

КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СНК СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИН

ТРУДЫ ВНИИМ, выпуск 22 (38)

ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД—1939

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
LIBRARY
1850 EAST 5TH AVENUE
CHICAGO, ILL. 60607
ACQUISITIONS
530 EAST 5TH AVENUE
CHICAGO, ILL. 60605

КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СНК СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИН

ВЫПУСК 22 (38)



Под редакцией
доктора технических наук **В. А. БАРИНОВА**

*Музыкальному и театру
Михаилу Федоровичу
за искренне преданное делу
В. А. Баринова*

25/12-39

Л. В. Ермаков

ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД—1939

АННОТАЦИЯ

Настоящий сборник содержит восемь статей, посвященных метрологическому исследованию: основных и рабочих штриховых эталонов длины, новых методов измерения концевых мер и вопросов определения коэффициентов термического удлинения 24-метровых инварных проволок базисного прибора Едерина.

При весьма ограниченном количестве метрологической литературы, данный сборник по своей тематике является полезным не только для работающих в области прикладной метрологии, но также и для геодезистов и работников крупных заводских измерительных лабораторий.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
И. И. Кварибург , М. А. Афанасьев и В. А. Барнинов. Новая платино-иридиевая мера М 20° Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии (ВНИИМ)	3
Н. Я. Бесценный. Влияние расположения опорных точек новой платино-иридиевой меры М 20° на ее длину и величину прогиба	10
М. А. Афанасьев. Исследование коэффициента расширения платино-иридиевой копии № 28 международного прототипа метра — основного эталона длины СССР	23
В. А. Барнинов. Исследование инварного метра № 598 — рабочего эталона длины Московского государственного института мер и весов	46
В. А. Барнинов. Измерение плоскопараллельных концевых мер (плиток Иогансона), длиной свыше 100 мм, методом компараторного сравнения со штриховыми мерами	58
Н. Я. Бесценный. О методе измерения плоскопараллельных концевых мер, длиной от 100 до 500 мм, на универсальном компараторе для штриховых мер	70
Н. Я. Бесценный. К вопросу об измерении плоскопараллельных концевых мер, длиной в 1 м, на компараторе для штриховых мер	75
В. А. Барнинов. Вопросы исследования и определения коэффициентов термического удлинения инварных геодезических проволок компараторными методами	85
Н. Я. Бесценный. О применении метода электрического конденсатора для измерения концевых мер длины с большой точностью	99

О П Е Ч А Т К И

к книге „Исследования в области измерения длин“

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
50	3-я сверху (формула 11)	$m_x = \pm \frac{\epsilon}{\sqrt{(\Delta l_i)^2}}$	$m_x = \pm \frac{\epsilon}{\sqrt{\sum (\Delta l_i)^2}}$
59	4-я сверху	(рис. 1, стр. 163)	(рис. 1, стр. 61)
68	21-я сверху	$\pm 0,5 \mu$	$\pm 0,05 \mu$
71	19-я сверху	(см. стр. 74)	(см. стр. 72)
96	формула 11-я	$l'_0 + \alpha l_i + \beta l_i^2 = l_{T_1}$	$l'_0 + \alpha l_i + \beta l_i^2 = l_{T_1}$
96	19-я снизу	l_{T_1} — действительная длина	l_{T_1} — действительная длина

Зак. № 700

(20₁₀ платины и 10₁₀ иридия), массой около 3,1 кг, был приобретен в 90-х годах прошлого столетия от известной английской фирмы „Джонсон, Маттеи и К^о“, которая выполнила заказ Международной метрической комиссии на единую плавку иридовой платины для создания прототипа метра \mathcal{M} и всех национальных эталонов метра. Так как сам по себе этот платино-иридиевый стержень представлял собой пока лишь материал и не обладал всеми необходимыми геометрическими свойствами, предъявляемыми к эталонам длины X-образного поперечного сечения, т. е. требовал механической обработки, выправления и тщательной шлифовки его поверхностей (которых при X-образном сечении насчитывается 22), — эта ответственная работа в 1931 г. была поручена механику-физику Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии И. И. Кварнбергу (умер в 1937 г.).

И. И. Кварнберг работал над порученной ему задачей около двух лет. Стержню была придана совершенная прямолинейность; все 22 плоскости были доведены до надлежащих размеров, что потребовало снятия со

АННОТАЦИЯ

Настоящий сборник содержит восемь статей, посвященных метрологическому исследованию: основных и рабочих штриховых эталонов длины, новых методов измерения концевых мер и вопросов определения коэффициентов термического удлинения 24-метровых инварных проволок базисного прибора Едерина.

При весьма ограниченном количестве метрологической литературы, данный сборник по своей тематике является полезным не только для работающих в области прикладной метрологии, но также и для геодези-

- н. Я. Бесценный. К вопросу об измерении плоскопараллельных концевых мер, длиной в 1 м, на компараторе для штриховых мер 75
- В. А. Барinov. Вопросы исследования и определения коэффициентов термического удлинения инварных геодезических проволок компараторными методами 85
- Н. Я. Бесценный. О применении метода электрического конденсатора для измерения концевых мер длины с большой точностью 99

НОВАЯ ПЛАТИНО-ИРИДИЕВАЯ МЕРА М 20° ВСЕСОЮЗНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА МЕТРОЛОГИИ (ВНИИМ)

§ 1. Краткие сведения об изготовлении меры

Новая платино-иридиевая мера М 20° представляет собой перво-классный эталон длины, обладающий той особенностью, что эта мера градуирована не при 0°, как это было принято для прототипа метра и всех национальных эталонов метра, а при нормальной температуре 20° С. Благодаря этому, в условиях лабораторных измерений, сводится до минимума влияние на результаты компараций недостаточно точного значения величин коэффициентов термического удлинения, сличаемых с данным эталоном других мер длины.

Второй весьма важной особенностью нового эталона является наличие миллиметровой шкалы по всей длине стержня на его нейтральной плоскости с диапазоном в 1002 мм (от -1 до 1001 мм), в то время как прототип метра и национальные эталоны метра имеют по существу лишь по два основных штриха, определяющих величину только одного метра при температуре 0°.

Указанные особенности новой меры выделяют ее из всех существующих платино-иридиевых эталонов длины.

Стержень, послуживший для изготовления нового эталона длины (90% платины и 10% иридия), массой около 3,7 кг, был приобретен в 90-х годах прошлого столетия от известной английской фирмы «Джонсон, Маттеи и К°», которая выполнила заказ Международной метрической комиссии на единую плавку иридной платины для создания прототипа метра М и всех национальных эталонов метра. Так как сам по себе этот платино-иридиевый стержень представлял собой пока лишь материал и не обладал всеми необходимыми геометрическими свойствами, предъявляемыми к эталонам длины X-образного поперечного сечения, т. е. требовал механической обработки, выправления и тщательной шлифовки его поверхностей (которых при X-образном сечении насчитывается 22), — эта ответственная работа в 1931 г. была поручена механику-физику Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии И. И. Кварнбергу (умер в 1937 г.).

И. И. Кварнберг работал над порученной ему задачей около двух лет. Стержню была придана совершенная прямолинейность; все 22 плоскости были доведены до надлежащих размеров, что потребовало снятия со

стержня тонких слоев очень вязкого материала, каким является иридиская платина. Одним из трудных этапов отделки стержня являлось установление параллельности верхних и нижних плоскостей с нейтральной плоскостью, шлифование всех 22 плоскостей и, наконец, окончательная полировка под зеркало нейтральной плоскости.

Эта работа была выполнена И. И. Кварнибергом с присущим ему искусством, причем для полировки под зеркало нейтральной плоскости И. И. Кварниберг применил собственные методы и средства, основанные на его долголетнем опыте.¹

Вся работа по шлифованию плоскостей стержня систематически проверялась на универсальном компараторе „SIP“ научными сотрудниками лаборатории мер длины.

Завершающей работой по изготовлению эталона являлось нанесение штрихов на подготовленной для этой цели нейтральной плоскости стержня. Эта задача потребовала почти двух месяцев предварительной подготовки, так как сначала наносились пробные штрихи на верхних плоскостях и, в зависимости от получаемых результатов, регулировалась соответствующим образом линейная делительная машина. В этой работе принимал участие старший научный сотрудник лаборатории М. А. Афанасьев.

Когда было закончено нанесение шкалы на нейтральной плоскости стержня, новый эталон 5 июля 1933 г. был предварительно сличен с платино-иридиевой мерой П 4. Действительная длина эталона для температуры 20° С оказалась равной:

$$[M 20^{\circ}] = 1 \text{ м} + 0,32 \text{ мк.} \quad (1)$$

Толщина отдельных штрихов равна 4 мк.

Таким образом, ВНИИМ обогатился новым единственным в своем роде платино-иридиевым эталоном, что и было засвидетельствовано специальным актом от 7 июля 1933 г.

Затем этой мере был дан отдых на полгода, после чего было приступлено к ее изучению.

Длина нового эталона, определяемая формулой (1), была получена при расположении данной меры, в момент ее компарации, на Бесселевых точках опоры, расстояние между которыми в этом случае было рассчитано равным 600,8 мм. Однако, принимая во внимание действительные геометрические и физические данные эталона $M 20^{\circ}$, научный сотрудник лаборатории Н. Я. Бесценный теоретически рассчитал, что выгоднее расстояние между точками опор установить равным 620 мм (точки Эри), так как при этом условии длина проекции нейтральной оси данного стержня останется неизменной, хотя и будет наблюдаться значительный прогиб стержня (20 мк) в середине. Имея же в виду, что новый эталон разделен по всей длине на миллиметры, еще выгоднее будет такое расположение опорных точек, при котором достигается наименьшая разность высот

¹ К сожалению, смерть унесла в могилу вместе с автором и его секрет полировки больших поверхностей на таком тяжелом для этого рода операций материале, каким является иридиская платина.

наиболее высокой и наиболее низкой точек нейтральной поверхности эталона. Расстояние между этими точками опоры Н. Я. Бесценный определил равным 591,9 мм. Кроме того, Н. Я. Бесценный из теоретических же расчетов определил, что перенос эталона с плоскости на точки Бесселя увеличивает длину проекции нейтральной оси на 0,18 м (см. статью Н. Я. Бесценного в настоящем сборнике: „Влияние расположения опорных точек новой платино-иридиевой меры М 20° на ее длину и величину прогиба“).

§ 2. Результаты сличения меры М 20° с основным эталоном № 28 и рабочими эталонами ВНИИМ

Как указано выше, предварительное определение длины М 20° было проведено путем сличения со специальным платино-иридиевым эталоном П 4.

Так как во время нанесения штрихов на нейтральной плоскости стержня последний покоился на горизонтальной плоскости стола делительной машины, то и первое сличение с П 4 производилось для новой меры на компараторе, исходя из того же условия, т. е. мера в ванне компаратора была установлена непосредственно на горизонтальную плоскость одной из подставок для сличаемых мер. Ванна не заполнялась водой.

В этих условиях для меры М 20° была получена следующая длина при 20° С (2 июля 1933 г.).

$$[M 20^\circ] = 1 м - 0,3 м. \quad (2)$$

При условии расположения ее на Бесселевых точках на расстоянии, равном 600,8 мм, была получена формула

$$[M 20^\circ] = 1 м + 0,32 м. \quad (2^*)$$

15 июля 1933 г. было произведено сличение новой меры с основным эталоном № 28. Это сличение дало значение меры при 20° С:

$$[M 20^\circ] = 1 м + 0,18 м, \quad (3)$$

т. е. значение, совпадающее с предыдущим в пределах допустимых ошибок компараторных наблюдений $\pm 0,2 м$.

Через полгода, в январе 1934 г., эталон М 20° был сличен вновь с эталоном П 4 и затем с инварным метром М 318. Эти два сличения производились на большом 4-метровом компараторе „SIP“, причем сама испытываемая мера покоилась в ванне компаратора не на опорах Бесселя, а на горизонтальной плоскости бронзовых подставок для сличаемых мер и ванна компаратора была наполнена водой.

Результаты этой компарации, при указанных условиях, получились следующие:

а) из сравнения с П 4

$$[M 20^\circ] = 1 м - 0,27 м; \quad (4)$$

б) из сравнения с М 318

$$[M 20^\circ] = 1 м - 0,32 м \quad (5)$$

(с вероятной погрешностью порядка $\pm 0,1 м$).

Сравнивая эти результаты с данными (2) от 2 июля 1933 г., видим полное их совпадение.

Далее, новому эталону опять был дан покой до 1935 г., в первой половине которого, по специальной программе, изучались его отдельные подразделения, после чего данная мера была помещена в хранилище эталонов ВНИИМ и в течение двух лет не подвергалась изучению. В мае 1937 г. произведено новое сличение $M 20^\circ$ с основным эталоном № 28.

Это сличение было выполнено руководителем лаборатории В. А. Баринным на малом универсальном компараторе. Сличаемые меры находились в воде при температуре около $19,2^\circ\text{C}$, и эталон $M 20^\circ$ лежал на роликах, установленных на расстоянии 592 мм друг от друга.

Наблюдения производились при двух положениях сравниваемых мер — АВ и ВА (с переключкой мер на 180°).

Сличения дали следующий результат при 20°C :

$$[M 20^\circ] = 1 м + 0,23 \mu \quad (6)$$

(с вероятной погрешностью $\pm 0,1 \mu$).

Сравнение той же меры с эталоном П 4, проведенное следом за изложенным, дало менее удовлетворительный результат:

$$[M 20^\circ] = 1 м + 0,59 \mu. \quad (7)$$

Если принять среднее значение из (6) и (7), тогда для $M 20^\circ$, получаем:

$$[M 20^\circ] = 1 м + 0,42 \mu. \quad (8)$$

Исходя из предположения, что стержень нового эталона длины принадлежит к серии стержней, изготовленных фирмой „Джонсон, Маттеи и К^о“ по заказу Международной метрической комиссии в 80-х годах прошлого столетия, т. е. из первой плавки, — приведение длины новой меры $M 20^\circ$ к температуре 20°C производилось в 1933 г. на основе численного значения коэффициента термического удлинения, полученного в ВНИИМ в 1931 г. М. А. Афанасьевым и В. А. Баринным, а именно:

$$\alpha_m = (8,61 + 0,0015 t) \cdot 10^{-6} \quad (9)$$

В дальнейшем, коэффициент термического удлинения принимался утвержденный VIII Международной генеральной конференцией по мерам и весам, т. е.

$$\alpha_m = (8,62 + 0,0018 t) \cdot 10^{-6}. \quad (10)$$

Специальное определение коэффициента термического удлинения, приведенное в § 4, дает основание предполагать, что стержень эталона $M 20^\circ$ не принадлежит к серии платино-иридиевых стержней основной плавки.

§ 3. Результаты изучения отдельных подразделений эталона $M 20^\circ$

Нанесение на плоскости миллиметровой шкалы было выполнено на автоматической делительной машине „SIP“, установленной в лаборатории мер длины около 40 лет тому назад. Задача усложнялась устарелостью конструкции машины и ее износом от долголетней работы.

Вследствие этого машина была подвергнута новой юстировке и регулировке.

Кроме того, требовалась специальная регулировка термического компенсатора машины, чтобы для общей длины меры получить при 20° С величину, равную одному метру.

После этого стержень был окончательно установлен на машину для нанесения полной миллиметровой шкалы на ее нейтральной плоскости.

Как видно из данных § 2, для общей длины задача была разрешена вполне удачно. При нанесении же промежуточных штрихов сказалось влияние изношенности машины.

Изучение подразделений меры на компараторе показало, что погрешности возрастают постепенно к середине меры, достигая 18 μ , а затем уменьшаются. Это понятно, так как именно средняя часть винта машины чаще всего была в работе, а следовательно и претерпела наиболее значительный износ. Изучению подвергались все дециметровые интервалы, затем сантиметры первого и последнего дециметров, и наконец, миллиметры первого и последнего сантиметров.

Для изучения дециметров был применен метод прямой калибровки, а для изучения сантиметров и миллиметров — метод перекрестной калибровки. Обработка материалов наблюдений производилась по способу Перара.

Для вычисления искомым погрешностей отдельных делений получено было 293 условных уравнения, из которых 55 разрешали задачу для дециметров и по 119 — для отдельных сантиметров первого и последнего дециметров и отдельных миллиметров первого и последнего сантиметров.

Калибровка дала следующие результаты:

А. Для дециметровых интервалов

дм	μ
(0-1)	- 2,0
(0-2)	- 5,5
(0-3)	-16,2
(0-4)	-18,0
(0-5)	- 6,4
(0-6)	-10,6
(0-7)	- 8,8
(0-8)	- 5,5
(0-9)	- 2,9

В. Для сантиметровых интервалов:

в первом дециметре		в последнем дециметре	
см	μ	см	μ
(0-1)	-7,5	(90-91)	+3,6
(0-2)	-8,8	(90-92)	+5,4
(0-3)	-8,5	(90-93)	+5,2
(0-4)	-7,1	(90-94)	-3,3
(0-5)	-6,4	(90-95)	+1,2
(0-6)	-6,8	(90-96)	-0,9
(0-7)	-6,3	(90-97)	+3,7
(0-8)	-4,7	(90-98)	+2,7
(0-9)	-4,3	(90-99)	+5,7

С. Для миллиметровых интервалов:
в первом сантиметре в последнем сантиметре

в первом сантиметре		в последнем сантиметре	
мм	μ	мм	μ
(0-1)	+0,8	(990-991)	0,0
(0-2)	+0,9	(990-992)	+0,4
(0-3)	+1,6	(990-993)	+0,4
(0-4)	+1,2	(990-994)	-0,5
(0-5)	+0,7	(990-995)	+0,4
(0-6)	+0,9	(990-996)	+0,5
(0-7)	0,0	(990-997)	+1,1
(0-8)	-0,4	(990-998)	+0,8
(0-9)	-1,0	(990-999)	+1,3

Следует заметить, что для платино-иридиевого эталона П4, на котором метрическая шкала нарезалась в Международном бюро мер и весов,

погрешности дециметровых интервалов достигают в середине меры 25μ , поэтому можно считать, что шкала новой платино-иридиевой меры $M 20^\circ$ нарезана вполне удовлетворительно, принимая во внимание сравнительную устарелость делительной машины.

§ 4. Определение коэффициента термического удлинения меры $M 20^\circ$

Как указывалось выше, для первоначальных вычислений принималось значение коэффициента термического удлинения, установленное для основных эталонов длины из иридийной платины. Для полноты изучения новой меры, однако, необходимо было произвести самостоятельное его измерение, имея в виду, что даже для эталонов одной плавки получаются результаты, отличающиеся друг от друга.

Для изучения термического коэффициента $M 20^\circ$ применялся инварный эталон метра № 318, термический коэффициент которого выражается уравнением

$$\alpha_{318} = (1,912 - 0,0047 t) \cdot 10^{-6}. \quad (11)$$

Изучение термического коэффициента меры $M 20^\circ$ производилось дважды. Первое исследование в апреле 1934 г. являлось предварительным и выполнялось на малом компараторе „SIP“ при трех последовательных температурах, близких к 0° , 20° и 35° , и при температуре, весьма близкой к 20° для меры № 318.

При наблюдении определялись разности длин испытуемой меры $M 20^\circ$, имеющей температуры t , и меры № 318, имеющей температуры t' . Все температуры t' близки друг к другу, и поэтому без сколько-нибудь заметной погрешности все наблюдаемые разности длин можно привести к одной и той же температуре меры № 318, пользуясь термическим коэффициентом ее.

При обработке результатов предварительного исследования, все наблюдаемые разности были приведены к средней температуре $t_m = 20^\circ,029$ меры № 318.

Принимая для выражения длины меры $M 20^\circ$, в зависимости от температуры, обычную квадратичную формулу, для каждой из наблюдаемых разностей можно написать уравнение вида:

$$x + yt + zt^2 = m, \quad (12)$$

где m — разность длин испытуемой и контрольной мер при $t = 0^\circ$, а $y + zt$ — средний коэффициент термического удлинения испытуемой меры.

В настоящем случае условные уравнения получились следующие:

$$\left. \begin{aligned} x + 0,384y + 0,14746z &= -220,15 \mu \\ x + 19,915y + 396,60722z &= -51,39 \mu \\ x + 35,146y + 1235,24132z &= +80,49 \mu \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Решая данную систему по способу наименьших квадратов, получаем следующие значения неизвестных:

$$\left. \begin{aligned} x &= -223,46 \mu, \\ y &= +8,630 \mu, \\ z &= +0,00052 \mu \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

при вероятной погрешности одного наблюдения $\pm 0,2 \mu$.

Второе исследование производилось в сентябре 1937 г. на большом 4-метровом компараторе „SIP“.

В этом случае контрольная мера № 318 находилась в малой ванне компаратора при сравнительно постоянной температуре, близкой к $16^{\circ},5$; испытываемая же мера $M_{20^{\circ}}$ помещалась в большой ванне, температура воды которой менялась. Экспериментальные наблюдения были выполнены при пяти температурах, близких к 1° , 9° , 17° , 24° и 30° .

При вышеизложенном методе обработки для данных наблюдений получены следующие значения искоемых неизвестных:

$$\left. \begin{aligned} x &= -218,14 \mu \\ y &= + 8,604 \mu \\ z &= + 0,00070 \mu \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

при вероятной погрешности одного наблюдения $\pm 0,1 \mu$.

Сравнивая результаты (14) и (15), замечаем, что числа, полученные для y и z из первого и второго определений различаются незначительно. Если же эти последние данные сравнить с данными (10) Международного бюро мер и весов, то особенно значительное расхождение наблюдается для значения z , характеризующего, как известно, изменение y в зависимости от изменения температуры t .

Если взять среднее для y и z из результатов (14) и (15), то получаем:

$$\left. \begin{aligned} y &= + 8,617 \mu, \\ z &= + 0,00061 \mu. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

При подобной постановке вопроса, первый член квадратичной формулы термического уравнения почти согласуется с данными уравнения (10), но второй член значительно меньше.

Лаборатория мер длины остановилась именно на данных формулы (16), приняв для меры $M_{20^{\circ}}$ значение

$$\alpha_{M_{20^{\circ}}} = (8,62 + 0,0006 t) \cdot 10^{-6}. \quad (17)$$

Характерно, что каждое из определений коэффициентов платино-иридиевых мер в ВНИИМ всегда давало второй член меньше, чем определения в Международном бюро. Для $M_{20^{\circ}}$ он получился особенно малым.

Н. Я. БЕСЦЕННЫЙ

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОПОРНЫХ ТОЧЕК НОВОЙ ПЛАТИНО-ИРИДИЕВОЙ МЕРЫ М 20° НА ЕЕ ДЛИНУ И ВЕЛИЧИНУ ПРОГИБА

Штриховые эталоны, изучаемые с помощью компараторов, обычно располагают не на плоской поверхности, а на двух опорных роликах, отстоящих на равных расстояниях от концов эталона. Такой порядок установки эталона, благодаря которому последний со всех сторон окружен одной и той же средой — водой, способствует выравниванию температуры во всех частях эталона.



Рис. 1.

Вместе с тем расположение эталона на двух роликах устраняет трение между поверхностью эталона и поверхностью подставки, препятствующее эталону изменять свою длину, сле-

дуя за малейшими изменениями температуры окружающей среды. Эти обстоятельства оказывают положительное влияние на точность сличения эталонов. Однако, при расположении эталона на двух опорах, он прогибается под влиянием собственного веса. Кривая изогнутой оси эталона изображена на рис. 1.

С изгибом эталона непосредственно связаны следующие явления, на которые необходимо обратить внимание:

1) лицевая поверхность эталона, на которой нанесены штрихи, изгибается соответственно изгибу оси эталона; отдельные участки этой поверхности, лежавшие до изгиба эталона в одной горизонтальной плоскости, занимают наклонное положение с различными, в различных участках поверхности, углами наклона;

2) штрихи, нанесенные по всей длине эталона, лежавшие до изгиба эталона в одной горизонтальной плоскости, теряют это свойство;

3) длина эталона, т. е. расстояние между его штрихами, как будет показано далее, изменяется с изгибом эталона.

Как величина стрел прогиба эталона, в различных точках его длины, так и длина эталона, зависят от удаленности опорных точек эталона от его концов. Из теории сопротивления материалов известно, что с другой стороны рассматриваемые величины зависят также от размеров и формы поперечного сечения эталона. Так как поперечное сечение новой платино-иридиевой меры М 20° несколько отличается от сечения основных платино-иридиевых эталонов, то нет основания взять для новой платино-

иридневой меры то же расположение опорных точек, какое принято для основных эталонов.

Отыскание наиболее рационального расположения опорных точек для меры М 20° и составляет задачу настоящей работы.

Впервые вопрос о деформации меры длины, расположенной на двух опорах, был аналитически изучен Бесселем в 30-х годах прошлого столетия [1].

Этой же теме посвящена работа бывшего директора Международного бюро мер и весов Броха, опубликованная в 1890 г. [2], которой мы и воспользуемся для решения нашей задачи.

§ 1. Уравнение изогнутой оси эталона

При изгибе балки под влиянием сил, перпендикулярных к ее оси, в каждой ее части волокна, составляющие выпуклости балки, удлиняются, а волокна, составляющие вогнутости балки, укорачиваются. Между удлиненными и укороченными волокнами изогнутой балки лежит так называемая нейтральная поверхность, проходящая через центры тяжести сечений балки. Как известно из теории сопротивления материалов, эта нейтральная поверхность не изменяет своей длины при изгибе балки. Среднюю линию или ось нейтральной поверхности называют изогнутой осью балки. Зная уравнение изогнутой оси нашего эталона, мы могли бы весьма просто найти величину его прогибов и наклон поверхности, на которой нанесены штрихи в различных точках длины эталона. Для нахождения уравнения изогнутой оси эталона Бессель воспользовался известной зависимостью теории сопротивления материалов:

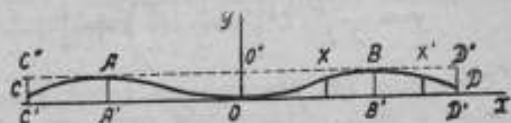


Рис. 2.

$$\frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} = \frac{M}{EI},$$

где левая часть уравнения представляет собой выражение кривизны изогнутой оси балки, M — изгибающий момент в том же сечении, I — момент инерции сечения относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести сечения, E — модуль упругости материала балки.

Пусть $CAOBD$ — изогнутая ось эталона (рис. 2), O — середина эталона, A и B — проекции точек опор на изогнутую ось эталона. Ввиду малости углов изгиба $\left(\frac{dy}{dx}\right)^2$ очень мало, и из предыдущего уравнения получаем:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI}. \quad (1)$$

При том расположении координатных осей, которое указано на рис. 2, Брох для изгибающего момента в сечении эталона, лежащем между опорами, получил:

$$M = \frac{1}{2} p L^2 \left[-\frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left(\frac{l}{L} \right) - \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right],$$

где L — общая длина эталона, l — расстояние между опорами, p — вес одного погонного миллиметра эталона. Поэтому

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{2} \frac{p}{EI} L^2 \left[-\frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left(\frac{l}{L} \right) - \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right], \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{dy}{dx} = \frac{1}{2} \frac{p}{EI} L^2 \left[\frac{1}{4} \frac{x}{L} + \frac{1}{2} \left(\frac{l}{L} \right) \left(\frac{x}{L} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где φ угол наклона кривой,

$$y = \frac{1}{2} \frac{p}{EI} L^4 \left[-\frac{1}{8} \left(\frac{x}{L} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{l}{L} \right) \left(\frac{x}{L} \right)^2 - \frac{1}{12} \left(\frac{x}{L} \right)^3 \right]. \quad (4)$$

Уравнение (4) представляет собой уравнение кривой изогнутой оси эталона в части, заключенной между опорами.

Подставив в уравнения (3) и (4) $x = \frac{1}{2} l$, Брох нашел угол кривой с осью абсцисс в точке опоры B и стрелу прогиба в середине эталона — $f = BB_1 = OO''$:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{2} \frac{p}{EI} L^2 \left[-\frac{1}{8} \left(\frac{l}{L} \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{l}{L} \right)^2 - \frac{1}{24} \left(\frac{l}{L} \right)^3 \right], \quad (5)$$

$$f = \frac{1}{2} \frac{p}{EI} L^4 \left[-\frac{1}{32} \left(\frac{l}{L} \right)^2 + \frac{1}{16} \left(\frac{l}{L} \right)^3 - \frac{1}{192} \left(\frac{l}{L} \right)^4 \right]. \quad (6)$$

Подобным же образом найдено уравнение изогнутой оси эталона в части, лежащей вне опор. Изгибающий момент для сечения эталона, лежащего вне опор, выразился:

$$M = \frac{1}{2} p \left(\frac{1}{2} L - x \right)^2 = \frac{1}{2} p L^2 \left[\frac{1}{4} + \left(\frac{x}{L} \right) - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right].$$

Поэтому

$$\frac{d^2 y'}{dx^2} = \frac{1}{2} \frac{p}{EI} L^2 \left[-\frac{1}{4} + \left(\frac{x}{L} \right) - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \quad (7)$$

и, приняв во внимание, что, при $x = \frac{l}{2}$, $\frac{dy'}{dx} = \operatorname{tg} \alpha$ и $y' = f$,

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{dy'}{dx} = \frac{1}{2} \frac{p}{EI} L^2 \left[\frac{1}{8} \left(\frac{l}{L} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{x}{L} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{L} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{x}{L} \right)^3 \right], \quad (8)$$

$$y' = \frac{1}{2} \frac{p}{EI} L^4 \left[-\frac{1}{48} \left(\frac{l}{L} \right)^3 + \frac{1}{8} \left(\frac{l}{L} \right)^2 \left(\frac{x}{L} \right) - \frac{1}{8} \left(\frac{x}{L} \right)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{x}{L} \right)^3 - \frac{1}{12} \left(\frac{x}{L} \right)^4 \right]. \quad (9)$$

Подставив в формулы (8) и (9) $x = \frac{1}{2}L$, Брох нашел угол кривой с осью абсцисс в конце эталона и ординату конца эталона:

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{1}{2} \frac{p}{EI} L^3 \left[\frac{1}{8} \left(\frac{l}{L} \right)^2 - \frac{1}{24} \right], \quad (10)$$

$$DD' = \frac{1}{2} \frac{p}{EI} L^4 \left[-\frac{1}{48} \left(\frac{l}{L} \right)^3 + \frac{1}{16} \left(\frac{l}{L} \right)^2 - \frac{1}{64} \right]. \quad (11)$$

Наконец, исходя из равенства $f - DD' = DD' = f'$, Брох нашел прогиб в конце эталона, по отношению к точкам опор A и B :

$$f = \frac{1}{2} \frac{p}{EI} L^4 \left[\frac{1}{64} - \frac{3}{32} \left(\frac{l}{L} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{l}{L} \right)^3 - \frac{1}{192} \left(\frac{l}{L} \right)^4 \right]. \quad (12)$$

§ 2. Укорочение расстояния между штрихами, нанесенными на нейтральной поверхности эталона

Как уже было сказано, длина нейтральной поверхности эталона остается неизменной при изгибе эталона. Поэтому разность между длиной изогнутой оси эталона — кривой $CAOBD$ (рис. 2) и длиной ее проекции, дает укорочение расстояния между концами оси нейтральной поверхности эталона при его изгибе.

Покажем, как найдена эта разность в исследовании Броха.

