

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

ЛИНЕЙНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

ТРУДЫ ВНИИМ

ВЫПУСК 20 (80)

МАШГИЗ · 1953

КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

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

ЛИНЕЙНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

ТРУДЫ ВНИИМ

ВЫПУСК 20 (80)

Под редакцией

проф. д-ра техн. наук М. Ф. Романовой



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1953 ЛЕНИНГРАД

m/0738

В статьях сборника рассматриваются новые приборы и усовершенствования и предлагаются новые методы, имеющие целью увеличение точности измерений длины. Сборник предназначен для научных работников, инженеров и техников, работающих в области метрологии и точного машиностроения.

Ответственный редактор директор ВНИИМ *М. П. Павлов*

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

ПРЕДИСЛОВИЕ

В статьях настоящего сборника рассматриваются в основном вопросы, связанные с точными измерениями длины.

В статье М. Л. Бржезинского «Измерительная машина с автоколлимационной оптической системой для линейных измерений» приведено описание, методы юстировки и поверки концевой измерительной машины с автоколлимационной оптической системой, в создании которой принимали участие ведущие сотрудники лаборатории измерения длины в машиностроении ВНИИМ. Машина позволяет измерять концевые меры длиной до 12 метров. Создание подобной машины обеспечивает поддержание единства измерения в области мер большой длины.

В статье Л. К. Каяка «Об усовершенствовании методов сличения эталонов длины» описаны усовершенствования, внесенные в компараторы для сравнения длины штриховых мер, принадлежащие лаборатории мер длины ВНИИМ. Как известно, этими компараторами обеспечивается возможность сравнения штриховых мер с государственным эталоном метра; поэтому проведенная работа имеет весьма важное значение для поддержания единства и повышения точности измерения длины во всех областях народного хозяйства и особенно в области геодезии.

Введенные в компараторы усовершенствования обеспечивают применение объективных методов при установке микроскопов и осветителей, а также дают возможность следить за постоянством и равномерностью распределения температуры в двух сравниваемых мерах. Внесенные изменения имеют целью уменьшение систематических ошибок и увеличение достоверности результатов измерений длины. В статье приведены данные, позволяющие судить о степени неизменности рабочих эталонов длины.

В статье А. Н. Королевой «О точности метода калибровки шкал на стереокомпараторе» содержатся результаты тщательно проведенного на стереокомпараторе калибрования стеклянных шкал с достаточно совершенными штрихами.

Исследование погрешности этих измерений указывает на необходимость разработки новых, более точных методов определения исходной длины подобных шкал.

В статье А. Ю. Гиделя «К вопросу о погрешности за счет измерительного усилия при линейных измерениях» дается обоснование необходимости уменьшения измерительного усилия при измерении малых толщин и тел из материалов с малой твердостью.

В статье М. Г. Богуславского «Образцы с регулярным профилем для поверки и градуировки щуповых приборов» дано описание технологии изготовления и методов поверки образцов с регулярным профилем. Образцы с регулярным профилем, предлагаемые автором для поверки приборов, определяющих чистоту обработки поверхности, должны обеспечить, благодаря высокой степени однородности, получение наиболее однозначных результатов при поверках приборов разнообразных типов.

В статье Н. Н. Медведева «Динамический метод определения температурных коэффициентов удлинения тел» даны теоретические обоснования предлагаемого автором динамического метода измерения температурных коэффициентов удлинения и приведены результаты измерения этих коэффициентов указанным методом для ряда мер.

Несмотря на спорность некоторых теоретических предпосылок, автору удалось получить достаточную точность измерения при применении разработанного им метода. Работа заслуживает широкого обсуждения, принимая во внимание большие выгоды динамического метода в отношении сокращения времени, затрачиваемого на измерения.

Редактор

М. Л. БРЖЕЗИНСКИЙ

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ МАШИНА С АВТОКОЛЛИМАЦИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Развивающееся отечественное тяжелое машиностроение выдвигает требования к созданию специальных средств для измерения больших длин с высокой точностью. Как известно, в настоящее время применяются измерительные машины только до 6 метров. Автором этой статьи еще в 1940—1941 гг. были разработаны два проекта длинноизмерительных машин 7 метров и 15 метров¹. Учитывая, что изготовление цельной станины длиной 10—15 метров с точными направляющими представило бы большие технологические трудности, в проекте для 15-метровой машины была предусмотрена составная станина из отдельных звеньев, новая система шкал и правая бабка с «плавающей» шкалой. Эти предложения и легли в основу при разработке проекта 12-метровой машины, который был реализован во ВНИИМ в 1951 году.

В настоящей статье будут рассмотрены вопросы, касающиеся конструкции машины и ее оптической системы, имеющих принципиальное отличие от существующих типов измерительных машин и применяющихся впервые.

1. Устройство измерительной машины

К особенностям принятой конструкции машины нужно отнести: составную станину из трех отдельных звеньев, монтированных на цельном основании, переднюю измерительную бабку с подвижной стомиллиметровой шкалой на оси измерения и автоколлимационную оптическую систему.

Кинематическая схема измерительной машины представлена на рис. 1. Передняя измерительная бабка 1 имеет установочный микроскоп 2 и стомиллиметровую шкалу в цилиндрической оправе 3, которая имеет легкое и точное перемещение на шарикоподшипниковых роликах в направлении оси измерения;

¹ См. описание в книге А. Д. Рубинова, Измерение больших размеров в машиностроении, Машгиз, 1948, стр. 26.

перемещение цилиндрической оправы 3 фиксируется по шкале 4 и отсчетному микроскопу (на схеме не показан).

Цилиндрическая оправка со шкалой 4 находится под действием груза p , обеспечивающего постоянное измерительное давление.

Передняя бабка базируется на двух верхних и одной боковой направляющих станины при помощи роликов, смонтированных в нижней части корпуса. Это обеспечивает плавный и легкий ход передней бабки по направляющим станины. Хомутик 5 с винтом 6 обеспечивает микроподачу бабки при установке микроскопа 2 на штрихи шкалы 10. Задняя бабка 7 имеет пиноль 8 с устройством для микроподачи измерительного штифта 9 в направлении оси измерения. В корпусе задней бабки помещаются зеркала коллиматора и установочный микроскоп 13. Бабка перемещается

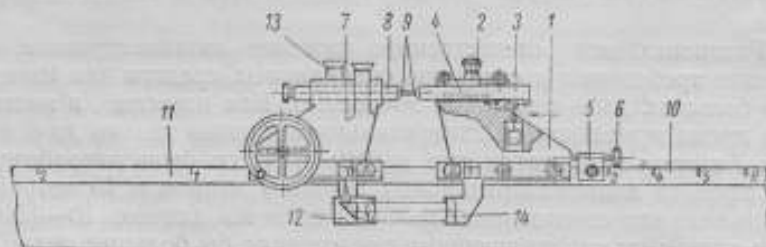


Рис. 1. Кинематическая схема машины с автоколлимационной оптической системой.

