-4\sigma}{4} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{\left(\frac{d}{a}\right)^n} \right] + \frac{\alpha}{\gamma} 1,3995 \cdot 10^{-3}.$$

Заметим, что для практических вычислений коэффициентов можно пренебрегать \sum , тогда формулы для β_i и β_e примут очень простой вид.

Как и следовало ожидать, величины β_i и β_e зависят только от отношения $\frac{d}{a}$ и не зависят от длины и емкости резервуара. Легко видеть, что

$$\beta_i - \beta_e = -\frac{1,3595 \cdot 10^{-3}}{\gamma} \left[a - \frac{3}{2} \frac{2-2\sigma}{E} \right],$$

т. е. разность $\beta_i - \beta_e$ не зависит от конструктивных особенностей термометра с цилиндрическим резервуаром.

Для интервала температур 0—100°, где γ , E , σ можно считать неизменными для стекла по ГОСТ 1224—41 (тип 16^{III})

$$\beta_i = \beta_e + 0,000014,$$

и для стекла 59^{III}

$$\beta_i = \beta_e + 0,000011.$$

Таким образом, значение одного из коэффициентов вполне определяет упругие свойства данного термометра.

Для характеристики β_i (табл. I) приводим числовые данные термометров, описанных в следующем параграфе.

Таблица I

№ термометра	β_i (вычисленный)	β_i (опытный)	№ термометра	β_i (вычисленный)	β_i (опытный)
8	0,000136	0,000136	7	0,000177	0,000179
4	0,000148	0,000147	9	0,000180	0,000181
2	0,000154	0,000150	3	0,000226	0,000225

7. Опытные данные

В пп. 3 и 5 были выведены формулы для величин сжимаемости ртути A_1f (формула 3) и деформации резервуара A_2f (формула 10); общее снижение:

$$\Delta t = \frac{p}{\gamma E} \left[\frac{5-4\sigma}{4} \cdot \frac{d}{a} + \frac{3-12\sigma}{4} + \frac{5-4\sigma}{4} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{\left(\frac{d}{a}\right)^n} \right] + \frac{a}{\gamma} p.$$

Пренебрегая членами

$$\frac{p(5-4\sigma)}{E\gamma^4} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{\left(\frac{d}{a}\right)^n},$$

мы получим очень простую и удобную для подсчета формулу, дающую вполне удовлетворительную точность (погрешность менее 1%):

$$\Delta t = \frac{p}{\gamma} \left(\frac{5-4\sigma}{4E} \cdot \frac{d}{a} + \frac{3+12\sigma}{4E} + \beta \right). \quad (12)$$

Для стекла по ГОСТ 1224—41 (16^{III}) в интервале температур 0—100° С

$$\Delta t = p 10^{-2} \left(0,896 \frac{d}{a} + 3,62 \right) \quad (12a)$$

и для стекла 59^{III}

$$\Delta t = p 10^{-2} \left(0,876 \frac{d}{a} + 3,43 \right). \quad (12b)$$

Для иллюстрации приведенных выводов были поставлены следующие опыты.

1. Из стекла по ГОСТ 1224—41 (тип 16^{III}) были изготовлены три палочных термометра с одинаковой емкостью резервуара ($v = 3,600 \text{ мм}^3$). Резервуары термометров были сделаны из цилиндрических трубок, толщина стенок которых была предварительно измерена. Из термометров был тщательно удален воздух и их проградуировали по двум опорным точкам 0 и 50° с ценой деления в 0,5° и пределах $-2,5 + 52,5^\circ$.

В табл. 2 приведены размеры этих термометров.

Таблица 2

№ термометра (цилиндрического)	Наружный диаметр D в мм	Толщина стенок a в мм	$\frac{d}{a}$	Длина резервуара l в мм	Длина l' шкалы в мм
2	7,46	0,7	8,657	125	3,36
3	8,25	0,5	14,5	87	3,33
4	8,70	0,85	8,023	95	3,38

Термометры были проверены по образцовым термометрам в точках 0, 25, 40, 50 и 52°. Вверху капилляра сделали перегородку, в которой канал был сокращен, но не перекрыт. До перегородки ртуть доходила: у № 2 до 54,3°; у № 3 до 54,6°; у № 4 до 55,1°.

По перегородке был сделан срез и после выдержки в снеговой ванне в течение 30 мин. термометры запаивали, не вынимая из снеговой ванны. После этого термометры вновь были проверены в тех же температурных точках тем же эталоном. Разность показаний между первой и второй проверкой и есть Δt . Затем были произведены подсчеты Δt по формуле (12a), и полученные опытные результаты были сведены в табл. 3.

Давление p вычислялось по формуле (1) и было переведено в кг/см^2 с учетом величины атмосферного давления в момент запайки конца капилляра.

Из табл. 3 можно видеть, что влияние отношения $\frac{d}{a}$ на

снижение показаний особенно ярко выступает при сравнении величины Δt для термометров № 3 и 4. У термометров № 4, несмотря на большее внутреннее давление, величина снижения показаний меньше, чем у термометра № 3 на $0,5^\circ (+52^\circ)$.

Из табл. 3 ясно видно, что Δt , вычисленные по формуле (12а), совпадают с опытными, так как отсчеты показаний термометров сделаны с точностью до $\pm 0,05^\circ$.

2. Для подтверждения формулы (12а) в случае более высоких давлений и $t=100^\circ\text{C}$ были изготовлены три термометра № 7, 8 и 9 с наименьшим подразделением $0,1^\circ$, с пределами шкалы $+95^\circ - (\pm 100,5^\circ)$ и контрольной точкой 0° .

В табл. 4 приведены размеры этих термометров.

Проделав то же, что было сделано в первом опыте, получим значение величины Δt для точек $0, 99$ и 100° (табл. 5).

При вычислении давления для точек 99 и 100° вводилась поправка на температуру окружающего воздуха, так как при запайке конца капилляра температура окружающего воздуха была 16°C , а при проверке в стоградусной точке $+23^\circ$.

Как и в предыдущем опыте, величины вычисленных снижений Δt совпадают с опытными, а расхождения находятся за пределами точности поставленного опыта.

У термометров № 7, 8, 9 была определена также величина снижения положения 0° после 100° по сравнению с положением после 20° . Оказалось, что у газонаполненных термометров величина снижения увеличилась: у № 7 на $0,011^\circ\text{C}$; у № 8 на $0,009^\circ\text{C}$; у № 9 на $0,017^\circ\text{C}$.

Следовательно, в газонаполненных термометрах явление временного снижения 0° складывается из:

а) явления депрессии в обычном смысле, т. е. снижения показания этого же термометра при 0°C , если бы он был вакуумный;

б) явления последствия внутреннего давления.

8. Заключение

Выведенные для термометров с цилиндрическим резервуаром формулы и результаты описанных опытов показывают, что снижения показаний зависят не только от давления и сорта стекла, но и от конструктивных особенностей данного термометра (отношение $\frac{d}{a}$ является характеристикой упругости резервуара).

Как давление p , так и отношение $\frac{d}{a}$ у готового термометра определить затруднительно, поэтому выведенные формулы дают качественную картину, а использование их для введения поправки представляет значительную сложность; заметим также, что поправка зависит от положения интере-

сующей нас температурной точки относительно опорных точек, по которым производилась градуировка газонаполненного термометра.

1. Если интересующая нас температурная точка t лежит между двумя опорными точками t_1 и t_2 , то термометр будет показывать больше, и поправку δ можно подсчитать по следующей формуле:

$$\delta = \Delta - \Delta_1 - \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{t_2 - t_1} (t - t_1),$$

где Δ , Δ_1 и Δ_2 — снижения для температур t , t_1 и t_2 , подсчитанные по формуле (12).

2. Если интересующая нас температурная точка лежит выше последней опорной точки t_k , то

$$\delta = \Delta - \Delta_k - \frac{\Delta_k - \Delta_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} (t - t_k)$$

имеет знак плюс, т. е. показания термометра будут занижены.

Сложность введения поправки на внутреннее давление оставляет один путь — путь сокращения влияния внутреннего давления. Для газонаполненных термометров, а также для термометров вакуумных, если они применяются в условиях, где возможны изменения давлений, необходимо резервуар термометра по возможности делать с меньшим отношением $\frac{d}{a}$; безусловно нетерпимы тонкие (меньше 0,5 мм)

стенки резервуара и доньшка, так как в таком случае, кроме опасности разрушения, резко увеличивается чувствительность термометра к изменению внутреннего и внешнего давлений.

У всех газонаполненных термометров с ценой деления 0,5°, 0,2° и менее, вне зависимости от предела шкалы и назначения термометра, необходимо иметь запасной резервуар возможно большей емкости. Эталонные термометры до 150° С безусловно должны изготавливаться вакуумными.

ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИДИМОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАСШИРЕНИЯ РТУТИ В СТЕКЛЯННЫХ ОБОЛОЧКАХ

1. Введение

В нашей стране после Великой Октябрьской Социалистической революции было организовано и получило широкое развитие производство ртутно-стеклянных термометров.

Ртутно-стеклянные термометры изготавливаются из двух сортов стекол отечественного производства:

1) стекла по ГОСТ 1224—41, предназначенного для изготовления термометров с пределом шкалы до 360°С, и

2) стекла типа иенского 59^{III}, употребляемого в основном для производства термометров с пределом шкалы до 500°С.

У стеклянных термометров, основанных на изменении объема тел при нагревании, сохраняется связь, вне зависимости от выбираемого интервала температур (t_1, t_2), между емкостью резервуара при 0°С, средним видимым коэффициентом расширения и средним видимым приращением объема ртути, определенными в этом произвольно выбранном интервале температур (t_1, t_2):

$$E_0 = \frac{l}{\gamma} \quad (1)$$

при

$$\gamma = \beta - \bar{\beta},$$

где E_0 — емкость резервуара термометра при 0°С;

γ — видимый коэффициент расширения в интервале (t_1, t_2);

l — среднее видимое приращение объема ртути в интервале (t_1, t_2);

β — средний объемный коэффициент расширения термометрической жидкости в интервале (t_1, t_2);

$\bar{\beta}$ — средний объемный коэффициент расширения стекла, из которого изготовлен термометр, в интервале (t_1, t_2);

$\gamma = \gamma(t)$, $l = l(t)$, т. е. они являются функциями температуры t .