Начнем с определения длины участка OB , заключенного между серединой эталона и опорной точкой B , кривой изогнутой оси эталона:

$$S = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} dx = \int_0^x \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] dx = x + \frac{1}{2} \int_0^x \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx.$$

Подставив вместо $\frac{dy}{dx}$ соответствующее значение, согласно формуле (3), и произведя интегрирование, Брох получил:

$$OX = x + \frac{1}{8} \left(\frac{p}{EI} \right)^2 L^7 \left[\frac{1}{12} \left(\frac{l}{L} - \frac{1}{2} \right)^2 \left(\frac{x}{L} \right)^5 - \frac{1}{15} \left(\frac{l}{L} - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{x}{L} \right)^6 + \frac{1}{63} \left(\frac{x}{L} \right)^7 \right], \quad (13)$$

а, положив $x = \frac{1}{2}l$, он получил выражение для длины участка OB кривой:

$$OB = \frac{1}{2}l + \frac{1}{768} \left(\frac{p}{EI} \right)^2 L^7 \left[\frac{1}{4} \left(\frac{l}{L} \right)^5 - \left(\frac{l}{L} \right)^6 + \frac{11}{10} \left(\frac{l}{L} \right)^5 - \frac{1}{5} \left(\frac{l}{L} \right)^6 + \frac{1}{84} \left(\frac{l}{L} \right)^7 \right]. \quad (14)$$

Так же найдено и выражение для длины участка BD кривой:

$$BX' = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = x - \frac{1}{2}l + \frac{1}{2} \int_0^x \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx.$$

Подставив вместо $\frac{dy}{dx}$ значение, отвечающее формуле (8), произведя интегрирование и положив затем $x = \frac{1}{2}L$, где L — длина проекции кривой $CAOBD$ на горизонтальную плоскость, Брох получил:

$$BD = \frac{1}{2}L - \frac{1}{2}l + \frac{1}{512} \left(\frac{P}{EI}\right)^2 L^7 \left[\frac{1}{28} - \frac{1}{4} \left(\frac{l}{L}\right)^2 - \frac{1}{6} \left(\frac{l}{L}\right)^4 + \frac{5}{4} \left(\frac{l}{L}\right)^6 - \left(\frac{l}{L}\right)^8 + \frac{5}{36} \left(\frac{l}{L}\right)^{10} - \frac{1}{120} \left(\frac{l}{L}\right)^{12} \right]. \quad (15)$$

Сумма выражений (14) и (15) дает:

$$OBD = \frac{1}{2}L + \frac{1}{1536} \left(\frac{P}{EI}\right)^2 L^7 \left[\frac{3}{28} - \frac{3}{4} \left(\frac{l}{L}\right)^2 + \frac{7}{4} \left(\frac{l}{L}\right)^4 - \frac{4}{5} \left(\frac{l}{L}\right)^6 + \frac{1}{60} \left(\frac{l}{L}\right)^8 \right].$$

Разность между длиной кривой $CAOBD$ и длиной ее проекции на горизонтальную плоскость выразилась следующим образом:

$$\Delta L = CAOBD - L = \frac{1}{768} \left(\frac{P}{EI}\right)^2 L^7 \left[\frac{3}{28} - \frac{3}{4} \left(\frac{l}{L}\right)^2 + \frac{7}{4} \left(\frac{l}{L}\right)^4 - \frac{4}{5} \left(\frac{l}{L}\right)^6 + \frac{1}{60} \left(\frac{l}{L}\right)^8 \right]; \quad (16)$$

ΔL представляет собой величину, на которую при изгибе эталона уменьшается расстояние между концами изогнутой оси эталона. С целью найти значение отношения $\frac{l}{L}$, при котором ΔL имеет наименьшую величину, Брох нашел производную выражения для ΔL по l и приравнял ее нулю:

$$\left(\frac{l}{L}\right)^4 - 40 \left(\frac{l}{L}\right)^6 + 70 \left(\frac{l}{L}\right)^8 - 15 = 0,$$

откуда $\frac{l}{L} = 0,559380$. Последнее численное значение для $\frac{l}{L}$, при котором ΔL имеет наименьшую величину, было найдено Бесселем, почему и точки опор, расставленные согласно отношения $\frac{l}{L} = 0,559380$, называют точками Бесселя. Подставив 0,559380 в уравнение (16), Брох нашел:

$$\Delta L = \frac{1}{768} \left(\frac{P}{EI}\right)^2 L^7 0,000501566 = \left(\frac{P}{EI}\right)^2 L^7 0,000000653. \quad (17)$$

Подстановка значения $\frac{l}{L} = 0,559380$ в выражения (6), (10) и (11) дала:

1) стрела прогиба в середине эталона

$$f = \left(\frac{P}{EI}\right) L^4 0,000325663; \quad (18)$$

2) стрела прогиба в конце эталона

$$f' = \left(\frac{P}{EI}\right) L^4 0,000183112; \quad (19)$$

3) угол наклона в конце эталона

$$\operatorname{tg} \alpha' = \left(\frac{P}{EI}\right) L^3 0,001276701. \quad (20)$$

Определив ΔL , нетрудно было определить расстояние между штрихами при изгибе эталона, у которого штрихи нанесены на специально для них обнаженной нейтральной поверхности. Крайние штрихи эталона обычно нанесены на весьма малых расстояниях от концов эталона. Чтобы найти уменьшение расстояния между крайними штрихами эталона, необходимо из величины ΔL вычесть укорочение малых участков нейтральной поверхности, лежащих между крайними штрихами и торцами эталона. Рассматривая эти малые участки нейтральной поверхности как плоские, наклоненные под углом α' к горизонтальной плоскости, Брех пользовался для нахождения укорочения каждого из них формулой:

$$\delta x = \left(\frac{1}{2} L - x\right) (1 - \cos \alpha') = \left(\frac{1}{2} L - x\right) \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \alpha'. \quad (21)$$

И далее

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2} L - x\right) \frac{1}{2} \left(\frac{P}{EI}\right)^2 L^6 \cdot (0,001276701)^2 = \\ & = \left(\frac{P}{EI}\right)^2 \left(\frac{1}{2} L - x\right) L^6 \cdot (0,001276701)^2 = \\ & = \left(\frac{P}{EI}\right)^2 \left(\frac{1}{2} L - x\right) L^6 \cdot 0,000000815. \end{aligned} \quad (22)$$

Исходя из формул (17) и (22), Брех нашел укорочение расстояния между крайними штрихами эталона:

$$\begin{aligned} \Delta L - 2\delta x &= \Delta(2x) = \\ &= \left(\frac{P}{EI}\right)^2 L^6 \left[L \cdot 0,000000653 - \left(\frac{1}{2} L - x\right) \cdot 0,000000163 \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

§ 3. Изменение расстояния между штрихами, нанесенными на поверхности, лежащей выше нейтральной поверхности эталона, при изгибе эталона

Если штрихи эталона нанесены на поверхности, лежащей выше нейтральной поверхности эталона, то они при изгибе эталона кроме смещения, зависящего от изгиба оси эталона, испытывают смещение, зави-

сящее от поворота тех поперечных сечений эталона, к которым принадлежат штрихи. Для крайних штрихов эталона это последнее смещение (рис. 3) противоположно по направлению смещению штрихов, зависящему от изгиба оси эталона. Брох находил смещение штрихов, зависящее от поворота сечения эталона, по формуле:

$$h \sin \varphi = \frac{h \frac{dy}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} = h \frac{dy}{dx}. \quad (24)$$



Рис. 3.

В зависимости от того, лежит ли штрих, смещение которого ищут, внутри или вне точек опор эталона, в формулу (24) вместо $\frac{dy}{dx}$ следует подставить ее выражение по формулам (3) и (8). Окончательная величина изменения длины эталона при его изгибе равна алгебраической сумме уменьшения длины эталона, зависящего от изгиба оси эталона, и удвоенного смещения крайнего штриха эталона, зависящего от поворота сечений эталона. Смещения штрихов эталона, зависящие от поворота его сечений, можно устранить, расположив опоры эталона согласно такому значению отношения $\frac{l}{L}$, которое определится из уравнения $\frac{dy}{dx} = 0$, т. е. с помощью формулы (8), из уравнения:

$$\frac{1}{8} \left(\frac{l}{L}\right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{x}{L}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{L}\right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{x}{L}\right)^3 = 0.$$

§ 4. Данные новой платино-иридиевой меры М 20°

Для изготовления нового эталона — меры М 20°, был взят платино-иридиевый стержень, единственно оставшийся в СССР, из числа тех

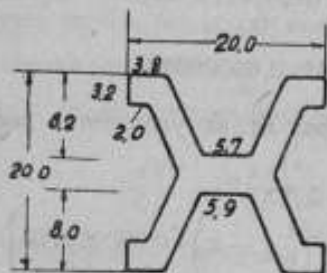


Рис. 4.

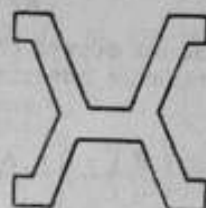


Рис. 5.

платино-иридиевых стержней первых плавков Джонсон-Маттен, из которых были изготовлены международный прототип метра и его копии. Новая платино-иридиевая мера М 20° имеет X-образное сечение (рис. 4), отличное от X-образных сечений эталонов № 28 и № 11 (рис. 5). (Раз-

меры поперечного сечения нового платино-иридиевого эталона, в миллиметрах, приведены на рис. 4). Вследствие небольших отступлений сечения стержня данной меры от симметрии, по отношению к горизонтальной прямой, проходящей через середину его высоты, центр тяжести сечения, найденный по формуле статки, оказался лежащим на 0,1 мм ниже середины высоты стержня. Лицевая поверхность меры М 20°, на которой по всей ее длине нанесены штрихи, лежит на 1,9 мм выше нейтральной поверхности стержня. Площадь сечения стержня равна 157,4 мм². Момент инерции поперечного сечения, относительно горизонтальной оси, равен 5280 мм⁴. Вес стержня равен 3723,4 г. Длина меры от торца до торца равна 1074 мм. Поэтому вес погонного миллиметра равен 3,470 г. Объем стержня равен 169,05 см³. Вследствие этого вес его в воде равен 3554,4 г. Вес одного погонного миллиметра стержня в воде равен 3,309 г. Модуль упругости сплава принят равным 21,4 · 10⁸ г/мм². При общей длине стержня от торца до торца в 1074 мм, начальный и конечный штрихи меры, определяющие длину 1 м, отстоят от торцов стержня на 37 мм каждый.

§ 5. Выбор расположения опорных точек новой платино-иридиевой меры М 20°

Предположим, что мы расставили опорные ролики нашей новой меры согласно отношению $\frac{l}{L} = 0,559380$, т. е. поставили опорные ролики в точки Бесселя, которые приняты для эталонов № 28 и № 11. Тогда, следовательно, расстояние между опорными роликами нашего эталона М 20° равно 1074 · 0,559380 = 600,77 мм. По формулам (9), (18), (23) и (24) предыдущих параграфов получим для этого случая расположения опорных точек:

	Мера в воздухе	Мера в воде
	в микронах	
Стрела прогиба в середине меры f	13,3	12,7
Стрела прогиба у крайнего штриха меры f'	5,7	5,4
Уменьшение общей длины стержня, зависящее от изгиба его оси	-0,0009	-0,0008
Увеличение общей длины стержня, зависящее от наклона его сечений	+0,1836	+0,1742
Полное изменение длины меры	+0,1827	+0,1734

Кроме приведенных здесь величин нам необходимо найти еще одну величину, которая, как и предыдущие, характеризует деформацию стержня меры. Согласно рис. 2, схематически изображающему изгиб эталона, наибольшую ординату имеют точки лицевой поверхности меры, расположенные над ее опорами. Однако, в исследовании деформации расположенной на двух опорах меры, приведенном в книге Ф. Г. Рольта [3], путем построения кривых изогнутой оси меры, соответствующих различным расположениям опор, показано, что точки, расположенные над двумя опорами, являются наивысшими лишь при одном частном случае расста-



новки опорных точек, а именно: при $\frac{l}{L} = 0,5505$; вообще же наивысшие точки каждого эталона могут, в зависимости от расположения опор, находиться как между опорами, так и вне их. Согласно упомянутому исследованию при значениях $\frac{l}{L}$, лежащих между 0,5505 и 0,5773, наивысшие точки эталона лежат между точками, находящимися над опорами и крайними



Рис. 6.

точками эталона (рис. 6). Найдем наибольшую ординату кривой изогнутой оси эталона, расположенного на опорах, расставленных соответственно отношению $\frac{l}{L} = 0,559380$.

Для этого ранее необходимо найти абсциссу той точки кривой, которая имеет наибольшую ординату. Приравняв нулю формулу (8) и подставив в нее вместо L —1074 мм и вместо l —1074·0,559370=600,77 мм, получим уравнение:

$$0,333333x^3 - 537x^2 + 288370x - 48454700 = 0,$$

откуда $x = 325,274$ мм.

Подставив найденное значение x в формулу (9), получим: для эталона в воздухе $y = 13,5$ мк, для эталона в воде $y = 12,9$ мк.

Так как превышение точки эталона, расположенной над опорами, над средней точкой эталона равно: для эталона в воздухе 13,3 мк и для эталона в воде 12,7 мк, то превышение наивысшей точки эталона точки, расположенной над опорой, будет равно: 0,2 мк, при нахождении эталона как в воздухе, так и в воде.

Из приведенных выше величин, характеризующих изгиб стержня меры, видим, что укорочение общей длины меры представляет весьма малую величину, лежащую далеко за пределами точности компараторных измерений и не играющую никакой роли. Этого и следовало ожидать, так как Бессель при расчете опорных точек исходил именно из условия наименьшего укорачивания расстояния между концами оси эталона. Точки Бесселя являются наивыгоднейшими опорными точками для эталонов метра, у которых штрихи нанесены на нейтральной поверхности. Вследствие того, что штрихи нашей новой меры М 20° нанесены на поверхности, лежащей на 1,9 мм выше нейтральной поверхности, увеличение общей длины меры, зависящее от наклона сечений стержня, выразилось значительной величиной в 0,18 мк. Увеличение общей длины меры, зависящее от наклона ее сечений, можно, однако, устранить. Для этого следует расставить опорные ролики таким образом, чтобы поперечные сечения меры, к которым принадлежат ее крайние штрихи, лежали в вертикальных плоскостях и были параллельны друг другу. Приравняв нулю

формулу (8) (см. § 3 и 1), мы из уравнения:

$$\frac{1}{8} \left(\frac{l}{L} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{x}{L} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{L} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{x}{L} \right)^3 = 0,$$

положив $x = 500$ мм, получим $\frac{l}{L} = 0,577253$.

Тогда $l = 1074 \cdot 0,577253 = 620,0$ мм, т. е., по сравнению с первым рассмотренным нами случаем расстановки опорных роликов, l увеличилось на 19 мм. Прогобы и изменения длины меры $M 20^\circ$ при расстановке

опорных роликов согласно отношению $\frac{l}{L} = 0,577253$, вычисленные по формулам (6), (9), (16) и (21, 2-е выражение) выразились следующими величинами:

	Мера в воздухе	Мера в воде
	в микронах	
Стрела прогиба в середине стержня f	21,0	20,1
Превышение конечным штрихом меры точки ее опоры	3,4	3,2
Укорочение общей длины меры, зависящее от изгиба оси стержня	-0,0018	-0,0016
Увеличение общей длины меры, зависящее от наклона сечений стержня	0,0000	0,0000
Полное изменение длины меры	-0,0018	-0,0016

При такой расстановке опорных роликов наивысшее положение занимает конечный штрих эталона (рис. 7).

Изменением длины меры в 0,0018 мк или 0,0016 мк можно пренебречь, так как эти величины весьма малы по сравнению с погрешностью компараторных измерений.

Таким образом, можно считать, что при перенесении нашей меры с плоскости на ролики, расставленные согласно отношению $\frac{l}{L} = 0,577253$,

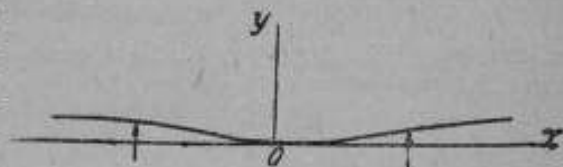


Рис. 7.

длина меры остается неизменной. Но такая расстановка опорных роликов имеет существенный недостаток.

Как видно из приведенных величин, при такой расстановке опорных точек стрела прогиба в середине стержня составляет 20,1 мк (в воде), а конечный штрих меры расположен на 3,2 мк (в воде) выше точки стержня, находящейся над точкой опоры. Значительная разность высот отдельных штрихов, достигающая таким образом 23,3 мк и, следовательно, значительный наклон отдельных участков меры неблагоприятно влияют на освещенность и видимость штрихов и могут повести к понижению точности отсчетов. Поэтому более благоприятным в отношении наблюдений является первый рассмотренный нами

случая расстановки опорных роликов, при котором стрела прогиба составляет 12,7 μ (в воде). Но если подходить к вопросу выбора расположения опорных точек с точки зрения достижения наименьшей разности высот штрихов меры по всей ее длине, то весьма рациональным представляется такой вариант расположения опорных точек, при котором прогиб стержня в его середине будет равен прогибу в его конце и, следовательно, штрихи 0, 5 и 10 μ меры будут лежать на одной высоте.

В упомянутом ранее исследовании деформации меры, приведенном в книге Ф. Г. Рольта, путем построения кривых изогнутой оси меры, соответствующих различным расположениям опор, показано, что расстановка опорных точек, дающая равенство высот середины и конца меры, дает вместе с тем наименьшую разность высот наиболее высокой и наиболее низкой точек шкаловой поверхности меры.

Найдем значение $\frac{l}{L}$, обеспечивающее равенство высот середины и конца меры. Когда прогиб у крайнего штриха меры будет равен прогибу в середине меры, то при нашем расположении координат (рис. 2), ордината крайнего штриха меры будет равна 0. Положив в формуле (9) $x = 500$ μ м, приравняем ее 0. Тогда получим уравнение:

$$+ 0,020833 \left(\frac{l}{L}\right)^3 - 0,058194 \left(\frac{l}{L}\right)^2 + 0,014189 = 0,$$

$$\text{откуда } \frac{l}{L} = 0,551139.$$

Тогда $l = 1074 \cdot 0,551139 = 591,92$ μ м, т. е. расстояние между опорными роликами уменьшилось по сравнению с расстоянием в первом рассмотренном нами варианте расстановки роликов на 9 μ м. Прогибы и изменения длины меры $M 20^\circ$, при значении $\frac{l}{L} = 0,551139$, вычисленные по формулам (6), (9), (16), (21, 2-е выражение) и (24), выразились следующими величинами:

	Мера в воздухе	Мера в воде
	в микронах	
Стрела прогиба в середине стержня f . . .	10,0	9,6
Стрела прогиба у крайнего штриха меры f'	10,0	9,6
Укорочение общей длины меры, зависящее от изгиба оси стержня	-0,0010	-0,0009
Увеличение общей длины меры, зависящее от наклона сечений стержня	+0,2662	+0,2540
Полное изменение длины меры	+0,2652	+0,2531

Как уже было сказано ранее, при значениях $\frac{l}{L}$, лежащих между 0,5505 и 0,5773, наивысшие точки эталона находятся между точками, расположенными над опорами и конечными точками меры (рис. 6). Найдем наибольшую ординату кривой изогнутой оси стержня меры, расположенной на

опорах, расставленных соответственно отношению $\frac{l}{L} = 0,551139$. Приравняв нулю формулу (8) и подставив в нее, вместо $L=1074$ и вместо $l=1074 \cdot 0,551139 = 591,92$, получим уравнение:

$$0,333333x^3 - 537x^2 + 288370x - 47037600 = 0,$$

откуда $x = 297,47$.

Подставив найденное значение x в формулу (9), получим: для меры в воздухе $y = 10,0 \mu$, для меры в воде $y = 9,6 \mu$, т. е. практически наивысшие точки меры лежат на одной и той же высоте, что и точки, расположенные над опорами.

Исходя из того, что при последнем случае расстановки опорных точек достигнута наименьшая разность высот наиболее высокой и наиболее низкой точек лицевой поверхности меры, что весьма существенно для меры, разделенной по всей ее длине, и, полагая, что удлинение меры на $0,26 \mu$ не может играть отрицательной роли, так как является величиной постоянной и учитываемой, лаборатория мер длины ВНИИМ и остановилась на этом последнем случае расстановки опорных точек

§ 6. Изменение длины дециметровых подразделений новой меры М 20° при изгибе стержня

Определить изменения длины подразделений меры можно с помощью формулы:

$$\delta L = h (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2), \quad (25)$$

где φ_1 и φ_2 — углы между плоскостями тех сечений стержня меры, к которым принадлежат крайние штрихи исследуемых подразделений, и вертикальной плоскостью, h — расстояние между поверхностью меры, на которой нанесены штрихи, и ее нейтральной поверхностью.

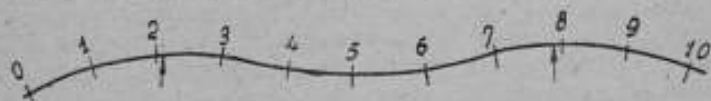


Рис. 8.

Тангенсы углов в этой формуле заменяют их выражениями по формулам (3) и (8).

Удлинения дециметровых подразделений нашей меры М 20°, при значении $\frac{l}{L} = 0,551139$, вычисленные по формуле (25), выразились следующими величинами:

Интервалы в дм	Удлинения в μ		Интервалы в дм	Удлинения в μ	
	в воздухе	в воде		в воздухе	в воде
0—1	+0,0245	+0,0234	0—6	+0,0568	+0,0542
0—2	+0,1289	+0,1230	0—7	+0,0388	+0,0371
0—3	+0,2274	+0,2169	0—8	+0,1373	+0,1310
0—4	+0,2094	+0,1998	0—9	+0,2420	+0,2306
0—5	+0,1331	+0,1270	0—10	+0,2662	+0,2540

Чтобы уяснить себе, как складываются приведенные удлинения дециметровых подразделений из смещений штрихов, служащих границами этих подразделений, приведем величины смещений этих штрихов:

Штрихи дм	Смещения в р в воздухе	Штрихи дм	Смещения в р в воздухе
0	-0,1331	6	+0,0763
1	-0,1086	7	+0,0943
2	-0,0042	8	-0,0042
3	+0,0943	9	-0,1086
4	+0,0763	10	-0,1331
5	+0,0000		

Знак — у величины смещений означает смещение штриха по направлению от середины эталона к концу, а знак + означает смещение в противоположную сторону.

Положение сечений стержня, проходящих через оси штрихов дециметровых подразделений при изгибе эталона, от которого зависят величина и знак смещения штрихов, можно схематически изобразить как показано на рис. 8.

Необходимо еще рассмотреть вопрос об изменении длины подразделений меры, зависящем от изгиба ее оси. Как уже было сказано ранее, ось нейтральной поверхности не изменяет своей длины при изгибе стержня. То же относится и ко всем частям изогнутой оси. Поэтому можно утверждать, что длина проекции каждой части оси меры, отвечающей дециметровому подразделению меры, будучи меньше соответствующей части изогнутой оси меры, будет вместе с тем и меньше той же части оси меры в ее первоначальной неизогнутой форме. И, следовательно, изменение длины каждого из дециметровых подразделений меры, зависящее от изгиба оси стержня, может иметь только отрицательный знак. Так как укорочение общей длины меры, зависящее от изгиба ее оси, при принятой расстановке опорных точек равно 0,0010 м, то укорочения длины дециметровых подразделений меры, зависящие от той же причины, составляют лишь десятитысячные доли микрова.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. W. Bessel. Darstellung der Untersuchungen und Maassregeln welche in den Jahren 1835 bis 1838 durch die Einheit des Preussischen Längenmaasses veranlaßt worden sind. 1839, S. 121—136.
2. O. J. Broch. Comparaisons des règles dans le comparateur Brunner. Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures, 1889, T. VII, p. 62—78.
3. Ф. Г. Рольт. Калибры и точные измерения. Пер. с англ., 1933, Приложение II, стр. 249—254.
4. M. Tresca. Note sur la forme qu'il convient de donner aux Mètres que la Commission Internationale doit construire. Procès-Verbaux de la Commission Internationale du Mètre, 1872, p. 192—209.

М. А. АФАНАСЬЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФИЦИЕНТА РАСШИРЕНИЯ ПЛАТИНО-ИРИДИЕВОЙ КОПИИ № 28 МЕЖДУНАРОДНОГО ПРОТОТИПА МЕТРА — ОСНОВНОГО ЭТАЛОНА ДЛИНЫ СССР

§ 1. Введение

Первое определение коэффициентов расширения национальных платино-иридиевых прототипов метра были произведены в Международном бюро мер и весов в 1888 г. Определение коэффициентов расширения было произведено двумя методами. Первый метод заключался в сравнении на компараторе метра № 6, признанного Международным прототипом, при различных температурах от 0 до 38°, с метром № 12, находившимся при постоянной температуре. Результаты определения коэффициента расширения метра № 6 привели к следующей формуле:

$$\alpha_0 = (8644 + 0,52 t) 10^{-9}. \quad (1)$$

Второй метод заключался в измерении на приборе Физо при различных температурах специальных кусочков, отрезанных от обоих концов стержня, предназначенного для изготовления метра № 6. Результаты дали следующие величины:

$$\begin{array}{l} \text{Отрезок от левого конца } A \dots \alpha_A = (8666 + 1,46 t) 10^{-9} \\ \text{. . . правого . . . } B \dots \alpha_B = (8653 + 1,48 t) 10^{-9} \\ \text{Среднее . . . } \alpha = (8660 + 1,47 t) 10^{-9} \end{array} \quad (2)$$

Для окончательной величины коэффициента расширения метра № 6 была взята средняя величина из результатов компараторных наблюдений и из наблюдений отрезков на приборе Физо, так как значения их находились в удовлетворительном согласовании и, таким образом, для метра № 6 на эпоху 1889 г. было установлено:

$$\alpha_0 = (8651 + 1,00 t) 10^{-9}. \quad (3)$$

Для остальных метров коэффициенты расширения определялись только на компараторе, и им приписаны непосредственно найденные из соответствующих сравнений величины, которые и были санкционированы Генеральной конференцией по мерам и весам в 1889 г.

В 1914 г. (через 25 лет), согласно Положениям о метрической конвенции 1875 г. о периодическом сличении прототипов, наступил срок повторного сличения национальных платино-иридиевых прототипов метра,

но вследствие мировой войны 1914—1918 гг. Международное бюро мер и весов получило возможность приступить к этой работе только в 1919 г.

При вторичном определении коэффициентов расширения метров № 4, 12, 8, 17, 20 и 24 было обнаружено, что их расширение, по данным 1919 г., значительно меньше величин, полученных в 1888 г., и ближе между собою.

Начиная с 1921 г. Международное бюро мер и весов предприняло систематическое определение коэффициентов расширения платино-иридиевых метров. Для данной работы были взяты два метра, изготовленные из отливки Джонсон-Маттеи, № 20 и 26 и еще два других метра, а именно T_2 — специальной отливки, и T_3 — один из рабочих эталонов Международного бюро мер и весов.

Определение коэффициентов расширения этих метров было произведено на компараторе при трех температурах между 0 и 18° и между 18 и 36°, а отрезков от них на приборе Физо — от 0 до 100°. В окончательном результате получены следующие значения:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{20,26} &= (8,6210 \pm 0,0018 t) 10^{-6} \\ \alpha_{T_1} &= (8,6220 \pm 0,0018 t) 10^{-6} \\ \alpha_{T_2} &= (8,6130 \pm 0,0018 t) 10^{-6} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Эти новые данные позволили заключить, что существующие разности в коэффициентах расширения национальных эталонов метра большой плавки Джонсон-Маттеи лежат в пределах достигаемой на компараторе точности.

Указанное положение и выводы Международного бюро обсуждались на VI Генеральной конференции в 1921 г. и на VII Генеральной конференции в 1927 г. Однако, окончательного решения относительно общего коэффициента расширения для национальных метров прототипов эти конференции не приняли, а было предложено Международному комитету по мерам и весам продолжать дальнейшие исследования в этой области в течение 1928 и 1929 гг. Кроме того, Конференция 1927 г. высказала пожелание, чтобы и национальные лаборатории, в свою очередь, произвели подобные же исследования, дополнив этим материалы Международного бюро и облегчив задачу предстоящих конференций при окончательном решении данного вопроса.

На пожелание Конференции 1927 г. об исследовании коэффициентов расширения национальных метров из сплава Джонсон-Маттеи отозвались два национальных метрологических учреждения: Швейцарское бюро [1] и Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии СССР [2].

В конце 1935 г. было получено письмо от директора Международного бюро мер и весов Перара с заметкой научного сотрудника Бюро Волэ относительно советских методов определения коэффициентов расширения метров прототипов из сплава Джонсон-Маттеи.

2. Критический обзор результатов работы 1931 г. по определению коэффициентов расширения платино-иридиевых метров

Заметка Волэ с критическим обзором нашей работы, выполненной в 1931 г. и изложенной в „Сообщении ВИМС“ № 129 1933 г. [2], а также предложение Волэ принять дискуссионное участие в дальнейших исследовательских процессах по определению коэффициентов расширения платино-иридиевых национальных метров прототипов побудили нас в 1936 г. вновь приступить к этой весьма трудной, но интересной международной исследовательской работе.

Когда мы определяли коэффициенты расширения наших платино-иридиевых метров № 11, 28 и П 4, мы заметили некоторые систематические несоответствия между температурой изучаемых метров и температурой окружающей среды (воды в ванне), указываемой термометрами. Это несоответствие температуры метров с показанием термометров выражалось в несоответствии в длинах наших изучаемых метров. На основании замеченных явлений мы пришли к предположению, что термометры имеют меньшую тепловую инерцию, чем меры и, следовательно, быстрее принимают температуру окружающей среды (воды в ванне).

Это и привело нас к введению в уравнение:

$$x + yt + zt^2 = m \quad (5)$$

добавочного члена, зависящего от скорости изменения температуры воды в ванне, после чего уравнение (разности длин испытуемой и контрольной меры) приняло вид:

$$x + yt + zt^2 + utv = m, \quad (6)$$

где v — скорость изменения температуры, т. е. производная температуры по времени, а u — соответствующий коэффициент, который нами был назван динамическим температурным коэффициентом.

На наше предположение о различной чувствительности между термометрами и платино-иридиевыми мерами Волэ приводит противоположный довод, основанный на опытах в Международном бюро, которые показали, что платино-иридиевые стержни и ртутные термометры обладают одинаковой чувствительностью к изменениям окружающей температуры.

Эти два противоположных взгляда на чувствительность платино-иридиевых мер и термометров к изменениям окружающей температуры и некоторые указания Волэ на испытанные методы работы Международного бюро, а также и наши эксперименты по изучению температурного режима воды в ванне компаратора, позволили сделать следующий вывод о нашей работе 1931 г.

При подготовке компаратора к наблюдениям, производившейся за несколько часов до наблюдений, мы самым тщательным образом очищали воду в ванне компаратора от пузырьков воздуха, после чего вода в ванне оставалась в покое до самого начала наблюдений. Перед началом наблюдений мы очищали поверхности мер и термометров от пузырьков воздуха, которые успели образоваться к этому моменту, причем пузырьки сни-

мались только с наружных, видимых глазом поверхностей меры, а нижние поверхности оставались нетронутыми.

Самый процесс выделения из воды пузырьков воздуха идет непрерывно, начиная с момента нарушения равновесий между температурой воды в ванне компаратора и температурой компараторного помещения, за исключением низких температур, от 0 до 4°, при которых образования пузырьков в ванне не замечается.

Пузырьки воздуха, оседающие на нижних плоскостях меры при низких температурах в момент их образования, имеют, очевидно, температуру воды ванны. Температура воды ванны, которая нами не регулировалась, под действием внешней температуры помещения постепенно повышается, но так как пузырьки воздуха являются слабыми проводниками тепла (по сравнению с водой), то они не принимают этой новой температуры воды в ванне и не дают, естественно, испытуемым мерам принимать температуру воды. Эти явления, вытекающие из непосредственных наблюдений, привели нас к выводу, что в температурном интервале (4—20°) термометры дают преувеличенные разности температур по сравнению с соответствующими разностями в длинах наблюдаемых в тех же условиях платино-иридиевых мер.

При высоких температурах, когда процесс выделения пузырьков воздуха из воды идет более интенсивно, чем при низких температурах, получается обратное явление.

Пузырьки воздуха, оседающие на нижних плоскостях меры, в момент их образования также имеют температуру воды ванны, под действием более низкой температуры помещения постепенно понижающуюся. Но пузырьки воздуха, как и при низких температурах, будучи слабыми проводниками тепла, не принимают сразу это понижение температуры воды, и мы всегда имеем возможность наблюдать, что при высоких температурах ртутные термометры дают преуменьшенные разности температур по сравнению с соответствующими разностями в длинах мер.

При сравнении полученных нами в 1931 г. коэффициентов расширения для № 28 из первого определения, когда большая ванна компаратора была закрыта металлическими крышками,

$$\alpha_{28} = (8,563 \pm 0,0035 t) 10^{-6} \quad (7)$$

со вторым определением, когда ванна была закрыта деревянными крышками, не обшитыми снизу гранитом,

$$\alpha_{28} = (8,611 \pm 0,00147 t) 10^{-6}, \quad (8)$$

мы, на основании изложенных выше соображений, и получили результаты, резко отличающиеся друг от друга. Эти расхождения мы именно и объясняем тем обстоятельством, что во втором определении были применены деревянные крышки на ванне компаратора, которые как слабые проводники тепла и задерживали нагревание воды ванны при низких температурах, а при высоких — ее охлаждение. Вследствие этого получился процесс, несколько задерживающий изменения температуры воды в ванне, а, следовательно, и образования пузырьков, в итоге же — и меньшие систематические ошибки, чем в первом определении.

Процесс перемешивания воды в ванне компаратора для выравнивания ее температуры при наблюдениях в 1931 г. нами строго не был учтен, так как, не применяя более продолжительного перемешивания воды в ванне, как это следовало бы, мы давали возможность свободно оседать пузырькам воздуха на мерах, а не отгоняли их движением воды дальше, где они, попадая на свободную поверхность воды, теряли бы свое влияние на термометры и меры.

Количество времени, затрачиваемое на наблюдения, по нашей схеме 1931 г., было слишком большим, что в значительной степени способствовало изменению температуры воды в ванне, а, следовательно, и выделению пузырьков.

На основании приведенных выше соображений и выводов, работа по исследованию коэффициентов расширения платино-иридиевых метров в 1936 г. вновь была поставлена на том же большом 4-метровом компараторе фирмы „Société Genevoise“, с наблюдением при 10 различных температурах — от 0 до 35° — по абсолютному методу из сравнений с инварным метром № 318.

Для сохранения большего постоянства температуры воды ванны во время процесса одного наблюдения, зависящего от времени наблюдения, производилось исследование не двух (одновременно) платино-иридиевых метров, как в 1931 г., а лишь одного — № 28.

§ 3. Установка мер и термометров

Установка мер и термометров в ваннах компаратора производилась следующим образом: в большой ванне компаратора была установлена

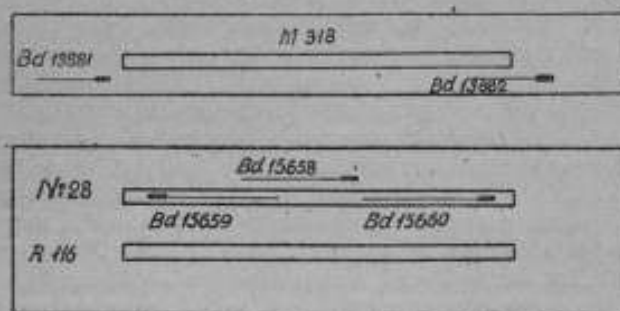


Рис. 1.

копия прототипа Международного метра № 28 и для наблюдения температуры воды ванны были положены три термометра „Baudin“ № 15658, 15659 и 15660, причем два термометра — № 15659 и 15660 — лежали непосредственно на самом метре № 28, на нейтральной его плоскости, а третий термометр — № 15658 — был расположен около метра. Кроме метра № 28 в этой же ванне находился еще один рабочий платинитовый метр лаборатории, *H*-образного сечения, № 116, служивший для определения цены делений барабанов микрометров микроскопов.

В малой ванне компаратора был установлен инварный метр № 318, а возле него находились два термометра „Baudin“ № 13881 и 13882 (рис. 1).

У всех перечисленных термометров предварительно были определены положения нулевых точек.

§ 4. Схема наблюдений

Наблюдения производились поочередно, как и в первой нашей работе, двумя наблюдателями М. А. Афанасьевым и В. А. Бариновым, причем схема наблюдения была несколько изменена сравнительно с 1931 г. и состояла из следующих операций:

1) вода в обеих ваннах перемешивалась все время, за исключением времени наблюдения штрихов меры; 2) перед наблюдением с инварным метром № 318 перемешивание воды в малой ванне прекращалось и производились отсчеты термометров № 13881 и 13882; 3) наблюдался метр № 318 — три наведения на левый штрих и три наведения на правый; 4) прекращалось перемешивание воды в большой ванне, подводилась под микроскопы для наблюдения штрихов на метре № 28; 5) наблюдался метр № 28 — три наведения на левый штрих шесть наведений на правый и снова три наведения на левый штрих; 6) вторичные отсчеты термометров № 15658, 15659 и 15660; 7) снова подводился под микроскопы и наблюдался инварный метр № 318 — три отсчета по правому штриху и три отсчета по левому; 8) производились вторичные отсчеты термометров; 9) перемешивалась вода в обеих ваннах.