по направляющим станины при помощи зубчатой рейки, смонтированной на специальном приливе между направляющими, и шестерни, укрепленной на оси в нижней части корпуса бабки. Задняя бабка базируется на направляющих двумя верхними и одной боковой опорными площадками в нижней части корпуса. Для устранения люфта между бабкой и направляющими станины у передней бабки два боковых ролика крепятся на пружинящих оправках, чем и обеспечивается плотное прилегание двух других противоположных боковых роликов к базовой боковой направляющей станины. У задней бабки устранение люфта достигается пружинной планкой. Плотное прилегание по верхним направляющим обеспечивается силой тяжести.

На станине установлены две шкалы. Шкала 10 передней измерительной бабки 1, расположенная в головной части станины, имеет девять дециметровых интервалов; по этой шкале и установочному микроскопу 2 фиксируется положение передней бабки. Вторая шкала 11 имеет одиннадцать метровых интервалов, по которым и определяется положение задней бабки 7. Шкалы выполнены в виде металлических брусков со сквозными отверстиями, в которые вставлены стеклянные пластинки со штрихами и маркировкой. Шкала с дециметровыми интервалами выполнена на

одном массивном бруске; шкала с метровыми интервалами составлена из отдельных коротких брусков. Шкалы крепятся на специальном приливе станины между направляющими. Для ориентировочной установки бабок предусмотрены наружные шкалы сбоку станины.

Такая комбинация трех шкал дает возможность установить бабки машины на требуемый размер в пределах от 0 до 12 000 мм через 0,001 мм. Для исключения погрешностей, могущих возникнуть от перекоса бабок в процессе измерения или от непрямолинейности направляющих, применена автоколлимационная оптическая система, которая состоит из коллиматора 12, связанного с корпусом задней бабки, и зеркала 14, прикрепленного к основанию передней бабки.

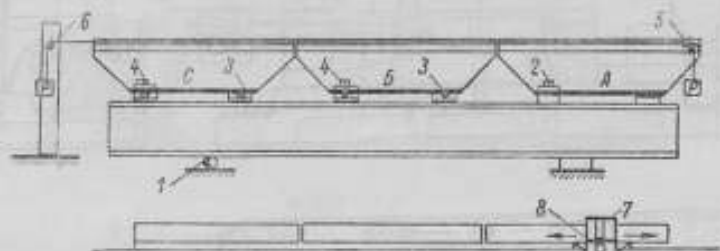


Рис. 2. Звенья составной станины на балках.

Роль компенсирующей оптической системы будет ясна из дальнейшего описания.

В принятой конструкции машины технологические трудности в части изготовления станины устраняются тем, что станина выполняется не цельной, а состоящей из отдельных звеньев, монтируемых на сплошном основании, в качестве которого были использованы две балки двутаврового профиля № 45 (рис. 2). Балки, жестко связанные между собой, покоятся на двух опорах фундамента. Расстояние между опорами выбрано из расчета, что при равномерной нагрузке на балки будет иметь место минимальная стрела прогиба их. Для избежания нежелательных деформаций, одна из опор 1 предусмотрена подвижной, на которой в случае температурных изменений балки могут свободно перемещаться на цилиндрической опоре. Три звена А, Б, С, представляющие собой отдельные станины, смонтированы на балках. Первая станина А установлена на трех точках и специальных регулировочных устройств не имеет, если не считать двух винтов 2, при помощи которых направляющие станины могут быть установлены в горизонтальной плоскости. Два других звена Б, С установлены на специальных башмаках 3, 4 — по два у каждого звена. Устройство башмаков понятно из чертежа, представленного на рис. 3.

Площадка 3, на которую опирается станина, при помощи винта 1 может перемещаться в горизонтальной плоскости, а при помощи винта 6 и клина 4 осуществляется подъем по высоте; хотя при этом и получаются незначительные смещения в горизонтальной плоскости, однако при помощи двух винтов легко достигается требуемое смещение станины в двух плоскостях. У каждого звена на одном башмаке предусмотрена опора, допускающая в случае температурных изменений свободное перемещение массы станины в осевом направлении. Отдельные звенья установлены с зазором на стыках 0,3—0,4 мм.

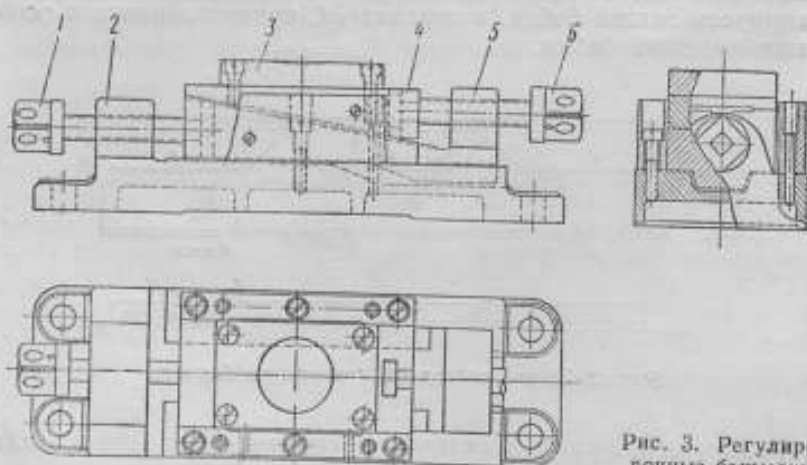


Рис. 3. Регулировочные башмаки.

Предварительная установка отдельных звеньев станины на балках производилась по чувствительному уровню и струне с применением микроскопа. Первое звено А (рис. 2) при помощи винтов 2 устанавливалось в горизонтальное положение по уровню. После этого два других звена устанавливались относительно первого при помощи регулировочных башмаков 3, 4. Регулировка верхних направляющих производилась по уровню, базовые боковые направляющие устанавливались по струне и микроскопу. Струна толщиной 0,2 мм была натянута на специальных регулируемых роликах; один ролик 5 крепился на конце первого звена станины, а второй — на стойке 6, расположенной вне станины. При помощи ползушки 7 с микроскопом 8 и подвижных роликов 5, 6 струна устанавливалась параллельно боковой направляющей первого звена А станины. Боковые направляющие второго и третьего звеньев устанавливались по направлению струны с помощью того же приспособления с микроскопом. Окончательная регулировка и повеска станины производились уже совместно с бабками по чувствительному коллиматору.

2. Инструментальные погрешности у измерительных машин и методы их компенсации

Для того чтобы иметь ясное представление о причинах, вызывающих погрешности, рассмотрим сначала механическую систему, в данном случае станину и бабки. Обозначим линией NN направляющие станины и совпадающую с ними плоскость шкалы (рис. 4), OA — расстояние от плоскости шкалы до линии измерения, AB — расстояние от оси, проходящей через штрих, на которой установлена бабка, до точки контакта измерительного накопечника. В процессе измерения могут иметь место повороты бабок, вызванные главным образом непрямолинейностью направляющих станины.