Так как величина градуса термодинамической шкалы температур не зависит от t , то отклонения показаний стеклянного

термометра от этой шкалы будут определяться видом функции $[\gamma(t)]_1$, где $[\gamma(t)]_1$ — первое приближение функции $\gamma(t)$, определяемое в предлагаемой работе.

Знание $[\gamma(t)]_1$ важно и при изготовлении термометров; она входит в формулу для вычисления объема резервуара термометров и определяет изменения шага зуба конусных линеек, в случае жидкостных термометров, и играет существенную роль при выборе опорных точек, по которым производят градуировку термометров. $\gamma(t)$ находят как разность средних коэффициентов теплового расширения ртути и стекла, которые и исследуют независимо друг от друга.

Средний коэффициент расширения ртути исследован Харлоу; им получены две формулы, устанавливающие значение $\beta_0^t(t)$ соответственно в интервалах (0°C , 100°C) и (100°C , 350°C):

$$\beta_0^t = [1815,38 + 0,07548 t + 0,0001533 t^2] \cdot 10^{-7} \quad 0^\circ\text{C} \leq t \leq 100^\circ\text{C}$$

$$\beta_0^t = \left[1755,91 + \frac{36955,5}{634,7 - t} \right] \cdot 10^{-7} \quad 100^\circ\text{C} \leq t \leq 350^\circ\text{C} \quad (2)$$

Коэффициент линейного расширения стекла по ГОСТ был исследован в лаборатории ВНИИМ, и предварительные результаты этого исследования изложены в работе Тарховой А. В. (Сборник трудов ВНИИМ вып. 2(47) за 1941 г.). В этой работе приведена следующая формула для линейного коэффициента расширения:

$$\bar{\alpha}_{20}^t = [788,3 + 0,438 (t - 20)] \cdot 10^{-8} \quad 20^\circ\text{C} \leq t \leq 470^\circ\text{C}.$$

Заметим, что: 1) представление функции $\alpha(t)$ на таком значительном интервале температур при помощи прямой линии едва ли может быть оправдано, 2) основанием к выводу формулы А. В. Тарховой послужили опыты, произведенные с dilatометром, не обеспечивавшим равномерного распределения температуры в стержне, а поэтому полученные результаты не могут быть признаны достаточно надежными. Так как интересующий нас коэффициент объемного расширения стекла β равен утроенному значению коэффициента линейного расширения, то ошибка определения β в три раза превосходит ошибку определения α .

Эти соображения побудили искать метод, непосредственно дающий возможность определить функцию $\gamma_0^t(t)$.

В настоящей работе предлагается „термометрический метод“ определения среднего видимого коэффициента расширения ртути в стекле γ_0^t в температурных интервалах t_1, t_2 через γ_0^{100} .

Но так как определение величины γ_0^{100} не представляет значительной трудности и всегда может быть произведено хотя бы методом весового термометра, то, пользуясь выведенной зависимостью, легко находить $\gamma_{t_1}^{t_2}$ для любых значений t_1, t_2 .

2. Средний термометрический коэффициент расширения

В термометрии пользуются понятием среднего объемного коэффициента расширения тел (β_0^t) в интервалах температур ($0^\circ \text{C}, t^\circ \text{C}$), считая что

$$\beta_0^t = \frac{v_t - v_0}{v_0 t}.$$

Средний коэффициент расширения для интервалов температур (t_1, t_2) иногда определяют следующим равенством:

$$\beta_{(t_1 t_2)} = \frac{v_{t_2} - v_{t_1}}{v_{t_1} (t_2 - t_1)}.$$

Однако такое определение $\beta_{(t_1 t_2)}$ не может быть принято в термометрии, так как не дает возможности сохранить одновременно справедливость двух основных равенств:

$$E_0 = \frac{t_1^2}{\gamma_{(t_1 t_2)}} \quad \text{и} \quad \gamma_{(t_1 t_2)} = \beta_{(t_1 t_2)} - \bar{\beta}_{(t_1 t_2)}$$

в интервалах (t_1, t_2), где $t_1 \neq 0$.

Рассмотрим укороченный термометр со шкалой от t_1 до t_2 (например, термометр из набора по Аншютцу). Ртуть при нагревании от $t_1^\circ \text{C}$ до $t_2^\circ \text{C}$ получит приращение объема:

$$v_{t_2} - v_{t_1} = v_0 (1 + \beta_0^{t_2} t_2) - v_0 (1 + \beta_0^{t_1} t_1)$$

или

$$v_{t_2} - v_{t_1} = v_0 (\beta_0^{t_2} t_2 - \beta_0^{t_1} t_1).$$

Очевидно, что можно найти такое число $\beta_{t_1}^{t_2}$, для которого будет справедливо равенство:

$$\beta_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = \beta_0^{t_2} t_2 - \beta_0^{t_1} t_1,$$

но тогда

$$\frac{v_{t_2} - v_{t_1}}{v_0 (t_2 - t_1)} = \beta_{t_1}^{t_2} = \frac{\beta_0^{t_2} t_2 - \beta_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}.$$

Число $\beta_{t_1}^{t_2}$ будем называть средним термометрическим коэффициентом расширения в интервале (t_1, t_2).

Таким образом, слева мы получили определение среднего термометрического коэффициента расширения $\beta_{t_1}^{t_2}$ в интервале температур ($t_1 t_2$):

$$\beta_{t_1}^{t_2} = \frac{v_{t_2} - v_{t_1}}{v_0 (t_2 - t_1)}.$$

а справа — его выражение через средние коэффициенты в интервалах $(0^\circ, t_2)$ и $(0^\circ, t_1)$:

$$\beta_{t_1}^{t_2} = \frac{\beta_0^{t_2} t_2 - \beta_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}.$$

Для интервалов вида $(0^\circ, t)$ очевидно, что средний термометрический коэффициент расширения совпадает с принятым средним коэффициентом расширения. Аналогично из изменения объема оболочки получим, что средний термометрический коэффициент расширения для стекла $\bar{\beta}_{t_1}^{t_2}$ в интервале (t_1, t_2) равен:

$$\bar{\beta}_{t_1}^{t_2} = \frac{\beta_0^{t_2} t_2 - \beta_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}.$$

Среднее видимое приращение ртути в стекле, приходящееся на единицу объема резервуара при 0°C , в интервале (t_1, t_2) равно:

$$\frac{(v_{t_2} - v_{t_1}) - (\bar{v}_{t_2} - \bar{v}_{t_1})}{v_0 (t_2 - t_1)} = \beta_{t_1}^{t_2} - \bar{\beta}_{t_1}^{t_2} = \gamma_{t_1}^{t_2}.$$

Таким образом, видимый коэффициент расширения, вне зависимости от интервала температур, определяется равенством $\gamma_{t_1}^{t_2} = \beta_{t_1}^{t_2} - \bar{\beta}_{t_1}^{t_2}$ и связан с видимыми коэффициентами в интервалах $(0^\circ, t_1)$ и $(0^\circ, t_2)$ точно так же, как и коэффициент стекла и ртути.

Действительно:

$$\begin{aligned} \gamma_{t_1}^{t_2} &= \beta_{t_1}^{t_2} - \bar{\beta}_{t_1}^{t_2} = \frac{\beta_0^{t_2} t_2 - \beta_0^{t_1} t_1 - \beta_0^{t_2} t_2 + \beta_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1} = \\ &= \frac{(\beta_0^{t_2} - \beta_0^{t_1}) t_2 - (\beta_0^{t_1} - \beta_0^{t_1}) t_1}{t_2 - t_1} \end{aligned}$$

или

$$\gamma_{t_1}^{t_2} = \frac{\gamma_0^{t_2} t_2 - \gamma_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}. \quad (3)$$

Покажем, что зависимость между видимым коэффициентом расширения, средним видимым приращением объема ртути и емкостью резервуара при 0°C остается одинаковой для любого интервала температур — $E_0 = \frac{t_1^{t_2}}{\gamma_{t_1}^{t_2}}$.

Из определения $\gamma_{t_1}^{t_2}$ следует, что

$$\gamma_{t_1}^{t_2} = \frac{(v_{t_2} - v_{t_1}) - (\bar{v}_{t_2} - \bar{v}_{t_1})}{E_0 (t_2 - t_1)},$$

где $E_0 = v_0$, но

$$\frac{(v_{t_2} - v_{t_1}) - (\bar{v}_{t_2} - \bar{v}_{t_1})}{t_2 - t_1} = t_1^{t_2},$$

где k_{12}^2 — среднее видимое приращение объема ртути в интервале температур (t_1, t_2) , следовательно

$$\gamma_{12}^2 = \frac{V_{12}^2}{E_0} \quad \text{или} \quad E_0 = \frac{V_{12}^2}{\gamma_{12}^2}.$$

Так как приведенный вывод справедлив для любых t_1 и t_2 , то и зависимость остается справедливой для любых t_1 и t_2 ; справедливость равенства:

$$\gamma_{12}^2 = \beta_{12}^2 - \bar{\beta}_{12}^2$$

была доказана ранее.

Функции β_0^2 от t удобно выражать в виде ряда

$$\beta_0^2 = a + bt + ct^2 + \dots$$

Функции γ_0^2 будем искать тоже в виде ряда

$$\gamma_0^2 = A + Bt + Ct^2 + \dots, \quad (4)$$

ограничиваясь в настоящем исследовании тремя первыми членами.