При каждой заданной температуре измерений было произведено по 6 подобных наблюдений, которые и составили отдельную серию наблюдений.

В конце каждой серии производились еще наблюдения по определению цены делений барабанов микрометров,¹ причем для инварного метра, лежавшего в малой ванне при комнатной температуре, цена делений барабанов микрометров определялась только после первой серии наблюдений по десятым долям первого и последнего миллиметров метра № 318, между 4-м и 6-м рабочими оборотами винтов левого (Y') и правого (Z') микрометров. Для метра № 28, находившегося в большой ванне компаратора при различных температурах от 0 до 35°, цена делений барабанов микрометров определялась после каждой серии наблюдений по изученным десятым долям первого и последнего миллиметров на рабочем метре № 116 между 4-м и 6-м оборотами левого (Y) и правого (Z) микрометров и для последних двух серий у правого (Z) микрометра между 3-м и 5-м рабочими оборотами.

¹ Окулярные микрометры новейшей конструкции были приобретены от фирмы „Société Genevoise“ в 1929 г. Исследование прогрессивных и периодических ошибок винтов показало, что периодические ошибки винтов малы и находятся в пределах ошибок компараторных измерений. Прогрессивные ошибки винтов более крупные, но и они не превышают 0,2 деления микрометра [3].

Результаты определения цены делений барабанов микрометров
по № 116

Время наблюдений 1936 г.	Температура в °С	Цена делений для левого микроскопа Y_2 и Y_1 , в μ	Цена делений для правого микроскопа Z_2 и Z_1 , в μ
-----------------------------	---------------------	---	--

1. Для № 28

7 VI	17,2	0,99880	0,99970
9 VI	0,5	0,99960	0,99862
11 VI	5,3	0,99990	1,00025
13 VI	10,4	0,99950	1,00005
14 VI	14,3	0,99970	0,99951
16 VI	17,8	1,00010	0,99946
17 VI	22,1	1,00090	0,99862
19 VI	24,6	0,99990	0,99882
21 VI	29,0	0,99955	1,00001
22 VI	34,5	0,99965	0,99911

2. Для № 318

7 VI	17,3	1,00070	1,00010
------	------	---------	---------

§ 5. Обработка наблюдений

Обычно при подобного рода работах мы вычисляли разности длин между испытуемой мерой и мерой, находящейся всегда при постоянной температуре. В данной работе мы приняли другой метод, а именно: сначала определяли разность между осями микроскопов и мерой № 318, т. е. ($L_k - \text{№ 318}$), принимая за начало осей микроскопов 0 делений 5-го оборота шкалы микрометра, а затем вычисляли разность длин между метром № 28 и осями микроскопов (№ 28 — L_k), что можно выразить следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} 1) L_k - \text{№ 318} &= (A - a_1) Y_1 + (a_1' - A') Z_1 \\ 2) \text{№ 28} - L_k &= (a_2 - A) Y_2 + (A' - a_2') Z_2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $A - 0$ делений 5-го оборота левого микрометра, a_1 и a_1' — отсчеты по микрометрам левого и правого микроскопов, для метра № 318, $A' - 0$ делений 5-го оборота правого микрометра, a_2 и a_2' — отсчеты по микрометрам левого и правого микроскопов для метра № 28, Y_1 и Z_1 — цена делений барабанов по № 318, Y_2 и Z_2 — цена делений барабанов по № 116.

Пользуясь уравнением меры № 318

$$[\text{№ 318}] = 1 \text{ м} + 18,06 \mu + (1,912 t - 0,005 t^2) \mu, \quad (10)$$

мы выводили истинную длину (L_k) между осями микроскопов на данный момент времени и истинную длину метра № 28 при его данной темпера-

туре. Затем брали среднее значение длины метра № 28 из всей серии наблюдений.

Изложенный метод обработки наблюдений позволял нам судить о состоянии и поведении балки компаратора между осями рабочих микроскопов во время процесса одного наблюдения и всей серии, а также о ходе изменения длины метра № 28 с изменением его температуры.

§ 6. Подготовка компаратора к наблюдениям

Подготовка компаратора к наблюдениям начиналась днем, а сами наблюдения производились вечером, так как днем наблюдать на компараторе весьма трудно из-за сотрясений фундамента компаратора, вызываемого близостью уличного грузового и трамвайного движения. Вследствие этого мы выбирали наиболее спокойное время, когда уличное движение несколько затихает и дает возможность спокойно наблюдать.

§ 7. I серия наблюдений

Первая серия наблюдений при температуре в $17^{\circ},2$ была проведена 7 июня 1936 г. Ванны компаратора были наполнены водой 27 мая, причем режим воды в ванне компаратора подвергался тщательному исследованию в отношении ее термических свойств в течение нескольких суток.

Результаты I серии наблюдений

1. Вывод длины компаратора¹

№ на- бле- дени	Наблю- датель ²	Время наблюдения	l	l	$L_A - \text{№ 318}$	L_A
			№ 318 в °С	№ 318 в μ	в μ	в μ
		<i>ч. мин.</i>				
1	М. А.	21 14 нач.	17,272	+49,60	+16,56	+66,16
		21 25,5 кон.	17,277	+49,61	+16,98	+66,59
2	В. Б.	21 29 нач.	17,274	+49,60	+16,82	+66,42
		21 41 кон.	17,277	+49,61	+17,12	+66,73
3	М. А.	21 46 нач.	17,284	+49,62	+17,12	+66,74
		21 57 кон.	17,282	+49,62	+16,99	+66,61
4	В. Б.	22 00 нач.	17,292	+49,63	+17,32	+66,95
		22 10 кон.	17,296	+49,64	+17,22	+66,86
5	М. А.	22 16 нач.	17,302	+49,65	+17,42	+67,07
		22 27,5 кон.	17,305	+49,65	+17,29	+66,94
6	В. Б.	22 32 нач.	17,305	+49,65	+17,83	+67,48
		22 43 кон.	17,310	+49,66	+17,46	+67,12

¹ В этой и последующих аналогичных таблицах L_A — расстояние между осями микроскопов.

² В этой и последующих таблицах — М. А. — М. А. Афанасьев, В. Б. — В. А. Баринев.

2. Вывод длины № 28

Наблю- датель	t № 28 в °С	№ 28 — L_A в μ	L_A в μ	t № 28 в μ	t № 28 (исправ.) в μ
М. А.	17,218	+83,60	+66,38	+149,98	+150,26
В. Б.	17,228	+83,40	+66,58	+149,98	+150,17
М. А.	17,248	+83,53	+66,68	+150,21	+150,23
В. Б.	17,258	+83,56	+66,90	+150,46	+150,39
М. А.	17,266	+83,54	+67,00	+150,54	+150,40
В. Б.	17,279	+83,18	+67,30	+150,48	+150,23
Среднее	17,250	+83,47	+66,81	+150,28	+150,28

$$\rho = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n-1}} = \pm 0,09 \mu.$$

$$\rho_m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n(n-1)}} = \pm 0,04 \mu.$$

В указанный промежуток времени были произведены опыты с подогреванием воды в большой ванне компаратора при помощи имеющихся при ней четырех реостатов. Эти опыты с реостатами ванны показали нам их вредное влияние на постоянство температуры воды, так как после их действия и даже после 10—15-минутного последующего перемешивания всей массы воды в ванне замечалось остаточное нагревание воды во внутренней ванне. В силу этого подогревание воды в большой ванне компаратора при помощи реостатов было оставлено и решено было работать без всякого механического регулирования температуры, имея в виду то благоприятное обстоятельство, что большая ванна, вмещающая массу воды весом около 2 тонн, сама по себе довольно медленно и равномерно изменяет свою температуру. Для большего сохранения постоянства температуры воды в ванне мы решили, как и в предыдущей нашей работе в 1931 г., закрывать ванну деревянными крышками, а сами крышки дополнительно покрывать толстым слоем материи и располагать и выполнять наблюдения так, чтобы они занимали минимум времени.

Перед наблюдением вода в ваннах была тщательно очищена от пылинок (вода в ваннах за такой длительный промежуток времени, с 27 мая по 7 июня, приняла температуру помещения, и пузырьков воздуха в ваннах не имелось), меры и термометры окончательно были отрегулированы и за 1 час до наблюдения вода в ваннах непрерывно перемешивалась.

§ 8. II серия наблюдений

Вторая серия наблюдений была проведена 9 июня 1936 г. при температуре 0°,5.

Подготовка большой ванны компаратора к наблюдениям при 0°,5 производилась следующим образом: из наружной ванны вода была выпущена, а взамен ее положен лед. Во внутренней ванне вода была оста-

влена и под действием льда в наружной ванне постепенно охлаждалась. Охлаждение активизировалось периодическим перемешиванием воды во внутренней ванне (на подготовку воды при 0°,5 истрачено около 1 т льда). Предварительные опыты состояния температуры воды в ванне дали следующую картину. При перемешивании воды во внутренней ванне термометры давали более согласные показания между собою, чем без перемешивания, причем в последнем случае всегда показания термометров были меньше, чем после перемешивания воды. Очевидно это явление связано с неравномерным охлаждением воды внутренней ванны от стенок внешней, наполненной льдом. Это обстоятельство побудило нас при наблюдениях приложить усилия к максимальному сокращению времени на отсчеты

Результаты II серии наблюдений

1. Вывод длины компаратора

№ набл.	Наблю-датель	Время наблюдения	t № 318 в °С	l № 318 в μ	L_A № 318 в μ	L_B в μ
1	М. А.	21 12,5 нач.	17,904	+50,70	+19,99	+70,69
		21 21 кон.	17,899	-50,68	-20,13	+70,81
2	В. Б.	21 25,5 нач.	17,906	+50,69	+20,26	+70,95
		21 34,5 кон.	17,906	+50,67	+20,66	+71,35
3	М. А.	21 40 нач.	17,892	+50,67	+19,93	+70,60
		21 48 кон.	17,890	-50,66	+19,89	+70,55
4	В. Б.	21 54 нач.	17,892	+50,67	+20,36	+71,03
		22 01,5 кон.	17,895	-50,67	+20,30	+70,97
5	М. А.	22 6,5 нач.	17,890	-50,66	+20,06	+70,72
		22 15,5 кон.	17,890	-50,66	+20,16	+70,82
6	В. Б.	22 22 нач.	17,888	-50,66	+20,12	+70,78
		22 29 кон.	17,892	+50,67	+20,09	+70,76

2. Вывод длины № 28

Наблю-датель	t № 28 в °С	№ 28 - L_A в μ	L_A в μ	l № 28 в μ	l № 28 (исправл.) в μ
М. А.	0,579	-64,49	+70,75	+6,26	+6,02
В. Б.	0,570	-64,75	+71,15	+6,40	+6,24
М. А.	0,562	-64,87	+70,58	+5,71	+5,62
В. Б.	0,537	-65,31	+71,00	+5,69	+5,81
М. А.	0,533	-65,66	+70,77	+5,11	+5,27
В. Б.	0,525	-65,72	+70,77	+5,05	+5,27
Среднее	0,551	-65,13	+70,84	+5,70	+5,70

$$\rho = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n-1}} = \pm 0,39 \mu.$$

$$\rho_m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n(n-1)}} = \pm 0,16 \mu.$$

термометров и отсчеты микрометров для метра № 28, а также к непрерывному перемешиванию воды в ванне.

За 1 час до наблюдений вода была очищена от пылинок (пузырьков воздуха в ванне не имелось), меры отрегулированы и мешалки для внутренней большой ванны и малой ванны пущены в действие для перемешивания воды.

§ 9. III серия наблюдений

Третья серия наблюдений была произведена 11 июня 1936 г. при температуре 5° .

Подготовка воды в большой ванне компаратора происходила следующим образом: от предыдущего наблюдения при $0^{\circ},5$ температура воды ванны к 11 июня сильно повысилась, и для понижения ее в наружную ванну было положено 200 кг льда, охладившего внутреннюю ванну до желаемого предела. Как и во II серии, в данном случае были произведены дополнительные исследования режима температуры воды внутренней ванны. Исследования показали нам медленное повышение температуры воды ванны, измеряемое величинами порядка $0^{\circ},02$ за пятиминутный интервал времени.

За 1 час до наблюдений, как и в предыдущих сериях, крышки с ванны были сняты для регулировки мер и чистки воды от пылинок, причем было обнаружено появление пузырьков воздуха в незначительном количестве на термометрах и на метре № 28. Пузырьки были сняты с термометров и с верхних и нижних плоскостей метра № 28. Затем мешалки были пущены в действие для перемешивания воды.

Результаты III серии наблюдений

1. Вывод длины компаратора

№ наблюдений	Наблюдатель	Время наблюдения	t	t	L_k -№ 318	L_k
			в $^{\circ}\text{C}$	в μ	в μ	в μ
		<i>ч. мин.</i>				
1	М. А.	21 18 нач.	17,683	+ 50,31	+ 20,91	+ 71,22
		21 28,5 кон.	17,683	+ 50,31	+ 20,47	+ 70,78
2	В. Б.	21 33,5 нач.	17,686	+ 50,32	+ 20,84	+ 71,16
		21 43,5 кон.	17,683	+ 50,31	+ 21,14	+ 71,45
3	М. А.	21 47,5 нач.	17,679	+ 50,31	+ 20,81	+ 71,12
		21 57,5 кон.	17,683	+ 50,31	+ 20,78	+ 71,09
4	В. Б.	22 02 нач.	17,683	+ 50,31	+ 20,97	+ 71,28
		22 10 кон.	17,683	+ 50,31	+ 21,10	+ 71,41
5	М. А.	22 15 нач.	17,680	+ 50,31	+ 20,88	+ 71,19
		22 23 кон.	17,688	+ 50,32	+ 20,91	+ 71,23
6	В. Б.	22 28 нач.	17,682	+ 50,31	+ 20,74	+ 71,05
		22 36 кон.	17,686	+ 50,32	+ 20,97	+ 71,29

2. Вывод длины № 28

Наблюдатель	t № 28 в °С	№ 28 — L_k в μ	L_k в μ	t № 28 в μ	t № 28 (исправл.) в μ
М. А.	5,060	-25,78	+71,00	+45,22	+47,84
В. Б.	5,211	-24,63	+71,30	+46,67	+47,98
М. А.	5,322	-23,97	+71,10	+47,13	+47,48
В. Б.	5,428	-23,16	+71,34	+48,18	+47,62
М. А.	5,534	-22,54	+71,21	+48,67	+47,19
В. Б.	5,618	-21,37	+71,17	+49,80	+47,60
Среднее . .	5,363	-23,58	+71,19	+47,61	+47,62

$$\rho = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n-1}} = \pm 0,28 \mu.$$

$$\rho_m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n(n-1)}} = \pm 0,11 \mu.$$

§ 10. IV, V и VI серии наблюдений

Четвертая, пятая и шестая серии наблюдений были проведены 13, 14 и 16 июня 1936 г. при температурах, близких 10, 14,2 и 17°,5. Подготовка воды в ванне компаратора при этих температурах не представляла больших затруднений, так как соответствующий температурный режим достигался естественным путем — влиянием и действием температуры окружающей среды, которая была выше, чем температура воды в ванне компаратора.

Результаты IV серия наблюдений

1. Вывод длины компаратора

№ наблюдения	Наблюдатель	Время наблюдения	t № 318 в °С	t № 318 в μ	L_k — № 318 в μ	L_k в μ
1	М. А.	21 15 нач.	17,986	+50,83	+25,34	+76,17
		21 24 кон.	17,988	+50,83	+26,00	+76,83
2	В. Б.	21 28,5 нач.	17,989	+50,84	+25,87	+76,71
		21 36 кон.	17,990	+50,84	+25,40	+76,24
3	М. А.	21 41 нач.	17,989	+50,84	+25,84	+76,68
		21 51,5 кон.	17,990	+50,84	+25,97	+76,81
4	В. Б.	21 58,5 нач.	17,992	+50,84	+26,24	+77,08
		22 05 кон.	17,992	+50,84	+26,18	+77,02
5	М. А.	22 12,5 нач.	17,996	+50,85	+25,94	+76,79
		22 22 кон.	17,995	+50,85	+25,98	+76,83
6	В. Б.	22 26,5 нач.	17,995	+50,85	+26,86	+77,71
		22 40 кон.	17,996	+50,85	+26,43	+77,28

2. Вывод длины № 28

Наблюдатель	t	L_k	L_k	t	L_k
	№ 28 в °С	№ 28 — L_k в р	в р	№ 28 в р	№ 28 (исправ.) в р
М. А.	10,275	+ 13,83	+ 76,50	+ 90,33	+ 91,90
В. Б.	10,351	+ 14,13	+ 76,48	+ 90,61	+ 91,54
М. А.	10,406	+ 14,31	+ 76,74	+ 91,05	+ 91,51
В. Б.	10,490	+ 14,89	+ 77,05	+ 91,94	+ 91,67
М. А.	10,568	+ 15,05	+ 76,81	+ 91,86	+ 90,92
В. Б.	10,664	+ 15,63	+ 77,50	+ 93,13	+ 91,36
Среднее . .	10,459	+ 14,64	+ 76,85	+ 91,49	+ 91,48

$$p = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n-1}} = \pm 0,33 \text{ р.}$$

$$p_m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n(n-1)}} = \pm 0,14 \text{ р.}$$

Предварительные исследования постоянства температуры воды в ванне показали, что при указанных выше температурах вода в ванне несколько меньше нагревается, чем это наблюдалось при 5°, и в течение 5 минут постоянство температур удерживается в пределах 0,005—0°,015. Образование пузырьков воздуха при данных температурах и их осаждение на поверхностях метра № 28 и термометров больше, чем при температуре воды в 5°.

За 1 час до наблюдений пузырьки тщательно снимались с верхних и нижних поверхностей метра № 28 и термометров, а затем метр № 28 окончательно регулировался, и до начала наблюдений вода в ванна перемешивалась.

Результаты V серии наблюдений
1. Вывод длины компаратора

№ наблюдений	Наблюдатель	Время наблюдения	t	t	$L_k - \text{№ 318}$	L_k
			№ 318 в °С	№ 318 в р	в р	в р
		<i>ч. мин.</i>				
1	М. А.	21 30 нач.	+ 18,239	+ 51,27	+ 28,22	+ 79,49
		21 39,5 кон.	+ 18,239	+ 51,27	+ 28,45	+ 79,72
2	В. Б.	21 44 нач.	+ 18,238	+ 51,27	+ 28,72	+ 79,99
		21 53,5 кон.	+ 18,242	+ 51,28	+ 28,48	+ 79,76
3	М. А.	21 58,5 нач.	+ 18,241	+ 51,28	+ 28,35	+ 79,63
		22 7,5 кон.	+ 18,245	+ 51,28	+ 28,72	+ 80,00
4	В. Б.	22 17,5 нач.	+ 18,275	+ 51,34	+ 28,42	+ 79,76
		22 26 кон.	+ 18,282	+ 51,35	+ 28,65	+ 80,00
5	М. А.	22 30,5 нач.	+ 18,269	+ 51,33	+ 28,63	+ 79,96
		22 41,5 кон.	+ 18,269	+ 51,33	+ 29,13	+ 80,46
6	В. Б.	22 46,5 нач.	+ 18,274	+ 51,34	+ 28,92	+ 80,26
		22 56 кон.	+ 18,279	+ 51,35	+ 29,22	+ 80,57

2. Вывод длины № 28

Наблюдатель	t № 28 в ° С	№ 28 - L_k в μ	L_k в μ	l № 28 в μ	l № 28 (исправл.) в μ
М. А.	+ 14,165	+ 43,85	+ 79,60	+ 123,45	+ 124,42
В. Б.	+ 14,216	+ 44,37	+ 79,88	+ 124,25	+ 124,78
М. А.	+ 14,247	+ 43,92	+ 79,82	+ 123,74	+ 124,00
В. Б.	+ 14,300	+ 44,23	+ 79,88	+ 124,11	+ 123,91
М. А.	+ 14,341	+ 44,56	+ 80,21	+ 124,77	+ 124,13
В. Б.	+ 14,393	+ 44,76	+ 80,42	+ 125,18	+ 124,17
Среднее . .	+ 14,277	+ 44,28	+ 79,97	+ 124,25	+ 124,24

$$\rho = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n-1}} = \pm 0,31 \mu$$

$$\rho_m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n(n-1)}} = \pm 0,13 \mu$$

Результаты VI серии наблюдений

1. Выводы длины компаратора

№ наблюдения	Наблюдатель	Время наблюдения	t № 318 в ° С	l № 318 в μ	L_k - № 318 в μ	L_k в μ
1	М. А.	21 13 нач.	18,978	+ 52,54	+ 34,60	+ 87,14
		21 24,5 кон.	18,982	+ 52,55	+ 34,50	+ 87,05
2	В. Б.	21 29 нач.	18,990	+ 52,55	+ 34,63	+ 87,18
		21 39 кон.	18,982	+ 52,55	+ 35,13	+ 87,68
3	М. А.	21 45,5 нач.	18,982	+ 52,55	+ 34,50	+ 87,05
		21 54,5 кон.	18,982	+ 52,55	+ 35,27	+ 87,82
4	В. Б.	21 59,5 нач.	18,985	+ 52,56	+ 35,16	+ 87,72
		22 08,5 кон.	18,985	+ 52,56	+ 35,27	+ 87,83
5	М. А.	22 13 нач.	18,984	+ 52,55	+ 35,27	+ 87,82
		22 26 кон.	18,988	+ 52,56	+ 35,29	+ 87,85
6	В. Б.	22 30 нач.	18,987	+ 52,56	+ 35,87	+ 88,43
		22 39 кон.	18,991	+ 52,57	+ 35,80	+ 88,37

2. Вывод длины № 28

Наблюдатель	t № 28 в °С	№ 28 — L_k в μ	L_k в μ	l № 28 в μ	l № 28 (исправ.) в μ
М. А.	17,746	+ 67,01	+ 87,10	+ 154,01	+ 154,53
В. Б.	17,772	+ 67,55	+ 87,43	+ 154,98	+ 155,28
М. А.	17,799	+ 67,13	+ 87,44	+ 154,57	+ 154,63
В. Б.	17,812	+ 67,09	+ 87,78	+ 154,87	+ 154,82
М. А.	17,847	+ 67,75	+ 87,84	+ 155,59	+ 155,23
В. Б.	17,859	+ 66,71	+ 88,40	+ 155,11	+ 154,56
Среднее . .	17,806	+ 67,21	+ 87,67	+ 154,87	+ 154,86

$$p = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n-1}} = \pm 0,30 \mu.$$

$$p_m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n(n-1)}} = \pm 0,12 \mu.$$

§ 11. VII серия наблюдений

Седьмая серия наблюдений была проведена 17 июня 1936 г. при температуре 22°,1.

Для установления во внутренней ванне температуры воды, необходимой по программе наблюдений, в наружную ванну было прибавлено 300 л горячей воды. Эта вода подавалась из специальной колонки¹ в наружную

Результаты VII серии наблюдений

1. Вывод длины компаратора

№ п-бледе-ния	Наблю-датель	Время наблюдения	t № 318 в °С	l № 318 в μ	L_k — № 318 в μ	L_k в μ
		<i>ч. мин.</i>				
1	М. А.	21 21 нач.	19,338	+ 53,16	+ 37,21	+ 90,37
		21 33,5 кон.	19,338	+ 53,16	+ 37,35	+ 90,51
2	В. Б.	21 37 нач.	19,346	+ 53,17	+ 37,68	+ 90,85
		21 44,5 кон.	19,362	+ 53,20	+ 37,91	+ 91,11
3	М. А.	21 50,5 нач.	19,353	+ 53,19	+ 37,68	+ 90,87
		22 0,5 кон.	19,356	+ 53,19	+ 38,17	+ 91,36
4	В. Б.	22 6,5 нач.	19,364	+ 53,21	+ 37,84	+ 91,05
		22 14 кон.	19,364	+ 53,21	+ 37,77	+ 90,98
5	М. А.	22 23 нач.	19,368	+ 53,21	+ 38,07	+ 91,28
		22 33 кон.	19,378	+ 53,23	+ 37,90	+ 91,13
6	В. Б.	22 37,5 нач.	19,380	+ 53,23	+ 37,90	+ 91,13
		22 45,5 кон.	19,382	+ 53,24	+ 38,57	+ 91,81

¹ Имеющиеся нагревательные приборы у большой ванны компаратора не могут в короткий срок поднять температуры всей массы воды в ванне, и мы всегда пользуемся для этой цели специальной колонкой для нагревания воды, которая установлена в соседнем помещении.

2. Вывод линии № 28

Наблюдатель	t № 28 в °С	№ 28 — L_n в μ	L_n в μ	l № 28 в μ	l № 28 (исправ.) в μ
М. А.	22,118	+102,44	+90,44	+192,88	+192,75
В. Б.	22,111	+101,99	+90,98	+192,97	+192,90
М. А.	22,111	+101,86	+91,12	+192,98	+192,91
В. Б.	22,088	+101,48	+91,02	+192,50	+192,54
М. А.	22,093	+101,07	+91,20	+192,27	+192,36
В. Б.	22,087	+100,79	+91,47	+192,26	+192,40
Среднее . . .	22,103	+101,60	+91,04	+192,64	+192,64

$$\rho = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n-1}} = \pm 0,30 \mu.$$

$$\rho_m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n(n-1)}} = \pm 0,12 \mu.$$

ванну; одновременно перемешивалась вода в наружной и во внутренней ванне до тех пор, пока температура воды в обеих ваннах не сравнялась. Предварительные опыты по испытанию постоянства температуры воды во внутренней ванне при данных условиях дали вполне удовлетворительные результаты. Понижение температуры воды в ванне в пятиминутный интервал времени не превосходило $0^{\circ},01$, однако при этом было обнаружено и отрицательное явление, а именно: большее выделение и оседание пузырьков воздуха к поверхностям метра № 28 и термометров.

За 1 час до наблюдения меры были отрегулированы, пылинки и пузырьки тщательно сняты с верхних и нижних поверхностей метра № 28 и термометров. Затем мешалки были пущены в действие для перемешивания воды.

§ 12. VIII серия наблюдений

Восьмая серия наблюдений была выполнена 19 июня 1936 г. при температуре $24^{\circ},6$. Подогревание воды во внутренней ванне до указанной нами температуры производилось теми же приемами, что и в VII серии.

Предварительные опыты по испытанию теплового режима воды во внутренней ванне дали нам совершенно удовлетворительные результаты, а именно: понижение температуры воды в ванне за пятиминутный промежуток времени не превосходило $0^{\circ},01$, но зато выделение из воды пузырьков воздуха увеличилось настолько, что мы решили окончательную регулировку метра № 28 и снятие пузырьков с поверхностей метра и термометров производить не за 1 час до начала наблюдений, а за полчаса, при непрерывном при этом перемешивании воды в ванне до начала наблюдений.

При данной температуре мы произвели первую пробу нового, нами сконструированного прибора для отдувания паров воды от объективов.

Прибор (рис. 2) представляет собою две квадратные латунные пустотелые коробочки, с трех сторон запаянные, длиной и шириной по 50 мм, с узкой щелью в 1 мм; на одном конце каждой коробочки припаяна латунная втулка, диаметром в 6 мм, для надевания резиновой трубки; резиновая трубка соединяется с нагнетательным насосом (воздуходувка), который в свою очередь соединен с мотором, заставляющим посредством шкива насос быстро вращаться. Забирая наружный воздух, насос направляет его непрерывной струей по резиновой трубке в коробочки; из коробочек воздушная струя выходит наружу. Так как коробочки кладутся

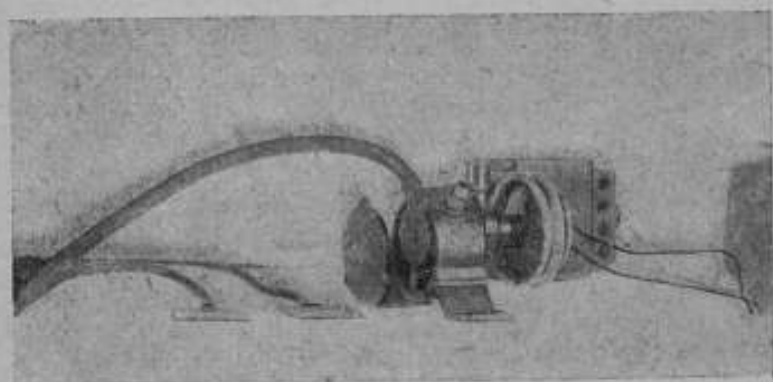


Рис. 2.

Результаты VIII серии наблюдений
1. Выход длины компаратора

№ на- блюде- ний	Наблю- датель	Время наблюдения	t № 318 в °С	№ 318		L_k
				в р	в р	
1	М. А.	20 57 нач.	20,140	+ 54,53	+ 43,93	+ 98,46
		21 07,5 кон.	20,146	+ 54,54	+ 44,16	+ 98,70
2	В. Б.	21 12 нач.	20,148	+ 54,55	+ 45,26	+ 99,81
		21 21,5 кон.	20,153	+ 54,56	+ 44,93	+ 99,49
3	М. А.	21 27 нач.	20,154	+ 54,56	+ 44,76	+ 99,32
		21 40 кон.	20,164	+ 54,58	+ 45,00	+ 99,58
4	В. Б.	21 46 нач.	20,170	+ 54,59	+ 45,16	+ 99,75
		21 54,5 кон.	20,169	+ 54,59	+ 45,19	+ 99,78
5	М. А.	22 01 нач.	20,172	+ 54,59	+ 45,32	+ 99,91
		22 12 кон.	20,188	+ 54,62	+ 45,52	+ 100,14
6	В. Б.	22 17 нач.	20,184	+ 54,61	+ 45,58	+ 100,19
		22 26 кон.	20,185	+ 54,62	+ 45,48	+ 100,10

2. Вывод длины № 28

Наблюдатель	t № 28 в °С	№ 28 — L_* в μ	L_k в μ	№ 28 в μ	№ 28 (исправл.) в μ
М. А.	24,688	+ 116,58	+ 98,58	+ 215,16	+ 214,68
В. Б.	24,662	+ 115,55	+ 99,65	+ 215,20	+ 214,95
М. А.	24,643	+ 115,10	+ 99,45	+ 214,55	+ 214,46
В. Б.	24,615	+ 115,07	+ 99,76	+ 214,83	+ 214,99
М. А.	24,601	+ 144,02	+ 100,02	+ 214,04	+ 214,32
В. Б.	24,587	+ 113,51	+ 100,14	+ 213,65	+ 214,05
Среднее . .	24,633	+ 114,97	+ 99,60	+ 214,57	+ 214,58

$$\rho = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n-1}} = \pm 0,37 \mu,$$

$$\rho_m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n(n-1)}} = + 0,15 \mu.$$

на крышки компаратора около отверстий в крышках над микроскопами, то пары, выходящие из ванны через эти отверстия в крышках, увлекаются непрерывной воздушной струей, выходящей из щели каждой ксербочки и не оседают на поверхности объективов.

Это приспособление оказалось настолько удобным, что мы при измерениях совершенно не наблюдали каких-либо признаков запотевания объективов. Прибор мы пробовали и при более высоких температурах (около 50°), — результат получался такой же положительный.

§ 13. IX серия наблюдений

Девятая серия наблюдений проведена 21 июня 1936 г. при температуре 29°. Подогревание воды во внутренней ванне до необходимой температуры производилось путем прибавления горячей воды в наружную ванну.

Предварительные опыты по испытанию теплового режима воды в ванне компаратора дали удовлетворительный результат, понижение температуры воды ванны за 5-минутный интервал времени не превышал 0°,02. Процесс выделения пузырьков воздуха и оседания их на поверхностях метра № 28 и термометров значительно повысился по сравнению с теми же явлениями для температуры 25°.

За полчаса до наблюдений пузырьки были сняты с метра № 28 и термометров. Особенное внимание было обращено на снятие пузырьков воздуха с нижних поверхностей метра № 28.

После регулирования мер, крышки компаратора были тщательно покрыты материей и затем вода в ваннах перемешивалась до начала наблюдений.

Перед началом наблюдений было испытано действие прибора по отдуванию паров воды от объективов микроскопов.

Результаты IX серии наблюдений
1. Вывод длины компаратора

№ наблюдений	Наблюдатель	Время наблюдения	t № 318 в °С	l № 318 в μ	L_n — № 318 в μ	L_n в μ
<i>ч. мин.</i>						
1	М. А.	21 00 нач.	20,550	+ 55,23	+ 48,93	+ 104,16
		21 11 кон.	20,560	+ 55,25	+ 48,53	+ 103,78
2	В. Б.	21 17 нач.	20,569	+ 55,27	+ 48,90	+ 104,17
		21 26,5 кон.	20,580	+ 55,29	+ 49,07	+ 104,36
3	М. А.	21 32 нач.	20,566	+ 55,26	+ 49,09	+ 104,35
		21 43 кон.	20,574	+ 55,28	+ 49,10	+ 104,38
4	В. Б.	21 48 нач.	20,572	+ 55,27	+ 49,70	+ 104,97
		21 55,5 кон.	20,578	+ 55,29	+ 49,93	+ 105,22
5	М. А.	22 00 нач.	20,579	+ 55,29	+ 49,47	+ 104,76
		22 10 кон.	20,589	+ 55,31	+ 49,73	+ 105,04
6	В. Б.	22 15 нач.	20,596	+ 55,32	+ 50,39	+ 105,71
		22 23,5 кон.	20,604	+ 55,33	+ 50,63	+ 105,96

2. Вывод длины № 28

Наблюдатель	t № 28 в °С	№ 28 — L_n в μ	L_n в μ	l № 28 в μ	l № 28 (исправл.) в μ
М. А.	29,099	+ 148,97	+ 103,97	+ 252,94	+ 251,95
В. Б.	29,050	+ 148,34	+ 104,26	+ 252,60	+ 252,04
М. А.	29,003	+ 147,60	+ 104,36	+ 251,96	+ 251,81
В. Б.	28,964	+ 147,15	+ 105,10	+ 252,25	+ 252,44
М. А.	28,925	+ 146,16	+ 104,90	+ 251,06	+ 251,59
В. Б.	28,874	+ 145,88	+ 105,84	+ 251,72	+ 252,70
Среднее:	28,985	+ 147,35	+ 104,74	+ 252,09	+ 252,09

$$p = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n-1}} = \pm 0,41 \mu.$$

$$p_m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n(n-1)}} = \pm 0,17 \mu.$$

§ 14. X серия наблюдений

Последняя, десятая серия наблюдений проведена 22 июня 1936 г. при температуре 34°5. Подготовка воды в ванне компаратора при этой температуре происходила так же, как и в предыдущих сериях, т. е. прибавлением большого количества горячей воды в наружную ванну.