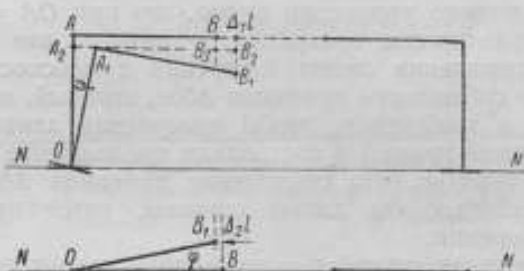


Рис. 4. Кинематическая схема.

Рассмотрим погрешности измерения, которые при этом могут возникнуть.

При повороте бабки вокруг оси, совпадающей со штрихом шкалы (на схеме след оси — точка O), на угол φ , точка контакта B переместится из B в B_1 .

При этом произойдет перемещение контактной точки в направлении линии измерения, а также в направлении, перпендикулярном измерительной оси; это последнее перемещение существенного значения не будет иметь, и поэтому будем рассматривать только составляющую перемещения точки контакта B в направлении измерительной оси. Обозначим эту составляющую через $\Delta_1 l$; нетрудно доказать, что

$$\Delta_1 l = OA \sin \varphi + A_1 B_1 \cos \varphi - A_2 B_2.$$

Из чертежа видно, что $A_1 B_1 = A_2 B_2 = AB$ и $OA_1 = OA$, тогда

$$\Delta_1 l = OA \sin \varphi - AB(1 - \cos \varphi).$$

Разложим $\cos \varphi$ в ряд и, ограничиваясь величинами второго порядка малости, возьмем $1 - \frac{\varphi^2}{2}$. . . , а для малых углов, вместо $\sin \varphi$, φ ; тогда получим:

$$\Delta_1 l = OA\varphi + AB \frac{\varphi^2}{2}. \quad (1)$$

Из этого уравнения видно, что основную погрешность будет вносить первый член; величина смещения $\Delta_1 l$ в направлении оси измерения, при постоянном значении OA (расстояние от плоскости шкалы до линии измерения), будет зависеть от угла перекоса φ . Нетрудно убедиться, как велико влияние угла перекоса φ . Так, например, при значении $OA = 150$ мм и $AB = 200$ мм, поворот бабки на угол $\varphi = 10^\circ$ вокруг оси, проходящей через плоскость штриха шкалы, дает смещение измерительного наконечника в направлении оси измерения, а следовательно, и ошибку результата измерения

$$\Delta_1 l = 0,0075 \text{ мм.}$$

Из приведенного уравнения видно, что при $OA = 0$ погрешность $\Delta_1 l$ практически превращается в нуль; это будет иметь место при совпадении линии измерения с плоскостью шкалы, т. е. в случае соблюдения принципа Аббе, который, как известно, заключается в требовании, чтобы измеряемая длина и шкала лежали на одной прямой и составляли продолжение друг друга. Само собой понятно, что соблюдение принципа Аббе в нашем случае потребовало бы длины станины, вдвое превышающей пределы измерения.

Мы рассмотрели случай поворота бабки вокруг оси, проходящей через плоскость штрихов, и возникающие при этом погрешности измерения, которые обычно называют погрешностями первого порядка. Легко убедиться, что эти же погрешности будут иметь место и в случае поворота бабки вокруг любой оси, параллельной штриху шкалы, на который установлена бабка, так как из кинематики известно, что вращение тела вокруг некоторой оси может быть заменено вращением вокруг любой иной оси, параллельной данной, и соответствующим перемещением; в нашем случае вращение бабки вокруг некоторой оси, параллельной штриху шкалы, эквивалентно вращению вокруг оси, совпадающей с этим штрихом, и двум перемещениям — вдоль измерительной оси и перпендикулярно ей. Следовательно, и в этом случае мы будем иметь составляющую перемещения в направлении оси измерения, которая и вызывает погрешности первого порядка.

Рассмотрим погрешности, могущие возникнуть от поворота бабки вокруг оси, перпендикулярной плоскости деления шкалы, а также вокруг оси, параллельной линии измерения.

При повороте бабки вокруг оси O , перпендикулярной к плоскости шкалы, на угол φ , точка контакта из положения B переместится в положение B_1 (рис. 4, внизу); при этом произойдет смещение точки B и в направлении линии измерения на величину $\Delta_2 l$, значение которой определится из уравнения

$$\Delta_2 l = OB (\cos \varphi - 1).$$

Разложив $\cos \varphi$ в ряд и ограничиваясь двумя членами ряда, получим для $\Delta_2 l$ в конечном виде уравнение

$$\Delta_2 l = OB \frac{\varphi^2}{2}. \quad (2)$$

Легко видеть, что в этом случае, для того же значения $\varphi = 10^\circ$, погрешность от смещения точки контакта в направлении оси измерения будет ничтожно малой.

Вращение бабки вокруг оси, параллельной линии измерения, может вызвать только смещение контактной точки в направлении, перпендикулярном линии измерения, которое не может дать существенных погрешностей. Из результатов приведенного ана-

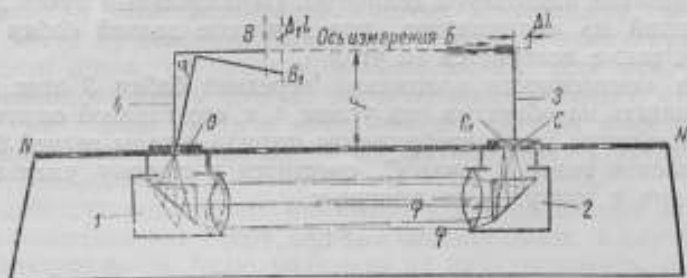


Рис. 5. Оптическая схема, компенсирующая ошибки от перекосов бабок в одной плоскости.

лиза видно, что погрешности первого порядка возникают при повороте бабок вокруг оси, совпадающей с плоскостью штрихов шкалы и параллельных ей. Изготовление станины, у которой прямолинейность направляющих и пригонка бабок при их взаимодействии обеспечили бы точность, превышающую 10° , представляло бы большие технологические трудности. У существующих машин применяется специальная оптическая система, которая исключает погрешности первого порядка от поворота бабок вокруг оси, совпадающей с плоскостью штрихов шкалы и параллельных ей.