Из равенств (3) и (4) получим:

$$\gamma_{12}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} [A(t_2 - t_1) + B(t_2^2 - t_1^2) + C(t_2^3 - t_1^3) + \dots]$$

или

$$\gamma_{12}^2 = A + B(t_1 + t_2) + C(t_1^2 + t_1 t_2 + t_2^2) + \dots$$

3. Описание термометра

При непосредственном определении вида функции γ_0^2 решение вопроса естественно следует искать при помощи самого термометра, представив резервуар термометра в виде наполненной ртутью стеклянной капиллярной трубки, имеющей длину, равную $\approx 6300z$, где z — средняя длина градуса в интервале $(0^\circ \text{C}, 100^\circ \text{C})$.

Таким образом, отсчитывая температуру по термометру с длиной градуса 5 мм, мы фактически наблюдаем видимое расширение столбика ртути длиной 31,5 м, заключенного в стеклянную трубку.

Для измерения температуры одним и тем же термометром в интервале -30°C до 350°C с точностью до $0,02^\circ$ потребовался бы термометр с градуированной частью длиной не менее 1,5 м, с капилляром, откалиброванным на протяжении 1,5 м.

Технология изготовления такого термометра настолько сложна, а работа с ним так громоздка, что создание и использование его практически невозможно.

Но если неудобен термометр со шкалой от -30°C до $+350^\circ \text{C}$, то вполне возможно создание термометра с укороченной переменной шкалой.

Такого типа термометры были использованы автором для определения функции γ'_0 ; один из них изображен на рис. 1.

Термометр изготовлен из массивной капиллярной трубки 7, на которой нанесены равномерные деления в количестве 550—650 делений по типу термометров с ценою деления $0,2^\circ$ и пределами от -5° до $+105^\circ$. Термометр ниже нулевой отметки имеет запасной резервуар 2 емкостью не менее 250°C ; емкость основного резервуара 3 взята с таким расчетом, чтобы 100°C целиком умещались на разделенной части капилляра. Сверху имеется приспособление для отливания ртути, состоящее из шпнца 4, входящего в верхний запасной резервуар 5 значительной емкости; острие шпнца очень близко подходит к верхней стенке запасного резервуара, что дает возможность собирать обратно ранее отлитую ртуть. Свободное от ртути пространство в термометре заполнено осушенным азотом. Общая длина термометра равна 480 мм.

В таких термометрах (отливных) в интервале температур (0°C , 350°C) не обнаруживалось появления пузырьков газа на стенках канала капилляра и резервуара, а также прилипания ртути в канале капилляра.

4. Вывод основных формул

Известно, что за объем резервуара термометра принимают объем, который занимает ртуть при 0°C .

Главная особенность описанного термометра — это переменный объем резервуара. Нас же интересуют видимые приращения некоторого объема вполне определенного резервуара при разных интервалах температур. Таким образом, необходимо вывести формулу для перехода от показаний отливного термометра к показаниям термометра с постоянным E_0 , имеющего равномерные деления.

Главная задача — найти зависимость между показаниями отливного термометра и видимым коэффициентом расширения.

Пусть температуре 0°C соответствуют показания отливного термометра τ_0 , а 100°C — τ_{100} , следовательно, при нагревании от 0°C до 100°C наблюдаемое показание равно $\tau_{100} - \tau_0 = n_0^{100}$, где n_0^{100} выражено в условных делениях отливного термометра; аналогично, для интервала (t_1, t_2) наблюдаемое показание отливного термометра равно $n_{t_1}^{t_2}$.

Допустим, что мы отлили некоторое количество ртути в запасной резервуар, тогда положению ртути в капилляре на отметке τ_0 будет соответствовать некоторая температура

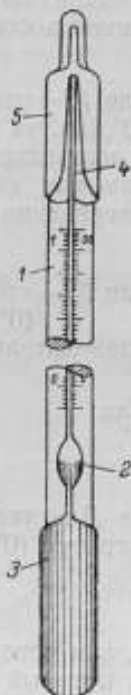


Рис. 1. Термометр с укороченной переменной шкалой.

0°C ; посмотрим, как будут связаны объемы резервуаров этих фактически разных термометров.

Обозначим E_0 — первоначальный объем резервуара отливного термометра при 0° (термометр при 0°C показывает τ_0), E_0^{θ} — объем резервуара термометра после отливания части ртути в верхний запасной резервуар (термометр при $\theta^{\circ}\text{C}$ показывает τ_0).

При нагревании от 0°C до $\theta^{\circ}\text{C}$ объем ртути E_0^{θ} увеличится и станет равным

$$E_0^{\theta} \cdot (1 + \beta_0^{\theta} \theta),$$

где β_0^{θ} — средний коэффициент расширения ртути в интервале $(0^{\circ}, \theta)$. Эта ртуть заполняет не старый объем E_0 , хотя и стоит в капилляре на той же отметке τ_0 , а несколько увеличенный, так как объем оболочки первоначального резервуара после нагревания до температуры θ стал равным

$$E_0 \cdot (1 + \bar{\beta}_0^{\theta} \theta),$$

где $\bar{\beta}_0^{\theta}$ — средний коэффициент расширения стекла в интервале $(0^{\circ} - \theta)$, следовательно

$$E_0^{\theta} (1 + \beta_0^{\theta} \theta) = E_0 (1 + \bar{\beta}_0^{\theta} \theta)$$

или

$$E_0^{\theta} = \frac{1 + \bar{\beta}_0^{\theta} \theta}{1 + \beta_0^{\theta} \theta} E_0. \quad (5)$$

Для термометра, который будет работать в интервале температур $(0^{\circ}\text{C}, 100^{\circ}\text{C})$,

$$E_0 = \frac{I_0^{100}}{\gamma_0^{100}},$$

а для того же термометра, но из которого отлили часть ртути и который будет работать в интервале (t_1, t_2) ,

$$E_0^{\theta} = \frac{I_{t_1}^{t_2}}{\gamma_{t_1}^{t_2}}.$$

Подставив вместо E_0^{θ} его значение из формулы (3), получим:

$$E_0 = \frac{(1 + \beta_0^{\theta} \theta) I_{t_1}^{t_2}}{(1 + \bar{\beta}_0^{\theta} \theta) \gamma_{t_1}^{t_2}}.$$

Сравнивая полученное равенство с основным уравнением для интервала $(0^{\circ}\text{C}, 100^{\circ}\text{C})$, можно написать, что

$$\frac{I_0^{100}}{\gamma_0^{100}} = \frac{(1 + \beta_0^{\theta} \theta) I_{t_1}^{t_2}}{(1 + \bar{\beta}_0^{\theta} \theta) \gamma_{t_1}^{t_2}}$$

или

$$\gamma_{t_1}^{t_2} = \frac{(1 + \beta_0^{\theta} \theta) I_{t_1}^{t_2}}{(1 + \bar{\beta}_0^{\theta} \theta) I_0^{100}} \gamma_0^{100}. \quad (6)$$

Для того чтобы перейти от средних величин видимого приращения ртути в стеклянной оболочке l'_{i_1} к показаниям термометра n'_{i_1} , необходимо учесть;

1) изменение объема канала основного капилляра термометра в зависимости от температуры t_2 ,

2) изменение при нагревании (для $t_1 \neq 0$) от $t_1^\circ \text{C}$ до $t_2^\circ \text{C}$ объема канала вспомогательного капилляра или объема запасного резервуара, вмещающего видимое приращение ртути $l'_0 t_2$. Если обозначить ε_i — объем канала капилляра между соседними делениями при температуре $t^\circ \text{C}$, а $\eta_{i_1 t_2}$ — приращение вспомогательного объема, то

$$l_0^{100} = \frac{n_0^{100}}{100} \varepsilon_{100}$$

$$l'_{i_1} = \frac{n'_{i_1}}{t_2 - t_1} \varepsilon_{i_2} + \frac{\eta_{i_1 t_2}}{t_2 - t_1}.$$

Очевидно, что $\varepsilon_i = \varepsilon_0 (1 + \bar{\beta}_0^i t)$, где ε_0 — объем канала капилляра, заключенного между соседними делениями при 0°C .

Подсчитаем величину $\eta_{i_1 t_2}$.

Для нашего термометра вспомогательный объем W при температуре 0°C равен

$$W = E_0 - E_0^g,$$

т. е.

$$W = \left(1 - \frac{1 + \bar{\beta}_0^g \theta}{1 + \beta_0^g \theta} \right) E_0 = \frac{\gamma_0^g \theta}{1 + \beta_0^g \theta} E_0,$$

где

$$E_0 = \frac{l_0^{100}}{\gamma_0^{100}} = \frac{n_0^{100}}{100} \frac{\varepsilon_{100}}{\gamma_0^{100}},$$

но тогда

$$\eta_{i_1 t_2} = W \bar{\beta}_0^{i_2} (t_2 - t_1)$$

или

$$\eta_{i_1 t_2} = \frac{\gamma_0^g \bar{\beta}_0^{i_2} (t_2 - t_1) n_0^{100}}{\gamma_0^{100} (1 + \beta_0^g \theta) \cdot 100} \varepsilon_{100}.$$

Следовательно,

$$l'_{i_1} = \frac{n'_{i_1}}{t_2 - t_1} \varepsilon_{i_2} + \frac{n_0^{100} \gamma_0^g \bar{\beta}_0^{i_2} \varepsilon_{100}}{100 \gamma_0^{100} (1 + \beta_0^g \theta)}$$

или

$$l'_{i_1} = \frac{n'_{i_1}}{t_2 - t_1} (\varepsilon_{i_2} + \Delta_{i_1, i_2}),$$

где

$$\varepsilon_{i_2} = (1 + \bar{\beta}_0^{i_2} t_2) \varepsilon_0, \quad \Delta_{i_1, i_2} = \frac{(t_2 - t_1) n_0^{100} \gamma_0^g (1 + \bar{\beta}_0^{100} \cdot 100)}{100 \cdot n'_{i_1} \gamma_0^{100} (1 + \beta_0^g \theta)} \varepsilon_0.$$