Предварительные опыты по испытанию постоянства температуры воды в ванне при данном тепловом режиме позволили нам заключить, что охлаждение воды в ванне не выходит из пределов $0,02-0,03$ в течение 5 минут. Для сохранения постоянства температуры воды в ванне, кроме принятых внешних мер (покрытие ванны материей) следовало бы еще больше, чем в предыдущих сериях, сократить время самих наблюдений; однако, это оказалось невозможным, так как последнее привело бы к сокращению числа отсчетов, а, следовательно, и к нарушению единообразия и веса наблюдений.

Результаты X серии наблюдений
1. Вывод данных компаратора

№ наблюдения	Наблюдатель	Время наблюдения	t	l	$L_k - \text{№ 318}$	L_k
			№ 318 в °С	№ 318 в р	в р	в р
		<i>ч. мин.</i>				
1	М. А.	21 26 нач.	21,192	+ 56,33	+ 57,12	+ 113,45
		21 36 кон.	21,199	+ 56,35	+ 57,38	+ 113,73
2	В. Б.	21 39,5 нач.	21,209	+ 56,36	+ 57,45	+ 113,81
		21 48 кон.	21,228	+ 56,40	+ 57,75	+ 114,15
3	М. А.	21 51,5 нач.	21,199	+ 56,35	+ 58,22	+ 114,57
		22 00,5 кон.	21,214	+ 56,37	+ 57,99	+ 114,36
4	В. Б.	22 04 нач.	21,219	+ 56,38	+ 58,58	+ 114,96
		22 12,5 кон.	21,226	+ 56,39	+ 58,16	+ 114,55
5	М. А.	22 17 нач.	21,222	+ 56,39	+ 57,89	+ 114,28
		22 29 кон.	21,239	+ 56,42	+ 58,65	+ 115,07
6	В. Б.	22 32 нач.	21,240	+ 56,42	+ 58,29	+ 114,71
		22 40 кон.	21,242	+ 56,42	+ 58,69	+ 115,11

2. Вывод длины № 28

Наблюдатель	t № 28 в °С	№ 28 — L_k в р	L_k в р	l № 28 в р	l № 28 (исправл.) в р
М. А.	34,612	+ 188,31	+ 113,59	+ 301,90	+ 300,20
В. Б.	34,526	+ 186,57	+ 113,98	+ 300,55	+ 299,60
М. А.	34,452	+ 185,86	+ 114,46	+ 300,32	+ 300,01
В. Б.	34,394	+ 184,93	+ 114,76	+ 299,69	+ 299,89
М. А.	34,297	+ 183,92	+ 114,68	+ 298,60	+ 299,65
В. Б.	34,220	+ 183,09	+ 114,91	+ 298,00	+ 299,72
Среднее . .	34,417	+ 185,45	+ 114,40	+ 299,84	+ 299,84

$$\rho = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n-1}} = \pm 0,23 \text{ р.}$$

$$\rho_m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n(n-1)}} = \pm 0,09 \text{ р.}$$

Выделение пузырьков воздуха и их осаждение на метре № 28 и термометрах по сравнению с выделением пузырьков воздуха при температуре в 29° сильно увеличилось. За полчаса до наблюдений пузырьки воздуха были тщательно сняты с метра № 28 и термометров, меры отрегулированы, а вода в ваннах до наблюдений перемешивалась.

В X серии наблюдений большое значение имел прибор для отдувания паров воды от объективов микроскопов.

§ 15. Результаты обработки всех наблюдений из 10 серий

Результаты вычисления длины метра № 28, полученные из наблюдений по 10 сериям при температурах от 0,5 до 34°,5, позволили нам составить начальные уравнения на основе обычной квадратичной формулы функциональной зависимости длины от температуры:

$$x + yt + zt^2 = m, \quad (11)$$

где x — длина метра № 28 при 0°, а $y + zt$ — средний коэффициент расширения метра № 28.

Принимая во внимание указанные выше результаты, система начальных уравнений представляется в следующем виде:

$$\begin{aligned} x + 17,250 y + 297,56250 z &= + 150,28 \mu \\ x + 0,551 y + 0,30360 z &= + 5,70 \mu \\ x + 5,363 y + 28,76177 z &= + 47,61 \mu \\ x + 10,459 y + 109,39068 z &= + 91,49 \mu \\ x + 14,277 y + 203,83273 z &= + 124,25 \mu \\ x + 17,806 y + 317,05364 z &= + 154,87 \mu \\ x + 22,103 y + 488,54261 z &= + 192,64 \mu \\ x + 24,633 y + 606,78469 z &= + 214,57 \mu \\ x + 28,986 y + 840,18820 z &= + 252,09 \mu \\ x + 34,417 y + 1184,52989 z &= + 299,84 \mu \end{aligned}$$

Из этих уравнений мы получили следующие нормальные уравнения:

$$\begin{aligned} 10x + 175,845y + 4076,95031z &= + 1533,34 \\ 175,845x + 4076,95031y + 105853,907z &= + 35509,324 \\ 4076,95031x + 105853,907y + 2959296,7z &= + 921808,2. \end{aligned}$$

Решив эту нормальную систему уравнений, получим следующие значения для неизвестных

$$\begin{aligned} x &= + 1,098 \mu \pm 0,130 \mu, \\ y &= + 8,6155 \mu \pm 0,016 \mu, \\ z &= + 0,00181 \mu \pm 0,00043 \mu \end{aligned}$$

при вероятной ошибке одной серии наблюдений $\pm 0,146 \mu$. Кроме этого общего решения (из всех 10 серий наблюдений) мы повторили ту же задачу по измерениям каждого наблюдателя в отдельности, исходя из результатов 10 серий (по 3 наблюдения в серии).

Для наблюдений М. А. Афанасьева получили следующие значения неизвестных:

$$\begin{aligned}x &= +1,037 \mu \pm 0,172 \mu, \\y &= +8,6158 \mu \pm 0,021 \mu, \\z &= +0,00182 \mu \pm 0,00058 \mu.\end{aligned}$$

при вероятной ошибке для одной серии наблюдений $\pm 0,195 \mu$.

Для наблюдений В. А. Барнинова получили следующие значения неизвестных:

$$\begin{aligned}x &= +1,166 \mu \pm 0,123 \mu, \\y &= +8,6152 \mu \pm 0,015 \mu, \\z &= +0,00179 \mu \pm 0,00041 \mu.\end{aligned}$$

при вероятной ошибке для одной серии наблюдений $\pm 0,138 \mu$.

Далее для контроля и критического обзора выполненной нами работы по исследованию коэффициента расширения метра № 28, мы решили еще вычислить эти коэффициенты раздельно по следующим сериям: 1) из I, II и X серий при температурах $17^{\circ}, 250$, $0^{\circ}, 551$ и $34^{\circ}, 417$ и 2) из II, VI и X серий при температурах $0^{\circ}, 551$, $17^{\circ}, 806$ и $34^{\circ}, 417$.

В этих двух системах по две серии наблюдений взяты одинаковые, а третьи серии наблюдений являются близкими по температуре, но различными по времени их наблюдения, имея в виду, что наблюдения при температурах, близких к $17-20^{\circ}$, как это показал многолетний опыт, всегда имеют наименьшие ошибки.

Решение этих двух систем дало следующие значения неизвестных:

для первого случая	для второго случая
$x = +0,945 \mu$	$x = +0,960 \mu$
$y = +8,6296 \mu$	$y = +8,6005 \mu$
$z = +0,00160 \mu$	$z = +0,00242 \mu$

Из сравнения значений неизвестных, полученных из первой и второй систем, мы видим сравнительно значительные расхождения. Однако, мы считаем, что это расхождение можно отнести за счет ошибок наблюдений, происходящих от несовершенства штрихов на метре № 28.

§ 16. Заключение

Итак в итоге нашей работы по исследованию коэффициента расширения метра № 28 мы получили следующее его значение:

$$\alpha_{28} = (8,6155 + 0,00181t) 10^{-6}$$

при вероятных ошибках $\rho_a = \pm 0,016$, $\rho_b = \pm 0,00043 \mu$.

Сравнивая это значение со значениями коэффициентов расширения для метра № 28 из определений 1931 г., т. е.

$$\begin{aligned}\alpha_{28} &= (8,563 + 0,00350t) 10^{-6} \text{ из I определения} \\ \alpha_{28} &= (8,611 + 0,00147t) 10^{-6} \text{ из II} \quad \text{''} \\ \alpha_{28} &= (8,592 + 0,00262t) 10^{-6} \text{ из III} \quad \text{''}\end{aligned}$$

мы видим, что эти последние результаты меньше по величине по сравнению с данными 1936 г.

Сравнивая же значение коэффициента расширения для метра № 28, полученное нами в 1936 г., со значениями коэффициентов расширения, полученными в Международном бюро мер и весов для метров № 20, 26, T₂ и T₃, и в Национальном бюро мер и весов в Швейцарии для метра № 2, согласно нижеследующей таблице:

Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии (ВНИИМ)	Международное бюро мер и весов	Национальное бюро мер и весов Швейцарии
$\alpha_{28} = (8,6155 + 0,00181 t) 10^{-6}$	$\alpha_{20, 26} = (8,6210 + 0,00180 t) 10^{-6}$ $\alpha_{T_2} = (8,6220 + 0,00180 t) 10^{-6}$ $\alpha_{T_3} = (8,6130 + 0,00180 t) 10^{-6}$	$\alpha_2 = (8,603 + 0,00233 t) 10^{-6}$

мы приходим к заключению, что полученный нами коэффициент расширения для метра № 28 весьма близок по величине к коэффициентам расширения метров Международного бюро мер и весов. Однако, мы считаем, что результаты, которых мы добились в 1936 г. в этом чрезвычайно важном метрологическом процессе термического исследования платино-иридиевого эталона метра № 28, являются только удовлетворительными, поскольку средние ошибки, с которыми получены искомые неизвестные все-таки еще сравнительно велики.

Полученная из Международного бюро мер и весов записка Воле, в которой на ряду с обзором нашей работы 1931 г. он поделился с нами полувекковым опытом Бюро, позволила нам сравнить наш метод работы с методом работы Международного бюро и взять из них лучшее. Результатом этого явилось близкое согласие коэффициентов расширения платино-иридиевых метров большой плавки Джонсон-Маттеи из определений Международного бюро и ВНИИМ. В следующих наших работах мы постараемся повысить точность наших определений до такого предела, когда вычисления коэффициентов расширения из отдельных серий наблюдений будут давать совершенно одинаковые результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hebretica Physica Acta*, Tome 2, 1929, Berne.
2. М. А. Афанасьев, V. A. Barinov et N. C. Preipitch, Détermination des coefficients thermiques de dilatation des mètres prototypes № 28, № 11 en platine iridié et la règle en platine iridié, désignée par П 4 1894 (Mémoires présentés à la VIII Conférence Générale des Poids et Mesures, 1933, Leningrad—Moscou).
3. М. А. Афанасьев, Исследование окулярных микрометров для микроскопов 4-метрового компаратора (Труды ВИМС, вып. 5, 1934 г.).

В. А. БАРИНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНВАРНОГО МЕТРА № 598 — РАБОЧЕГО ЭТАЛОНА ДЛИНЫ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНСТИТУТА МЕР И ВЕСОВ

§ 1. Описание меры

Метр № 598, служащий рабочим эталоном длины Московского государственного института мер и весов, изготовлен известной швейцарской фирмой „Société Genevoise pour la construction d'instruments de physique et de mecanique — Geneve (Suisse)* из сплава инвар, содержащего 36% Ni и 64% Fe, в виде стержня *H*-образного поперечного сечения (рис. 1), при общей длине стержня в 103,2 см и массе в 2656,7 г.



Рис. 1.

Нейтральная плоскость меры, открытая по всей длине стержня и зеркально полированная, шириной 6,5 мм, расположена точно на среднем продольном слое массы стержня, выдаваясь над перемычкой на 0,7 мм.

На верхних плоскостях стержня, на левом и правом его концах, симметрично расположены надписи, фиксирующие: 1) название сплава, из которого изготовлен стержень (invar C.01354), 2) наименование фирмы (S.I.P. Geneve), 3) номер меры (№ 598) и 4) численное значение температуры, к которой отнесена номинальная длина меры (20° С).

Основная шкала меры, от 0 до 100 см, нарезана на нейтральной плоскости строго по оси меры с номинальной ценою одного подразделения в 1 мм, причем штрихи, отвечающие 0 и 1000 мм, расположены от соответственных концов стержня на расстоянии 16 мм. Толщина отдельного штриха — порядка 0,006 мм. Числовые обозначения даны на мере для каждого сантиметра.

Кроме основной шкалы, для вспомогательных метрологических измерений имеются две дополнительные шкалки, расположенные на свободных полях нейтральной плоскости, симметрично относительно крайних штрихов основной шкалы; каждая из этих шкалок представляет собой отдельный миллиметровый интервал, разделенный на 10 частей.

Расстояние между точками опор при изучении меры, рассчитано было по Бесселю и принято было равным 576 мм.

§ 2. Первое исследование меры (декабрь 1933 г.—январь 1934 г.)

Это исследование имело целью получить результаты всестороннего метрологического анализа меры, как рабочего эталона длины. Программа исследования состояла из следующих позиций:

1) Изучение среднего коэффициента термического удлинения метра № 598, т. е. $\alpha_m = \frac{1}{l} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T}$, в пределах температур от 0° до 30°С;

2) сравнение инварного метра № 598 с платино-иридиевым эталоном метра П 4 Всесоюзного института метрологии;

3) изучение действительной длины отдельных дециметровых интервалов по всей длине меры;

4) изучение действительной длины отдельных сантиметров первого дециметра и третьего дециметра;

5) изучение действительной длины отдельных миллиметров первого сантиметра;

6) изучение действительной длины десятых долей миллиметра на вспомогательных миллиметровых шкалах меры.

Хронологический порядок программы исследования был несколько иной по сравнению с вышеприведенным и устанавливался в зависимости от текущих лабораторных условий.

Дальнейшее изложение будет соответствовать порядку проектной программы исследования.

§ 3. Изучение среднего коэффициента термического удлинения α_{500} инварного метра № 598

Изучение производилось относительным методом на малом компараторе „SIP“ из сравнительных измерений с инварным метром № 318, применяемым лабораторией для этих целей, по предложению проф. Ф. И. Блумбах, с 1909 г. Коэффициент расширения метра имеет следующее значение:

$$\alpha_{318} = (1,912 - 0,0047 t) \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

Температура воды в ванне компаратора менялась сообразно программе наблюдений от 0 до 30°С и учитывалась двумя термометрами Baudin № 15658 № 15659.

Термометры располагались у самих мер на уровне их нейтральной плоскости. Слой воды над верхней плоскостью меры при всех наблюдениях был около 15 мм. Экспериментальная часть исследования состояла из трех серий независимых сравнений длины метра № 598 с длиной метра № 318 при температурах, близких к 0°, 3, 17°, 9 и 27°, 7. Наблюдения производились в каждой серии поочередно двумя наблюдателями из 6 полных приемов, понимая под приемом наблюдений следующие операции:

Прямой ход

- 1) Перемешивание воды в ванне компаратора (2—3 минуты);
- 2) производство отсчетов по термометрам;

3) наблюдение метра № 318 — три наведения микрометра на левый штрих, шесть на правый и три на левый;

4) наблюдение метра № 598 — три наведения микрометра на левый штрих, шесть на правый и три на левый.

Обратный ход

5) Наблюдение метра № 598 — три наведения на правый штрих, шесть на левый и три на правый;

6) наблюдение метра № 318 — три наведения на правый штрих, шесть на левый и три на правый;

7) производство отсчетов по термометрам;

8) перемешивание воды.

В итоге по всем трем сериям были получены результаты, представленные в табл. 1:

Таблица 1

№ приемов	I серия		II серия		III серия	
	t в °С	№ 318 — № 598 в μ	t в °С	№ 598 — № 318 в μ	t в °С	№ 598 — № 318 в μ
1	0,340	-50,02	17,905	-59,14	27,864	-67,09
2	0,299	-50,45	17,900	-58,69	27,802	-67,71
3	0,360	-50,66	17,922	-59,09	27,739	-67,62
4	0,284	-50,27	17,928	-58,93	27,712	-66,99
5	0,351	-49,99	17,941	-59,38	27,643	-67,97
6	0,283	-49,44	17,943	-59,15	27,580	-67,76
Среднее	0,320	-50,14	17,923	-59,06	27,723	-67,52

На основе полученных результатов эталонирования задача вычисления среднего коэффициента термического удлинения может быть весьма компактно решена по способу наименьших квадратов, исходя из следующих теоретических положений.

Длина изучаемого эталона, в пределах возможной температуры его метрологического применения, т. е. от 0 до 30°С, есть, как известно, линейная функция температуры, и формула для коэффициента α термического удлинения в простейшем ее виде будет выражаться так:

$$\alpha = \frac{l_0 - l_1}{t_0 - t_1}, \quad (2)$$

где t_0 — произвольно выбранная температура, t_1 — температура эталонирования, l_0 — вероятная длина меры при температуре t_0 , l_1 — длина меры при температуре эталонирования t_1 .

Принимая во внимание, однако, что данные, получаемые из непосредственных наблюдений, сопровождаются случайными ошибками, формула (2), после простых преобразований, представится в виде уравнения погрешностей

$$\delta_i = l_i - \alpha(t_0 - t_i) - l_0, \quad (3)$$

где δ_i — случайная ошибка наблюдений.

Термическое исследование меры предполагает серию измерений при различных, устанавливаемых программой, температурах, поэтому будем иметь и соответствующий ряд уравнений погрешностей, если таких серий было n :

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= l_0 - \alpha(t_0 - t_1) - l_1 \\ \delta_2 &= l_0 - \alpha(t_0 - t_2) - l_2 \\ \delta_3 &= l_0 - \alpha(t_0 - t_3) - l_3 \\ &\dots \\ \delta_n &= l_0 - \alpha(t_0 - t_n) - l_n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Последняя система уравнений легко дает систему нормальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} nl_0 - \alpha \sum (t_0 - t_i) - \sum l_i &= 0, \\ - \sum (t_0 - t_i) l_0 + \alpha \sum (t_0 - t_i)^2 + \sum (t_0 - t_i) l_i &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Так как t_0 — произвольно выбранная температура, то поставим условие, чтобы t_0 удовлетворяло следующему требованию:

$$t_0 = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}{n} = \frac{\sum t_i}{n} \quad (6)$$

Тогда очевидно, что

$$l_0 = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n}{n} = \frac{\sum l_i}{n} \quad (7)$$

с весом n и следовательно:

$$\alpha = \frac{\sum l_i (t_0 - t_i)}{\sum (t_0 - t_i)^2} = \frac{\sum l_i \cdot \Delta t_i}{\sum (\Delta t_i)^2} \quad (8)$$

с весом, равным $\sum (\Delta t_i)^2$.

Принимая во внимание уравнения (3) и (8), далее легко получаем, что:

1) средняя квадратичная ошибка длины исследуемой меры, измеренной одним приемом, т. е. ошибка единицы веса, будет иметь вид:

$$\epsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{kn - 2}} = \pm \sqrt{\frac{\sum (\Delta l_i)^2 - \alpha^2 \sum (\Delta t_i)^2}{kn - 2}}, \quad (9)$$

где k — число приемов наблюдений в одной температурной серии измерений;

2) средняя квадратичная ошибка вероятнейшего значения длины исследуемой меры при температуре t_0

$$m_l = \pm \frac{\epsilon}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

и, наконец,

3) средняя квадратичная ошибка окончательного значения коэффициента α термического удлинения

$$m_{\alpha} = \pm \frac{\varepsilon}{\sqrt{(\Delta t_i)^2}} \quad (11)$$

Имея из табл. 1 разности (№ 598 — № 318), а также принимая во внимание, что длина № 318 на эпоху 1933 г. выражается уравнением:

$$[\text{№ 318}] = 1 \text{ м} + 15,45 \mu + (1,912 t - 0,005 t^2) \mu, \quad (12)$$

вычисляем длину инварной меры № 598 по каждой серии. Редуцируя эту длину на среднюю температуру t_0 , получаем:

Для I серии ($t_0 = 0^{\circ},320$):

$$[\text{№ 318}] = 1 \text{ м} + 15,45 \mu + (1,912 - 0,005 \cdot 0^{\circ},320) \cdot 0^{\circ},320 \mu = \\ = 1 \text{ м} + 16,06 \mu,$$

$$[\text{№ 598}] = 1 \text{ м} + 16,06 \mu - 50,14 \mu = 1 \text{ м} - 34,08 \mu.$$

Для II серии ($t_0 = 17^{\circ},923$):

$$[\text{№ 318}] = 1 \text{ м} + 15,45 \mu + (1,912 - 0,005 \cdot 17^{\circ},923) \cdot 17^{\circ},923 \mu = \\ = 1 \text{ м} + 49,56 \mu,$$

$$[\text{№ 598}] = 1 \text{ м} + 49,56 \mu - 59,06 \mu = 1 \text{ м} - 9,50 \mu.$$

Для III серии ($t_0 = 27^{\circ},723$):

$$[\text{№ 318}] = 1 \text{ м} + 15,45 \mu + (1,912 - 0,005 \cdot 27^{\circ},723) \cdot 27^{\circ},723 \mu = \\ = 1 \text{ м} + 64,85 \mu,$$

$$[\text{№ 598}] = 1 \text{ м} + 64,85 \mu - 67,52 \mu = 1 \text{ м} - 2,67 \mu.$$

Численное решение задачи и вычисление средних ошибок отдельных элементов определения, располагается в специальную схему (табл. 2).

Таблица 2

Время измерений	Серия	Число приемов	t_i в $^{\circ}\text{C}$	Длина меры l_i	$t_i - t_0$ в μ	$t_i - t_0$ в $^{\circ}\text{C}$	$\Delta t_i \cdot \Delta t_i$	$(\Delta t_i)^2$	$(\Delta t_i)^2$
1933 г.				м μ					
27 XII	I	6	0,320	1-34,08	+18,66	+15,002	+279,94	+348,20	+225,00
30 XII	II	6	17,923	1- 9,50	- 5,92	- 2,601	+ 15,40	+ 35,05	+ 6,76
31 XII	III	6	27,723	1- 2,67	-12,75	-12,401	+158,12	+162,56	+153,75
	Σ	18	—	—	- 0,01	0,000	+453,46	+545,81	+385,60
	Среднее	15,322	1 м-15,42	—	—	—	—	—	—

Далее по формулам (8), (9), (10) и (11) вычисляются искомые численные значения величины α , m_{α} и m_{α} :

$$\alpha_{598} = + \frac{453,46 \mu}{385,60} = + 1,1759 \mu,$$

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{545,81 - (1,18)^2 \cdot 385,60}{18 - 2}} = \pm \sqrt{\frac{9,83}{16}} = \pm 0,78 \mu,$$

$$m_t = \pm \frac{0,78 \mu}{\sqrt{18}} = \pm 0,18 \mu,$$

$$m_\alpha = \pm \frac{0,78 \mu}{\sqrt{385,60}} = \pm 0,04 \mu.$$

§ 4. Сравнение инварного метра № 598 с платино-иридиевым эталовым метра П 4

Сравнение осуществлено на малом компараторе „SIP“, в воде, из 4 приемов, при температуре, близкой к 20° С, и имея в виду, что длина симметричного метра на мере П 4 выражается следующим уравнением:

$$[П 4] = 1 м - 4,7 \mu + (8,610 t + 0,0015 t^2) \mu. \quad (13)$$

Результаты сравнения приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Время изме- рений	Наблюдатели ¹	t в ° С	Δt в ° С	Измеренное № 598 — П 4 в μ	$(\alpha - \alpha') \cdot \Delta t$ в μ	Приведенное № 598 — П 4 в μ	v	v^2
1933 г. 31 XII	А Б А Б	19,672	+0,010	-170,92	-0,08	-171,00	-0,24	0,0576
		19,674	+0,008	-171,13	-0,06	-171,19	-0,05	0,0025
		19,683	-0,001	-171,66	0,00	-171,66	+0,42	0,1764
		19,698	-0,016	-171,27	+0,14	-171,13	-0,11	0,0121
		19,682	—	-171,24	—	-171,24	+0,02	0,2486

Редуцируя длину П 4 на среднюю температуру наблюдений 19°,682, получим:

$$[П 4] = 1 м - 4,7 \mu + (8,61 + 0,0015 \cdot 19^\circ,682) \cdot 19^\circ,682 \mu = 1 м + 165,35 \mu.$$

На основании данных табл. 3 далее имеем:

$$[№ 598] = (1 м + 165,35 \mu) - 171,24 \mu = 1 м - 5,89 \mu.$$

Имея в виду, что термическое удлинение метра № 598

$$\alpha_m = + 1,1759 \mu,$$

легко получаем длину исследуемой меры № 598 для температуры 20° С:

$$[№ 598] = 1 м - 5,89 \mu + 1,1759 (20^\circ - 19^\circ,682) \mu = 1 м - 5,52 \mu.$$

¹ А — Афанасьев, Б — Барinov (тоже далее в табл. 4 и 9).

§ 5. Изучение действительной длины отдельных дециметровых интервалов по всей длине метра № 598

Эта задача разрешена была двумя этапами работы: сначала была определена действительная длина первого дециметра сравнением с нормальным дециметром D 76, а затем, методом прямой калибровки, на продольном компараторе остальные девять дециметровых интервалов были сравнены с первым.

Результаты эталонирования первого дециметра заключены в табл. 4.

Таблица 4

Наблюдатели	t в °C	№ 598 (0—10) см— — D 76 в μ	v	v^2	$m_1 = \pm \sqrt{\frac{0,0141}{4-1}} = \pm 0,07 \mu$
А	19,36	-19,34	+0,04	0,0016	
Б	19,39	-19,20	-0,10	0,0100	
А	19,41	-19,34	+0,04	0,0016	
Б	19,41	-19,33	+0,03	0,0009	
	19,39	-19,30	+0,01	0,0141	

Имея в виду, что термическое удлинение D 76 имеет значение, равное $(1,254 + 0,000635 t) \cdot 10^{-6}$, длина D 76 (0—100) мм при температуре 19°,39 получится из решения уравнения:

$$D 76 (0 - 100) \text{ мм} = 100 \text{ мм} - 5,1 \mu + \\ + (1,254 + 0,000635 \cdot 19^\circ,39) \cdot 19^\circ,39 \mu = 100 \text{ мм} + 19,45 \mu$$

(в данном случае 5,1 μ есть поправка к D 76 по сертификату Международного бюро).

На основании данных табл. 4 легко далее получаем длину первого дециметра меры № 598 при температуре 19°,39:

$$\text{№ 598 (0 - 100) мм} = 100 \text{ мм} + 19,45 \mu - 19,30 \mu = 100 \text{ мм} + 0,15 \mu.$$

Следовательно, длина этого же дециметра на мере № 598 при нормальной температуре 20° C, будет:

$$\text{№ 598 (0 - 100) мм} = 100 \text{ мм} + 0,15 \mu + 0,11759 \mu \cdot 0^\circ,61 = \\ = 100 \text{ мм} + 0,22 \mu.$$

Результаты второго этапа работы, т. е. сравнения остальных девяти интервалов с первым дециметром, приводятся в табл. 5.

Таблица 5

Наблюдаемые дециметровые интервалы	Средние разности длин из 4 наблюдений при средней температуре 19°,60 в р	Приведенные разности		Длина интервалов	
		поправка на температуру в р	разность при 20° С в р	интервалы в мм	действительное значение при $t = 20^\circ \text{C}$ мм р
(0-1)	—	+0,22	+0,22	0-100	100+0,22
(1-2) — (0-1)	-1,60	-0,22	-1,38	0-200	200-1,16
(2-3) — (0-1)	-1,27	-0,22	-1,05	0-300	300-2,21
(3-4) — (0-1)	+0,51	+0,22	+0,73	0-400	400-1,48
(4-5) — (0-1)	-0,33	+0,22	-0,11	0-500	500-1,59
(5-6) — (0-1)	-0,12	+0,22	+0,10	0-600	600-1,49
(6-7) — (0-1)	-1,41	+0,22	-1,19	0-700	700-2,68
(7-8) — (0-1)	+0,82	+0,22	+1,04	0-800	800-1,64
(8-9) — (0-1)	-3,40	+0,22	-3,18	0-900	900-4,82
(9-10) — (0-1)	-0,40	+0,22	-0,18	0-1000	1000-5,00

§ 6. Изучение действительной длины отдельных сантиметровых подразделений в интервале (0-1) дм

Изучение производилось на продольном компараторе методом сравнения с соответствующими подразделениями нормального дециметра D 76. Было сделано четыре независимых наблюдения при средней температуре 19°,4 С.

Результаты, полученные из наблюдений, и обработка измерений представлены в табл. 6.

Таблица 6

Наблюдаемые сантиметровые интервалы на мере № 598	Средние разности из 4 наблюдений при температуре 19°,4 в р	Поправки		Действительная длина интервалов при $t = 19^\circ,4$ мм р	Поправки на температуру в р	Приведенная к 20° С длина интервалов мм р
		на температуру в р	по сертификату на D 76 в р			
0-1	-4,54	+2,45	+1,30	10-0,79	+0,01	10-0,78
0-2	-6,38	+4,90	+1,80	20+0,32	-0,01	20+0,32
0-3	-7,37	+7,35	+1,20	30+1,18	-0,02	30+1,20
0-4	-9,30	+9,80	+0,60	40+1,10	-0,03	40+1,13
0-5	-13,36	+12,25	+0,50	50-0,61	+0,03	50-0,58
0-6	-14,16	+14,70	-0,10	60+0,44	-0,04	60+0,48
0-7	-14,85	+17,15	-1,80	70+0,50	-0,05	70+0,55
0-8	-15,09	+19,60	-3,50	80+1,01	-0,05	80+1,06
0-9	-17,54	+22,05	-4,20	90+0,31	-0,06	90+0,37
0-10	-19,14	+24,50	-5,10	100+0,26	+0,07	100+0,33

§ 7. Изучение действительной длины отдельных миллиметровых подразделений в интервале (0—1) см

Изучение производилось совершенно так же, как это описано выше, при соответственных последовательных сравнениях миллиметровых подразделений изучаемой меры с D 76.

В табл. 7 помещены итоги этой работы.

Таблица 7

Наблюдаемые миллиметровые интервалы на мере № 598	Средние разности из 4 наблюдений при температуре 19°,22 в м	Поправки		Действительная длина интервалов при $t = 19°,22$ мм м	Поправки на температуру в м	Приведенная к 20° С длина интервалов мм м
		на температуру в м	по сертификату на D 76 в м			
0—1	-0,15	+0,24	-0,30	1—0,21	0,00	1—0,21
0—2	-0,59	+0,48	-0,10	2—0,21	0,00	2—0,21
0—3	-0,74	+0,72	0,00	3—0,02	0,00	3—0,02
0—4	-1,49	+0,96	+0,20	4—0,33	0,00	4—0,33
0—5	-1,64	+1,20	+0,30	5—0,14	+0,01	5—0,13
0—6	-2,26	+1,44	+0,60	6—0,22	+0,01	6—0,21
0—7	-2,78	+1,68	+0,40	7—0,70	+0,01	7—0,69
0—8	-3,61	+1,92	+1,00	8—0,69	+0,01	8—0,68
0—9	-4,52	+2,16	+1,20	9—1,16	+0,01	9—1,15
0—10	-4,12	+2,40	+1,30	10—0,42	+0,01	10—0,41

§ 8. Изучение отдельных вспомогательных миллиметров, нанесенных на свободных полях нейтральной плоскости слева от 0 и справа от штриха, отвечающего 100 см

Вспомогательные миллиметры разделены каждый на 10 равных частей. Цена деления барабанов микроскоп-микрометров, которыми мы в данном случае пользовались, была хорошо изучена и периодически проверяется.

На эпоху данного исследования цена одного деления для левого микроскопа выражалась в линейной мере величиной 0,60054 м и для правого микроскопа 0,60089 м.

Мера № 598 была поставлена под микроскопы компаратора так, что в поле зрения каждого из микроскопов наблюдался соответствующий миллиметровый интервал.

Подвижная пара нитей наводилась три раза на каждый штрих, отвечающий 0,1 мм, фиксируя отсчеты по гребенке (обороты микрометрического винта) и по барабану (доли оборота винта) в журнале наблюдений. Пройдя таким образом в одну сторону все 11 штрихов, т. е. выполнив прямой ход наблюдений, тем же порядком производили наблюдения обратным ходом винта. Средний отсчет по каждому штриху, очевидно, получался из 6 отсчетов.

Эти наблюдения были выполнены полностью и независимо двумя наблюдателями, как для левого, так и для правого конца меры № 598.

В табл. 8 даны результаты наблюдений и их обработка.