Обратимся снова к кинематической схеме машины, но уже с оптической системой (рис. 5). Здесь коллиматор 1 и объектив 2, жестко связанные с бабками, расположены с таким расчетом, что фокальная плоскость коллиматора совпадает с плоскостью штрихов шкалы задней бабки, а фокальная плоскость объектива — с плоскостью шкалы передней бабки. Кроме того, линия измерения отстоит от плоскости шкал на величину фокусного расстояния объективов; иначе говоря, измерительная ось машины находится на двойном фокусном расстоянии объектива и коллиматора (учитывая, конечно, изменение направления лучей в призмах). При установке задней бабки 4 на штрих шкалы, коллиматор 1 посылает параллельный пучок на объектив 2 передней бабки 3,

вследствие чего изображение этого штриха мы наблюдаем в плоскости другой шкалы. Пусть изображение этого штриха совпадает с каким-либо штрихом шкалы передней бабки и наблюдается через установочный микроскоп в точке C . Теперь повернем заднюю бабку на некоторый угол φ вокруг оси, проходящей через плоскость штриха шкалы. Как мы уже видели, при этом точка контакта измерительного наконечника с мерой переместится из B в B_1 на некоторую величину $\Delta_1 l$. Вместе с перемещением точки контакта наконечника задней бабки переместится вдоль линии измерения и мера, которая, в свою очередь, сместит точку контакта B подвижного наконечника правой бабки на ту же величину, вследствие чего отсчетный микроскоп даст преувеличенное на $\Delta_1 l$ показание измеряемой величины. Параллельный пучок лучей, выходящий из коллиматора, при повороте задней бабки 4 на угол φ , также повернется на угол φ .

При неизменности положения передней бабки 3 этот пучок будет падать на объектив под углом φ к его главной оптической оси. Вследствие этого изображение штриха шкалы задней бабки, наблюдаемое ранее в точке C , сместится в сторону уменьшения показания в точку C_1 на величину

$$\Delta l = F \operatorname{tg} \varphi,$$

где F — фокусное расстояние объектива. Для того чтобы изображение штриха привести в прежнее положение (т. е. в совпадение с тем же штрихом шкалы передней бабки), необходимо сместить переднюю бабку на расстояние Δl ; при этом показание по шкале правой бабки уменьшится на ту же величину Δl . Теперь нам остается показать, полностью ли компенсируется при этом перемещении передней бабки на расстояние Δl та величина $\Delta_1 l$, которая получилась вследствие поворота бабки на угол φ .

Мы имели уравнение (1) для

$$\Delta_1 l = OA \sin \varphi + AB \frac{\varphi^2}{2}.$$

Так как в данном случае OA — расстояние от плоскости шкалы до линии измерения — равно фокусному расстоянию объектива F , то получим:

$$\Delta_1 l = F \sin \varphi + AB \frac{\varphi^2}{2},$$

а значение

$$\Delta l = F \operatorname{tg} \varphi.$$

Требуется найти разность между $\Delta_1 l$ и Δl . Обозначим ее через η , тогда $\eta = \Delta_1 l - \Delta l$; подставляя значения $\Delta_1 l$ и Δl из предыдущих уравнений (1, 2), получим:

$$\eta = F (\sin \varphi - \operatorname{tg} \varphi) + AB \frac{\varphi^2}{2}.$$

Из разложения в ряд $\sin \varphi$ и $\operatorname{tg} \varphi$ нетрудно видеть, что значение $(\sin \varphi - \operatorname{tg} \varphi)$ будет величиной третьего порядка малости $\frac{\varphi^3}{2}$. Остается член $AB \frac{\varphi^3}{2}$, который, как мы видели, вносит погрешности второго порядка.

Все изложенное будет справедливо также и для передней бабки, так как ее объектив и призма совершенно такие же, как и у задней бабки.

Таким образом, применение этой оптической системы даст возможность, при несоблюдении принципа Аббе, избежать ошибок первого порядка, происходящих от поворота бабок вокруг осей, совпадающих с плоскостью штрихов и параллельных им. Однако при этой оптической системе погрешности, могущие иметь место от поворота бабок вокруг осей, перпендикулярных плоскости шкал, не будут компенсироваться. Для исключения их необходимо иметь точную боковую направляющую станины. Кроме того, надо иметь в виду, что эта система компенсирует погрешности только от смещения контактной точки в направлении линии измерения.

В действительности же мы имеем у измерительных наконечников плоскость или сферу, и при повороте бабок, в случае плоских наконечников, будет нарушена их параллельность, а в случае сферических — будет смещение контактных точек относительно их первоначального положения. В том и другом случае, при измерении мер на машине, будут иметь место ошибки, которые никак не учитываются и не компенсируются при этой оптической системе.

Таким образом, применение этой системы требует достаточно точных направляющих станины.

Так например, у 6-метровой машины фирмы К. Цейсс отклонение от прямолинейности, при перемещении левой бабки, на всей длине не превышает $10 - 15''$. Учитывая, что достигнуть такой точности направляющих у составной станины 13 метров длины представило бы большие трудности, автор предложил новую автоколлимационную систему, при которой могут быть допущены значительно большие отклонения от прямолинейности направляющих станины без ущерба для точности измерения.

3. Бабки с автоколлимационной оптической системой

Кинематическая схема измерительных бабок с автоколлимационной оптической системой представлена на рис. 6. С корпусом левой бабки соединена труба коллиматора 2. Окуляр коллиматора 3 и зеркала, для удлинения пути луча, вмонтированы в корпусе бабки. Таким путем, при малых габаритах трубы, мы имеем длиннофокусный коллиматор высокой чувствительности (фокус объектива 800 мм). Верхняя часть корпуса левой бабки с коллиматором и установочным микроскопом 13 может поворачиваться

в вертикальной и горизонтальной плоскостях на опорных шарнирах 9 и 10 вокруг осей O и O_1 . Для того чтобы при поворотах бабки не происходило больших смещений микроскопа относительно штриха шкалы, ось вращения O должна приблизительно совпадать с осью штриха шкалы, а ось O_1 должна быть перпендикулярна плоскости шкалы и проходить приблизительно в центральной части штриха. Незначительные смещения установоч-

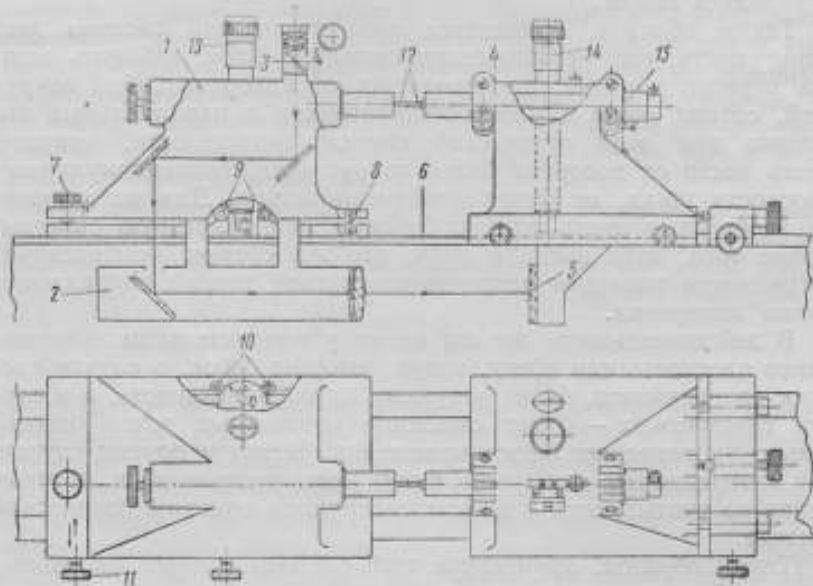


Рис. 6. Бабки с автоколлиматором для измерения больших длин.