Таким образом, заменяя t_1^{100} и t_0^{100} в формуле (6) их выражениями через n_{11}^{100} и n_0^{100} , получим:

$$\gamma_{11}^{100} = \frac{(1 + \beta_0^{\theta}) n_{11}^{100} \cdot 100 (\epsilon_{12} + A_{11,12})}{(1 + \beta_0^{\theta}) n_0^{100} (t_2 - t_1) \epsilon_{100}} \gamma_0^{100}. \quad (6a)$$

Используя формулу (3), заменим γ_{11}^{100} ее выражением через γ_0^{100} и γ_0^{12} и получим, что

$$\frac{\gamma_0^{12} t_2 - \gamma_0^{100} t_1}{t_2 - t_1} = \frac{(1 + \beta_0^{\theta}) n_{11}^{100} \cdot 100 (\epsilon_{12} + A_{11,12})}{(1 + \beta_0^{\theta}) n_0^{100} (t_2 - t_1) \epsilon_{100}} \gamma_0^{100},$$

или

$$\gamma_0^{12} = \frac{1}{t_2} \left[t_1 \gamma_0^{100} + \frac{(1 + \beta_0^{\theta}) n_{11}^{100} \cdot 100 (\epsilon_{12} + A_{11,12})}{(1 + \beta_0^{\theta}) n_0^{100} \cdot \epsilon_{100}} \gamma_0^{100} \right]. \quad (7)$$

В нашем опыте мы будем производить отливку так, чтобы захватить после первой отливки интервал (100° С, 200° С), после второй отливки — интервал (200° С, 300° С) и после третьей отливки — (250° С, 300° С). В принятых обозначениях соответствующие формулы будут выглядеть так:

1. Для интервала (100° С, 200° С) достаточно положить в формуле (7) $t_1 = 100$, а $\theta = \theta_1$ ($\theta_1 \approx 100^\circ$), тогда

$$\gamma_0^{12} = \frac{100}{t_2} \left[1 + \frac{(1 + \beta_0^{\theta_1}) \cdot n_{100}^{100} (\epsilon_{12} + A_{100,12})}{(1 + \beta_0^{\theta_1}) \cdot n_0^{100} \cdot \epsilon_{100}} \right] \gamma_0^{100} \quad (8)$$

$$100^\circ \text{ С} < t_2 \leq 200^\circ \text{ С}.$$

2. Для интервала (200° С, 300° С) положим в формуле (7) $t_1 = 200^\circ \text{ С}$, $\theta = \theta_2$ ($\theta_2 \approx 200^\circ \text{ С}$) и $t_2 = t_3$, тогда

$$\gamma_0^{12} = \frac{1}{t_3} \left[200 \gamma_0^{200} + \frac{(1 + \beta_0^{\theta_2}) \cdot n_{200}^{100} (\epsilon_{12} + A_{200,12})}{(1 + \beta_0^{\theta_2}) \cdot n_0^{100} \cdot \epsilon_{100}} \gamma_0^{100} \right].$$

Подставив значение γ_0^{200} из ранее выведенной формулы (8), получим

$$\gamma_0^{12} = \frac{100}{t_3} \left[1 + \frac{(1 + \beta_0^{\theta_1}) n_{100}^{200} (\epsilon_{200} + A_{100,200})}{(1 + \beta_0^{\theta_1}) n_0^{100} \cdot \epsilon_{110}} + \frac{(1 + \beta_0^{\theta_2}) n_{200}^{100} (\epsilon_{12} + A_{200,12})}{(1 + \beta_0^{\theta_2}) \cdot n_0^{100} \cdot \epsilon_{100}} \right] \gamma_0^{100} \quad (8a)$$

$$200^\circ \text{ С} < t_3 \leq 300^\circ \text{ С}.$$

3. Аналогично можно получить, что

$$\begin{aligned} \gamma_0^{t_4} = \frac{100}{t_4} & \left[1 + \frac{(1 + \beta_0^{200} \theta_1) n_{100}^{200} (\epsilon_{200} + \Delta_{100, 200})}{(1 + \beta_0^{200} \theta_1) \cdot n_0^{100} \epsilon_{100}} + \right. \\ & + \frac{(1 + \beta_0^{250} \theta_2) \cdot n_{100}^{250} (\epsilon_{250} + \Delta_{200, 250})}{(1 + \beta_0^{250} \theta_2) n_0^{100} \epsilon_{100}} + \\ & \left. + \frac{(1 + \beta_0^{300} \theta_3) \cdot n_{250}^{300} (\epsilon_{t_4} + \Delta_{250, t_4})}{(1 + \beta_0^{300} \theta_3) n_0^{100} \epsilon_{100}} \right] \gamma_0^{100} \end{aligned} \quad (86)$$

$300^\circ \text{C} < t_4 \leq 350^\circ \text{C}.$

Отыскание функции γ_0^t будем производить методом последовательных приближений.

1. Находим приближенные значения $[\gamma_0^{200}]_I$ и $[\gamma_0^{300}]_I$, положив в формулах (8) и (8а) $\epsilon_i = \text{const}$ и $\Delta_{i_1, i_2} = 0$; пользуясь приближенными значениями $[\gamma_0^{200}]_I$ и $[\gamma_0^{300}]_I$ и известным значением γ_0^{100} , находим первое приближение функции $[\gamma_0^t]_I$:

$$[\gamma_0^t]_I = A_1 + B_1 t + C_1 t^2,$$

используя значения β_0^t для ртути, находим первое приближение:

$$[\beta_0^t]_I = \beta_0^t - [\gamma_0^t]_I$$

и на основании полученных приближенных формул определяем величины ϵ_{200} , ϵ_{300} , $\Delta_{100, 200}$ и $\Delta_{200, 300}$.

2. Подставляем в формулы (8) и (8а) найденные значения и находим второе приближение $[\gamma_0^t]_{II}$ и т. д.

Мы ограничимся третьим приближением, так как четвертое приближение практически совпадает с ним, например значения $[\gamma_0^{200}]_{III}$ от $[\gamma_0^{200}]_{IV}$ отличаются на величину, меньшую $5 \cdot 10^{-9}$. Предел же, к которому стремятся $[\gamma_0^t]_k$, существует, так как

$$[\gamma^t]_{II} > [\gamma^t]_{IV} > [\gamma^t]_{VI} > \dots \text{ и т. д.}$$

$$[\gamma_0^t]_I < [\gamma_0^t]_{III} < [\gamma_0^t]_V < \dots \text{ и т. д.,}$$

а

$$\lim_{k \rightarrow \infty} ([\gamma^t]_k - [\gamma_0^t]_{k+1}) = 0$$

и удовлетворяет неравенству:

$$[\gamma_0^t]_{III} < \gamma_0^t < [\gamma_0^t]_{IV},$$

где γ_0^t — истинное значение. Первое приближение имеет определенный физический смысл: в формуле (8), если положить $\epsilon_i = \epsilon = \text{const}$, $\Delta_{i_1, i_2} = 0$, величина, стоящая в квадратных скобках,

умноженная на 100, есть показание ртутного стеклянного термометра, соответствующего температуре $t^\circ\text{C}$ при условии, что термометр имеет идеальный канал капилляра и равномерную градуировку по точкам 0°C и 100°C .

Действительно эта величина, взятая хотя бы из формулы (8а), может быть написана так:

$$\frac{n_0^{100} \epsilon}{n_0^{100} - 100 \epsilon} + \frac{1 + \beta_0^{20} \theta_1}{1 + \beta_0^{100} \theta_1} \frac{1 + \beta_0^{20} \theta_2}{1 + \beta_0^{100} \theta_2} \frac{n_{20}^t \epsilon}{n_0^{100} - 100 \epsilon} \cdot$$

$$n_0^{100}, \frac{1 + \beta_0^{20} \theta_1}{1 + \beta_0^{100} \theta_1} n_{100}^{200} \text{ и } \frac{1 + \beta_0^{20} \theta_2}{1 + \beta_0^{100} \theta_2} n_{200}^t$$

есть величины наблюдаемых приращений ртути в термометре с емкостью резервуара E_0 , т. е. в термометре, из которого не отливали ртути, а увеличили длину капиллярной трубки, отградуировав его по точкам 0°C , 100°C . Эти наблюдаемые приращения относятся соответственно к интервалам температур (0°C , 100°C), (100°C , 200°C) и (200°C , $t^\circ\text{C}$) и выражены в количествах условных делений.

Поделив сумму этих величин на $\frac{n_0^{100}}{100}$ — среднюю величину наблюдаемого приращения ртути в интервале (0°C , 100°C), соответствующую 1°C , получим значение показания идеального ртутного стеклянного термометра при температуре $t^\circ\text{C}$, т. е.:

$$[\gamma_0^t]_1 = \frac{K_t}{t} \gamma_0^{100},$$

где K_t — показания ртутного стеклянного термометра при $t^\circ\text{C}$;

$[\gamma_0^t]_1$ — первое приближение видимого коэффициента расширения для стекла, из которого изготовлен термометр;

t — температура в $^\circ\text{C}$.

Поэтому, если известны значения первого приближения, то можно определить:

$$K_t = \frac{[\gamma_0^t]_1}{\gamma_0^{100}} t. \quad (9)$$

5. Результаты опытов

Изложенный метод был применен к термометрам, изготовленным из стекла по ГОСТ 1224-41 со следующим химическим составом:

SiO_2 — 67,1%	CaO — 7,0%
Al_2O_3 — 2,5%	ZnO — 7,2%
B_2O_3 — 2,2%	Na_2O — 14%

Нами был исследован видимый коэффициент расширения состаренных термометров. Следует отметить, что процесс состаривания оказывает довольно значительное влияние на величину коэффициента расширения стекла, а следовательно, и на видимый коэффициент расширения ртути в стекле. В табл. 1 приведены числовые значения $\bar{\beta}_0^{100}$ для стекла по ГОСТ 1224—41, определенные методом весового термометра в лаборатории завода „Точизмеритель“.