Таблица 8

Наблюдаемые миллиметровые штрихи	Левый конец меры				Правый конец меры			
	Средние отсчеты по микро-скопу	Интервалы в мм	Длина интервалов в делениях барабана	Длина интервалов в μ	Средние отсчеты по микро-скопу	Интервалы в мм	Длина интервалов в делениях барабана	Длина интервалов в μ
0	10 41,98				27 83,65			
0,1	12 08,47	0—0,1	166,49	99,9	26 17,08	0—0,1	166,57	100,0
0,2	13 75,38	0—0,2	333,40	200,1	24 51,37	0—0,2	332,28	199,4
0,3	15 42,96	0—0,3	500,98	300,7	22 84,88	0—0,3	498,77	299,3
0,4	17 09,85	0—0,4	667,87	400,9	21 18,54	0—0,4	665,11	399,1
0,5	18 76,70	0—0,5	834,72	501,1	19 52,22	0—0,5	831,43	498,9
0,6	20 43,06	0—0,6	1001,08	601,0	17 85,76	0—0,6	997,89	598,8
0,7	22 09,28	0—0,7	1167,30	700,7	16 18,95	0—0,7	1164,70	698,9
0,8	23 75,28	0—0,8	1333,30	800,4	14 53,13	0—0,8	1330,52	798,4
0,9	25 41,94	0—0,9	1499,96	900,4	12 86,41	0—0,9	1497,24	898,4
1,0	27 08,20	0—1,0	1666,22	1000,2	11 20,54	0—1,0	1663,11	998,0

На основании всех полученных таким образом результатов полного метрологического исследования меры № 598 на данный рабочий эталон длины было выдано соответствующее свидетельство Московскому государственному институту мер и весов.

§ 9. Дополнительные последующие испытания рабочего эталона № 598

Метр № 598 в первых числах июня 1935 г. был доставлен научным сотрудником МГИМВ из Москвы в Ленинград во Всесоюзный институт метрологии для внеочередного исследования в связи с пребыванием данной инварной меры в условиях высокой температуры во время пожара в лабораториях названного Института в мае 1935 г.

Наружный осмотр меры, после снятия предохранительного слоя вазелина, позволил установить, что зеркально-полированная нейтральная поверхность жезла поражена царапинами, задевающими местами штриховую шкалу меры, а также обнаружить темные пятна — следы едкой копоты, осевшей на отдельных плоскостях меры. Из объяснений сотрудника МГИМВ выяснилось, что жезл перед отправлением в Ленинград был очищен от копоты специалистом-механиком; установить все подробности, сопутствовавшие указанной выше факт, не удалось.

По нашим предположениям, на основе изучения свойств инвара, мера № 598 должна была уменьшиться в своей длине, и это укорачивание меры должно было быть тем значительнее, чем сильнее было тепловое воздействие, чем длительнее пребывала мера в условиях высокой температуры.

7 июня 1935 г. инварный метр № 598 был сличен с симметричным метром платино-иридиевой меры П4. Результаты наблюдений приведены в табл. 9.

Таблица 9

Время наблюдений	Наблю-дате-ли	t в °С	Δt в °С	Измеренное № 598—П 4 в μ	$(\alpha - \alpha') \cdot \Delta t$ в μ	Приведен- ное № 598—П 4 в μ	v	v^2
1935 г. 7 июня	А	18,737	+0,003	-180,49	-0,02	-180,51	-0,91	0,8281
	Б	18,736	+0,004	-181,70	-0,03	-181,73	+0,31	0,0961
	А	18,742	-0,002	-181,31	+0,01	-181,30	-0,12	0,0144
	Б	18,745	-0,005	-181,17	+0,04	-181,13	+0,71	0,5041
Среднее . .		18,740	—	-181,42	—	-181,42	$\sum v^2 = 1,4427$	

Примечание: $\alpha - \alpha' = 7,46 \mu$, $m_1 = \pm \sqrt{\frac{1,4427}{4-1}} = \pm 0,62 \mu$,
 $m_2 = \pm \frac{0,62 \mu}{\sqrt{4}} = \pm 0,31 \mu$.

Из дальнейшей обработки наблюдений, по известной уже схеме, была получена длина меры № 598.

При температуре 18°,740

$$[П 4] = 1 м - 4,7 \mu + (8,61 + 0,0015 \cdot 18^\circ,740) \cdot 18^\circ,740 \mu = \\ = 1 м + 157,18 \mu.$$

Таким образом, при той же средней температуре наблюдения 18°,740 для № 598 будем иметь, согласно данным табл. 9:

$$[№ 598] = 1 м + 157,18 \mu - 181,42 \mu = 1 м - 24,24 \mu.$$

Но так как длина данной меры отнесена к 20° С, то окончательно получаем:

$$[№ 598] = 1 м - 24,24 \mu + 1,176 \mu \cdot (20^\circ - 18,740) = 1 м - 22,76 \mu.$$

Сравнивая полученный результат с результатом первоначального определения длины, видим, что длина инварной меры № 598 укоротилась на 17,2 μ .

Совершенно очевидно, что термическое воздействие на жезл, вызванное пожаром, было очень сильным и длительным по времени.

Тем больший интерес вызвало дальнейшее поведение данной меры, а именно — насколько быстро или медленно будет восстанавливаться ее длина с течением времени, если сама мера будет находиться в полном покое и в температурных условиях, близких к нормальным.

С этой целью, спустя почти 9 месяцев, 29 февраля 1936 г., инварный метр № 598 был вновь сличен с платино-иридиевым эталоном метра П 4. Результат этого последнего сравнения для $t = 20^\circ$ С получился следующий:

$$[№ 598] = 1 м - 20,6 \mu.$$

Таким образом, действительно, длина инварной меры № 598, зафиксированная компарацией ее от 7 июня 1936 г., изменилась за 9 месяцев в сторону удлинения на 2,2 μ и это удлинение оказалось почти в два

раза больше, чем обычное изменение длины у метровых жезлов, изготовленных из инвара, вызываемое свойствами молекулярной структуры данного сплава.

Из последующих периодических измерений имеем:

1937 г. ноябрь [№ 598] = 1 м — 19,2 мк,

1938 г. май [№ 598] = 1 м — 18,2 мк.

Как видно из этих данных, инварная мера № 598, после катастрофы, изменяет свою длину (удлинняется), в среднем, почти на 1,5 мк в год. Будущие измерения покажут вид функции, которой отвечают эти изменения длины во времени.

В. А. БАРИНОВ

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КОНЦЕВЫХ МЕР (ПЛИТОК ИОГАНСОНА), ДЛИНЮЮ СВЫШЕ 100 ММ, МЕТОДОМ КОМПАРАТОРНОГО СРАВНЕНИЯ СО ШТРИХОВЫМИ МЕРАМИ

§ 1. Введение

В настоящее время плоскопараллельные концевые меры (плитки типа Иогансона), длиною свыше 100 мм, имеют широкое применение в точных измерениях в лабораториях и в цехах машиностроительных и станкостроительных заводов. Если до 1937 г. наборы такого рода мер, длиною от 125 до 500 мм, импортировались в СССР главным образом от известной фирмы „Johansson Eskilstuna-Sweden“, то уже в 1937 г. производство этих мер было с успехом освоено советским заводом „Красный Инструментальщик“.

Измерение плоскопараллельных концевых мер, длиною не более 100 мм, с большой степенью точности производится абсолютным интерференционным методом, и измерение такого рода мер не представляет в настоящее время каких-либо затруднений. В данном случае главное внимание направлено лишь на совершенствование аппаратуры, на создание наивыгоднейших температурных условий для измерений, на возможности автоматической регулировки температуры, на просмотр методики наблюдений с целью повышения точности измерений и т. п.

Гораздо сложнее обстояло дело с точным измерением плоскопараллельных концевых мер, длина которых превышает 100 мм, необходимая же точность измерения их действительной длины требовалась равной нескольким десятым долям микрона.

Этот последний вопрос, казалось бы, с первого взгляда, наилучшим образом мог быть разрешен измерением указанных мер на концевой машине, типа „SIP“, в которой имеется все необходимое для измерения концевой меры, причем длина измеряемого объекта фиксируется из непосредственных отсчетов на штриховом рабочем эталоне. Однако, точность, даваемая этой машиной, в том виде, какой она имела для измерения мер второго порядка, оказалась слишком малой, чтобы удовлетворить первоклассным требованиям, предъявляемым к образцовым наборам концевых мер.

В 1935 г. лаборатория мер длины ВНИИМ, в лице старшего научного сотрудника М. А. Афанасьева, базируясь на данных Международного бюро мер и весов и других иностранных метрологических учреждений,

применила к плоскопараллельным концевым мерам, длиною свыше 100 мм, метод компараторных измерений, обращая каждую из этих мер в штриховую меру, путем притирки к концевой мере специальных боковичков со штрихами (рис. 1, стр. 63) и сравнивая затем эту последнюю комбинированную меру со штриховым рабочим эталоном. Этот метод, не имевший к тому времени какого-либо параллельного контроля, но исходивший из предположения, что каждая плоскопараллельная концевая мера по своей форме весьма близка к прямоугольному параллелепипеду, казался настолько достоверным, что был не только принят, но даже регламентирован и узаконен ОСТ 7622.

Но если сами компараторные измерения, выполняемые на совершеннейшем приборе для штриховых мер, и не вызывали никаких сомнений, то результаты, получаемые на нем для концевых мер, уже в 1936 г., стали вызывать сомнения, сущность которых со всей очевидностью раскрылась в первой половине 1937 г. при измерении набора плоскопараллельных концевых мер, изготовленных заводом „Красный Инструментальщик“.

§ 2. Основной недостаток компараторного метода, применявшегося лабораторией до середины 1937 г.

При идеальной форме плоскопараллельной концевой меры, которую в дальнейшем мы будем для краткости называть плиткой, ее геометрическая ось является одновременно и отрезком прямой, определяющим длину меры. Но если рассматривать данную меру в системе двух взаимноперпендикулярных осей X и Y , и если хотя при одном сечении по оси X или по оси Y эта мера будет иметь перекося, — геометрическая ось такой меры уж не будет кратчайшим расстоянием между двумя измерительными плоскостями меры и будет отличаться от длины перпендикуляра, опущенного из середины одной измерительной плоскости на другую измерительную плоскость меры, тем больше, чем значительнее будет величина перекося.

Притирая боковички к измерительным поверхностям плитки строго симметрично, так чтобы ориентировочные штрихи a и a_1 боковичков располагались посредине, как это показано на рис. 1, в результате измерения получали длину l_1 линии, соединяющей середины сторон d_1 и d_2 верхней плоскости плитки. Повторяя ту же операцию для противоположной плоскости и сравнивая новую длину l_1' с l_1 , можно было иметь суждение о непараллельности измерительных плоскостей, а, вычисляя среднее из l_1 и l_1' , получить значение l , т. е. длину геометрической оси плитки.

Эта длина l и принималась лабораторией мер длины за искомую длину измеряемой на компараторе плитки.

Совершенно очевидно, что данный результат, из каких бы точнейших компараторных измерений он ни был получен, отвечал только одному частному случаю, когда плитка не имеет перекося или когда эти перекося по своей величине исчезающе малы по сравнению с ошибками компараторных измерений. В действительности даже плитки Иогансона,

обладая достаточной взаимной параллельностью измерительных плоскостей, имеют перекосы.

Таким образом, метод, применявшийся лабораторией мер длины до середины 1937 г., не позволял измерить действительную длину плитки, по своей сути определяемую не длиной геометрической оси, а кратчайшим расстоянием между измерительными плоскостями данной меры, т. е., как указывалось выше, перпендикуляром, опущенным из середины верхней измерительной плоскости¹ на плоскость, к которой притерта прикладываем или надвиганием нижняя измерительная плоскость.

Особенно резко это обстоятельство выявилось при измерении новых плоскопараллельных концевых мер — плиток, изготовленных в порядке освоения заводом „Красный Инструментальщик“. Измерение на компараторе плитки, номинальной длиной в 400 мм, показало, что действительная длина этой плитки равняется $400 \text{ мм} + 16,0 \text{ мк}$. Эта мера была признана негодной и вместо нее была доставлена другая плитка той же номинальной длины. Измерение этой последней дало результат: $400 \text{ мм} + 1,7 \text{ мк}$; таким образом разность длин этих двух плиток из компараторных измерений оказалась равной 14,3 мк.

Но самый грубый относительный контроль длин этих двух мер на интерферометре показал, что разность в длине между ними не превосходит 2 мк.

Однако, одного взгляда на взаимное положение этих плиток, притертых к одной стеклянной пластинке, было достаточно, чтобы убедиться в наличии у этих мер, особенно у первой, значительных перекосов.

Относя условно наблюдаемый перекося целиком за счет первой плитки и оценивая приблизительно величину угла непараллельности, которая оказалась равной почти $30'$, путем простого расчета получили, что при этих обстоятельствах примененный метод компараторных измерений, не учитывающий перекосов, и должен был дать для длины первой плитки величину, равную $400 \text{ мм} + 16 \text{ мк}$.

§ 3. О новых компараторных методах определения длины плоскопараллельных концевых мер, длиной свыше 100 мм

Указанные выше причины привели к полному пересмотру метода компараторного измерения длинных плиток.

В сентябре 1937 г. был рассмотрен и обсужден ряд методов по измерению плоскопараллельных концевых мер плиток, длиной от 125 до 500 мм, на компараторе „SIP“, в связи с тем, что существовавший до сего времени способ позволял, как это было видно, измерять на компараторе длину геометрической оси меры, но не ее нормаль, с измерением которой связаны интерференционные методы.

Сущность отдельных из предложенных способов кратко заключается в следующем.

¹ Под верхней измерительной плоскостью мы понимаем условно ту из двух, которая расположена справа от вертикально читаемой надписи на плитке.

Способ 1-й (предложение В. А. Баринава).

Исходя из положения, что длина геометрической оси плитки l_2 не должна значительно отличаться от длины l_0 нормали (а в этом заключается достоинство и качество изготовления плитки заводом), предлагается измерять на компараторе, при сравнении плитки с рабочим штриховым эталоном, не одну длину l_1 , как это делалось до сих пор, а три расстояния, т. е. l_1 , l_2 и l_3 , нарезав для этой цели на втором боковичке дополнительные штрихи a' и a'' (рис. 1) на расстояниях, не превосходящих 1 мм от основного штриха a . Искомая нормаль l_0 , очевидно, должна лежать в секторе $a_1 a' a''$, представляя собой минимум из средних, взятых во всех комбинациях, на основе непосредственно измеренных величин l_1 , l_2 и l_3 .

Повторив такого же рода измерения по другой стороне плитки, а также поставив плитку на узкую боковую ее сторону (чтобы учесть перекосы в другой плоскости), можем заключить, что среднее из 4 минимальных средних должно отвечать значению l_0 , или во всяком случае быть близким к l_0 в пределах ошибок измерения.

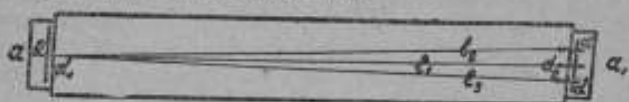


Рис. 1.

Положительной стороной этого способа является то, что: 1) не требуется изготовления новых боковичков, а необходимо лишь нанесение двух дополнительных штрихов на одном боковичке, 2) не надо перегрывать боковички при измерении расстояний l_2 и l_3 , а нужно лишь немного менять ориентировку плитки под микроскопами помощью регулировочных винтов.

Можно было бы между штрихами средними a и крайними a' и a'' нанести промежуточные штрихи через 0,2 мм, что облегчило бы ориентировку измеряемой плитки под микроскопами при различных линейных значениях перекоса в форме плитки. Однако, как оказалось в дальнейшем при экспериментировании, отсутствие этих промежуточных штрихов не создало особых осложнений; благодаря большому увеличению микроскопов, легко было менять ориентировку плитки.

Способ 2-й (предложение А. И. Каргашева).

Рассматривая все измерения отнесенными к нейтральной плоскости плитки, а значит и заготовив новые боковички соответствующей толщины, равной половине толщины плитки, предлагается производить непосредственное измерение длин b и c на компараторе (рис. 2), из сравнения со штриховым рабочим эталоном, изучив предварительно величину a на боковичке при помощи окулярного микрометра. Тогда, очевидно, l_2 может быть вычислено по формуле

$$l_2 = \frac{2\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}}{a},$$

где $p = \frac{a+b+c}{2}$. Причем, $\cos \varphi = \frac{l_2}{c}$.

Далее, от плитки отнимаются боковички (первая пара) и к ней притирается вторая пара специальных боковичков, чтобы произвести точно такие же измерения элементов b' и c' , но когда сама плитка будет покоиться под микроскопами, на одной из боковых узких плоскостей.

В этом случае, по аналогии с первыми измерениями, получаем для l_3

$$l_3 = \frac{2\sqrt{p'(p'-a')(p'-b')(p'-c')}}{a'}$$

где $p' = \frac{a'+b'+c'}{2}$ и, очевидно, $\cos \theta = \frac{l_0}{c'}$.

Окончательно для искомого значения l_0 получаем

$$l_0 = l_3 \cdot \cos \varphi = \frac{l_3 \cdot l_1}{c} \quad (*)$$

Этот способ, отличаясь геометрической строгостью решения поставленной задачи определения длины нормали l_0 , сводится, однако, в конечном счете к вычислению значения l_0 на основе элементов, полученных

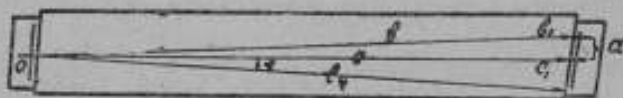


Рис. 2.

из непосредственных измерений, и, следовательно, все погрешности измерения величин a , a' , b , b' и c , c' отразятся на вычисленном значении l_0 . Кроме того процесс наблюдений при втором положении плитки может вызвать известные затруднения, так как на поверхность того и другого боковичков со штрихами будут влиять апертура микроскопов и отражательные свойства свободных частей измерительных зеркально-полированных плоскостей плитки, вызывая искажения в изображениях штрихов. Наконец, этот способ целиком связан с изготовлением новых двух пар боковичков специального размера и со значительной затратой времени на измерение каждой плитки, так как должна производиться смена боковичков, а это связано при каждой новой притирке с изменением температурного режима плитки.

В заключение следует, однако, отметить, что, пользуясь рекомендуемыми А. И. Карташевым формулами, можно из измерений по способу В. А. Барина получить контрольное значение для искомого l_0 .

Способ 3-й (вариант 2-го, предложение А. И. Карташева).

Этот способ сводится к тому, чтобы притирать к измеряемой плитке с одной стороны боковичок, толщина которого l_3 точно равняется толщине испытуемой плитки, причем этот боковичок должен иметь три полированных под зеркало поверхности (одна притирочная, и две для нанесения штрихов). Второй же боковичок должен иметь толщину, равную половине толщины плитки, как и в первом варианте А. И. Карташева

(рис. 2). Тогда из измерений по одной стороне плитки, согласно 2-му способу, получаем

$$l_1 = \frac{2\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}}{a}$$

Из измерений по обратной стороне, притерев лишь второй из указанных боковичков и не перетирая первого боковичка, получаем:

$$l_2 = \frac{2\sqrt{p'(p'-a')(p'-b')(p'-c')}}{a'}$$

Искомое значение l_0 легко выводится на основе только что приведенных значений l_1 и l_2 , зная величину l_2 из специальных определений:

$$l_0 = \frac{2\sqrt{p''(p''-l_1)(p''-l_2)(p''-l_3)}}{l_2}$$

где $p'' = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{2}$.

Этот вариант, в случае хорошего изготовления боковичков, является более выгодным, чем 2-й способ, с точки зрения техники наблюдений на компараторе, однако, вычисленное значение l_0 будет попрежнему сопровождаться, в известной степени, накоплением погрешностей, поскольку l_0 выводится из значений l_1 и l_2 , которые в свою очередь являются вычисленными из элементов a, a', b, b' и c, c' , измерение которых на компараторе сопряжено с ошибками наблюдений.

Способ 4-й (предложение Н. Я. Бесцениного).

Этот способ проще первых трех и, как оказалось в дальнейшем, практически наиболее рационален. Сущность способа заключается в том, что непосредственно измеренное значение длины геометрической оси l , которое весьма точно, как указывалось ранее, получается из компараторных измерений, исправляется за перекосы умножением этого значения на косинусы углов перекосов, а именно:

$$l_0 = l_m \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2,$$

где l_0 — искомая длина плитки, l_m — среднее значение длины геометрической оси плитки из компараторных измерений, α_1 и α_2 — значения углов перекоса в двух взаимноперпендикулярных направлениях, измеряемые косвенным путем (через линейные отклонения) при помощи угольника и шупов или ливеечки с делениями через 0,1 или 0,2 мм.

В дальнейшем Н. Я. Бесцениный после теоретических расчетов еще более упростил этот метод, предложив один из боковичков притирать так, чтобы ориентировочный штрих этого боковичка был расположен от середины в сторону, противоположную перекосу на величину, равную линейному значению перекоса. Таким образом, этот метод позволил производить измерения лишь в той плоскости плитки, в которой при помощи

прикладывания плитки к выверенному угольнику наблюдался перекося, линейной величиной превосходявший 0,1 мм.¹

Способ 5-й (предложение А. М. Кияшко).

Способ А. М. Кияшко характеризуется предварительным определением на оптиметре или на концевой измерительной машине положения такой точки на второй измерительной плоскости плитки, которая является основанием перпендикуляра, опущенного из середины первой измерительной плоскости на вторую. Измеряя затем линейное значение координат, определяющих положение найденной точки на измерительной плоскости, второй боковичок притирается так, чтобы ориентировочный штрих находился против этой точки. Первый же боковичок, имеющий толщину, равную половине толщины измеряемой плитки, притирается подобно тому, как это рекомендует в своем способе А. И. Карташев. После притирки боковичков плитка устанавливается на компараторе и измеряется обычным порядком. Это предложение А. М. Кияшко представляет ту выгоду, что измерение на компараторе производится только один раз, так как боковички, притертые к измеряемой плитке в том положении, как это выше указано, уже определяют кратчайшее расстояние, соединяющее две измерительных плоскости испытуемой плитки.

Однако, если пользоваться для предварительных операций измерительной машиной для концевых мер, типа „SIP“, то отпадает необходимость и пользования боковичками и переноса плитки на компаратор, что и предлагают в следующем — 6-м — способе А. А. Поликарпов, П. П. Зубрилин и М. Л. Бржезинский.

Способ 6-й (предложение А. А. Поликарпова, П. П. Зубрилина и М. Л. Бржезинского).

Этот способ сводится к измерению плитки без участия вспомогательных боковичков, непосредственно на измерительной машине „SIP“, если: а) снабдить машину специальным оптиметрическим приспособлением, б) повысить точность отсчетов на микроскопах машины при наблюдении соответствующих штрихов рабочего эталона, обслуживающего данную машину и, наконец, что весьма важно, в) снабдить машину таким приспособлением (століком-кареткой), которое позволяет легко и просто устанавливать измеряемую плитку в должное положение между измерительными контактами машины. Несомненно, в случае осуществления указанных условий, этот метод должен быть наипростейшим из всех в смысле техники измерений и, самое главное, экономным во времени.

§ 4. Практическое применение некоторых методов при измерении плоскопараллельных концевых мер, изготовленных заводом „Красный Инструментальщик“

Для экспериментирования новых методов из набора, представленного заводом „Красный Инструментальщик“ в количестве 8 плиток, длиной от 125 до 500 мм, были выбраны четыре плитки, а именно — 200, 400,

¹ Обоснования этого метода изложены в настоящем сборнике в специальной статье Н. Я. Бесценного „О методе измерения плоскопараллельных концевых мер, длиной от 100 до 500 мм, на универсальном компараторе для штриховых мер“.

500 и 250 мм. Измерение этих четырех мер производилось параллельно — интерференционным методом и на компараторе.

Следует отметить, что метод интерференционного измерения плоскопараллельных концевых мер, длиной свыше 100 мм, был в свою очередь испытан в данном экспериментировании во всей широте впервые во ВНИИМ. Подробно методика и результаты этих опытных работ излагаются в специальной статье Г. В. Варлиха и А. И. Карташева „К вопросу об измерении плоскопараллельных концевых мер, длиной до 500 мм, относительным интерференционным методом на интерференционном компараторе Кестерса“ (журнал „Оптико-механическая промышленность“ № 5 за 1938 г.).

Во всяком случае, применяя теперь новые приемы измерения длинных плиток на компараторе для штриховых мер, результаты этих измерений немедленно контролировались указанными выше параллельными и независимыми измерениями на интерферометре.

Для плитки, длиной в 200 мм, был применен способ В. А. Баринова; таким образом к ней были притерты симметрично два боковичка, из которых один имел два дополнительных штриха, нанесенных от среднего штриха на расстояниях, весьма близких к 1 мм (точно 880,3 мк и 1096,9 мк). Рабочим эталоном на компараторе служил метр R 86, коэффициент расширения которого весьма близок по величине к коэффициенту расширения стали.

Результаты измерения из первого положения плитки по широкой ее стороне получились после редуцирования на температуру 20°С следующие:

$$\begin{aligned}l_2' &= 200 \text{ мм} + 3,33 \text{ мк}, \\l_1' &= 200 \text{ мм} + 2,57 \text{ мк}, \\l_3' &= 200 \text{ мм} + 4,14 \text{ мк}.\end{aligned}$$

Как видим, здесь минимум совпал со средней линией l_1 , т. е. в этой плоскости, очевидно, перекокс был ничтожно мал.

После притирки боковичков к измерительным плоскостям плитки для измерения ее в плоскости, перпендикулярной к предыдущей, т. е. по узкой стороне, были получены после редуцирования на температуру 20°С следующие результаты:

$$\begin{aligned}l_2 &= 200 \text{ мм} + 6,04 \text{ мк}, \\l_1 &= 200 \text{ мм} + 2,40 \text{ мк}, \\l_3 &= 200 \text{ мм} + 0,58 \text{ мк}.\end{aligned}$$

В данном случае, как видим, минимум отклонился от средней линии и, таким образом, очевидно, в этой плоскости плитка имела перекокс, причем линейное значение этого перекокса оказалось весьма близким к 1 мм.

Для контроля измерение было повторено по обратной узкой стороне плитки и соответственно было получено:

$$\begin{aligned}l_3 &= 200 \text{ мм} + 0,37 \text{ мк}, \\l_1 &= 200 \text{ мм} + 2,66 \text{ мк}, \\l_2 &= 200 \text{ мм} + 5,76 \text{ мк}.\end{aligned}$$

Итак, для L_2 , в среднем имеем:

$$L_2 = 200 \text{ мм} + \frac{-0,58 \text{ мк} + 0,37 \text{ мк}}{2} = 200 \text{ мм} - 0,10 \text{ мк}.$$

Применяя формулу (*) (см. стр. 64), предложенную для вычисления L_0 А. И. Карташевым, окончательно для испытуемой плитки из компараторных измерений, получаем:

$$L_0 = \frac{L_1' \cdot L_2}{L_1'} = 200 \text{ мм} - 0,10 \text{ мк}.$$

Длина той же плитки из интерференционных измерений была получена равной $200 \text{ мм} - 0,02 \text{ мк}$.

Таким образом, сходжение результатов компараторных и интерференционных измерений получилось отличное, имея в виду, что погрешность компараторных измерений равняется $\pm 0,2 \text{ мк}$.

Для измерения остальных трех плиток был применен способ, предложенный Н. Я. Бестенным: для каждой подлежащей измерению плитки предварительно измерялись с помощью угольника и щупов линейные значения перекосов в двух взаимноперпендикулярных плоскостях. Результаты этих предварительных измерений представлены на рис. 3 а, б и в.

Как видим на рис. 3а, измерение плитки, номинальной длиной 400 мм, необходимо было производить в двух взаимноперпендикулярных положениях, так как перекосы и в первом и во втором случае превосходили по своей величине 0,1 мм.

Ориентировка плитки под микроскопами при измерении производилась с учетом соответствующих перекосов.

Действительная длина данной плитки из двух указанных измерений на компараторе была получена для температуры 20°C .

I положение $400 \text{ мм} + 2,33 \text{ мк}$

II " $400 \text{ мм} + 2,81 \text{ мк}$

Среднее и окончательное $400 \text{ мм} + 2,57 \text{ мк}$

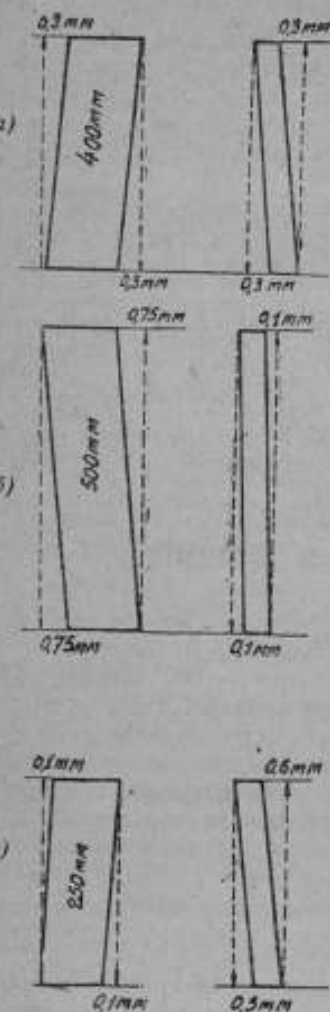


Рис. 3.

Из интерференционных измерений для этой же плитки было получено $400 \text{ мм} + 2,34 \text{ мк}$.

Принимая во внимание, с одной стороны, погрешность компараторных измерений $\pm 0,2 \text{ мк}$ и, с другой, возможную погрешность интерферен-

ционных измерений, которая по выводам Г. В. Варлиха должна выражаться величиной порядка 1:1 000 000 от длины плитки, следует считать сходжение полученных нами результатов из независимых методов измерения одной и той же плитки совершенно удовлетворительным.

Плитка номинальной длины 500 мм (рис. 3б) измерялась только по широкой стороне, но в двух положениях с учетом при ориентировке плитки под микроскопами соответствующего перекоса (0,75 мм). Действительная длина этой плитки, отнесенная к температуре 20°С, получилась в среднем равной 500 мм + 2,98 м.

Из интерференционных же измерений для этой плитки было получено: 500 мм + 2,86 м.

Наконец, плитка номинальной длины 250 мм (рис. 3в) измерялась только по узким сторонам, так как именно в этой плоскости был обнаружен перекося, линейное значение которого оказалось равным 0,6 мм. В итоге компараторные измерения дали для действительной длины этой плитки при температуре 20°С 250 мм + 0,52 м.

Из соответствующих интерференционных измерений было получено: 250 мм + 0,34 м.

Соединяя все полученные результаты в одну таблицу, предварительно округлив данные компараторных и интерференционных измерений до десятых долей микрона, получаем следующую сравнительную картину:

Номинальная длина плитки в мм	Действительная длина плитки при $t = 20^{\circ}\text{C}$		Δ в м
	Компараторные измерения мм м	Интерференционные измерения мм м	
200	200 - 0,1	200 + 0,0	-0,1
400	400 + 2,6	400 + 2,3	+0,3
500	500 + 3,0	500 + 2,9	+0,1
250	250 + 0,5	250 + 0,3	+0,2

Как видим, разности Δ в результатах, полученных из компараторных и интерференционных методов измерения для всех плиток оказались в пределах точности компараторных измерений штриховых мер. Если принять во внимание, особенно для плиток, размером в 400 и 500 мм, поправки на их вертикальное положение при измерении на интерферометре, имел в виду, что на компараторе все меры наблюдаются в их горизонтальном положении, то результаты обоих измерений еще более сблизятся. Следует также отметить, что ни в результаты компараторных измерений, ни интерференционных, не вводилась поправка за толщину притирочного слоя, в первом случае с боковичками, во втором — для блока из 2 плиток.

И в том и в другом случае величина этого слоя считалась ничтожно малой по сравнению с погрешностями самих измерений, а кроме того эта величина притирочного слоя отчасти и компенсировалась, поскольку в интерференционном методе фигурировал блок плиток при сравнительных измерениях (см. статью Г. В. Варлиха и А. И. Карташева).

§ 5. Заключение

Экспериментальные наблюдения плоскопараллельных концевых мер (плиток типа Йогансона), длиной свыше 100 мм, выполненные лабораторией мер длины по новым методам, доказали полную возможность измерения на компараторе средней длины меры, в том именно понятии, как эту длину трактует ОСТ 7622. Если до этих опытов компараторные измерения, как правило, всегда давали для длины такого рода мер величину большую, чем таковая получалась из интерференционных измерений, то в настоящее время результаты этих двух независимых методов измерения вполне согласуются в пределах допустимой погрешности компараторных наблюдений.

Вопрос о точности получаемых результатов компараторным методом является, конечно, основным вопросом, но одновременно и самым трудным вопросом, так как каждый результат компараторных измерений зависит от целого ряда факторов, учесть которые практически и конкретно часто не удастся. Например, для плиток неизвестно точное значение коэффициента расширения, и это значение условно принимается равным $11,5 \cdot 10^{-6}$. Таким образом, измеряя плитки при температуре 19° или 21° и редуцируя затем полученную длину испытуемой меры на температуру 20° , при ошибке в знании коэффициента расширения, равной $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$ получаем ошибку в приведенной длине плитки, равную $\pm 0,5 \mu$ на каждые 100 мм. В практике лаборатории бывают случаи, когда компараторные измерения производятся при температуре даже 17° и тогда, например, для меры, длиной в 500 мм, такого рода погрешность достигает уже значительной величины $\pm 0,75 \mu$.

Если считаться лишь с влиянием ошибок, возникающих от неточного учета перекосов (Δp), неточного значения температурного коэффициента расширения ($\Delta \theta_x$), неточного знания толщины притирочного слоя (Δl) и, наконец, самого компараторного сравнения штриховой меры со штриховой (Δk), то средняя квадратичная ошибка определения длины плоскопараллельной концевой меры на компараторе для штриховых мер будет иметь вид:

$$E = \pm \sqrt{\Delta p^2 + \Delta \theta_x^2 + \Delta l^2 + \Delta k^2}.$$

Ошибка Δp из теоретических расчетов, независимо от длины плоскопараллельной концевой меры, не превосходит $\pm 0,2 \mu$. Ошибка $\Delta \theta_x$ будет тем больше, чем больше длина испытуемой меры, и чем более отличается температура наблюдений от температуры 20° , на которую обычно редуцируют длину меры. Допуская неточность в знании коэффициента расширения в $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$ и разность температур в 1° , для меры в 500 мм, получаем $\Delta \theta_x = \pm 0,3 \mu$.

Ошибка Δl , как показали специальные опыты, не превосходит $\pm 0,1 \mu$.

Наконец, ошибка Δk может быть регламентирована только величиной $\pm 0,2 \mu$, независимо от длины испытуемой меры.