ного микроскопа 13 относительно штриха шкалы при поворотах бабки не будут иметь значения, так как последующим поступательным перемещением бабки по направляющим станины микроскоп устанавливается точно на штрих шкалы. Правая бабка снабжена таким же установочным микроскопом 14 и зеркалом 5 , которое на кронштейне прикреплено к основанию бабки.

Труба коллиматора и зеркало помещаются во внутренней полости станины. Изображение креста окулярной сетки коллиматора, отраженное от зеркала 5 , при определенных условиях будет наблюдаться в фокальной плоскости окуляра 3 и, поворотами с помощью микровинтов 7 и 11 корпуса левой бабки в двух плоскостях нити креста окулярной сетки и его изображение, отраженное от зеркала 5 , могут быть совмещены. В данном случае мы будем иметь автоколлимационную систему достаточно высокой чувствительности; совмещение наблюдаемого в окуляре 3 креста с крестом, отраженным от зеркала правой бабки, будет

соответствовать строго определенному положению трубы коллиматора и связанному с ней корпусу бабки, а следовательно, и положению измерительного наконечника левой бабки относительно наконечника правой бабки.

Как известно, перемещения трубы коллиматора (без поворота) в направлении, перпендикулярной пучку света, не могут быть отмечены коллиматором, но эти перемещения, если бы они имели место в некоторых пределах, не могут вносить погрешностей при измерении на машине. В зависимости от конструкции машины и системы шкал, бабки могут быть или обе подвижные, или только левая подвижная. Как мы уже видели, у 12-метровой машины обе бабки подвижные; правая бабка перемещается

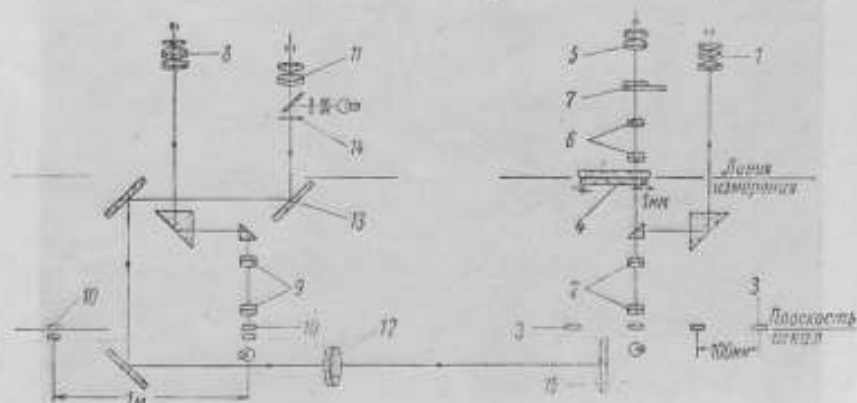


Рис. 7. Оптическая схема машины для измерения больших длин.

в пределах 9 дециметров, а левая в пределах 11 метров. Устанавливая бабки сначала в нулевое (исходное) положение по установочным микроскопам 13 и 14, наблюдая в окуляр коллиматора 3, микровинтами 7 и 11 совмещают вертикальные и горизонтальные нити креста коллиматора.

После этого левая и правая бабки перемещаются на требуемые интервалы и фиксируются по установочным микроскопам 13 и 14.

Если после этой установки будет наблюдаться смещение перекрестий коллиматора, то тем же приемом производится совмещения перекрестий и окончательная точная установка левой бабки на штрих шкалы по установочному микроскопу 13.

В этой системе будут исключены погрешности от возможных перекосов бабок в двух плоскостях; при этом не нарушается, восстанавливается параллельность измерительных плоскостей наконечников левой и правой бабок. При этой оптической системе могут быть допущены значительно большие отклонения от прямолинейности направляющих станины, чем у машины с оптической системой, компенсирующей погрешности от перекоса бабок только в одной плоскости.

Оптическая схема машины представлена на рис. 7.

Здесь 1 и 2 — окуляр и объектив установочного микроскопа передней бабки.

5, 6 и 7 — окуляр, объектив и спиральный нониус отсчетного микроскопа стомиллиметровой подвижной шкалы 4.

3 — пластинки со штрихами (шкала с дециметровыми интервалами).

15 — зеркало коллиматора.

11, 12 — окуляр и объектив коллиматора.

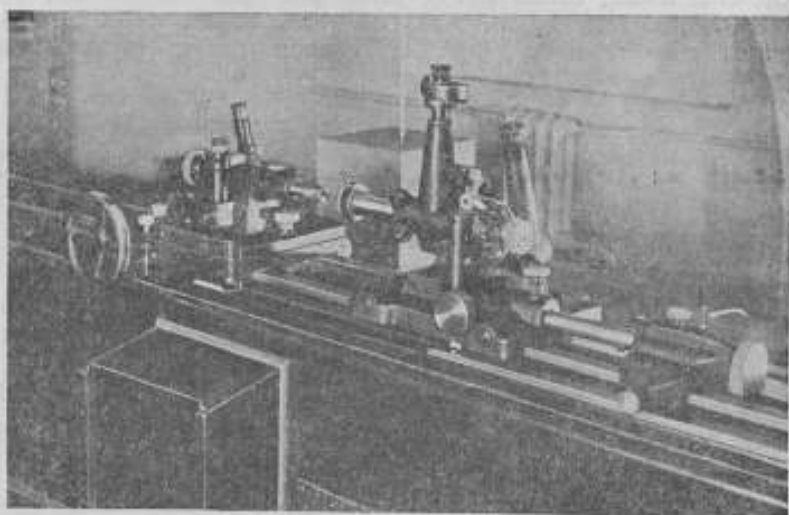


Рис. 8. Общий вид измерительных бабок, установленных в нулевое положение.

8 и 9 — окуляр и объектив установочного микроскопа задней бабки.

10 — пластинки со штрихами (шкала с метровыми интервалами).

На рис. 8 показаны бабки машины, установленные в нулевое (исходное) положение.

4. Юстировка и проверка машины

Проверке машины предшествовала ее юстировка, которая производилась по отдельным узлам в процессе сборки машины. Юстировка и проверка шкалы с метровыми интервалами производилась в процессе крепления отдельных брусков шкалы, с применением специальной дополнительной бабки с трубкой оптиметра¹

¹ Дополнительная бабка для проверки машин впервые была предложена Горьковским управлением.

(рис. 9). Применение дополнительной бабки дает возможность концевой мерой в 1000 мм производить юстировку и поверку шкалы на всей длине машины. Сущность этого метода заключается в том, что после установки первого метрового интервала, обычным методом по концевой мере, положение левой бабки фиксируется дополнительной бабкой, которая укрепляется на направляющих станины, и наконечник трубки оптиметра приводится в контакт с наконечником левой бабки.