Таблица 1

$\bar{\beta}_s^{100}$ (не отожж. стекла)	$\bar{\beta}_0^{100}$ (состаренн. стекла)	$\bar{\beta}_s^{100}$ (на отожж. стекла)	$\bar{\beta}_0^{100}$ (состаренн. стекла)
242,9 · 10 ⁻⁷	237,8 · 10 ⁻⁷	243,4 · 10 ⁻⁷	238,6 · 10 ⁻⁷
242,4 · 10 ⁻⁷	238,3 · 10 ⁻⁷	243,3 · 10 ⁻⁷	239,2 · 10 ⁻⁷

Примечание. Старение производилось по режиму 10 час. × 500° С.

Из табл. 1 видно, что коэффициент объемного расширения для состаренного стекла отличается от объемного коэффициента расширения для несостаренного в среднем на $4,5 \cdot 10^{-7}$.

Резервуары испытанных термометров были изготовлены из стекла, имевшего, после проведения режима старения, $\bar{\beta}_0^{100} = 238 \cdot 10^{-7}$; следовательно, величина видимого коэффициента расширения $\gamma_0^{100} = 1587 \cdot 10^{-7}$.

В табл. 2 приведены значения видимого коэффициента расширения γ_s^t в равных интервалах температур для четырех испытанных термометров № 1, 2, 3, 4.

Таблица 2

Интервал температур	Значение γ_s^t для термометров			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
0° С — 100° С	1587,0 · 10 ⁻⁷	1587,0 · 10 ⁻⁷	1587,0 · 10 ⁻⁷	1587,0 · 10 ⁻⁷
0° С — 180° С	1590,5 · 10 ⁻⁷	1591,0 · 10 ⁻⁷	1591,0 · 10 ⁻⁷	1591,5 · 10 ⁻⁷
0° С — 190° С	1591,6 · 10 ⁻⁷	1591,8 · 10 ⁻⁷	1591,9 · 10 ⁻⁷	1592,1 · 10 ⁻⁷
0° С — 200° С	1592,3 · 10 ⁻⁷	1592,8 · 10 ⁻⁷	1592,7 · 10 ⁻⁷	1593,2 · 10 ⁻⁷
0° С — 250° С	1599,1 · 10 ⁻⁷	1600,0 · 10 ⁻⁷	1597,9 · 10 ⁻⁷	1599,7 · 10 ⁻⁷
0° С — 280° С	1604,7 · 10 ⁻⁷	1605,1 · 10 ⁻⁷	1604,9 · 10 ⁻⁷	1605,0 · 10 ⁻⁷
0° С — 290° С	1606,4 · 10 ⁻⁷	1606,9 · 10 ⁻⁷	1606,2 · 10 ⁻⁷	1606,4 · 10 ⁻⁷
0° С — 300° С	1609,1 · 10 ⁻⁷	1609,4 · 10 ⁻⁷	1609,0 · 10 ⁻⁷	1608,5 · 10 ⁻⁷
0° С — 350° С	1622,0 · 10 ⁻⁷	1623,6 · 10 ⁻⁷	1620,9 · 10 ⁻⁷	1622,4 · 10 ⁻⁷

Значения γ_0^t вычислены методом последовательных приближений на основании опытных данных по формулам (8), (8а) и (8б).

По полученным результатам можно построить кривую второго порядка в интервале до 300° С, показывающую зависимость средних значений γ_0^t от температуры с точностью $1 \cdot 10^{-7}$.

Действительно, пусть

$$\gamma_0^t = A + Bt + Ct^2,$$

поставив вместо t значения 100, 200, 300, а вместо γ_0^{100} , γ_0^{200} и γ_0^{300} средние опытные значения, получим систему трех уравне-

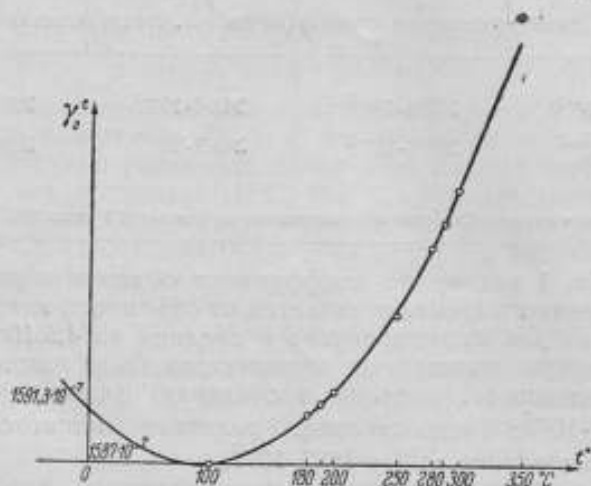


Рис. 2. Кривая зависимости средних значений γ_0^t от температуры.

ний с тремя неизвестными A , B и C . Решая эти уравнения, находим, что

$$\gamma_0^t = (1591,3 - 0,094t + 0,00051t^2) 10^{-7}. \quad (10)$$

Полученная кривая изображена на рис. 2.

Для большей наглядности приводим в табл. 3 средние опытные значения, изображенные на графике в виде отдельных точек, и значения, вычисленные по формуле (10).

Величины первых приближений видимых коэффициентов расширения для интервалов (t_1 , t_2) принимают значения, приведенные в табл. 4.

Для сравнения отечественного стекла по ГОСТ 1224-41 с немским 16^{III} приводим в табл. 5 показания, которые имели бы ртутные термометры из отечественного стекла и стекла немского 16^{III}, если бы они были отградуированы по основным точкам 0° С и 100° С с нанесением равномерных делений на строго цилиндрическом капилляре, т. е. сравниваем шкалы этих двух

Таблица 3

Интервал температур	Значение γ_0^t , получ. по формуле	Значение γ_0^t , получ. опытн. путем
0° C — 100° C	1587,0 · 10 ⁻⁷	1587,0 · 10 ⁻⁷
0° C — 180° C	1590,0 · 10 ⁻⁷	1591,1 · 10 ⁻⁷
0° C — 190° C	1591,9 · 10 ⁻⁷	1591,9 · 10 ⁻⁷
0° C — 200° C	1592,9 · 10 ⁻⁷	1592,9 · 10 ⁻⁷
0° C — 250° C	1599,7 · 10 ⁻⁷	1599,2 · 10 ⁻⁷
0° C — 280° C	1605,0 · 10 ⁻⁷	1604,9 · 10 ⁻⁷
0° C — 290° C	1605,9 · 10 ⁻⁷	1606,5 · 10 ⁻⁷
0° C — 300° C	1609,0 · 10 ⁻⁷	1609,0 · 10 ⁻⁷
0° C — 350° C	1620,9 · 10 ⁻⁷	1622,2 · 10 ⁻⁷

Таблица 4

Интервал температур	Значение $[\gamma_0^t]_1$	Интервал температур	Значение $[\gamma_0^t]_1$
0° C — 100° C	1587,0 · 10 ⁻⁷	0° C — 300° C	1600,5 · 10 ⁻⁷
0° C — 200° C	1589,0 · 10 ⁻⁷	0° C — 350° C	1609,8 · 10 ⁻⁷
100° C — 200° C	1591,0 · 10 ⁻⁷	200° C — 300° C	1623,5 · 10 ⁻⁷
0° C — 250° C	1593,6 · 10 ⁻⁷	300° C — 350° C	1660,0 · 10 ⁻⁷

термометров со стоградусной международной шкалой температур. Как видно из табл. 5, отечественное стекло ничуть не уступает стеклу 16^{III}.

Если принять за истинные значения приближения, которые дает формула Харлоу для определения коэффициента расширения ртуть, то можно получить для исследованного стекла следующую формулу, дающую зависимость $\bar{\beta}_0^t$ от t :

$$\bar{\beta}_0^t = (228,3 + 0,097t) \cdot 10^{-7},$$

$$100^\circ \text{C} \leq t \leq 300^\circ \text{C}.$$

Отсутствие эталонов I-го разряда и несовершенство термостатов не позволило определить третий член, зависящий от t^2 .

Так как ГОСТ 1224—41 допускает колебания объемного коэффициента расширения $235 \cdot 10^{-7} \leq \bar{\beta}_0^{100} \leq 255 \cdot 10^{-7}$, то формулу для $\bar{\beta}_0^t$ без значительной ошибки можно переписать так:

$$\bar{\beta}_0^t = \bar{\beta}_0^{100} + 0,097 \cdot 10^{-7} (t - 100), \quad (11)$$

Таблица 5

Температура °С	Стекло иенское 16Ш	ГОСТ 1224-41	Температура °С	Стекло иенское 16Ш	ГОСТ 1224-41	Температура °С	Стекло иенское 16Ш	ГОСТ 1224-41
-30	-30,28	-30,22	90	90,03	90,02	210	210,4	210,36
-20	-20,16	-20,13	100	100,00	100,00	220	220,5	220,51
-10	-10,07	-10,06	110	109,98	109,99	230	230,7	230,65
0	0,00	0,00	120	119,97	119,97	240	240,9	240,82
+10	+10,06	+10,04	130	129,97	129,97	250	251,1	251,03
20	20,09	20,07	140	139,98	139,97	260	261,4	261,27
30	30,11	30,09	150	149,99	149,98	270	271,7	271,54
40	40,12	40,08	160	160,02	160,01	280	282,0	(281,8) 281,84
50	50,12	50,08	170	170,07	170,05	290	292,4	(292,1) 292,18
60	60,10	60,07	180	180,12	(180,1) 180,10	300	302,7	(302,6) 302,68
70	70,08	70,06	190	190,19	(190,2) 190,17	350	—	(355,6) 355,03
80	80,06	80,04	200	200,29	(200,2) 200,26			

Примечание: 1. Данные для стекла иенского 16Ш взяты из «Wärmetabelle» 1919 г.
2. В скобках указаны результаты, полученные в описанном опыте, остальные значения вычислены по формуле (9) $K_t = \frac{[v_0^t]_1}{2 \cdot 100} t$, где $[v_0^t]_1$ взято согласно формуле для первого приближения

$$[v_0^t]_1 = (1594,5 - 0,1225 t + 0,000475 t^2) \cdot 10^{-7}$$

6. Расчет цены градуса метастатического термометра

Для определения цены одного градуса метастатического термометра в зависимости от интервала температур используем формулы, выведенные в п. 4.