Итак, при указанных обстоятельствах, для плитки, длиной 500 мм, получаем:

$$E_{500} = \pm \sqrt{(0,2)^2 + (0,3)^2 + (0,1)^2 + (0,2)^2} = \pm 0,4_6 \mu.$$

Соответственно для плитки, длиной 125 мм и 250 мм, будем иметь:

$$E_{125} = \pm 0,3 \text{ мк}; \quad E_{250} = \pm 0,4 \text{ мк}.$$

Имея в виду, что данный вывод нами получен, при учете лишь части погрешностей, влияющих на определение длины испытуемой плитки, и замечая, что величина возможной при этих обстоятельствах средней квадратичной ошибки плиток, длиной от 125 мм до 500 мм, близка, вообще, к $\pm 0,4 \text{ мк}$, надо полагать, что компараторные измерения плоско-параллельных концевых мер (для обычных наборов из 8 плиток) могут выполняться со средней квадратичной ошибкой порядка $\pm 0,5 \text{ мк}$ — $\pm 1,0 \text{ мк}$.

Н. Я. БЕСЦЕННЫЙ

**О МЕТОДЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КОНЦЕВЫХ МЕР,
ДЛИНЮЮ ОТ 100 ДО 500 ММ, НА УНИВЕРСАЛЬНОМ КОМПАРАТОРЕ
ДЛЯ ШТРИХОВЫХ МЕР**

Когда было выяснено, что для тех из ряда измеренных на компараторе плиток, которые имеют значительные перекосы, компараторные измерения дали не длины плиток по нормальям к их мерительным поверхностям, а всегда большие первых длины плиток по их осям (рис. 1), то

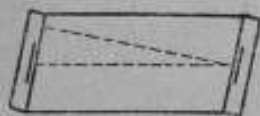


Рис. 1.

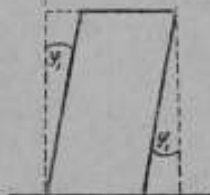


Рис. 2.

естественно возникла мысль о введении в результаты измерения плиток поправок на их перекосы. При этом первым вариантом метода измерения плиток на компараторе с введением поправок на перекосы плиток, который подвергся рассмотрению, был следующий. До того или после того, как

плитка будет измерена на компараторе совершенно так же, как это производилось и ранее, измеряют перекосы в двух взаимноперпендикулярных направлениях этой плитки. Для этого, притерев плитку к плоской горизонтальной поверхности, придвигают поочередно к каждой из четырех ее боковых сторон угольник и измеряют линейкой, разделенной через 0,2 мм, беря отсчет с точностью до 0,1 мм, четыре малые расстояния взятые вверху и внизу плитки (рис. 2). Вместо угольника для этой цели может также служить плитка, длиной в 500 мм, но чтобы возможно было измерять перекосы плиток с точностью в 0,1—0,2 мм, те стороны угольника или плитки, которыми пользуются для этих измерений, не должны отклониться от действительного перпендикуляра к плоскости, служащей основанием для плиток и угольника, более чем на 0,1 мм. Как показала практика, подбор таких угольника или плитки нетруден. Определив линейкой указанные четыре малые расстояния, находят синусы, а затем по таблицам натуральных тригонометрических величин косинусы двух углов перекосов плитки в двух взаимноперпендикулярных направлениях. Длину плитки l — кратчайшее расстояние между ее мерительными поверхностями находят по формуле:

$$l = l_1 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2,$$

где l_1 — длина плитки по ее оси, φ_1 и φ_2 — углы перекосов плитки.

Так как перекося плитки измеряется у верхнего ее ребра, то вогнутость боковых сторон плитки не будет играть отрицательной роли (рис. 3). При наличии же в плитке одной выпуклой боковой стороны противоположная ей боковая сторона обычно бывает вогнутой. В последнем случае приставляют угольник именно к вогнутой стороне плитки и ограничиваются измерением перекося у этой стороны плитки. Если длины двух мерительных сторон плитки различны (рис. 4), то, измерив перекося плитки с двух сторон, умножают величины, полученные на компараторе для длин двух сторон плиток, на косинусы углов перекося до взятия средней из этих величин.

Далее, для выяснения вопроса о том, устраняет ли с достаточной точностью указанное введение поправок на перекося плитки влияние этих перекося на длину плитки, полученную на компараторе, была составлена таблица (см. стр. 74).

В этой таблице в вертикальной боковой графе стоят номинальные длины плиток в миллиметрах, а в горизонтальной верхней графе — разности между длинами плиток по их осям и по нормальям к их мерительным сторонам, зависящие от перекося плиток, в микронах.

Остальные числа таблицы представляют собой линейные — в миллиметрах — и угловые — в минутах и секундах — величины перекося плиток, вычисленные, как показано далее. При этом для удобства рассмотрения вопроса предполагается, что плитки имеют перекося лишь в одном направлении.

Положим в представленном прямоугольном треугольнике (рис. 5) катет c равным, например, 300,0000 мм, а гипотенузу a на 0,1 м больше катета c , т. е. равной 300,0001 мм. Тогда $\cos \varphi = 0,99999967$; по таблицам находим: $\sin \alpha = 0,00082$ и $\alpha = 2'50''$. Величина перекося плитки в линейной мере $b = a \sin \alpha = 0,25$ мм. Значения $\alpha = 2'50''$ и $b = 0,25$ мм стоят в третьей горизонтальной и в первой вертикальной графе таблицы. Совершенно таким же образом получены и остальные числа таблицы.

Рассмотрим четвертую горизонтальную графу таблицы, которая, как и иллюстрирующий ее рис. 6, соответствует плитке в 400 мм. Из этой графы таблицы и рисунка видно, что в начале отклонения прямой a от перпендикуляра изменению длины этой прямой на 0,1 м отвечает перекося в 0,3 мм, а такому же в 0,1 м изменению длины прямой при перекося, равном приблизительно 1,3 мм, — изменение величины перекося лишь в 0,03 мм.

Из этих чисел следует, что введение поправок в результат измерения плитки на компараторе путем умножения этого результата на косинус угла перекося, как это наметилось в самом начале рассмотрения данного



Рис. 3.



Рис. 4.

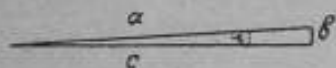


Рис. 5.

Номинальные длины плиток, в мм	Разность между данными плиток по осн и по нормали, в μ		0,1	0,5	0,6	0,1	1,1	2,0	2,1	2,1	3,0	3,1
	a	b										
100	4'50" 0,14	10'50" 11'55" 0,35	0,03	15'20" 16'5" 0,47	0,02	21'45" 22'15" 0,65	0,02	26'40" 27'5" 0,78	0,02	26'40" 27'5" 0,78	0,01	0,01
200	3'25" 0,20	7'40" 8'25" 0,49	0,04	10'50" 11'20" 0,66	0,03	15'20" 15'45" 0,92	0,03	18'50" 19'10" 1,10	0,03	18'50" 19'10" 1,10	0,02	0,02
300	2'50" 0,25	6'20" 6'50" 0,60	0,05	8'50" 9'20" 0,81	0,04	12'35" 12'50" 1,12	0,04	15'20" 15'40" 1,34	0,02	15'20" 15'40" 1,34	0,03	0,03
400	2'25" 0,28	5'25" 5'55" 0,69	0,06	7'40" 8'5" 0,94	0,05	10'50" 11'10" 1,30	0,05	13'20" 13'30" 1,55	0,04	13'20" 13'30" 1,55	0,02	0,02
500	2'10" 0,32	4'50" 5'20" 0,78	0,07	6'50" 7'10" 1,04	0,04	9'45" 10'0" 1,46	0,04	11'55" 12'5" 1,74	0,04	11'55" 12'5" 1,74	0,02	0,02

¹ Отступление от правильного возрастания разностей линейных величин перекосов, стоящих в трех вертикальных графах таблицы, объясняется погрешностями вычисления этих величин. Точность вычисления линейных величин перекосов ограничена погрешностями вычисления угловых величин перекосов, определенных с помощью таблиц тригонометрических величин с точностью до 5".

вопроса, сопряжено с недопустимыми погрешностями. Если погрешность измерения перекося плитки, длиной 400 мм, с перекосом, приблизительно равным 1,3 мм, составляет, например, 0,15 мм, то погрешность результата измерения плитки, зависящая от перекосов плитки, после введения поправок на эти перекосы будет приблизительно равна

$$\frac{0,15 \text{ мм}}{0,04 \text{ мм}} \cdot 0,1 = 0,4 \text{ мк.}$$

Из приведенной таблицы видно также, что введение поправок на перекосы плиток посредством умножения результата, полученного на компараторе, на косинусы углов перекосов, найденные с помощью измерения перекосов в линейной мере, возможно без значительных погрешностей, превышающих 0,1—0,2 мк, лишь при малых перекосах, выражающихся в линейной мере величинами от 0,2 до 0,8 мм, в зависимости от номинальной длины плитки. Чем длина плитки больше, тем при большем линейном перекосе возможно введение поправок указанным путем. Для измерения перекосов в линейной мере можно было бы применить индикаторы, позволяющие производить измерения малых длин с точностью, много большей той, которая доступна при пользовании линейкой. Однако, и с помощью индикаторов едва ли удалось бы достигнуть точности измерения перекосов, достаточной для введения поправок на перекосы.

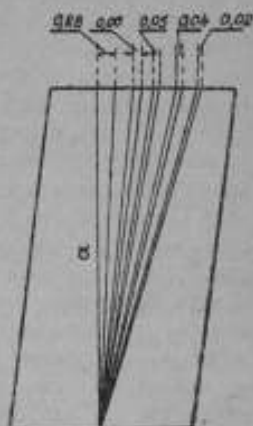


Рис. 6.

Если измерять перекосы у верхнего ребра плитки, то получению высокой точности измерения будет мешать фаска ребра плитки; если же производить измерение на какой-либо другой высоте плитки, то точность измерения будет ограничена возможными искажениями боковой стороны плитки в отношении плоскостности.



Рис. 7.

Но в тех редких случаях, когда перекосы плиток превышают, соответственно различным длинам плиток, величины от 0,2 до 0,8 мм, влияния перекосов можно избежать другим путем. Тем же способом который указывался ранее, измеряют линейкой перекося плитки и, притерев затем к плитке боковички, смещают один из них на линейную величину перекося в сторону, противоположную перекося (рис. 7). Тогда прямая, проходящая через штрихи двух боковичков, по направлению которой и производят измерение плитки на компараторе, будет расходить с перпендикуляром к ребрам *ab* и *cd* плитки на 0,1; 0,2 и максимум 0,3 мм, зависящие от погрешности в измерении перекося и погрешности в установке штриха боковичка. Последнее же расхождение направлений дает, как видно из приведенной выше таблицы, разность между длинами плитки по нормали и по оси порядка 0,1 мк. Установка смещенного боковичка в требуемое положение легко осуществляется

с помощью той же линейки, которой пользуются для измерения перекосов. Плитки, у которых каждый из перекосов в двух взаимноперпендикулярных направлениях превышает величины от 0,2 до 0,8 мм — соответственно различным длинам плиток, встречаются редко. В большинстве случаев угол, образованный мерительной поверхностью и узкой боковой стороной плитки, меньше отклоняется от прямого, чем угол, образованный мерительной поверхностью и широкой боковой стороной плитки. В тех случаях, когда перекоз плитки лишь в одном направлении превышает величины от 0,2 до 0,8 мм, способом смещения одного из боковичков находят длины перпендикуляров в двух противоположных одна другой сторонах плитки и, взяв среднюю из их величин, умножают ее на косинус угла второго меньшего перекоза, линейная величина которого также определена предварительно с помощью линейки. Либо можно даже ввести поправку на второй перекоз в величину, полученную на компараторе, пользуясь таблицей. При значительных отклонениях от 90° углов между мерительными поверхностями и широкими боковыми сторонами плитки измеряют по перпендикулярам длины узких боковых сторон плитки, для чего плитку устанавливают на подставку компаратора поочередно ее обеими узкими боковыми сторонами. Влияние перекосов плитки на точность ее измерения при применении изложенного метода измерения выразится погрешностью лишь в 0,1—0,2 м. Она сложится из указанной ранее погрешности порядка 0,1 м, проистекающей из отклонения прямых, по которым измеряется плитка, от действительных перпендикуляров в данных сторонах плитки и погрешности такого же порядка, зависящей от погрешности измерения второго меньшего перекоза в линейной мере.

Если сверх ожидания обнаружится плитка, у которой каждый из перекосов превышает величины от 0,2 до 0,8 мм, соответственно различным длинам плиток, то можно, измерив перпендикуляры во всех четырех боковых сторонах плитки, найти окончательно длину плитки по перпендикуляру к ее мерительным поверхностям по формуле, указанной А. И. Карташевым:

$$l_0 = \frac{l_1 l_2}{c},$$

где: l_0 — средняя длина перпендикуляров в широких боковых сторонах, l_1 — средняя длина перпендикуляров в узких боковых сторонах, c — средняя длина прямых линий, лежащих в широких боковых сторонах и соединяющих середины коротких ребер этих сторон. Длины последних прямых линий следует в этом случае также измерить на компараторе.

В заключение заметим, что по иностранным нормам на плоскопараллельные меры длины, которым впрочем далеко не всегда удовлетворяют плитки фирмы Иогансона, перекосы плиток, длиной от 100 до 500 мм, выраженные в линейной мере, не должны превышать 0,2 мм. Пользуясь приведенной ранее таблицей, легко подсчитать, что при наличии у плитки даже двух перекосов, по 0,2 мм каждый, разность между длинами плитки по оси и по нормали к мерительным поверхностям составит лишь величину порядка 0,2 м.

Н. Я. БЕСЦЕННЫЙ

К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КОНЦЕВЫХ МЕР, ДЛИНОЙ В 1 м, НА КОМПАРАТОРЕ ДЛЯ ШТРИХОВЫХ МЕР

Одной из важнейших проблем, стоящих перед лабораторией мер длины ВНИИМ в третьей пятилетке, является проблема измерения больших длин порядка нескольких метров и даже нескольких десятков метров. Разрешение этой проблемы требует наличия в нашем метрологическом арсенале образцовых концевых мер, длиной от одного до нескольких метров. Такие концевые меры, номинальной длиной в 1, 2 и 3 м, приобретены лабораторией и в ближайшее время будут окончательно изучены. Так как лаборатория в настоящее время еще не обладает установками для измерения концевых мер такой длины интерференционными методами, то для измерения этих концевых мер пользуются методом сличения концевых мер со штриховыми на компараторе для штриховых мер. Метод сличения концевых мер со штриховыми на компараторе с помощью специальных боковичков неоднократно испытывался в иностранных метрологических учреждениях и в практике нашей лаборатории и давал положительные результаты. Однако, в применении к мерам, длиной в 1, 2 и 3 м, этот метод должен быть еще дополнительно разработан в его деталях. Настоящая работа, посвященная изучению метода сличения концевой меры, длиной в 1 м, со штриховым эталоном, имеет задачей теоретически исследовать следующие вопросы:

1) как наилучшим образом расположить притираемые к мере боковички относительно самой меры; 2) как наилучшим образом расставить опорные точки концевой меры; 3) каким путем возможно ослабить влияние перекосов концевой меры на ее длину при сличении этой меры со штриховым эталоном длины; 4) какова погрешность измерения концевой меры при соблюдении всех условий, найденных посредством исследования предыдущих вопросов.

1. РАСПОЛОЖЕНИЕ БОКОВИЧКОВ ОТНОСИТЕЛЬНО КОНЦЕВОЙ МЕРЫ И РАССТАНОВКА ОПОР КОНЦЕВОЙ МЕРЫ, ДЛИНОЙ В 1 м, ПРИ СЛИЧЕНИИ ЭТОЙ МЕРЫ СО ШТРИХОВЫМ ЭТАЛОНОМ ДЛИНЫ

§ 1. Расположение боковичков относительно самой меры

Для определения длины концевой меры по прямой, соединяющей центры ее мерительных поверхностей, можно притереть боковички к мере так, чтобы штрихи этих боковичков легли в одну плоскость с нейтраль-

ным слоем меры (рис. 1). Но тогда придется наносить штрихи боковичков на значительных расстояниях от мерительных поверхностей боковичков, так как нанесение штрихов вблизи мерительных поверхностей может, при таком расположении боковичков относительно меры, отрицательно влиять на освещение штрихов и, следовательно, на точность измерения меры. Чтобы избежать погрешности, которая может произойти от ненормального освещения штрихов боковичков, следует, учитывая величину поля зрения микроскопов компаратора — 2,4 мм, наносить эти штрихи на расстоянии порядка 2 мм



Рис. 1.

Проекция на вертикальную плоскость.

от мерительных поверхностей боковичков. Однако, такое отдаление штрихов от мерительных поверхностей боковичков также ведет к понижению точности измерения меры, так как при указанном отдалении концевую меру с притертыми к ней боковичками надо будет сличать с интервалом не в 1 мм, а в $1 \text{ мм} + 4 \text{ мм}$ на штриховом эталоне. Интервал в $1 \text{ мм} + 4 \text{ мм}$ может быть легко получен путем нанесения на штриховом эталоне, номинальной длиной в 1 мм, одного дополнительного штриха, но в погрешность определения длины этого интервала войдут две погрешности определения длин интервалов в 1 мм и в 4 мм.

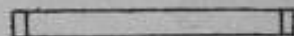


Рис. 2.

Проекция на вертикальную плоскость.

Если притереть боковички к мере так, чтобы вся мерительная поверхность меры была покрыта боковичком (рис. 2), то штрих на боковичке можно нанести на весьма малом расстоянии от мерительной поверхности боковичка, например, как это и практиковалось, на расстоянии 0,2 мм. Тогда длину концевой меры с притертыми к ней боковичками можно сравнивать с интервалом в 1 мм на штриховом эталоне.

От расположения боковичков, указанного в начале этого параграфа, следует отказаться еще и потому, что при притирке боковичков в уровень с нейтральным слоем меры не совсем исключена опасность повредить мерительные поверхности меры.

Поэтому лучше располагать боковички так, чтобы их мерительные поверхности целиком покрывали мерительные поверхности меры. Тогда в результате измерения получается не срединная длина меры, а длина меры у ее длинных граней, но на возможную разность срединной длины и длины меры у ее граней вводят затем поправку. Для определения величины указанной поправки изучают мерительные поверхности меры в отношении их плоскостности интерференционным методом. Это изучение мерительных поверхностей меры может быть выполнено с точностью до сотых долей микрона.

§ 2. Расстановка опор концевой меры, длиной в 1 мм, при сличении ее со штриховым эталоном

При расположении концевых мер, длиной в 1 мм, с притертыми к ним боковичками непосредственно на поверхности подставки компаратора, возможно влияние случайных отступлений этой поверхности от плоскости

на длину мер. Поэтому лучше располагать эти меры на двух опорных роликах, расставив эти ролики в точки Эри, обуславливающие, как известно, параллельность торцов меры. Расстояние между точками Эри для меры любой длины определяется величиной $l = L \cdot 0,5774$, где L — общая длина меры. Однако, в нашем случае расположения на двух опорах концевой меры с притертыми к ней боковичками, возникает вопрос, какую длину следует брать для отыскания l вместо L : длину меры без боковичков, длину меры, увеличенную на длину двух боковичков, т. е. $1000 \text{ мм} + 2,6 \text{ мм} = 1012 \text{ мм}$, или, наконец, что представляется на первый взгляд наиболее правильным, — какую-то длину, лежащую между двумя указанными длинами. Для решения этого вопроса, естественно, прибегнуть к теории изогнутой оси балки, расположенной на двух опорах. Рассуждая в полном соответствии с этой теорией, в нашем случае надо найти такое новое значение отношения $\frac{l}{L}$, при осуществлении ко-

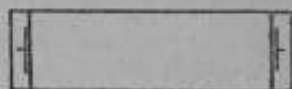


Рис. 3.

торого поперечные сечения боковичков, проходящие через штрихи боковичков и отстоящие поэтому, как и сами штрихи, на расстоянии $0,2 \text{ мм}$ от мерительных поверхностей боковичков (рис. 3), расположатся параллельно одно другому. При этом, под L понимается общая длина меры вместе с длиной боковичков. Для отыскания этого значения $\frac{l}{L}$ приравняем нулю выражение для тангенса угла наклона сечения меры;¹ тогда получим уравнение

$$\frac{1}{8} \left(\frac{l}{L} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{x}{L} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{L} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{x}{L} \right)^3 = 0.$$

Подставив в три последних члена правой части уравнения $L = 1012 \text{ мм}$ и $x = 500,2 \text{ мм}$, найдем $\frac{l}{L} = 0,5773498$. Найденное значение $\frac{l}{L}$ отличается от значения отношения Эри — $0,5773503$ — всего на пять единиц седьмого знака после запятой, т. е. мы получили практически то же значение отношения Эри. Следовательно, при вычислении l надо вместо L брать сумму длины меры и длины двух наших боковичков.

Рассмотрим теперь вопрос о влиянии отклонений опорных роликов от точек Эри на точность измерения концевых мер. Расстановку опор мер нетрудно осуществлять с точностью до $0,3 \text{ мм}$. Допустим, что расстояние между опорными роликами меры, длиной в 1 м (с притертыми к ней боковичками), вместо вычисленного $1012 \text{ мм} \cdot 0,57735 = 584,28 \text{ мм}$ действительно равно $584,58 \text{ мм}$. Тогда, очевидно, мерительные поверхности меры, как и сечения боковичков, проходящие через штрихи боко-

¹ См. в этом сборнике статью Н. Я. Бесценного „Влияние расположения опорных точек новой платино-иридиевой меры М 20^а на его длину и величину прогиба“ (§ 1, формула 8).

вичков, будут занимать наклонные положения и длина, меры в верхней ее части, получающаяся в результате измерения при принятом у нас расположении боковичков, будет меньшей срединной длины меры (рис. 4). Для определения разности между срединной длиной меры и длиной меры у верхней грани воспользуемся выражением для смещения точки поверхности меры, происходящего при изгибе меры:¹

$$h \cdot \frac{1}{2} \frac{p}{\varepsilon I} L^3 \left[\frac{1}{8} \left(\frac{l}{L} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{x}{L} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{x}{L} \right)^3 \right],$$

где h — расстояние между верхней поверхностью меры и ее нейтральным слоем, p — вес погонного миллиметра меры, ε — модуль упругости, I — момент инерции сечения меры относительно горизонтальной оси, проходящей через центр сечения меры.

Разность между срединной длиной меры и длиной меры у ее верхней грани, найденная с помощью приведенной формулы, выразилась следующими величинами: для меры, расположенной узкой гранью, — 0,0028 μ , для меры, расположенной плашмя, — 0,0112 μ .

Таким образом, погрешность измерения концевой меры, могущая произтечь из погрешности в установке опор меры, весьма мала по сравнению с общей погрешностью компараторных измерений.

Заметим, между прочим, что разность между срединной длиной меры и длиной меры у ее грани для однометровой меры без боковичков, при тех же отклонениях опор меры от точек Эри в 0,3 мм, выражается величинами совершенно того же порядка, что и приведенные для меры с боковичками.

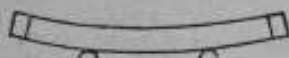


Рис. 4.

Совершенно таким же путем можно найти погрешность измерения концевой меры, возникающую из той неправильной расстановки опор меры, с притертыми к ней боковичками, на которую указывалось ранее. Найденная нами погрешность, являющаяся следствием расстановки опор меры с боковичками на расстоянии 1000 мм · 0,57735 = 577,4 мм, выражается величинами: для меры, расположенной узкой гранью, — 0,07 μ , плашмя — 0,25 μ .

Следовательно, неправильная расстановка опор меры с боковичками, особенно при расположении меры плашмя, увеличила бы общую погрешность измерения концевой меры на компараторе.

В начале этого параграфа было показано, что однометровую концевую меру с боковичками следует располагать на опорах, отстоящих одна от другой на 1012 мм · 0,57735 = 584,3 мм. С другой стороны, без боковичков эту однометровую меру, при пользовании ею как образцовой, располагают на опорах, расставленных одна от другой на расстоянии 1000 мм · 0,5735 = 577,4 мм. Поэтому необходимо выяснить, насколько будет изменяться расстояние между концами нейтрального слоя меры при

¹ См. статью Н. Я. Бесценного „Влияние расположения опорных точек“ и т. д. (§ 3, формула 24 и § 1 формула 8).

переносе меры с одной пары опор на другую. Для этого прибегнем к формуле:

$$\Delta L = \frac{1}{768} \left(\frac{P}{\epsilon l} \right)^2 L^5 \left[\frac{3}{28} - \frac{3}{4} \left(\frac{l}{L} \right)^2 + \frac{7}{4} \left(\frac{l}{L} \right)^4 - \frac{4}{5} \left(\frac{l}{L} \right)^6 + \frac{1}{60} \left(\frac{l}{L} \right)^8 \right],$$

выражающей уменьшение расстояния между концами нейтрального слоя меры при переносе меры с плоскости на две опоры.¹ По этой формуле найдем уменьшения расстояний между концами нейтрального слоя меры, ограниченного мерительными поверхностями односторонней меры, для меры с боковичками, при переносе ее с плоскости на пару опор, и для меры без боковичков, при переносе ее с плоскости на другую пару опор. Оказывается, что эти уменьшения расстояний между концами нейтрального слоя меры представляются величинами:

Мера лежит на узкой грани		Мера лежит плашмя	
Мера с боковичками	Мера без боковичков	Мера с боковичками	Мера без боковичков
0,000018 μ	0,000017 μ	0,0042 μ	0,0038 μ

Изменения расстояний между концами нейтрального слоя меры, при переносе меры с одной пары опор на другую, выразятся разностями первой и второй, а также третьей и четвертой приведенных величин. Они, очевидно, весьма малы по сравнению с общей погрешностью компараторных измерений.

II. ОСЛАБЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕКОСОВ КОНЦЕВОЙ МЕРЫ, ДЛИНОЙ В 1 М, НА ЕЕ ДЛИНУ ПРИ СЛИЧЕНИИ ЭТОЙ МЕРЫ СО ШТРИХОВЫМ ЭТАЛОНОМ ДЛИНЫ

Для достижения указанной в названии этой главы цели можно воспользоваться применявшимся уже для измерения концевых мер от 100 до 500 мм смещением боковичка в сторону, противоположную перекоосу.² Покажем прежде всего, как провести необходимое для такого смещения и предваряющее это смещение боковичка определение перекосов меры.

§ 3. Определение перекосов мер

Для определения перекосов мер нужны следующие приборы:

1. Линейка, длиной не менее 7 см, типа линейек, предназначенных для проверки плоских поверхностей (рис. 5 представляет пример желательного сечения линейки). Отступления ребра линейки от прямой не должно превосходить 0,3 μ .

¹ См. указанную выше статью Н. Я. Бесценного „Влияние расположения...“ (§ 2, формула 16).

² В. А. Бариннов. „Измерение плоскопараллельных концевых мер (плиток Иогансона), длиной свыше 100 мм, методом компараторного сравнения со штриховыми мерами“.

Н. Я. Бесценный. „О методе измерения плоскопараллельных концевых мер, длиной от 100 до 500 мм, на универсальном компараторе для штриховых мер“.

Обе статьи помещены в настоящем сборнике.

2. Линейка, длиной в 1 м, типа линеек, предназначенных для проверки плоских поверхностей; ребро линейки должно быть прямолинейно с точностью до 0,03 мм.

3. Щупы.

4. Специальная рама, на которой располагают исследуемые меры и поверочную линейку.

5. Малая лампа накаливания, которой пользуются для освещения щелей между малой поверочной линейкой и исследуемыми мерами.

Процесс определения перекосов концевых мер, длиной в 1 м, заключается в следующем.

Линейку, длиной в 7 см, кладут на раму, установленную на столе. Исследуемые меры располагают на этой раме, прикладывая их к ребру линейки их мерительными поверхностями (рис. 6). При прикладывании мер к ребру линейки одновременно выправляют их, если это окажется нужным и возможным, подгоняя их ребра под ребро прикладываемой к ним линейки, длиной в 1 м. Внутри рамы под мерами расположена лампа накаливания, благодаря освещению которой



Рис. 5.

щелей между мерами и малой поверочной линейкой, возможно приложить меры к ребру линейки с большой степенью совершенства. Имея три концевые меры, прикладывают их к линейке по две рядом, каждую с каждой, получая поочередно три комбинации мер. В каждой паре мер измеряют с помощью щупов промежутки, образующиеся при наличии в мерах перекосов либо возле поверочной линейки, либо у противоположных концов мер. Затем составляют уравнения:

$$x + y = a, \quad x + z = b, \quad y + z = c,$$

где a, b и c — полученные в результате измерения величины промежутков между мерами. Решая эту систему уравнений, находят в линейной мере перекосы. При составлении уравнений промежуткам между мерами, образующимся у поверочной линейки и у противоположных концов мер, придают противоположные знаки.

Принцип изложенного метода определения перекосов концевых мер был применен во ВНИИМ впервые А. И. Карташевым для определения перекосов концевых мер, длиной от 100 до 500 мм.

§ 4. Точность определения перекосов концевых мер

Из нашей системы уравнений имеем следующее выражение для x :

$$x = \frac{a + b - c}{2}.$$

Погрешность определения величины a , если под этой величиной по-

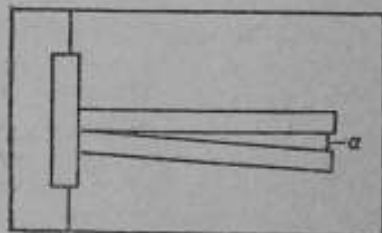


Рис. 6.

нимать величину промежутка, который образовался бы между двумя мерами при условии идеального приложения мерительных поверхностей этих мер к поверочной линейке, образуется из следующих погрешностей:

1) $\Delta_1 a$ — погрешности измерения с помощью шупа промежутка между двумя мерами;

2) $\Delta_2 a$ — погрешности, проистекающей из неполной параллельности мерительной поверхности одной из мер, промежутков между которыми образует величину a , ребру поверочной линейки;

3) $\Delta_3 a$ — погрешности, проистекающей из неполной параллельности мерительной поверхности второй из мер, промежутков между которыми образует величину a , ребру поверочной линейки.

Погрешности определения величин b и c составятся из совершенно аналогичных указанным погрешностей $\Delta_1 b$, $\Delta_2 b$, $\Delta_3 b$ и $\Delta_1 c$, $\Delta_2 c$, $\Delta_3 c$. Поэтому максимальная и средняя погрешности определения величины перекося меры выразятся так:

$$\Delta x_{\max} = \frac{1}{2} (\Delta_1 a + \Delta_2 a + \Delta_3 a + \Delta_1 b + \Delta_2 b + \Delta_3 b + \Delta_1 c + \Delta_2 c + \Delta_3 c),$$

$$\Delta x_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta_1 a)^2 + (\Delta_2 a)^2 + (\Delta_3 a)^2 + (\Delta_1 b)^2 + (\Delta_2 b)^2 + (\Delta_3 b)^2 + (\Delta_1 c)^2 + (\Delta_2 c)^2 + (\Delta_3 c)^2}.$$

Эти же формулы будут, очевидно, справедливы и для Δu и Δz , т. е. для погрешностей определения перекосов двух других из трех концевых мер, подвергшихся исследованию.

Для правильного сличения концевой меры со штриховой на компараторе необходимо определить перекосы этой меры в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Найдем сначала максимальную и среднюю погрешности определения перекося меры в направлении, параллельном широкому граням меры. При определении перекосов мер в этом направлении меры кладут на раму их широкими гранями. Указанные ранее погрешности будут в этом случае иметь следующие значения: $\Delta_1 a = \Delta_1 b = \Delta_1 c = 0,1$ мм; 0,1 мм — погрешность измерения шупом промежутков между мерами; $\Delta_2 a = \Delta_2 b = \Delta_2 c = \Delta_3 a = \Delta_3 b = \Delta_3 c = 0,03$ мм.

Вполне можно надеяться, что благодаря освещению указанным ранее источником света щели между мерой и поверочной линейкой удастся приложить меры к линейке так, чтобы разность величин промежутков между мерительной поверхностью меры и ребром линейки в двух крайних точках их соприкосновения не превышала 1μ . Тогда каждая из погрешностей, помеченных цифрами 2 и 3, будет составлять не более $1 \mu \times 33 = 33 \mu = 0,03$ мм. Множитель 33 представляет собой отношение длины меры к ее ширине. Погрешностью в установке меры, проистекающей из отклонений ребра линейки от прямой, ввиду ее малости, мы пренебрегаем.

Подставив эти значения частных погрешностей в ранее приведенные формулы, получим:

$$\Delta x_{\max} = \pm 0,24 \text{ мм}$$

$$\Delta x_{\text{ср}} = \pm 0,09 \text{ мм}.$$

При определении перекося меры в направлении, параллельном узким граням меры, одну из мер — исследуемую — кладут на раму узкой ее гранью, а две другие, для уменьшения погрешности в определении перекося исследуемой меры, — широкими гранями. В этом случае частные погрешности будут иметь следующие значения: $\Delta_1 a = \Delta_1 b = \Delta_1 c = 0,1$ мм; четыре из остальных шести погрешностей, допустим $\Delta_2 a$, $\Delta_2 a$, $\Delta_2 b$ и $\Delta_2 c$: $\Delta_2 a = \Delta_2 a = \Delta_2 b = \Delta_2 c = 0,03$ мм и, наконец, $\Delta_3 b = \Delta_3 c = 0,11$ мм.

Величина 0,11 мм получена так: $1 \mu \times 111 = 111 \mu = 0,11$ мм; множитель 111 представляет собой отношение длины меры к ее толщине — $\frac{1000}{9}$.

Подставив эти значения в приведенные ранее формулы, получим:

$$\Delta x_{\max} = \pm 0,32 \text{ мм},$$

$$\Delta x_{\text{ср}} = \pm 0,12 \text{ мм}.$$

§ 5. Влияние перекося меры на ее длину при применении приема смещения боковичка

В упоминавшейся выше статье Н. Я. Беспенного описан и обоснован для концевых мер, длиной от 100 до 500 мм, прием смещения боковичка, входящий в метод сличения концевых мер со штриховыми. Этот прием заключается в смещении одного из боковичков измеряемой меры перед измерением этой меры в сторону, противоположную перекося, на величину перекося, взятую в линейной мере (рис. 7). В случае двух перекося в мере можно смещать боковичок и в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Тогда в мере, длиной в 1 м, в которой один из боковичков сместили в двух направлениях, прямая, по которой измеряют длину меры, будет расходиться с перпендику-

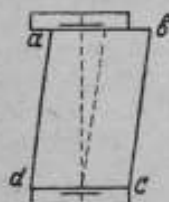


Рис. 7.