После этого левая бабка перемещается на следующий интервал (в нашем случае на 1 м) и мера 1000 мм помещается уже между

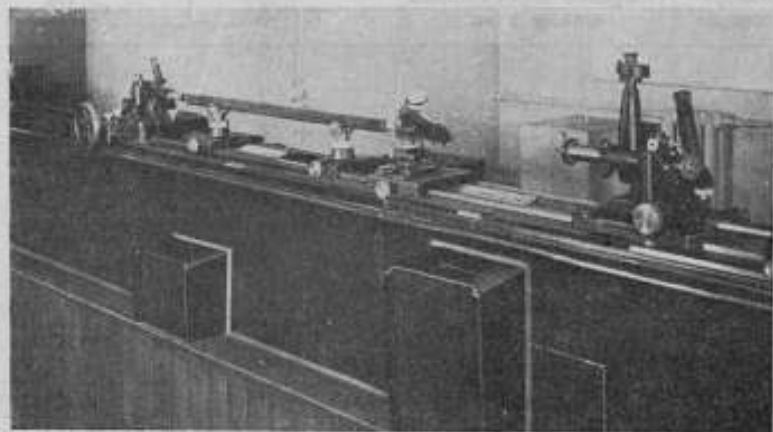


Рис. 9. Поверка шкалы с дополнительной бабкой.

дополнительной бабкой и левой бабкой машины (рис. 9). После поверки этого интервала мера снимается, а положение левой бабки на станине машины снова фиксируется дополнительной бабкой; после этого левая бабка перемещается на следующий интервал шкалы и т. д.

Этим методом и была произведена установка метровых интервалов и поверка шкалы на всей длине. Точность этого метода была определена на основании обработки результатов многократных независимых измерений отдельных интервалов.¹ Поверка 12-метровой машины производилась на протяжении трех недель; при поверке допускалось изменение температуры машины и меры до $\pm 0,3^\circ$ от нормальной температуры 20°C . В результате обработки многократных независимых измерений, произведенных на трех интервалах: 1000—2000 мм, 5000—6000 мм и 7000—8000 мм, была определена предельная погрешность отдельного измерения

¹ Этот метод впервые был исследован в ХГИМИП на 3-метровой измерительной машине.

метрового интервала (без учета погрешности аттестации конечной меры, по которой производилась поверка).

Как видно из данных, приведенных в табл. 1, 2 и 3, предельные погрешности аттестации шкалы на отдельных интервалах несколько отличаются, что и должно было иметь место, так как при измерениях допускалось изменение температуры; этим преследовалась цель установить предельную погрешность поверки

Таблица 1

| Интервал шкалы (в 0—2000 мм) | | | |
|--|----------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| № измерения | Поправка к показаниям шкалы в мк | $v_i \cdot 10^2$ | $v_i^2 \cdot 10^4$ |
| 1 | +2,25 | - 2 | 4 |
| 2 | +2,35 | + 8 | 64 |
| 3 | +0,75 | -152 | 23104 |
| 4 | +2,35 | + 8 | 64 |
| 5 | +1,70 | - 57 | 3249 |
| 6 | +1,60 | - 67 | 4489 |
| 7 | +2,05 | - 22 | 484 |
| 8 | +1,15 | -112 | 12544 |
| 9 | +3,05 | + 78 | 6084 |
| 10 | +3,65 | +133 | 19044 |
| 11 | +3,70 | +143 | 20449 |
| 12 | +2,70 | + 43 | 1849 |
| Средн. = + 2,27 | | $\sum v_i^2 = 91428 \cdot 10^{-4}$ | |
| $\sigma_{1000-2000} = \pm \sqrt{\frac{91428 \cdot 10^{-4}}{11}} = \pm 0,91 \text{ мк}$ $3\sigma_{1000-2000} = \pm 2,73 \text{ мк}$ | | | |

машины в условиях температурного режима, изменяющегося в некоторых пределах. Примем за окончательный результат среднее значение из трех интервалов:

$$3\sigma_{\text{ср}} = \pm \sqrt{\frac{(2,73)^2 + (2,4)^2 + (3,93)^2}{3}} = \pm 3 \text{ мк}.$$

Если учесть, что при поверке поправки определяются из трех независимых измерений, то полученное значение предельной

Таблица 2

| Интервал шкалы 5000—6000 мм | | | |
|---|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| № измерений | Поправка к показаниям шкалы в мм | $v_i \cdot 10^2$ | $v_i^2 \cdot 10^4$ |
| 1 | +0,75 | + 21 | 441 |
| 2 | +0,15 | - 39 | 1521 |
| 3 | +0,15 | - 39 | 1521 |
| 4 | +1,35 | + 81 | 6561 |
| 5 | +2,10 | +156 | 24336 |
| 6 | +0,40 | - 14 | 196 |
| 7 | -0,20 | - 74 | 5476 |
| 8 | +0,70 | + 16 | 256 |
| 9 | -0,50 | -104 | 10816 |
| Среди. = + 0,54 | | $\Sigma v_i^2 = 51124 \cdot 10^{-4}$ | |
| $\sigma_{5000-6000} = \pm \sqrt{\frac{51124 \cdot 10^{-4}}{8}} = \pm 0,80 \text{ мм}$ $3\sigma_{5000-6000} = \pm 2,40 \text{ мм}$ | | | |

Таблица 3

| Интервал шкалы 7000—8000 мм | | | |
|---|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| № измерений | Поправка к показаниям шкалы в мм | $v_i \cdot 10^2$ | $v_i^2 \cdot 10^4$ |
| 1 | +10,6 | - 67 | 4489 |
| 2 | + 8,05 | -188 | 35344 |
| 3 | +11,2 | +127 | 16129 |
| 4 | +10,1 | + 17 | 289 |
| 5 | +12,3 | +237 | 56169 |
| 6 | +11,1 | +117 | 13689 |
| 7 | + 9,7 | - 23 | 529 |
| 8 | +10,5 | + 57 | 3249 |
| 9 | + 9,6 | - 33 | 1089 |
| 10 | + 8,0 | -193 | 37249 |
| 11 | + 8,55 | -133 | 19044 |
| 12 | + 9,5 | - 43 | 1849 |
| Среди. = + 9,93 | | $\Sigma v_i^2 = 189118 \cdot 10^{-4}$ | |
| $\sigma_{7000-8000} = \pm \sqrt{\frac{189118 \cdot 10^{-4}}{11}} = \pm 1,31 \text{ мм}$ $3\sigma_{7000-8000} = 3,93 \text{ мм}$ | | | |

погрешности должно быть уменьшено в $\sqrt{3}$ раза, в результате будем иметь:

$$3\sigma_{1000} = \frac{3}{\sqrt{3}} = \pm 1,73 \text{ мк.}$$

Это будет предельная погрешность поверки метрового интервала шкалы без учета погрешности аттестации концевой меры. Учитывая предельную погрешность концевой меры (для метровой меры третьего разряда ± 2 мк), найдем предельную погрешность поверки каждого интервала шкалы. Погрешность интервала 0—1000 мм определится в результате суммирования найденной предельной погрешности метода поверки метрового интервала и предельной погрешности аттестации концевой меры. Предельная погрешность интервала 0—2000 мм будет складываться из погрешности поверки первого метрового интервала и погрешности поверки интервала 1000—2000 мм и т. д.