Рассмотрим метастатический термометр, имеющий на шкале τ градусов (обычно $\tau = 5^\circ$). Предположим, что отливка ртути производится с таким расчетом, чтобы при первой отливке на шкале термометра помещался интервал (0°С , $\tau^\circ \text{С}$), при второй — ($\tau^\circ \text{С}$, $2\tau^\circ \text{С}$), при третьей — ($2\tau^\circ \text{С}$, $3\tau^\circ \text{С}$) и т. д. Цену градуса мы будем определять через интервал, а именно, для интервалов вида $[2K\tau^\circ \text{С}$, $(2K+1)\tau^\circ \text{С}]$.

Согласно формуле (1):

$$E_0 = \frac{I_0^\tau}{\gamma_0^\tau} \left\{ \begin{array}{l} \text{или} \\ E_0^{2K\tau} = \frac{I_0^\tau \gamma_{2K\tau}^{(2K+1)\tau}}{I_{2K\tau}^{(2K+1)\tau} \gamma_0^\tau} \end{array} \right.$$

но E_0 и $E_0^{2K\tau}$ связаны друг с другом формулой (5), т. е.:

$$E_0 = \frac{1 + \beta_0^{2K\tau} \cdot 2K\tau}{1 + \beta_0^{2K\tau} \cdot 2K\tau} E_0^{2K\tau}.$$

Из полученных двух равенств находим связь между $I_{2K\tau}^{(2K+1)\tau}$ и I_0^τ :

$$I_{2K\tau}^{(2K+1)\tau} = \frac{(1 + \beta_0^{2K\tau} \cdot 2K\tau) \gamma_{2K\tau}^{(2K+1)\tau}}{(1 + \beta_0^{2K\tau} \cdot 2K\tau) \gamma_0^\tau} I_0^\tau. \quad (12)$$

Для того чтобы перейти к отсчетам по шкале, мы должны учесть, что

$$I_{2K\tau}^{(2K+1)\tau} = \frac{1}{\tau} n_{2K\tau}^{(2K+1)\tau} [\varepsilon_{(2K+1)\tau} + \Delta_{2K\tau, (2K+1)\tau}]$$

$$I_0^\tau = \frac{1}{\tau} n_0^\tau \varepsilon_\tau,$$

где $n_{2K\tau}^{(2K+1)\tau}$ и n_0^τ — показания метастатического термометра, отсчитываемые по его шкале.

Подставив в (12) значения I_0^τ и $I_{2K\tau}^{(2K+1)\tau}$, получим, что

$$\frac{n_0^\tau}{n_{2K\tau}^{(2K+1)\tau}} = \frac{(1 + \beta_0^{2K\tau} \cdot 2K\tau) \gamma_0^\tau [\varepsilon_{(2K+1)\tau} + \Delta_{2K\tau, (2K+1)\tau}]}{(1 + \beta_0^{2K\tau} \cdot 2K\tau) \gamma_{2K\tau}^{(2K+1)\tau} \varepsilon_\tau},$$

приняв во внимание формулу (6а), можем написать, что

$$\frac{\gamma_{2K\tau}^{(2K+1)\tau} \varepsilon_{100}}{\varepsilon_{(2K+1)\tau} + \Delta_{2K\tau, (2K+1)\tau}} = [\gamma_{2K\tau}^{(2K+1)\tau}]_1,$$

$$\frac{\gamma_0^\tau \varepsilon_{100}}{\varepsilon_\tau} = [\gamma_0^\tau]_1,$$

где $[\gamma]_1$ — значение γ в первом приближении нашего метода, но тогда

$$\frac{n_0^\tau}{n_{2K\tau}^{(2K+1)\tau}} = \frac{(1 + \beta_0^{2K\tau} \cdot 2K\tau) [\gamma_0^\tau]_1}{(1 + \beta_0^{2K\tau} \cdot 2K\tau) [\gamma_{2K\tau}^{(2K+1)\tau}]_1}$$

Таблица 6

Для $\tau = 5$

Область измерения температуры	Средняя температура выступающего столбика	Цена градуса метастатического термометра	
		Стекло ГОСТ 1224-41	Стекло ленинское 16Ш
0—5	15	1,0000	1,000
10—15	17	1,0045	1,005
20—25	20	1,0085	1,009
30—35	22	1,0125	1,013
40—45	24	1,0160	1,017
50—55	26	1,0195	1,021
60—65	28	1,0230	1,025
70—75	30	1,0265	1,028
80—85	31	1,0295	1,032
90—95	32	1,0325	1,035
100—105	33	1,0355	1,038
110—115	34	1,0380	1,041
120—125	35	1,0400	1,044
130—135	36	1,0425	1,046
140—145	37	1,0445	1,048
150—155	38	1,0465	1,050

Таблица 7

Для $\tau = 3$

Область измерения температуры	Средняя температура выступающего столбика	Цена градуса метастатического термометра	Область измерения температуры	Средняя температура выступающего столбика	Цена градуса метастатического термометра
0—3	12	1,0000	54—57	22	1,0215
6—9	14	1,0025	60—63	23	1,0240
12—15	15	1,0055	66—69	24	1,0260
18—21	16	1,0080	72—75	25	1,0275
24—27	17	1,0105	78—81	26	1,0295
30—33	18	1,0130	84—87	27	1,0315
36—39	19	1,0150	90—93	28	1,0330
42—45	20	1,0175	96—99	29	1,0345
48—51	21	1,0195	102—105	30	1,0365

Предположив, что показание метастатического термометра при нагревании от 0°C до $\tau^\circ\text{C}$ равно τ по его шкале, получим, что цена градуса в интервале $[2k\tau^\circ\text{C}, (2k+1)\tau^\circ\text{C}]$

$$\delta_{2K\tau} = \frac{\tau}{n_{2K\tau}^{(2K+1)\tau}} = \frac{(1 + \beta_0^{2K\tau} \cdot 2K\tau) [\gamma_0^{\tau}]_I}{(1 + \beta_0^{2K\tau} \cdot 2K\tau) [\gamma_{2K\tau}^{(2K+1)\tau}]_I}$$

Этот расчет применим для термометров, имеющих полное погружение. Термометры имеют погружение только до отметки 0, поэтому при определении $\delta_{2K\tau}$ необходимо учитывать поправку на выступающий столбик.

Приводим табл. 6 и 7 (для $\tau=5$ и $\tau=3$) значений градуса метастатического термометра с учетом поправки на выступающий столбик. В случае $\tau=5$ приводим соответствующие значения градуса для термометров из иенского стекла 16^{III}.

УСТАНОВЛЕНИЕ М. В. ЛОМОНОСОВЫМ ПОНЯТИЙ ОБ ОСНОВНЫХ ТЕПЛОВЫХ ВЕЛИЧИНАХ

Ученые середины XVIII в. в своих представлениях о теплоте еще не разграничивали температуры и количества тепла. Под влиянием господствовавшей тогда формальной теории теплоты сложилось убеждение, будто показания термометров отвечают количеству сосредоточенного в телах особого теплового вещества — „теплотвора“. В то время тепловые явления стояли в центре внимания физиков и химиков, но многие экспериментальные исследования обесценивались из-за неразработанности понятий об основных тепловых величинах.

До сих пор еще не было обращено внимание на то, что М. В. Ломоносов выработал отчетливые представления как о температуре, так и о количестве тепла, и что в своих работах он разграничивал эти понятия. По существу это имело основополагающее значение для термометрии и калориметрии.

Учение Ломоносова о теплоте выделяется среди теорий теплоты XVIII в. прогрессивным материалистическим содержанием. В противоположность преобладавшему тогда сугубо эмпирическому подходу к тепловым явлениям и формальному их толкованию, Ломоносов дал цельную кинетическую теорию теплоты, вложив в нее элементы идеи развития и взаимосвязи в природе. Теплоту он рассматривал как проявление единства материи и движения, как „источник изменений“. В силу этого его учение о теплоте явилось передовой для своего времени физической теорией, сумевшей предвидеть факты и выработать важные понятия.

Ломоносов различал „общее“ движение тел и их „внутреннее“ движение. Наиболее общим видом внутреннего движения твердых, жидких и газообразных тел Ломоносов считает вращение частиц и полагает, что „причиною теплоты является внутреннее вращательное движение связанной материи“¹. Поступательное движение частиц он рассматривает как производ-

¹ М. В. Ломоносов, Полное собрание сочинений, изд. АН СССР, 1951, т. 2 стр. 39. В последующих ссылках указываются только страницы этого издания.

ное от их вращения и на этом основании объясняет упругость газов, текучесть жидкостей, плавление твердых тел и проч.¹. Температуру Ломоносов характеризует как величину, определяющую интенсивностью внутреннего движения: „частицы горячих тел вращаются быстрее, более холодных — медленнее“², „степень теплоты в телах определяется скоростью вращательного движения частиц“³. Таково даваемое Ломоносовым кинетическое представление о температуре.