ляром к мерительным поверхностям меры не больше чем на 0,34 мм в направлении, параллельном широким граням меры, и не больше чем на 0,42 мм в направлении, параллельном узким граням меры. Величины 0,34 и 0,42 мм могут образоваться от сложения найденных ранее максимальных погрешностей в определении перекося меры — 0,24 мм и 0,32 мм с погрешностью в установке боковичков, которую мы считаем равной 0,1 мм. С помощью простых расчетов, ход которых был приведен в упоминавшейся выше статье, легко доказать, что длины меры, номинальной длиной в 1 м, взятые по прямям, расходящимся с перпендикуляром к мерительным поверхностям меры на 0,34 мм и 0,42 мм, превышают ее длину, взятую по этому перпендикуляру, соответственно на 0,06 μ и 0,10 μ . Поэтому максимальная погрешность измерения концевой меры, длиной в 1 м, зависящая от перекося меры, в случае наличия в этой мере двух перекося, при применении смещения боковичка будет равна сумме двух последних приведенных погрешностей, т. е. будет равна 0,16 μ .

Для нахождения средней погрешности измерения меры, длиной в 1 м, зависящей от перекосов меры, естественно исходить из средней погрешности определения величины перекосов. Эту среднюю погрешность определения перекоса мы нашли ранее близкой к 0,1 мм. Считая погрешность в установке боковичка также равной 0,1 мм, получим, что среднее отклонение смещенного боковичка от идеального его положения составит $\sqrt{(0,1)^2 + (0,1)^2} = \pm 0,14$ мм. Такое же отклонение боковичка дает, как показывает расчет, погрешность в определении длины меры, номинальной длиной в 1 м, в 0,02 м. Средняя погрешность измерения меры в 1 м, зависящая от двух перекосов, составит, следовательно, лишь $\sqrt{0,02^2 + 0,02^2} = 0,03$ м.

§ 6. Заключение

Полная погрешность определения длины концевой меры, номинальной длиной в 1 м, при измерении этой меры путем сличения ее со штриховым эталоном длины, сложится из следующих частных погрешностей:

- 1) погрешности определения длины основного эталона № 28, которую считаем равной 0,2 м;
- 2) погрешности сличения штрихового рабочего эталона с эталоном № 28, которую считаем также равной 0,2 м;
- в) погрешности сличения штриховой меры, образованной из концевой притиркой двух боковичков со штрихами, со штриховым рабочим эталоном; эту погрешность мы также считаем равной 0,2 м;
- 4) погрешности определения длины штрихового интервала, образующегося при притирке боковичков друг к другу; измерение этого малого интервала, длиной всего в 0,4 мм, производится с помощью перемещения подвижной нити микрометра микроскопа с одного штриха интервала на другой; погрешность этого измерения зависит от ошибок микрометра и погрешности наводок нити на штрихи интервала и не зависит от погрешности в определении температуры боковичков; погрешность определения длины этого интервала считаем равной 0,1 м;
- 5) погрешности, зависящей от перекосов концевой меры; эта погрешность, при предварительном выполнении изложенного в разделе II измерения перекосов меры, не превысит 0,2 м.

В § 2 раздела I доказано, что погрешности, могущие возникнуть от прогиба концевой меры при расположении ее на двух опорах, весьма малы по сравнению с погрешностью компараторных измерений штриховых мер. Поэтому погрешностями, происходящими из прогиба меры, мы пренебрегаем.

Далее, мы считаем, что сличение концевой меры со штриховым эталоном производится при температуре, отличающейся от 20°C не больше чем на 0°,1. Так как коэффициент расширения концевой меры, длиной в 1 м, определен в настоящее время с точностью до 0,2 м, то погрешность измерения этой меры, происходящая из погрешности определения коэффициента расширения, не превысит $0,2 \text{ м} \cdot 0,1 = 0,02$ м. Следовательно, последней погрешностью можно пренебречь.

Максимальная погрешность определения длины концевой меры, номи-

нальной длиной в 1 м, путем сличения ее со штриховым эталоном, выражается величиной

$$\epsilon_{\max} = 0,2 \mu + 0,2 \mu + 0,2 \mu + 0,1 \mu + 0,2 \mu = 0,9 \mu$$

и средняя погрешность — величиной

$$\epsilon_{\text{ср}} = \pm \sqrt{(0,2)^2 + (0,2)^2 + (0,2)^2 + (0,1)^2 + (0,2)^2} \mu = \pm 0,4 \mu.$$

В. А. БАРИНОВ

ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФИЦИЕНТОВ ТЕРМИЧЕСКОГО УДЛИНЕНИЯ ИНВАРНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРОВОЛОК КОМПАРАТОРНЫМИ МЕТОДАМИ

§ 1. Введение

Если в базисных операциях изменение длин проволок так или иначе учитывается результатами программной компарации последних, то значительно сложнее разрешается вопрос с термическим исследованием проволок, имея в виду, что инвар принадлежит к малорасширяющимся сплавам, к сплавам специальной термо-механической обработки.

К данному вопросу в Международном бюро мер и весов до сих пор подходили чисто лабораторным путем, определяя коэффициент расширения геодезического измерительного прибора тщательным изучением коэффициентов для метрового отрезка от всей проволоки, когда последняя находится под натяжением силою в 10 кг, и приписывая затем найденные значения для всей серии проволок, изготовленных из целого бунта проволоки одной плавки. Такого рода решение данной задачи в большинстве случаев приводило к результатам, не соответствующим действительности.

Обширный ряд исследований, выполненных автором в течение последних 8 лет, показал с полной очевидностью нереальность сертификатных термических уравнений, выдаваемых для инварных проволок Международным бюро мер и весов.¹

Однако, и наше решение той же задачи, излагаемое далее и больше отвечающее действительному положению, в свою очередь не является окончательным и страдает рядом недостатков.

Основная доля недостатков кроется в трудностях создания действительных термостатных условий для проволок на известный интервал времени, а следовательно и чрезвычайной сложности учета реальной температуры проволок.

Температурный диапазон исследования, в силу технических компараторных условий, является ограниченным и находится в лучшем случае в пределах лишь от 0 до 28°C, в то время, как наблюдения при температурах ниже нуля, хотя бы в интервале 0°...—10°, позволили бы иметь

¹ В. А. Барinov. „Исследование термических и динамических влияний на инварные проволоки Едерина“. Труды ВНИИМ, вып. 14 (30), Стандартгиз, 1936.

более надежное суждение о реальной величине второго квадратичного коэффициента термического уравнения у проволок.

Далее, метод компарации, связанный с несовершенной аппаратурой, а следовательно и сопровождающийся значительными ошибками наблюдений, вуалирует, а иногда и искажает, значения действительного изменения длины проволок в зависимости от изменений температуры.

Совершенно неизвестным для инварных проволок является термический гистерезис, и все попытки уловить его характер и направление путем эталонирования проволок по восходящим и нисходящим температурам, конкретных результатов до сих пор не дали.

Наконец автору удалось в последние годы установить, что совершенно новая инварная проволока, обладая определенным коэффициентом термического удлинения, изменяет величину последнего после первых же значительных потрясений в ходе базисных измерений. Известная стабильность величины термического коэффициента наступает лишь тогда, когда данная проволока становится действительно рабочей проволокой.

Излагаемый ниже процесс исследования 14 инварных проволок, с выводом соответствующих результатов, выходит по своим размерам за рамки не только многих опытов автора, но и работ такого же рода над инварными проволоками за рубежом СССР.

В данном случае: 1) испытанию подвергались одновременно 14 проволок, принадлежащих к различным номерным сериям и участвовавших ежегодно в первоклассных базисных измерениях, 2) семь проволок имели коэффициенты термического удлинения, полученные из специальных исследований в Ленинграде в 1926 г., 3) четыре проволоки имели сертификатные данные от Международного бюро мер и весов, 4) для четырех проволок коэффициенты термического удлинения были вовсе неизвестны и, наконец, 5) время для исследования такого количества проволок было установлено весьма короткое — всего 22 дня.

Если первые четыре положения создавали вполне понятный для экспериментатора физико-метрологический интерес, то пятое условие сузило программу работы и не позволило осуществить ряд мероприятий, способствующих повышению точности наблюдений.

§ 2. Задача и программа исследования

Технические условия Ленинградского 24-метрового компаратора позволили разрешить задачу одновременного термического испытания только 14 проволок. Были специально выбраны из отдельных 6 номерных серий следующие проволоки: 1) № 142 и 145, 2) № 712, 720 и 736, 3) № 803, 4) № 835 и 837, 5) № 870 и 896, и, наконец, 6) № 963, 971, 977 и 995.

В табл. 1 представлены средние коэффициенты термического удлинения α_m для части перечисленных проволок по данным прошлых лет.

Остальные проволоки данных термического испытания не имели.

Задача такого рода исследования предполагает в конечном итоге получить результаты, которые позволили бы иметь суждение: 1) о величине коэффициентов термического удлинения для отдельных проволок,

2) о сходимости значений коэффициентов термического удлинения проволок, входящих в одну номерную серию, 3) о характере термического гистерезиса у инварных проволок, 4) о величине средних квадратичных

Таблица 1

№ проволоки	$\alpha_m = \frac{\Delta l}{\Delta t}$	Год исследования и чьи данные	
142)	0	1926 г. проф. Дитц О. Г. и доцент Ларионов С. А.	
145)			
712)	-4,40·10 ⁻⁶		
720)			
736)	-5,92·10 ⁻⁶		
835)			
837)	-4,32·10 ⁻⁶		
963)			
971)	-7,14·10 ⁻⁶		1928 г. Международное бюро мер и весов
977)			
995)			

ошибок эталонирования проволок, как по приемам наблюдений, так и всего испытательного цикла наблюдений и, наконец, 5) о величине средней квадратической ошибки, сопровождающей вывод коэффициентов термического удлинения из наблюдений при 5—6 температурах в пределах 0—25°C.

Так и была составлена программа исследования, предполагавшая: 1) произвести компарацию всех 14 проволок при 5 возрастающих температурах, близких к 0°, 7°, 15°, 20°, 25°, из трех полных приемов по каждой отдельной температуре, наблюдая соответствующие изменения длины хорды, стягивающей точки концевых шкал, соответствующие штрихам 40 мм—40 мм, 2) проводить повышение температуры в компараторном зале постепенно, выдерживая проволоки между отдельными измерениями не менее 48 часов, 3) произвести компарацию тех же проволок после самой высокой температуры при любой установившейся, свободно падающей температуре, спустя 96—100 часов, и, в заключение 4) обработать весь полученный материал наблюдений с выводом соответственных результатов.

Программа отдельного приема наблюдений в предстоящей компарации проволок должна была состоять из следующих последовательных действий: 1) отсчеты термометров, расположенных на высоте микроскопов и в теле монолита, 2) отсчеты термометров при жезле, 3) эталонирование компаратора вперед—обратно, 4) отсчеты термометров, указанных в пп. 1 и 2, 5) отсчеты термометров, расположенных на высоте кронштейнов, 6) эталонирование всех 14 проволок, 7) отсчеты термометров, указанных в п. 5, 8) отсчеты термометров, указанных в пп. 1 и 2, 9) эталонирование компаратора вперед—обратно, 10) отсчеты термометров, указанных в пп. 1 и 2.

Для второго приема измерения длины проволок начальным определением длины компаратора должно было служить последнее эталонирование

компаратора из первого приема, а результаты второго определения длины компаратора во втором приеме соответственно должны были служить начальным определением длины компаратора для третьего приема измерения длины проволок. Таким образом, схема одной температурной серии наблюдений установлена была в следующем виде:

компаратор	}	I прием
проволоки		
компаратор	}	II прием
проволоки		
компаратор	}	III прием
проволоки		
компаратор		

§ 3. Подготовка к наблюдениям

Ленинградский компаратор был предоставлен для настоящей работы на февраль. Этот компаратор помещается в специальном здании, причем вся аппаратура компаратора расположена почти на 1,8 м выше уровня мостовой прилегающей улицы на едином мощном монолите, изолированном от стен и пола здания и залегающем на глубину до 2 м.

Компараторная зала отапливается тремя кафельными печами, но помимо этих печей имеется большой вентилятор, облегчающий регулировку температуры помещения. При благоприятных наружных условиях, ровной и аккуратной топке печей в зале компаратора вполне возможно создавать необходимый температурный режим. Для ограждения монолита и проволок от местного нагрева вблизи печей, последние экранируются переносными фанерными ширмами.

Таковы обстановка и условия, в которых протекали в последние годы, наряду с обычным эталонированием, экспериментальные работы, связанные с термическим исследованием инварных проволок на Ленинградском компараторе.

За трое суток до начала наблюдений все 14 проволок были сняты с барабанов, протерты по всей длине денатурированным спиртом, чтобы снять с них слой вазелина, и развешены на кронштейнах, при температуре окружающей среды, близкой к 5°.

За сутки до наблюдений были установлены девять термометров: три на высоте кронштейнов, три на уровне микроскопов, три в теле монолита — микроскоподержателя. Кроме указанных десяти термометров, два термометра, как обычно, были помещены на нейтральной плоскости рабочего эталона — жезла G 14. В тот же день был отрегулирован рельсовый путь для тележки с жезлом, а также и сама тележка, несущая жезл.

В течение трех суток помещению компаратора было предоставлено свободное остывание путем открытия окон и действия вентилятора.

Цена деления барабанов микроскопов определялась из наблюдений вспомогательных миллиметровых интервалов, нанесенных на нейтральной плоскости жезла G 14.

Результаты наблюдений обработаны на 20 оборотов хода микрометра по каждому микроскопу в интервалах 10⁰⁰—20⁰⁰—30⁰⁰, имея в виду,

что с изменением температуры положение мер, жезла и проволок, под микроскопами должно изменяться относительно соответствующих расстояний между оптическими осями микроскопов (20°C — нульпункт микроскопа).

Данные, отвечающие изложенному, после обработки сведены в табл. 2:

Таблица 2

№ микроскопов	Интервалы винта		Примечание
	10—20 μ	20—30 μ	
	μ	μ	
I	1,0788	1,0845	} Для измерения длины компаратора
II	1,0809	1,0867	
III	1,0787	1,0822	
IV	1,0759	1,0773	
V	1,0822	1,0827	
VI	1,0853	1,0912	
VII	1,0745	1,0800	
VIII	1,0814	1,0785	
IX	1,0697	1,0744	
I	1,0788	1,0845	} Для измерения проволок
IX	1,0705	1,0732	

Длина 3-метрового инварного жезла — рабочего эталона G 14, по данным Всесоюзного института метрологии из последнего эталонирования жезла от 4 декабря 1934 г., выражалась следующим уравнением:

$$[G 14] = 3 \text{ м} + 44,4 \mu + (2,443 t + 0,002 t^2) \mu. \quad (1)$$

§ 4. Измерительные операции с проволоками в шести температурных сериях и результаты, полученные по каждой серии

Намеченные программой температурные моменты для наблюдений, по причинам, не зависящим от нас, не могли быть строго выдержаны и уклонялись от заданных температур в некоторых сериях до $1^{\circ},8$. Особенную роль в данном положении сыграла резко изменяющаяся ленинградская погода.

Так, первая серия наблюдений, вместо заданной температуры около 0° , прошла при средней температуре $1^{\circ},7$; вторая серия наблюдений протекала в температурных условиях, заданных программой; третья серия, вместо 15° , прошла при средней температуре $13^{\circ},2$; четвертая — при температуре $18^{\circ},4$, вместо проектной 20° ; пятая серия производилась при средней температуре $23^{\circ},3$, вместо 25° , хотя в этом последнем случае были приняты самые энергичные меры к повышению температуры. Шестая вспомогательная серия наблюдений умышленно была проведена нами в том тепловом режиме, который свободно установился после пятой серии измерений, спустя 96 часов. При этих условиях, нам казалось,

реже должен был выявиться характер термических последствий на длине испытуемых инварных проволок.

Считая весьма важной экономию времени при термическом исследовании проволок, наблюдения проводились в напряженном темпе: отдельное серийное наблюдение (3 приема для 14 проволок) выполнялось в течение 4 часов, с предварительным вычислением результатов.

Однако, эти меры не избавили нас полностью от значительного изменения температуры в интервале наблюдений одной серии; наиболее резко это изменение сказывалось в показаниях термометров при железе (влияние температуры наблюдателей).

Поскольку техническое выполнение задачи было строго одинаковым по всем шести сериям эталонирования, мы не приводим отдельных результатов по сериям, а представляем полученные нами итоги в сводной табл. 3. В этой таблице заключены результаты определения длины компаратора в шести сериях наблюдений с указанием соответствующих температур.

Таблица 3

Серия	Прием	Длина компаратора K м	Температура		
			железа в °С	монокита в °С	помещения в °С
I	1	24 + 333,70	1,80	—	1,71
	2	+ 322,82	1,84	—	1,75
	3	+ 315,53	1,86	—	1,67
II	1	24 + 517,50	6,35	4,55	7,47
	2	+ 520,21	6,74	4,65	7,58
	3	+ 522,52	7,04	4,75	7,59
III	1	24 + 804,92	9,73	6,75	13,04
	2	+ 824,78	10,60	7,00	13,20
	3	+ 845,10	11,24	7,25	13,32
IV	1	24 + 1556,60	15,90	13,80	18,39
	2	+ 1568,76	16,38	13,80	18,46
	3	+ 1571,56	16,65	13,85	18,45
V	1	24 + 1950,36	20,01	16,90	23,02
	2	+ 1962,62	20,82	17,00	23,34
	3	+ 1980,08	21,57	17,20	23,67
VI	1	24 + 1355,12	8,76	10,70	8,95
	2	+ 1346,21	8,66	10,50	8,92
	3	+ 1330,45	8,58	10,40	8,87

Примечание. Железо наблюдалось по штрихам, отвечающим 0 и 3 м из трех последовательных наведений парными нитями микрометра на указанные штрихи, для каждого из интервалов между соседними микроскопами.

Рассматривая данные табл. 3, видим, что температуры железа (заключенного в ящик-футляр) и особенно монокита, начиная со второй серии значительно отстают от температуры воздуха компараторного помещения.

Вывод средних квадратичных ошибок определения длины компаратора по отдельным сериям из приемов в нашем исследовании не представляется

необходимым, так как температура самого монолита систематически изменялась. Принимая во внимание, что термическое удлинение монолита (изменение всей его длины на 1°) представляет собой величину порядка 120μ , легко усмотреть, что после соответствующих приведений в каждой серии вероятная ошибка определения длины компаратора не превысит в худшем случае $\pm 2,5 \mu$, т. е. составит лишь 1:10000000 от определяемой длины.

Наиболее характерным в наблюдениях длины компаратора, при сплошном едином монолите для всех девяти микроскопов, является неравномерное изменение длины отдельных пролетов между микроскопами в зависимости от изменения температуры.

Хотя это явление и не имеет принципиального значения для компарации проволок, надо, однако, полагать, что устройство отдельных столбов для каждого микроскопа, как это имеет место на компараторе в Московском геодезическом институте, представляется более рациональным.

Измерительные операции с проволоками, в свою очередь, на каждой температурной серии проходили при одних и тех же технических условиях с применением совершенно одинаковых приемов наблюдений. Каждая проволока наблюдалась по средним штрихам концевых шкал из 5 последовательных наведений нитей микрометра на указанные штрихи в одном интервале хода микрометрического винта, а затем после передвижки проволоки, еще делалось 5 наведений в другом интервале хода винта.

Результаты этих независимых наблюдений, имея в виду прокатку проволоки под грузами на роликах между наблюдениями, следует считать совершенно удовлетворительными, так как расхождения в исключительных случаях достигали 15μ , обычно же разности были порядка 3—5 μ и меньше (при ширине наблюдаемых штрихов у некоторых проволок до 80—100 μ).

Самым ответственным в процессе измерения проволок является установка для проволок в каждом отдельном приеме левого поворотного кронштейна с роликом (у запасного для жезла пути), имея в виду, что с правого конца монолита кронштейн с роликом во всех сериях оставался неподвижным.

Незначительный перекосяк левого блока от различных его установок по приемам всегда мог внести в результаты наблюдений ряд метрологических осложнений и дополнительных ошибок, помимо обычных ошибок наблюдений. Единообразие установки блока насколько возможно контролировалось в каждом приеме при повороте кронштейна по специальным меткам — штрихам.

В табл. 4 приводятся средние значения длин из 3 приемов для 14 проволок по всем 6 сериям.

Весьма существенным является вопрос о величине вероятнейшей ошибки, с которой получен каждый из приведенных в табл. 4 результатов.

В табл. 5 мы приводим значения вероятных ошибок для длин проволок, полученных из эталонирования последних по каждой серии, округляя величины этих ошибок до $\pm 0,001$ м.м.

Из табл. 5 замечаем, что наибольшие по величине ошибки результатов

Таблица 4

Серия	I	II	III	IV	V	VI
Средняя температура	1°,71	7°,55	13°,19	18°,43	23°,34	8°,73
№ проволоки	24 м +					
	μ	μ	μ	μ	μ	μ
142	+ 60,36	+ 48,03	+ 86,91	+ 63,27	+ 89,96	+ 102,32
145	+ 85,96	+ 94,47	+ 94,22	+ 130,89	+ 111,15	+ 40,72
712	+ 730,57	+ 730,85	+ 690,32	+ 675,68	+ 675,95	+ 736,52
720	+ 692,49	+ 661,50	+ 678,75	+ 637,12	+ 632,17	+ 666,58
736	+ 1041,38	+ 1005,75	+ 1028,82	+ 982,62	+ 949,21	+ 1034,83
803	- 4373,14	- 4387,29	- 4369,15	- 4421,99	- 4444,64	- 4351,75
835	+ 501,51	+ 483,35	+ 487,09	+ 456,07	+ 465,79	+ 529,76
837	- 3,49	- 4,76	+ 23,41	- 12,73	- 36,96	+ 58,31
870	+ 519,31	+ 406,63	+ 402,12	+ 340,12	+ 269,84	+ 433,74
896	- 96,46	- 181,60	- 175,60	- 264,06	- 292,45	- 148,22
963	+ 1210,94	+ 1194,60	+ 1177,92	+ 1144,84	+ 1141,95	+ 1217,95
971	+ 1079,24	+ 1012,75	+ 1020,52	+ 1001,35	+ 971,26	+ 1023,74
977	- 235,66	- 302,14	- 300,55	- 313,56	- 319,51	- 260,96
995	+ 409,43	+ 340,19	+ 363,24	+ 336,74	+ 337,33	+ 409,73

Таблица 5

№ проволоки \ Серия	I	II	III	IV	V	VI	Вероятная ошибка среднего из серий, в микронах
	Вероятная ошибка, ± в микронах, из отдельных серий						
142	16	8	8	5	7	8	8
145	14	10	2	6	10	2	8
712	5	14	8	12	4	6	9
720	8	9	7	7	8	5	7
736	14	7	8	8	5	4	8
803	8	6	5	3	7	9	7
835	10	8	6	1	9	12	8
837	1	8	7	4	2	1	5
870	11	3	7	5	7	12	8
896	2	2	10	11	5	8	7
963	12	9	7	7	10	8	9
971	14	8	15	1	2	7	9
977	2	5	2	4	7	4	4
995	10	6	11	10	5	12	9

компарации проволоки наблюдаются в первой серии. Это объясняется тем, что после зимнего покоя, в свернутом на барабанах виде, проволоки первый раз подверглись динамическому воздействию. В последующих

сериях наступает сравнительная стабильность в значениях ошибок, несколько увеличивающаяся лишь по некоторым проволокам в шестой серии.

В среднем, результирующая вероятная ошибка лежит в пределах 7—8 μ . Полученное значение средней вероятной ошибки нельзя считать, безусловно, хорошим; этот результат — лишь удовлетворителен, принимая во внимание, что объектом наблюдения являлись непосредственные штрихи шкал, имеющие ширину, как указывалось уже ранее, порядка 80—100 μ .

Для целей термического исследования всегда желательно иметь на шкалах проволок вспомогательные, специально нарезанные штрихи, шириной не более 20 μ ; в последнем случае ошибка определения длины проволоки никогда не превосходит 2—3 μ , как это установлено автором из его обширных исследовательских работ и опытов с проволоками.

Ограниченное время, положенное на испытание данных проволок, не позволило провести такое полезное мероприятие — как нанесение вспомогательных штрихов на шкалах проволок.

Однако, табл. 4 устанавливает сравнительно реальную картину хода изменения длины проволок в зависимости от температуры и вполне позволяет решить задачу вычисления коэффициентов термического удлинения проволок. Зная величины этих коэффициентов, можно вычислить среднюю ошибку единицы веса по каждой проволоке, т. е. учесть влияние переменной температуры на изменение длины проволок и тогда, как это будет далее видно, средние квадратичные ошибки вычисленных длин проволок соответственно уменьшатся до величин порядка 3—4 μ .

В табл. 4 мы обращаем внимание на результаты эталонирования шестой, последней, серии наблюдений, выполненной при температуре 8°,73. Из 14 проволок только 7 (№ 712, 720, 736, 803, 837, 870 и 971) приняли длину, сравнительно близкую к той, которая интерполиционно намечалась для упомянутой температуры при основных измерениях проволок по возрастающей температуре. У остальных проволок наблюдается упреждение в изменении длины их при падении имевшей у нас место температуры с 23°,3 на 8°,7.

Это последнее явление весьма характерно для инвара и его термического гистерезиса. Ряд специальных экспериментов над инварными жезлами, проведенных в лаборатории мер длины Всесоюзного института метрологии приводил к аналогичным результатам: после сильного нагрева жезла и затем некоторого отдыха его в условиях нормальной температуры мера становилась короче, чем была при той же нормальной температуре до нагревания; инварный жезл, подвергнутый значительному охлаждению и эталонированный затем при нормальной температуре, оказывался длиннее, чем был до охлаждения при той же нормальной температуре.

§ 5. Коэффициенты термического удлинения исследуемых инварных проволок

Длина изучаемой меры, в данном случае инварной проволоки (когда эта проволока находится при свободном провисе и под натяжением в 10 кг), в пределах возможных температур ее применения, т. е. от 0 до 30°C,

есть, как известно, линейная функция температуры, и формула для α_m термического удлинения в простейшем ее виде может быть написана так:

$$\alpha_m = \frac{l_0 - l_i}{t_0 - t_i}, \quad (2)$$

где t_0 — произвольно выбранная температура, t_i — температура испытания, l_0 — вероятнейшая длина проволоки при температуре t_0 , l_i — наблюдаемая длина проволоки при температуре t_i .

Принимая во внимание, однако, что данные, полученные из непосредственных наблюдений, сопровождаются случайными ошибками и, что наблюдений производится не одно, а некоторое число n , после простых преобразований формула (2) очевидно может быть представлена уравнениями погрешностей, общий вид которых будет такой:

$$\delta_i = l_0 - \alpha_m (t_0 - t_i) - l_i. \quad (3)$$

Система из n уравнений вида (3) легко дает систему нормальных уравнений:

$$\begin{aligned} n l_0 - \alpha_m \sum (t_0 - t_i) - \sum l_i &= 0, \\ - \sum (t_0 - t_i) l_0 + \alpha_m \sum (t_0 - t_i)^2 + \sum (t_0 - t_i) l_i &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Поставим требование, чтобы t_0 удовлетворяло следующему условию:

$$t_0 = \frac{\sum t_i}{n}. \quad (5)$$

Тогда, очевидно, что

$$l_0 = \frac{\sum l_i}{n} \quad (6)$$

с весом n , причем $n = km$, где m — число серий наблюдений, а k — число приемов наблюдений в каждой серии.

Решая систему (4), получим:

$$\alpha_m = \frac{\sum l_i \Delta t_i}{\sum (\Delta t_i)^2} \quad (7)$$

с весом, равным $\sum (\Delta t_i)^2$.

Принимая далее во внимание уравнения (3) и (7), получаем:

1. Средняя квадратичная ошибка ε длины испытуемой проволоки, в условиях измерения ее при различных температурах t_i из одного приема наблюдений, будет иметь вид:

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{[\delta\delta]}{km - 2}} = \pm \sqrt{\frac{\sum (\Delta l_i)^2 - \alpha_m^2 \sum (\Delta t_i)^2}{km - 2}}. \quad (8)$$

Это выражение и соответствует ошибке единицы веса.

2. Средняя квадратичная ошибка вероятнейшего значения длины исследуемой проволоки при температуре t_0 :

$$m_{t_0} = \pm \sqrt{\frac{\varepsilon}{km}}. \quad (9)$$

3. Средняя квадратичная ошибка вероятнейшего значения α_m :

$$m_{\alpha_m} = \pm \frac{\varepsilon}{\sqrt{\Sigma (\Delta t_i)^2}} \quad (10)$$

На основе приведенных выше теоретических положений был обработан весь материал наблюдений в двух вариантах: первый заключался в решении задачи по наблюдениям только пяти первых серий по возрастающей температуре; второй разрешал ту же задачу, но с учетом и шестой серии измерений.

Результаты первого варианта представлены в табл. 6, а второго — в табл. 7.

Таблица 6¹

№ проволоки	l_0		m_{l_0} мм	$\alpha_m \cdot 10^{-6}$	$m_{\alpha_m} \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$
	м	мм				
142	24	+0,070	±0,002	+1,371	±0,448	± 7,63
145		+0,103	±0,002	+1,615	±0,369	± 6,32
712		+0,701	±0,002	-3,054	±0,333	± 5,70
720		+0,660	±0,002	-2,675	±0,403	± 6,89
736		+1,002	±0,003	-3,799	±0,569	± 9,74
803		-4,399	±0,003	-3,233	±0,574	± 9,82
835		+0,479	±0,001	-1,836	±0,282	± 4,83
837		-0,007	±0,003	-1,319	±0,600	±10,25
870		+0,385	±0,003	-10,471	±0,731	±12,50
896		-0,202	±0,003	-8,780	±0,681	±11,65
963		+1,174	±0,003	-3,475	±0,703	±12,09
971		+1,017	±0,002	-4,229	±0,514	± 8,80
977		-0,294	±0,002	-3,373	±0,478	± 8,17
995		+0,357	±0,003	-2,782	±0,649	±11,10

Сопоставляя результаты, приводимые в табл. 6, с данными табл. 7, видим, что коэффициенты термического удлинения, полученные нами для каждой из проволок из 6 серий (т. е. с возвратом в наблюдениях после наивысшей температуры испытания 23°,3 к температуре 8°,7), сохранили значения, вычисленные из 5 серий, в пределах величины порядка $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$, иначе говоря, в пределах ошибок определения данных коэффициентов методом эталонирования проволок на стационарном компараторе.

Таким образом, дополнительная шестая серия измерения проволок, поставленная с целью выяснения в первом приближении характера термического гистерезиса, не исказила результатов специальной пятисерийной системы, проведенной в целях определения коэффициентов термического удлинения проволок, одновременно доказав, что результаты таблицы весьма близки к действительным значениям искомых коэффициентов.

Однако, если сравнить полученные нами данные с данными табл. 1, то можно заметить, что с течением времени, а значит и с увеличением

¹ Средняя температура равна 12°,8, $k=3$, $m=5$, $n=15$.

№ проволоки	l_0	m_k мм	$\alpha_m \cdot 10^{-6}$	$m_n \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$
142	24 + 0,075	±0,003	+0,933	±0,620	±10,98
145	+ 0,093	±0,001	+2,245	±0,248	± 4,34
712	+ 0,707	±0,002	-3,315	±0,413	± 7,23
720	+ 0,661	±0,002	-2,620	±0,361	± 6,32
736	+ 1,007	±0,003	-3,963	±0,565	± 9,89
803	- 4,391	±0,003	-3,616	±0,666	±11,65
835	+ 0,487	±0,003	-2,325	±0,620	±10,85
837	+ 0,004	±0,004	-1,992	±0,926	±16,21
870	+ 0,395	±0,003	-10,499	±0,629	±11,02
896	- 0,193	±0,003	-8,975	±0,630	±11,15
963	+ 1,181	±0,002	-3,808	±0,415	± 7,26
971	+ 1,018	±0,002	-4,103	±0,478	± 8,37
977	- 0,289	±0,002	-3,582	±0,543	± 9,50
995	+ 0,366	±0,003	-3,242	±0,774	±13,55

срока пребывания проволок в работе, все коэффициенты термического удлинения уменьшились. Такое явление наблюдалось автором в предшествующих опытах почти у всех проволок, подвергавшихся вторичному термическому исследованию через значительный промежуток времени.

Независимо от вычисленных средних значений термического удлинения α_m мы вычислили и коэффициенты, исходя из квадратичной формулы термического уравнения вида:

$$l_0' + \alpha t_1 + \beta t_1^2 = l_T, \quad (11)$$

где t_1 — температуры компарации проволок; l_T — действительная длина проволоки при температуре t_1 ; l_0' — длина проволоки, отнесенная к 0° , α — линейное изменение данной проволоки при изменении температуры t на 1° , β — изменение α в зависимости от изменения температуры t .

Такого вида уравнения были составлены для каждой исследуемой проволоки отдельно из пяти серий наблюдений, причем в данном случае, очевидно, число уравнений должно быть больше числа неизвестных.

Полученные результаты приведены в табл. 8.

Несмотря на значительную почти у всех проволок абсолютную величину второго коэффициента β , следует отметить, что при существующем методе термического исследования проволок, полученные результаты дают лишь его порядок, так как ошибки самого определения либо лежат на грани значений указанных коэффициентов, либо иногда даже превосходят величину этих коэффициентов.

Практически рациональнее пользоваться, безусловно, средними значениями термического удлинения α_m табл. 7.

Надо иметь в виду, что даже для платино-иридиевого прототипа метра второй коэффициент β выводится не на материале компараторных

¹ Средняя температура равна $12^\circ,2$, $k=3$, $m=6$, $n=18$.

Таблица 8

Февраль 1936 г.