Таблица 4

| Интервалы шкалы в мм | Предельная погрешность поверки в мк |
|----------------------|--|
| 0—50 | $3\sigma_0 = \pm 1$ |
| 0—1000 | $3\sigma = \pm \sqrt{(1,73)^2 + (2)^2} = \pm 2,6$ |
| 0—2000 | $3\sigma = \pm \sqrt{2 \cdot (1,73)^2 + (2 \cdot 2)^2} = \pm 4,7$ |
| 0—3000 | $3\sigma = \pm \sqrt{3 \cdot (1,73)^2 + (3 \cdot 2)^2} = \pm 6,7$ |
| 0—4000 | $3\sigma = \pm \sqrt{4 \cdot (1,73)^2 + (4 \cdot 2)^2} = \pm 8,7$ |
| 0—5000 | $3\sigma = \pm \sqrt{5 \cdot (1,73)^2 + (5 \cdot 2)^2} = \pm 10,7$ |
| 0—6000 | $3\sigma = \pm \sqrt{6 \cdot (1,73)^2 + (6 \cdot 2)^2} = \pm 12,7$ |
| 0—7000 | $3\sigma = \pm \sqrt{7 \cdot (1,73)^2 + (7 \cdot 2)^2} = \pm 14,7$ |
| 0—8000 | $3\sigma = \pm \sqrt{8 \cdot (1,73)^2 + (8 \cdot 2)^2} = \pm 16,7$ |
| 0—9000 | $3\sigma = \pm \sqrt{9 \cdot (1,73)^2 + (9 \cdot 2)^2} = \pm 18,7$ |
| 0—10000 | $3\sigma = \pm \sqrt{10 \cdot (1,73)^2 + (10 \cdot 2)^2} = \pm 20,7$ |
| 0—11000 | $3\sigma = \pm \sqrt{11 \cdot (1,73)^2 + (11 \cdot 2)^2} = \pm 22,7$ |
| 0—12000 | $3\sigma = \pm \sqrt{12 \cdot (1,73)^2 + (12 \cdot 2)^2} = \pm 24,7$ |

Предельные погрешности поверки всех интервалов 12-метровой шкалы приведены в табл. 4. Предельная погрешность поверки участка малой (нулевой) длины была определена аналогичным методом по рассеянию показаний машины, при соприкасающихся наконечниках правой и левой бабки и при установленной концевой мере 50 мм. Предельная погрешность поверки малого участка шкалы:

$$3\sigma_0 = \pm 1 \text{ мк.}$$

Как видно из графика (рис. 10), погрешность аттестации шкалы будет линейной функцией от длины интервала шкалы. Уравне-

ние этой прямой будет формулой для подсчета погрешности поверки машины на любом интервале:

$$\pm \sigma = \pm (1 + 2 \cdot 10^{-9} L) \text{ мк},$$

где L — длина интервала шкалы в мм. Само собой понятно, что эта формула будет справедлива при условии соблюдения заданного температурного режима ($20^\circ \text{C} \pm 0,3^\circ$).

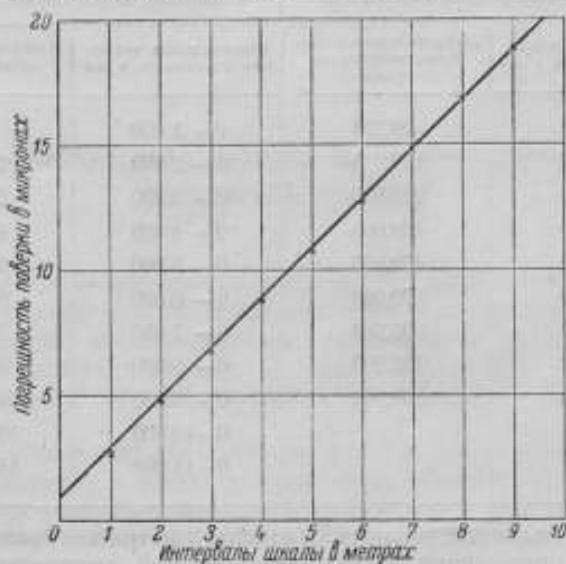


Рис. 10.

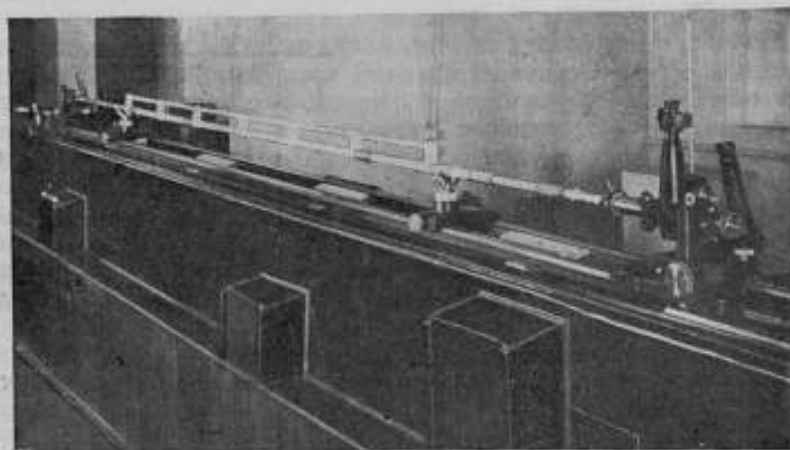


Рис. 11. Общий вид машины с установленной концевой мерой.

Поверка метровой шкалы с дециметровыми подразделениями производилась обычным методом по концевым мерам 2-го разряда. Действительные значения шкал с метровыми и дециметровыми интервалами приведены в табл. 5.

Таблица 5

| Шкала с дециметровыми интервалами | | Шкала с метровыми интервалами | |
|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---|
| Номинальные значения интервалов в мм | Действительные значения интервалов в мм | Номинальные значения интервалов в мм | Действительные значения интервалов в мм |
| 0—100 | 99,998 | 0—1 000 | 999,999 |
| 0—200 | 199,975 | 0—2 000 | 2 000,002 |
| 0—300 | 299,989 | 0—3 000 | 3 000,007 |
| 0—400 | 400,006 | 0—4 000 | 4 000,006 |
| 0—500 | 499,983 | 0—5 000 | 5 000,015 |
| 0—600 | 599,988 | 0—6 000 | 6 000,019 |
| 0—700 | 699,984 | 0—7 000 | 7 000,020 |
| 0—800 | 799,992 | 0—8 000 | 8 000,025 |
| 0—900 | 899,992 | 0—9 000 | 9 000,034 |
| | | 0—10 000 | 10 000,049 |
| | | 0—11 000 | 11 000,057 |

Результаты исследования двенадцатиметровой машины показали, что применение автоколлимационной оптической системы оправдало себя — при этой системе могут быть допущены значительные отклонения от прямолинейности направляющих станины без ущерба точности машины.