Для обозначения тепловых состояний и величин Ломоносов применяет более пятнадцать различных терминов. Изучение контекстов показывает, что это не случайно подвергнувшиеся слова. Говоря о температуре, Ломоносов применяет группу вполне определенных терминов; другая группа служит у него для обозначения калориметрических величин.

Обратимся прежде к терминологии Ломоносова, относящейся к понятию температуры. Смысл терминов уясняется, например, из таких мест в его работах: „тела, обладающие большей степенью теплоты, чем наше тело, мы обычно называем горячими, а меньшей — холодными“⁴. Отсюда следует, что „степень теплоты“ означает температуру. Подобным образом можно убедиться в том, что все нижеследующие термины также соответствуют по своему смыслу температуре: „степень огня“, „степень жара“, „градус теплоты“, „градус огня“, „напряженность огня“. Слово „температура“ в русских текстах Ломоносова не встречается. В существующих переводах с латинских текстов Ломоносова оно происходит от слова *temperies*. У Ломоносова „под огнем понимается степень теплоты, превышающая ту, которую могли бы вынести живые существа“⁵. Это разъясняет, почему Ломоносов одновременно употребляет такие выражения как „степень огня“ и „степень теплоты“. Для наиболее высоких температур он чаще всего применяет термин „напряженность огня“ или же „степень жара“. Впрочем, от этого детального разделения он нередко отходит, когда желает подчеркнуть общую физическую сущность теплоты в разных областях температуры.

Теория теплотвора не давала отчетливого представления о температуре, и поэтому она не могла удовлетворительно объяснить явления теплообмена. Не было ясности в том, по каким причинам теплота распределяется между телами тем, а не иным образом. В своей критике этой теории Ломоносов писал: „повсюду приходится читать в физических сочинениях о внед-

¹ Идея объяснения теплоты вращением частиц является важной отличительной чертой теории Ломоносова. К этой мысли после него обращались многие ученые XIX в., приписывавшие вращению главную или второстепенную роль (например, Дэви, Джоуль, Рэнкин, Клаузиус, Максвелл, Попов), что составило определенный этап в развитии кинетической теории.

² Стр. 23.

³ Стр. 83—85.

⁴ Стр. 81.

⁵ Стр. 65.

рени в поры тел названной выше теплотворной материи, как бы привлекаемой каким-то приворотным зельем, или, наоборот, о бурном выходе ее из пор, как бы объятай ужасом" ¹. В противоположность этому Ломоносов дал ясное представление о теплообмене как процессе, определяющемся температурой тел. Он указывает, например, что „когда частицы тела А ускоряют вращательное движение частиц тела В, то замедляют свое собственное. Вследствие этого, когда тело А при соприкосновении нагревает тело В, то само оно охлаждается" ². При этом „в частицах тела В не может быть возбуждено более быстрое движение, чем какое имеется в частицах тела А, и поэтому холодное тело В, погруженное в тело А, очевидно, не может воспринять большую степень теплоты, чем какую имеет А" ³. Тепловое равновесие устанавливается таким образом, что „тела имеют степень теплоты, присущую среде, в которой они находятся значительное время" ⁴. Так Ломоносов пришел к современным термодинамическим представлениям о температуре, как о величине, определяющей направление перехода тепла и являющейся мерой отклонения тел от теплового равновесия.

Многие из современных Ломоносову физиков не могли отрешиться от житейского разделения тепловых состояний на „теплоту" и „холод". Наряду с особым веществом теплоты они допускали существование особого вещества холода. Ломоносов критиковал это мнение ⁵ и разъяснял, что „самый низкий градус теплоты" есть то же самое, что и „наибольший градус стужи" ⁶. Для „высшей степени теплоты" он не ставил предела, но указывал, что „по необходимости должна существовать наиболее низкая и последняя степень холода, которая должна состоять в полном прекращении вращательного движения частиц" ⁷. Известно, что это было первое в науке предвидение существования абсолютного нуля температуры. Доказательство в наше время существования температур, измеряемых многими тысячами градусов, показывает, что Ломоносов не ошибся в предвидении и этой температурной области. Температуру Ломоносов представлял себе как единую физическую величину, определяющую широчайший диапазон возможных в природе тепловых состояний.

В середине XVIII в. существовало множество индивидуальных, чисто эмпирических температурных шкал. Тогда не только не была еще установлена единица температуры, но

¹ Стр. 41.

² Стр. 29.

³ Стр. 37.

⁴ Стр. 39.

⁵ Стр. 55.

⁶ Стр. 509.

⁷ Стр. 39.

даже отсчет положительных значений температуры велся по разным шкалам в противоположных направлениях. Такое положение возникло в результате сугубо эмпирического подхода к задаче построения шкалы и затемняло сущность температуры, как определенной физической величины. В противоположность этому теория Ломоносова давала исходные положения для правильного решения задачи построения единой температурной шкалы для широчайшей области температур.

Как мы видели выше, согласно Ломоносову, температура тел однозначно определяется скоростью движения частиц. Отсюда следует, что температура является такой физической величиной, которая может быть определена независимо от индивидуальных особенностей строения тел. Представление Ломоносова об объективном существовании определенных температурных состояний выражается, в частности, в его предвидении абсолютного нуля температуры (по его выражению „абсолютного холода“). Именно от этой температурной точки Ломоносов и начинает отсчет температуры и таким образом температура всегда имеет положительное численное значение. Соответственно с этим тела „всегда в какой-то степени обладают теплотою“.

Таким путем Ломоносов выработал наиболее общие представления об абсолютной температурной шкале. Чтобы дать „ясное представление о напряженности огня“, он устанавливает, что „теплота или огонь, от наименьшего до наибольшего, какой случается в природе, разделяется на температурные области, а эти — на градусы“¹. Температурные области Ломоносов разделяет с помощью постоянных точек следующим образом: „Первая и нижняя температурная область начинается от самого низкого градуса теплоты, или — что то же — от наибольшего градуса стужи, который пока еще никем не отмечен и не показан. Она оканчивается при температуре начинающегося замерзания воды . . . Вторая температурная область начинается там, где оканчивается первая, а высшим пределом ее мы принимаем ту точку, которой достигает наибольшая наблюдаемая летом жара и около которой находится теплота здорового человека. Третья температурная область простирается от этой температуры выше до точки кипящей воды. Четвертая устанавливается между кипением воды и кипением ртути. Пятая простирается отсюда до того жара, при котором плавится медь. Наконец, шестая температурная область, начинаясь от плавления меди, ищет себе предела в высшей степени огня, если таковая существует“².

Почти все выделенные Ломоносовым постоянные точки используются также и в современной термометрии: 1) нулевая точка абсолютной шкалы температур (-273°C), отвечающая

¹ Стр. 509.

² Стр. 511.

предположенному Ломоносовым „абсолютному холоду“, 2) точка таяния льда, 3) температура кипения воды, 4) температура плавления меди. Выделенная Ломоносовым первая область теперь рассматривается как область низких температур и точно так же его шестая область совпадает с областью современной оптической пирометрии. Ломоносов вел экспериментальные исследования по термометрии во всех выделенных им областях.

Следующее место из „Введения в истинную физическую химию“ ясно показывает, что Ломоносов разграничивал температуру (здесь — „степень огня“) и количество тепла („количество огня“): „Подобно тому, как в соответствии со свойствами каждого тела и каждой химической работы химик должен применять известную степень огня, так нужно очень тщательно соразмерять и количество его, чтобы не употребить слишком большое или слишком малое количество огня по отношению к объему тела, взятого для химического исследования“¹ (подчеркнуто мною, В. Б.).

В то время как температура определялась по теории Ломоносова как функция только лишь скорости движения частиц, количество тепла выражается в ней как величина, зависящая от скорости и массы частиц тела. Количество тепла Ломоносов представлял себе как суммарное количество внутреннего (вращательного) движения частиц тела. Соответственно с этим он выводит, что тело содержит тем больше тепла, чем больше скорость движения его частиц (т. е. чем выше температура тела) и чем больше масса (или плотность) тела: „при более быстром вращении частиц связанной материи, теплота должна увеличиваться, а при более медленном — уменьшаться“², „в телах имеется тем больше теплоты, чем плотнее связанная их материя, и наоборот“³.

При объяснении количественной стороны теплообмена Ломоносов исходит из принципа сохранения движения, который он применяет к внутреннему движению частиц тела и далее распространяет на теплоту. При передаче вращательного движения от частиц одного тела к частицам другого тела „столько же движения уходит от первых, сколько прибавляется у вторых“⁴, а это и означает, по Ломоносову, передачу между телами определенного количества тепла.

Таким путем Ломоносов пришел также к представлению об удельной теплоемкости тел. Он указывает, что „тела, удельно более тяжелые, воспринимают больше теплоты и долее ее удерживают, чем удельно более легкие“⁵. В этом же смысле он говорит о неодинаковой „емкости для теплоты“ разных

¹ Стр. 511.

² Стр. 23.

³ Стр. 13.

⁴ Стр. 29.

⁵ Стр. 69.

тел¹. Кроме того представление о конечной теплоемкости тел содержится в неявном виде во многих даваемых им определениях. Ломоносов также пользуется понятием о теплотворной способности топлива².

Если речь идет о теплообмене или превращении в теплоту приложенной к телу внешней работы³, то Ломоносов говорит об увеличении или уменьшении „количества теплоты“ или „количества огня“. Под „интенсивностью теплоты“ он понимает общий тепловой запас, что вытекает, например, из следующего: „опыт показывает, что интенсивность ее (теплоты, В. Б.) пропорциональна весу тела“⁴. В таком же смысле он говорит о заключающемся в телах „жаре“.

Наряду с этим Ломоносов указывает на производимые теплотою действия (например, плавление) как на проявление внутреннего движения материи, ее „двигательной силы“⁵. Благодаря такой „силе“ „огню свойственно изменять сцепление между частицами“⁶ любых тел⁷. Когда речь идет об этой способности теплоты, Ломоносов чаще всего применяет термин „сила огня“ или „сила теплоты“.