№ проволоки	l_0'		$\alpha \cdot 10^{-6}$	$\beta \cdot 10^{-6}$
	м	мм		
142	24	+0,057	+0,197	+0,0470
145		-0,064	+6,319	-0,1884
712		+0,743	-3,948	+0,0358
720		-0,692	-1,925	-0,0301
736		+1,034	+0,507	-0,1725
803		-4,380	+2,589	-0,2332
835		+0,506	-2,762	+0,0371
837		-0,017	+5,533	-0,2745
870		+0,525	-11,140	+0,0268
896		-0,089	-8,784	+0,0007
963		+1,219	-3,476	+0,0003
971		+1,081	-6,797	+0,1030
977		-0,226	-9,669	+0,2522
995		+0,414	-8,184	+0,2164

измерений, а из специальных наблюдений по методу Физо, причем эти последние наблюдения производятся не с прототипом непосредственно, а с коротким отрезком стержня, полученным с этой целью при изготовлении прототипа. Изложенный прием введен в практику Международного бюро мер и весов только потому, что современные метрологические компараторы не дают возможности получить для теплового уравнения меры коэффициент β с достаточной точностью.

§ 6. Заключение

Термическое исследование 14 инварных 24-метровых проволок Елерина, процесс которого изложен выше, представляется, если не по существу, то по одновременному количеству испытуемых объектов в условиях Ленинградского компаратора, первым опытом в СССР.

В итоге получены искомые коэффициенты термического удлинения для каждой проволоки отдельно. Найденные коэффициенты отличаются от соответствующих коэффициентов, которыми пользовались геодезисты с 1926—1928 гг. в работе с данными проволоками, причем новые коэффициенты оказались по абсолютной величине меньше старых. Это последнее найденное изменение величин коэффициентов во времени представляет для инварных проволок, повидимому, явление нормальное, так как получило свое подтверждение в обширных, предшествующих данному исследованию, опытах автора над инварными проволоками, находящимися в эксплуатации с 1906—1908 гг. до настоящего времени.

Реальность получаемых значений коэффициентов термического удлинения для инварных проволок методом обычного эталонирования их в условиях переменной температуры не подлежит сомнению и доказана практи-

ческим применением новых коэффициентов для огромного числа базисных проволок.

Принципиально вопрос может быть поставлен лишь в отношении степени точности результатов, получаемых указанным выше методом. Этот последний вопрос, естественно, упирается в вопрос недостаточно конкретного учета температуры испытуемых проволок.

Создание термостатных условий для проволоки в момент ее эталонирования вполне возможно и осуществимо, но связано с большими техническими трудностями. Однако, этот специфически лабораторный прием термического исследования проволок будет разобщен с полевым применением проволок, где учет температуры производится помощью ртутных или спиртовых термометров для окружающего воздуха, а температура последнего в полевой обстановке, как известно, весьма изменчива в нижних его слоях и часто далека от температуры проволок.

Наиболее существенными и отвечающими действительности следует, конечно, признать электрические методы учета температуры проволок как при их исследовании, так и в обстановке полевых операций. В этом случае, возникающее очевидно некоторое техническое осложнение измерительного процесса будет вполне оправдано окончательными результатами. Но несомненным является и то, что такого рода мероприятие применимо лишь в целях первоклассных базисных измерений.

О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕВЫХ МЕР ДЛИНЫ С БОЛЬШОЙ ТОЧНОСТЬЮ

1. ПРИНЦИПЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭТИХ МЕТОДОВ

§ 1. Принципы электрических методов измерения длины

В 1920 г. английский физик Виддингтон выступил в печати с предложением высокоточного электрического метода измерения длины [1]. Сущность этого метода заключалась в следующем.

В двух, расположенных один возле другого, колебательных контурах (I и II—рис. 1) генерируются катодными лампами A и B незатухающие электромагнитные колебания, порядок частоты которых равен 1000 килогерц. Конденсатор *b* контура лампы B состоит из двух металлических пластин, из которых одна неподвижна, а другая может перемещаться в направлении, перпендикулярном к собственной плоскости. В телефон *t*, включенный в анодную цепь лампы B, слышен звук, высота которого определяется частотой n биений колебаний обоих контуров. При изменении расстояния между пластинами конденсатора *b* изменяется емкость колебательного контура II и потому изменяется частота колебаний этого контура. Изменение же частоты колебаний одного из контуров влечет за собой изменение частоты биений колебаний контуров и таким образом изменение высоты звука в телефоне. Чем больше изменится емкость конденсатора, тем больше изменится и тон звука в телефоне. Благодаря этому по изменению тона в телефоне можно определить величину перемещения подвижной пластины конденсатора *b*.

Для испытания метода Виддингтон пользовался установкой, приведенной на рис. 2. Изменением величины груза чашки вызывалось перемещение левой пластины конденсатора и, следовательно, изменение расстояния *x* между пластинами конденсатора. Величина перемещения пластины измерялась микрометром. Доказав предварительно справедливость для этого случая закона Гука о пропорциональности деформации нагрузке,

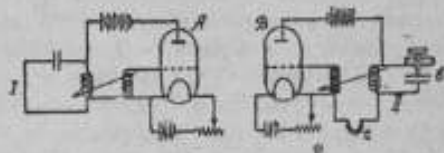


Рис. 1.

Виддингтон, основываясь далее на этом законе, показал, что перемещение пластины конденсатора лишь на 10^{-7} мм уже может быть замечено по изменению высоты звука в телефоне.

К настоящему времени разработано очень много схем, служащих для измерения с высокой точностью перемещения пластины конденсатора. Почти все они, как и схема Виддингтона, основаны на применении

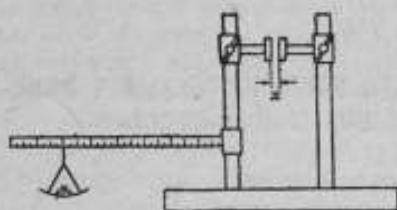


Рис. 2.

токов высокой частоты, но изменения емкости в более поздних схемах преобразуются не в изменения тона звука, а в изменения силы тока или напряжения. Перемещения пластины конденсатора в этих схемах регистрируются гальванометром, что представляет большое достоинство метода в отношении удобства проведения измерений.

Назвав изложенный метод в начале параграфа методом измерения длины, мы говорили до сих пор лишь о методе измерения перемещения пластины конденсатора. Сейчас мы аналогично и совершенно кратко изложим метод индуктивности, а в следующем параграфе покажем, как эти два метода применяются для измерения деформации тел и линейных размеров тел.

Назвав изложенный метод в начале параграфа методом измерения

Другой электрический метод измерения длины — метод индуктивности — основан на изменении индуктивного сопротивления реактивной катушки под влиянием изменения зазора между сердечником *a* катушки и якорем *b* (рис. 3). При приближении якоря к сердечнику индуктивное и, следовательно, полное сопротивление катушки увеличиваются, а при удалении — уменьшаются. Изменение же сопротивления катушки измеряют, например, включив ее предварительно в мостик Витстона. Регистратором перемещений якоря является и в этом методе стрелочный прибор, включенный, в случае использования мостика, в диагональ последнего. Для питания различных приборов, служащих для измерения длины и основанных на указанном принципе, применяется для одних ток обычной частоты в 50 герц, для других — ток высокой частоты. Наиболее чувствительные из подобных приборов, получивших практическое применение, позволяют обнаруживать перемещение якоря на сотые доли микрона.

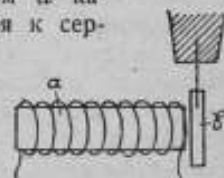


Рис. 3.

§ 2. Существующие применения электрических методов измерения деформаций и линейных размеров тел

На принципе метода емкости проф. Давиденков еще пятнадцать лет тому назад сконструировал прибор для высоко-точного измерения деформаций твердого тела под влиянием приложенной к нему силы. Прибор проф. Давиденкова, названный радио-экстенсометром, представлен схема-

тически на рис. 4. Конденсатор, состоящий из двух электрически изолированных дисков *A* и *B*, надевается с помощью специальных труб на стержень, деформация которого измеряется и скрепляется с этим стержнем посредством закрепительных винтов *c* и *d*. При растяжении стержня увеличивается и расстояние между пластинами конденсатора. Изменение же емкости конденсатора, включенного в один из колебательных контуров видоизмененной схемы Виддингтона, влечет изменение тона звука в телефоне схемы. Чувствительность прибора, по данным профессора Давиденкова, выражается величиной 10^{-6} мм.

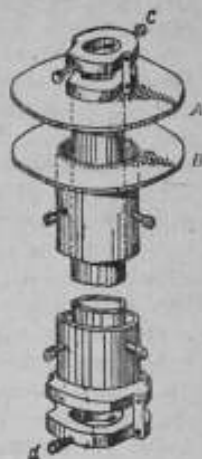


Рис. 4.

Примером применения метода индуктивности может служить прибор, изображенный на рис. 5. Положение мерительного штифта *d*, упирающегося в измеряемый предмет *e*, зависит от величины этого предмета. Когда штифт перемещается вдоль своей оси, он перемещает и якорь *b*, укрепленный с помощью пружины *c*. При перемещении якоря левая его часть, расположенная между двумя катушками *a*, приближается к одной из катушек и удаляется от другой, вызывая этим увеличение индуктивного сопротивления первой катушки и уменьшение индуктивного сопротивления второй. Катушки включены в смежные ветви мостика. Длина измеряемого предмета регистрируется таким образом стрелочным прибором, включенным в схему мостика. Описанные приборы питаются от силовой или осветительной сети через понизительный трансформатор, причем употребляется и стабилизатор напряжения. Приборы подобного типа изготавливаются американской фирмой „Pratt and Whitney“ и другими. Чувствительность таких приборов лежит для различных видоизменений их типа в пределах 0,1—2 м.

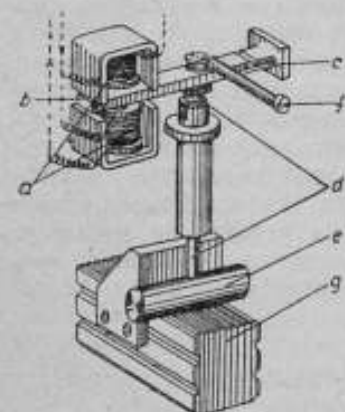


Рис. 5.

a — реактивные катушки, *b* — якорь, *c* — пружина, *d* — мерительный стержень, *e* — измеряемый предмет, *f* — установочный винт, *g* — стоек.

Чувствительность прибора, по данным профессора Давиденкова, выражается величиной 10^{-6} мм. При перемещении якоря левая его часть, расположенная между двумя катушками *a*, приближается к одной из катушек и удаляется от другой, вызывая этим увеличение индуктивного сопротивления первой катушки и уменьшение индуктивного сопротивления второй. Катушки включены в смежные ветви мостика. Длина измеряемого предмета регистрируется таким образом стрелочным прибором, включенным в схему мостика. Описанные приборы питаются от силовой или осветительной сети через понизительный трансформатор, причем употребляется и стабилизатор напряжения. Приборы подобного типа изготавливаются американской фирмой „Pratt and Whitney“ и другими. Чувствительность таких приборов лежит для различных видоизменений их типа в пределах 0,1—2 м. Употребляемые для измерения точно изготавливаемых деталей машин и приборов, а также концевых мер длины, электрические индуктивные приборы весьма удобны для массовой поверки объектов.

Применяют также электрические приборы, аналогичные по назначению и устройству описанному, но основанные на методе емкости.

Метод индуктивности и метод емкости успешно используются для автоматического измерения толщины различных материалов и изделий при их изготовлении. Примерами приборов, предназначенных для указан-

ной цели, могут служить индуктивные и емкостные приборы, устанавливаемые для контроля толщины железа у прокатного стана. В таком измерительном процессе материал скользит под мерительными элементами электрического прибора. Аналогичными приборами являются емкостные приборы, употребляемые для контроля толщины бумаги у бумагоделательной машины. К этому же типу приборов относятся индуктивные приборы для контроля толщины свинцового кожуха кабеля, выходящего из пресса. Измерения, выполняемые с помощью указанных приборов в процессе изготовления материалов, позволяют держать толщину последних в заданных допусках. Точность этих измерений варьирует в зависимости от рода измеряемого материала или изделия, в пределах от одной до нескольких сотых долей миллиметра. В электрических приборах для измерения толщины материалов и изделий, в некоторой мере уже используется одно из основных свойств электрических методов измерения длины — возможность отдалить регистратор прибора от его первичных мерительных элементов и, следовательно, расположить регистратор в удобном для снятия показания месте. В будущем в приборах такого типа, вероятно, найдет приложение и другое свойство электрических методов — применимость лампочки, сигнализирующей о выходе из допуска. Методом индуктивности пользуются также для измерения изделия в процессе его обработки на шлифовальном станке. Поверхность обрабатываемого изделия скользит при таком измерении под упирающимся в нее мерительным штифтом электрического прибора. Регистратор прибора, как и в ранее указанных приборах, отдален от мерительного штифта. Станок выключают, когда стрелка регистратора, градуированного в линейной мере, покажет заданный размер изделия. Станок может останавливаться в нужный момент и автоматически. Для автоматического выключения станка применяют специальное реле, цепь которого замыкается стрелкой регистратора в момент достижения изделием заданного размера. Погрешность измерения изделия на шлифовальном станке электрическим методом не превышает 0,01 мм. Возможность применения реле, служащего для автоматического выключения станка, можно считать третьим положительным свойством электрических методов измерения длины.

II. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЕМКОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕВЫХ МЕР ДЛИНЫ С БОЛЬШОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Электрические методы измерения длины, типичные примеры которого были приведены в предыдущем параграфе, уже нашли себе применение в промышленности. Но эти методы привлекают внимание метролога не только теми своими достоинствами, на которых базируются автоматизация измерения и передача результатов измерения на расстояние, но и также своей чрезвычайно высокой чувствительностью. Исследования Виддингтона показали, что чувствительность метода емкости, даже на первой стадии развития этого метода — двадцать лет тому назад — выражалась величиной в 10^{-7} мм, т. е. превышала чувствительность интерференционных методов измерения длины, примерно, в пятьдесят раз. Однако, в изданиях иностранных метрологических учреждений мы не встречали сведений

о применении электрических методов измерения длины в метрологической практике Европы и Америки. Поэтому лаборатория мер длины ВНИИМ поставила себе задачу экспериментально изучить неисследованный до настоящего времени вопрос о возможности и целесообразности применения электрических методов для измерения с высокой точностью концевых мер длины. При этом решено было начать с исследования метода емкости, так как чрезвычайно высокая чувствительность именно этого метода доказана упомянутой уже работой Виддингтона.

§ 3. Механическая часть прибора для измерения концевых мер длины

На рис. 6 представлена схема механической части опытного прибора для измерения концевых мер длины методом емкости. На основании прибора укреплен столик *a*, состоящий из стальной чашки с агатом в центре, причем вершина агата лежит на одном уровне с острым краем чашки. Измеряемая концевая мера *b* устанавливается на столик, а на концевую меру устанавливается на трех шаровых контактах подвижная нижняя пластина *c* конденсатора. Шаровые контакты, жестко скрепленные с пластиной конденсатора, расположены равносторонним треугольником, вписанным в окружность, диаметром в 4 мм. Верхняя неподвижная пластина *d* конденсатора закреплена с помощью держателя на стойке *e*. Вилка *f*, укрепленная на подъемном механизме *g*, служит лишь для малого поднятия нижней пластины конденсатора перед установкой измеряемой меры. После установки меры, опуская вилку, приводят последнюю в такое положение, в котором она не касается нижней пластины конденсатора. Чем больше длина измеряемой концевой меры, тем меньше расстояние между пластинами конденсатора и тем больше, следовательно, емкость конденсатора. Определенной величине емкости конденсатора соответствует определенное положение стрелки гальванометра, включенного в ту же электрическую схему, в которую включен и конденсатор.

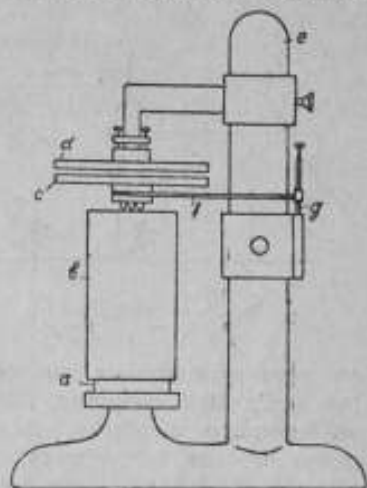


Рис. 6.

Прибор позволит измерять концевые меры, длиной до 180 мм.

Конструкция описанной механической части прибора уже разработана в деталях Техническим отделом завода „Эталон“, и заказ на ее изготовление дан этому же заводу.

§ 4. Электрическая схема прибора

После ознакомления с несколькими схемами, употребляемыми для измерения малых перемещений пластины конденсатора, для опытного прибора была выбрана схема, предложенная Виторским [2]. Являясь одной

из простых схем такого рода, эта схема, как увидим ниже, обладает достаточной для нашей цели чувствительностью. Схема, приведенная на рис. 7, содержит колебательный контур (I) в анодной цепи и колебательный контур (II) в цепи сетки. Явление, на котором основано изменение перемещений пластины конденсатора, Виторский описывает так:

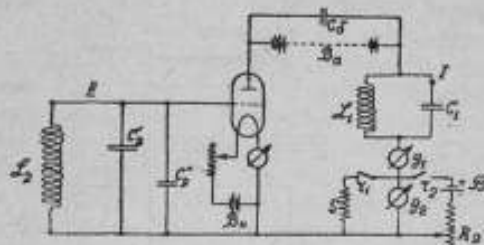


Рис. 7.

«если колебательный контур анодной цепи $L_1 C_1$ настроить на какую-либо постоянную частоту f_1 , а настройку контура цепи сетки $L_2 C_2$ постепенно изменять, увеличивая частоту его собственных колебаний от некоторой величины $f'_2 < f_1$ до некоторой другой величины $f'_2 > f_1$, то, как известно, в контуре $L_1 C_1$ будут генерироваться колебания, интенсивность которых будет возрастать по мере приближения настройки контура $L_2 C_2$ к резонансу с контуром $L_1 C_1$. При настройке, близкой к условию резонанса ($L_2 C_2 = L_1 C_1$) интенсивность колебаний достигает максимума, а при дальнейшем изменении периода собственных колебаний контура $L_2 C_2$ (в том же направлении) колебания постепенно ослабевают до полного прекращения. При этом анодный ток i_a (показание миллиамперметра g_1) также изменяется, быстро возрастая от некоторой начальной величины $i_{a \min}$ (соответствующей отсутствию колебаний) и достигая некоторого максимума $i_{a \max}$ в момент, близкий к резонансу контуров $L_1 C_1$ и $L_2 C_2$, а затем снова круто спадает, примерно, до своей первоначальной величины». Изменение настройки контура сетки $L_2 C_2$ производят изменением емкости C_2 . Тогда указанные изменения силы тока в анодной цепи происходят по причине изменения расстояния между пластинами конденсатора, выражающего емкость C_2 . В собранной нами схеме Виторского использована лампа П7 с чисто вольфрамовой нитью, причем для усиления эффекта две такие лампы включены параллельно. Напряжение анодной батареи — 80 В. Индуктивности L_1 и L_2 — порядка 0,025 мГн. Емкость C_1 — порядка 250 мкФ. Емкость C_2 выражена двумя параллельно включенными конденсаторами: максимум C'_2 равен 250 мкФ, максимум C''_2 равен 45 мкФ. По этой схеме нами был снят ряд кривых зависимости $i_a = f(C_2)$ при $C_1 = \text{const}$ и при различных значениях тока накала. Одна из снятых кривых приведена на рис. 8. Малыми участками такой кривой, близкими к прямолинейным, и можно воспользоваться для измерения перемещения пластины кон-

денсатора. Если же колебательный контур анодной цепи $L_1 C_1$ настроить на какую-либо постоянную частоту f_1 , а настройку контура цепи сетки $L_2 C_2$ постепенно изменять, увеличивая частоту его собственных колебаний от некоторой величины $f'_2 < f_1$ до некоторой другой величины $f'_2 > f_1$, то, как известно, в контуре $L_1 C_1$ будут генерироваться колебания, интенсивность которых будет возрастать

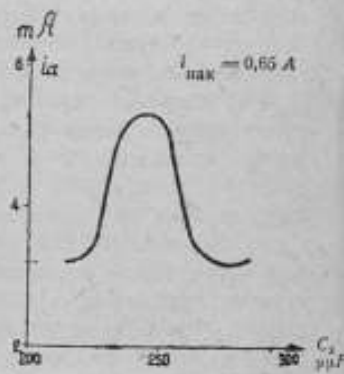


Рис. 8.

денсатора. В анодную цепь последовательно с миллиамперметром g_1 включен гальванометр g_2 с шунтом S . Параллельно g_2 для компенсации анодного тока включен аккумулятор B с переменным сопротивлением R_2 . При замкнутом ключе r_1 , изменяя C_2 , останавливаются на одном из почти прямолинейных участков кривой $i_a = f(C_2)$. Затем, замкнув ключ r_2 и разомкнув ключ r_1 , устанавливают с помощью изменения сопротивления R_2 стрелку гальванометра в нулевое положение. Давая далее малые приращения C_2 с помощью образцового конденсатора C'_2 , снимают, пользуясь еще гальванометром g_2 , кривую зависимости $\Delta i_a = f(\Delta C_2)$. Такая снятая нами кривая изображена на рис. 9. Полные изменения ΔC и Δi_a , отраженные этой кривой, равны соответственно $2,64 \mu F$ и $475 \mu A$. Изменению емкости в $1 \mu F$ отвечает изменение тока, примерно, в $180 \mu A$.

§ 5. Соотношения между величиной перемещения пластины конденсатора и электрическими величинами в нашем опытном приборе

В электрическую схему, описанную в предыдущем параграфе, на место конденсатора C_2 мы предполагаем включить измерительный конденсатор, смонтированный в механической части опытного прибора (см. рис. 6). Конденсатор C'_2 схемы будет служить для приведения электрической части прибора на желаемый рабочий участок кривой зависимости $i_a = f(C_2)$.

Емкость измерительного конденсатора, состоящего из двух пластин, диаметром $6,57$ см, расставленных на расстоянии $0,15$ мм один от другого, будет равна $200 \mu F$. Максимальное перемещение пластины конденсатора, равное максимальной разности измеряемых и употребляемых при этом измерении образцовых концевых мер длины, не должно превышать 2μ .

Принятое соотношение между величиной полного перемещения пластины конденсатора и расстоянием между его пластинами обеспечит почти линейную зависимость между величиной изменения емкости конденсатора и вызывающим это изменение перемещением пластины конденсатора. Отступление от линейности не превысит 1% от величины полного рабочего изменения емкости конденсатора. Зависимость между изменением силы тока, протекающего через гальванометр, и изменением емкости измерительного конденсатора, будет выражаться кривой, подобной изображенной на рис. 9 и, следовательно, тоже не будет много отличаться от линейной зависимости.

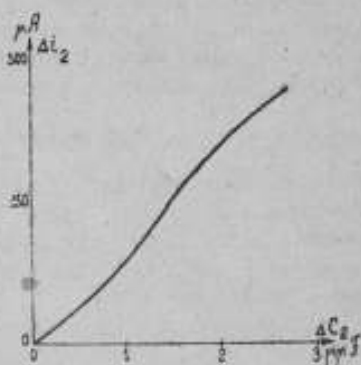


Рис. 9.

При перемещении подвижной пластины измерительного конденсатора на $0,025 \mu$ емкость его изменится на величину

$$\Delta C = C \frac{\Delta d}{d} = 200 \frac{0,000025}{0,15} = 0,033 \mu F.$$

Если изменение емкости на $1 \mu F$ дает, как мы убедились на опыте, изменение силы анодного тока, протекающего через гальванометр, в $180 \mu A$, то, считая для простоты расчета Δi пропорциональным ΔC , получим, что изменение емкости на $0,033 \mu F$ даст изменение тока, протекающего через гальванометр в $6 \mu A$. Таков порядок цены деления гальванометра, примененного в собранной схеме и нужного для нашего опытного прибора, если мы хотим измерять с помощью этого прибора концевые меры длины с точностью до сотых долей микрона. Полному перемещению пластины конденсатора на 2μ будет отвечать изменение емкости конденсатора приблизительно в $0,033 \mu F \frac{2}{0,025} = 2,64 \mu F$.

Если пользоваться для измерения мер длины таким участком кривой изменения силы тока, какой изображен на рис. 9, то, при изменении емкости на $2,64 \mu F$, ток, протекающий через гальванометр, изменится на $475 \mu A$, что будет соответствовать приблизительно восьмидесяти делениям гальванометра.

Градировка прибора должна производиться концевыми мерами, длина которых предварительно определена с помощью интерференционного метода измерения длины. Судя по характеру кривой рис. 9, можно полагать, что, для получения возможности измерять на данном приборе концевые меры длины с точностью до сотых долей микрона, надо будет градуировать прибор в 4—5 точках шкалы гальванометра.

Изложенный вариант соотношений между изменениями длины и изменением электрических величин получен после сравнительно долгих экспериментальных и теоретических поисков, имеющих целью сконструировать прибор, обладающий достаточной чувствительностью и достаточным постоянством показаний. Кроме того, ставилось задачей получить прибор с сравнительно равномерной шкалой. Постоянство показаний схемы при снятии на ней кривых, пример которых приведен на рис. 9, достигнуто. Однако, проведение градуировки прибора непосредственно перед измерением мыслится необходимым условием измерения на этом приборе. Чувствительность собранной схемы можно повысить и до тысячных долей микрона, но если учесть ту степень рельефности мерительных поверхностей самих мер, которая неизбежна при современных методах обработки поверхностей, а также принять во внимание применение в приборе механических контактов, то повышение чувствительности схемы представляется бесполезным. При большей чувствительности схемы было бы, кроме того, и трудно достичь достаточного постоянства ее показаний. В первых испытаниях прибора мы не надеемся получить точность измерения, большую даже десятых долей микрона. Испытание прибора в собранном виде будет проведено, как только закончится изготовление его механической части.

Чтобы избежать во время испытания электрического прибора влияния ошибки определения температуры мер на точность их измерения, предполагается первую стадию испытания прибора базировать на измерениях малых концевых мер, длиной, например, в 1—2 см. Измерение этих мер должно производиться в термоконстантном помещении, причем и измеряемые и образцовые меры должны перед измерением выдерживаться продолжительное время в этом помещении. Тогда можно будет измерять температуру мер с помощью ртутного термометра, расположенного весьма близко к мерам. В дальнейшем при измерении концевых мер на электрическом приборе для измерения температур мер вероятно нужно будет пользоваться термодарами.

§ 6. Некоторые недостатки метода емкости в отношении его применимости для измерения концевых мер длины с высокой точностью

Теоретическое изучение метода емкости показало, что этот метод, в отношении его применимости для точнейших измерений концевых мер длины, имеет следующие серьезные недостатки, не присущие, кстати сказать, интерференционному методу измерения концевых мер:

1. Применение метода емкости для точнейших измерений концевых мер длины невозможно без помощи механических контактов. Применение метода емкости по варианту, при котором поверхностью одной из пластин конденсатора служит сама мерительная поверхность измеряемой меры, может дать лишь среднюю длину прямых, параллельных оси меры и соединяющих каждые две противоположные точки ее мерительных поверхностей; целью же точного измерения концевой меры является всегда, как известно, определение ее срединной длины. Применение механических контактов при измерении мер не безвредно для мерительных поверхностей мер и, может быть, будет отрицательно отражаться на точности измерения мер.

2. При измерении концевых мер длины методом емкости образцовые и измеряемые меры устанавливаются поочередно в одно и то же место столика прибора. Последнее же обстоятельство заключает в себе недостаток метода измерения, во-первых, вследствие могущего происходить при нашей схеме механической части прибора опускания столика в момент перемены меры и, во-вторых, может быть, вследствие невозможности сравнивать в один и тот же момент измеряемую меру с образцовой после выравнивания их температур в результате продолжительного пребывания их установленными на приборе; при сличении концевых мер на интерференционном компараторе образцовая и измеряемая меры, как известно, одновременно устанавливаются на столик прибора.

Указанные недостатки метода емкости мы не считаем совершенно принципиальными и неустранимыми в будущем недостатками этого метода. Эти недостатки метода емкости, конечно, не исключают возможности применения его для точных измерений концевых мер длины и в настоящее время. Практика некоторых оптико-механических методов измерения концевых мер показала, что и при употреблении механических контактов возможно измерять длину мер с точностью до сотых долей

микрона. Что же касается недостатка, указанного выше, то влияние его нетрудно будет ослабить применением особой, но не сложной конструкции механической части прибора, а также может быть искусным изменением температуры измеряемых и образцовых мер длины.

Высокая чувствительность электрических емкостных приборов для измерения мер длины, а также удобство пользования такими приборами, обусловленное их электроизмерительной техникой, вероятно, будут способствовать внедрению этих приборов в практику метрологических учреждений и лабораторий заводов — изготовителей концевых мер длины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Philosophical Magazine, July—December, 1920, стр. 634.
2. Телеграфия и телефония без проводов, 1925, № 28, стр. 156.

Кроме того использованы следующие литературные источники:

3. H. Olken. Ultra-micrometer. Instruments, 1932, № 2.
4. F. C. Chard. An application of the thermionic valve to the measurement of physical quantities. Journal of Scientific Instruments, 1935, № 6.
5. Б. П. Бурлов. Автоматизация контроля линейных размеров изделий в машиностроении. Автоматика и Телемеханика, 1937, № 4.
6. Ф. Г. Рольт. Калибры и точные измерения. Перев. с англ. т. П. Л.—М. 1933, гл. XII. Электрические приспособления, применяемые для измерения перемещений.

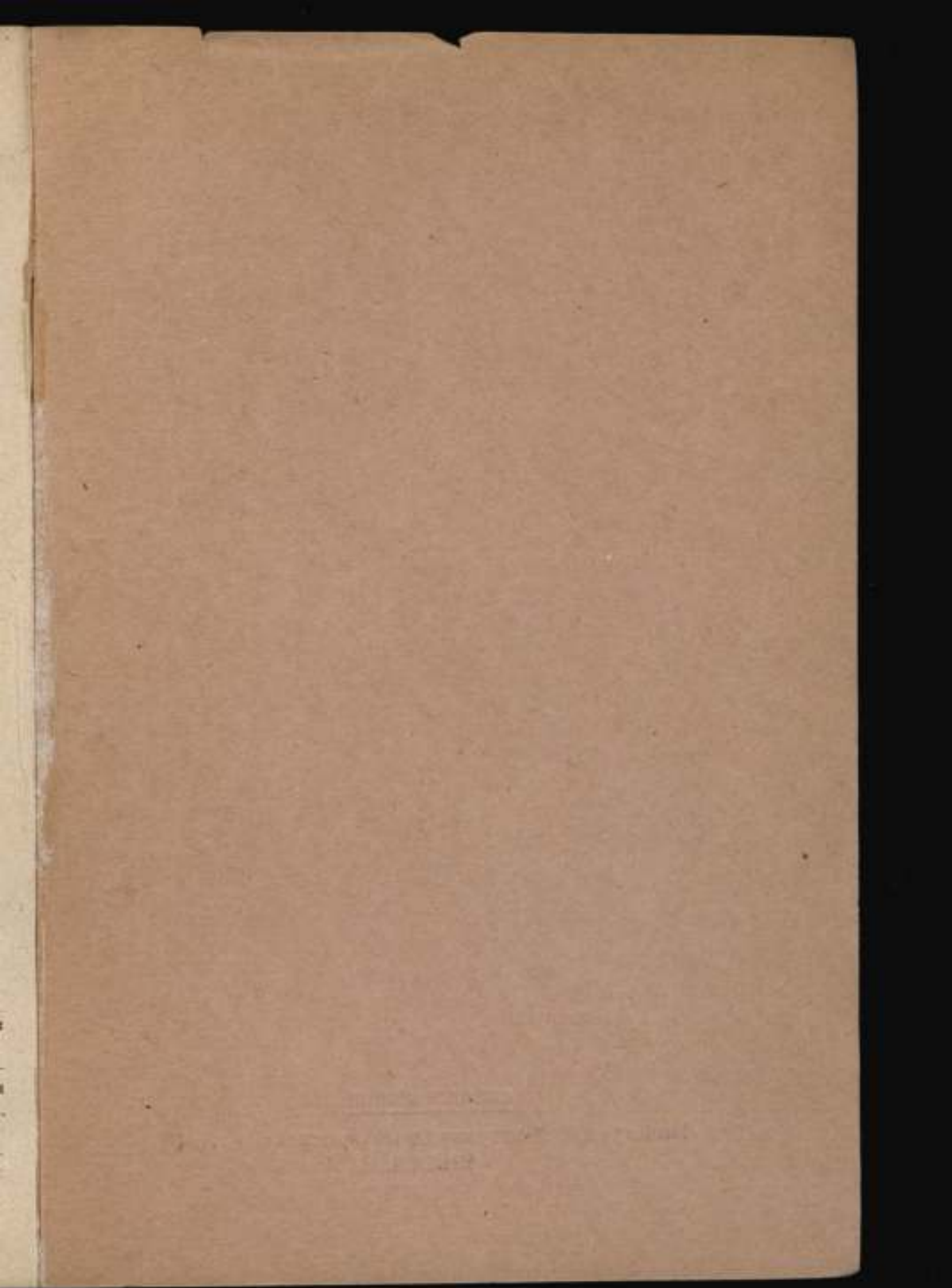
Отв. редактор *В. А. Баринюв*

Техн. редактор *П. В. Дворников*

Корректор *Н. П. Ивашкова*

Леноблгорлит № 2109. Сдано в производство 13/III 1939 г. Подписано к печати 21/IV 1939 г. Ст. форм. бум. $62 \times 88^{2/16}$. Колич. лвт. л. $9^{3/8}$. Колич. бум. л. $3^{1/2}$. Кол. печ. л. $6^{3/4}$. Кол. тип. зн. на бум. л. 111 000. Зак. № 700. Издание № 5. Тир. 1000

2-я типо-литография Гидрометеонздата. Ленинград, набережная 9 Января, 32



Цена 10 руб.

СКЛАД ИЗДАНИЯ:

Ленинград 5. Международный проспект, д. № 19.
ВНИИМ.