Термин „сила огня“ особенно часто употребляется в гл. 3 „Введения в истинную физическую химию“, где речь идет о „средствах, которыми изменяются смешанные тела“. Например: „Расплавление есть превращение твердого тела в жидкое, производимое силою огня“⁸. Но затвердевание происходит без приложения какой-либо „силы“ и Ломоносов там же пишет: „Застывание есть переход жидкого тела в твердое при уменьшении степени огня“⁹, отмечая только условие понижения температуры („степени огня“), необходимое для затвердевания¹⁰. Точно так же „силою огня“ обуславливаются процессы возгонки¹¹ остекловывания¹², спекания¹³, а операция отжига характеризуется уже определенной „степенью жара“¹⁴.

Теплота — по Ломоносову — вовсе не просто механическое понятие. Он подчеркивает богатство связанных с ней качественных изменений и ее важную роль в развитии природы. Например: „Огонь, который в умеренной своей силе теплотою называется, присутствием и действием своим по всему свету толь широко распространяется, что нет ни единого места, где бы он не был ... от него все внутренние движения тел, следовательно и внешние происходят ... Им обращается кровь и сохраняется здравие и жизнь наша. Его силою производят горы во внутренностях своих всякого рода минералы ... без

¹ Стр. 13.

⁴ Стр. 15.

⁷ Стр. 505.

² Там же.

⁵ Стр. 11.

⁸ Стр. 527.

³ Стр. 27.

⁶ Стр. 515.

⁹ Стр. 531.

¹⁰ В рукописном оригинале зачеркнуто первоначально написанное определение застывания, где оно характеризовалось уменьшением „силы огня“. Последний термин Ломоносов исправил на „степень огня“.

¹¹ Стр. 547.

¹² Стр. 535.

¹³ Стр. 533.

¹⁴ Там же.

него погаснуть солнцу, луне затмиться, звездам исчезнуть и самой природе умереть должно... Итак, что из естественных вещей испытания нашего более достойно, как сия всех созданных вещей общая душа, сие всех чудных перемен, во внутренности тел рождающихся, тонкое и сильное орудие?"¹

В работах по истории физики нередко указывают, что теория теплотвора способствовала уяснению понятия о количестве тепла. Вернее сказать, что она не столько уясняла это понятие, сколько давала формальное о нем представление. Без разграничения от понятий о температуре и о конечной теплоемкости тел представление о количестве тепла остается беспредметным, а выше этого теория теплотвора подняться не могла. Ломоносов же не только разграничил все эти величины, но и указал на их взаимную связь на основе представления о строении и внутреннем движении материи.

Для целеустремленной постановки калориметрических исследований необходимо было уяснить эту связь. Известно, что калориметрические измерения Ломоносов проводил большей частью совместно со своим личным другом Г. Рихманом. Так, например, в своем отчете за 1753 г. он писал: „С покойным профессором Рихманом делал я химико-физические опыты в лаборатории для исследования градуса теплоты, который на себя вода принимает от погашенных в ней минералов, прежде раскаленных“². Здесь применялся тот разработанный Рихманом метод, который и в настоящее время имеет важнейшее значение: количество тепла определяется по повышению температуры известного весового количества воды, в которую быстро погружается нагретое тело. В отчете за 1747 г. Рихман указывает „Трактат о градусе теплоты, который тогда происходит, когда две части воды разной теплоты вместе смешиваются, и я дал подлинное правило к сысканию этой теплоты“³. Это правило получило широкую известность и только благодаря его применению удалось в конце XVIII в. выработать такие важные калориметрические понятия, как скрытая теплота перехода и др.

Работы Ломоносова и Рихмана впервые положили основы современной калориметрии. Ломоносов разграничил понятия температуры и количества тепла, а Рихман разработал важнейший для калориметрии метод измерения.

¹ Стр. 357—358.

² Биллярский П. Материалы для биографии Ломоносова, 1865, СПб, стр. 249.

³ Елисеев А. А. Физический кабинет Академии Наук в первой половине XVIII в. и Ломоносов. Сборник „Ломоносов“, изд. АН СССР, 1940, стр. 173—206.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
П. Д. Рудаков, Исследование спиральных окулярных микро- метров	5
Н. А. Гаевский, Общая методика измерений и поверки за- цепления некруглых зубчатых колес	25
М. Ф. Гречко, Исследование интерференционного прибора типа ПИУ-1	48
М. Ф. Гречко, Методика измерения червячных фрез на уни- версальном микроскопе контактным приспособлением	56
Л. К. Каяк, Состояние эталонов длины	69
Л. К. Каяк и А. Н. Королева, Исследование стереокомпа- ратора СКС-1 № 480002	71
В. П. Простяков, Внутреннее давление в газонаполненных ртутно-стеклянных термометрах и его влияние на показания термо- метра	96
В. П. Простяков, Термометрический метод определения ви- димого коэффициента расширения ртути в стеклянных оболочках . .	110
В. Я. Билык — Установление М. В. Ломоносовым понятий об ос- новных тепловых величинах	128

БИБЛИОТЕКА
 Всесоюзного института исследования
 металлов и сплавов в Ленинграде
 Академик В. И. Зильберман

Содержание

Предисловие

1. Введение

2. Основные понятия

3. Методы исследования

4. Результаты работы

5. Заключение

6. Литература

7. Приложение

8. Библиография

9. Справочный материал

10. Заключение

Технический редактор Л. В. Соколова. Корректоры Е. С. Кушля и В. А. Белых.

Подписано к печати 28/II 1952 г. М-16654. Формат бумаги 60×92¹/₁₆.

Печ. листов 3,5. Уч.-изд. листов 7,8. Тираж 600 экз. Заказ 2003.

Номинал — по прейскуранту 1952 года.

Типография «Красный Печатник», Ленинград, проспект имени И. В. Сталина, 91.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
18	11 сверху	$\dots = \sqrt{2} \cdot md_1 = \frac{\sqrt{4} \cdot md_1}{\sqrt{2}}$	$\dots = \pm \sqrt{2} \cdot md_1 = \pm \frac{\sqrt{4} \cdot md_1}{\sqrt{2}}$	Авт.
18	12 сверху	$\dots = \sqrt{2} \cdot md_2 = \frac{\sqrt{4} \cdot md_2}{\sqrt{2}}$	$\dots = \pm \sqrt{2} \cdot md_2 = \pm \frac{\sqrt{4} \cdot md_2}{\sqrt{2}}$	"
27	20 сверху (ф-ла)	$\dots = \frac{\frac{3}{2} (r^2 + r'^2)^{3/2}}{r^2 + 2r'^2 - rr'}$	$\dots = \frac{(r^2 + r'^2)^{3/2}}{r^2 + 2r'^2 - rr'}$	"
38	11 сверху (р-ла)	$r^{\theta_1} = \dots$	$r^{\theta_1} = \dots$	Ред.
38	1 снизу	$r^{\theta_2} = \dots$	$r^{\theta_2} = \dots$	"
97	12 снизу (ф-ла)	$3,810 \cdot 10^{-6} \frac{cM^2}{\kappa g}$	$3,8 \cdot 10^{-6} \frac{cM^2}{\kappa \Gamma}$	Авт.
98	9 сверху (ф-ла)	$\dots = 6300 \cdot 3,810 \cdot 10^{-6} p$	$\dots = 6300 \cdot 3,8 \cdot 10^{-6} p$	"
100	10 сверху (ф-ла)	$\dots = \frac{L}{4\pi} H$	$\dots = \frac{L^2}{4\pi} H$	"
100	10 снизу (ф-ла)	$\dots) \frac{L^2}{4\pi} H = \dots$	$\dots) - \frac{L^2}{4\pi} H = \dots$	"
101	8 сверху (ф-ла)	$\dots + \frac{1}{\left(\frac{d}{a}\right)^2} + \dots$	$\dots - \frac{1}{\left(\frac{d}{a}\right)^2} + \dots$	"
101	2 сверху (ф-ла)	$\dots \frac{d}{a} \dots$	$\dots \frac{d}{a} \dots$	Типогр.
102	3 снизу (ф-ла)	$\dots) \frac{d}{4} + \frac{d^2}{2} (\sigma + 1) -$ $- 2(\sigma + 1) da + 2(\sigma - 1) \dots$	$\dots) \frac{d^2}{4} + \frac{d^2}{2} (\sigma + 1) +$ $+ 2(\sigma + 1) da + 2(\sigma + 1) \dots$	Авт. "
103	2 сверху (ф-ла)	$\dots \frac{d}{a} + (\sigma + 1) + 2(\dots$	$\dots \frac{d}{a} + 2(\sigma + 1) + 2(\dots$	"
105	1 снизу (ф-ла)	$\dots + \beta)$	$\dots + a)$	"
105	7 снизу (ф-ла)	$\dots + \frac{3 - 12\sigma}{4} + \dots$	$\dots + \frac{3 + 12\sigma}{4} + \dots$	"

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
113	12 снизу (ф-ла)	$\dots = \frac{\dots - \bar{\beta}_0^{12} t_1}{t_2 - t_1}$	$\dots = \frac{\dots + \bar{\beta}_0^{12} t_1}{t_2 - t_1}$	Авт.
120	7 сверху (ф-ла)	$\dots + \frac{1 + \bar{\beta}_0^{01} \theta_1}{1 + \bar{\beta}_0^{02} \theta_1} \frac{n_0^{100}}{100} x$	$\dots + \frac{1 + \bar{\beta}_0^{01} \theta_1}{1 + \bar{\beta}_0^{02} \theta_1} \frac{n_0^{100}}{100} x$	"
121	11 сверху (в заголовке таблицы)	(на отожж. стекла)	(не отожж. стекла)	Корр.
121	14 снизу	в равных	в разных	Авт.

5 р. 50 к.



ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА

Ленинград, Невский пр., 58