На рис. 11 представлен общий вид машины с установленной концевой мерой. Основание станины изолировано от температурных воздействий деревянной обшивкой, а станина — металлическим кожухом с воздушным промежутком между телом станины и кожухом. Машина установлена в специальном помещении, где автоматически поддерживается требуемый температурный режим.

Работы по конструированию бабок и регулировочных устройств для станины выполнены инженерами конструкторского бюро Степановым В. С. и Брюсовой Т. Н. Изготовление, сборка и юстировка производилась заводом «Эталон». Оптические детали шкал изготовлены Ленинградским оптическим заводом.

В работе по созданию машины принимали участие ведущие сотрудники лаборатории и руководитель отдела проф. доктор В. Г. Махровский.

Л. К. КАЯК

ОБ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИИ МЕТОДОВ СЛИЧЕНИЯ ЭТАЛОНОВ ДЛИНЫ

Точность сличений эталонов длины до самого недавнего времени в несколько раз превосходила точность технических измерений. В связи с значительным техническим прогрессом отечественного машиностроения и приборостроения, требования, предъявляемые к точности технических измерений, значительно возросли.

Чтобы удовлетворить эти возросшие требования науки и промышленности к точности измерений, должна быть повышена точность передачи единицы длины от основного государственного эталона к образцовым и рабочим мерам, т. е. точность сличения эталонов длины.

Эталонами длины являются штриховые меры, и повышение точности их сличения может идти по двум направлениям. Одно направление заключается в улучшении качества штрихов, определяющих длину эталонов, а другое — в усовершенствовании методов сличения эталонов и компараторов, при помощи которых производится это сличение.

Предстоящий переход на новое определение длины метра в длинах световых волн, когда в качестве эталонов будут применяться также и концевые меры длины, еще более усиливает необходимость усовершенствования компараторных сличений штриховых эталонов длины.

Переход от концевых мер к штриховым сопровождается дополнительной погрешностью, которая должна быть компенсирована общим повышением точности сличений.

В настоящей статье описываются выполненные нами работы по усовершенствованию компараторов ВНИИМ и методов сличения эталонов длины. Производится также анализ погрешностей и оценка точности результатов сличений эталонов длины.

В последней главе приводятся результаты послевоенных сличений и исследований эталонов длины.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПАРАТОРОВ ВНИИМ И МЕТОДОВ
СЛИЧЕНИЯ ЭТАЛОНОВ ДЛИНЫ

1. Пути повышения точности сличения эталонов

Одним из эффективных средств повышения точности сличения эталонов длины в настоящее время считается улучшение качества штрихов эталонов.

Длина штриховой меры определяется наикратчайшим расстоянием между осями штрихов, ограничивающих данную меру. У эталонов длины это расстояние измеряется вдоль оси эталона, проходящей между двумя продольными чертами, нанесенными на нейтральной плоскости эталона на расстоянии 0,2—0,3 мм друг от друга. При сличении эталонов на компараторе подвижная пара нитей окулярного микрометра микроскопа компаратора наводится на изображение штриха эталона так, чтобы штрих находился посередине между нитями микрометра, симметрично относительно каждой из них. Наблюдатель во время измерений не определяет положение оси штриха, а пользуется целиком той частью штриха, которая ограничена двумя продольными осями линиями. Поэтому особенно важно, чтобы штрихи эталонов длины были хорошего качества.

Чем выше качество штрихов эталона, тем с большей точностью можно будет навести пару нитей микрометра на штрих и тем точнее будет определена длина эталона. Штрихи эталонов длины должны иметь прямые и ровные края, симметричные относительно оси штриха. Изображение рассматриваемого в микроскоп штриха должно быть четким. Для этого необходима отличная полировка плоскости, на которой наносятся штрихи, и достаточная глубина самих штрихов. Опыт показывает, что ширина штрихов у эталонов длины не должна превышать 3—5 мк.

Платино-иридиевые эталоны длины: метр № 28, метр № 11 и специальная мера П4, изготовление которых производилось в 1876—1894 г., имеют штрихи шириной от 8 до 13 мк.

Рабочие эталоны длины, изготовлявшиеся в 1905—1930 гг., имеют штрихи шириной от 5 до 9 мк.

Таким образом, большинство существующих эталонов длины имеют штрихи, недостаточно удовлетворительные по своему качеству.

У рабочих эталонов качество штрихов несколько лучше не только потому, что они изготовлялись в среднем на 30 лет позднее, но и потому, что они изготовляются из никелевой стали, которая легче и лучше полируется.

Улучшить качество штрихов у платино-иридиевых эталонов можно как путем некоторой подчистки имеющихся штрихов, так и путем нанесения совершенно новых штрихов.

Подчистка штрихов, судя по опыту Международного бюро мер и весов, не всегда дает желаемые результаты. Техника же нанесения новых штрихов в настоящее время настолько совершенна, что получение штрихов с ровными и прямыми краями, правильным профилем сечения и шириной порядка 3—4 мк вполне осуществимо. Это подтверждается опытом лаборатории мер длины ВНИИМ, выполнившей еще в 1933—1934 гг. работы по нанесению шкалы штрихов шириной около 5 мк на платино-иридиевом метре М20°.

В 1950 г. в лаборатории были нанесены штрихи на платино-иридиевом концевом метре № 2, который в будущем будет служить штрихо-концевым эталоном сравнения. Штрихи были нанесены вблизи концов метра № 2 на тщательно отполированных небольших участках нейтральной плоскости. Благодаря хорошей полировке этих площадок штрихи получились хорошего качества и шириной около 3 мк. Поэтому будет вполне своевременно поставить вопрос также и об нанесении новых штрихов у некоторых из существующих платино-иридиевых эталонов метра.

Ведя подготовительные работы к нанесению новых штрихов и работы по созданию новых эталонов, лаборатория мер длины вела работы и по второму направлению — по пути усовершенствования компараторов и компараторных методов сравнения эталонов.

Лаборатория мер длины ВНИИМ имеет два компаратора — малый однометровый универсальный компаратор и большой четырехметровый «геодезический» компаратор.

Компараторы ВНИИМ уже подвергались некоторым изменениям и улучшениям: у микроскопов компараторов были поставлены новые объективы, были заменены окулярные микрометры и т. п. Все эти усовершенствования, однако, не вносили каких-либо изменений в конструкцию компаратора, в методику компараторных измерений. В противоположность этому настоящая работа имела своей целью повышение точности компараторных сличений за счет частичного изменения самой конструкции некоторых узлов компаратора.

В дальнейшем предполагается изготовить новые микроскопы с измененной оптической системой и отсчетными приспособлениями (например, оптическими микрометрами), основанными на иных, более совершенных, чем применяющиеся сейчас окулярные микрометры, принципах.

Основными погрешностями измерений при сличении эталонов длины компараторными методами являются погрешности: инструментальные, оптические и температурные [1]. Наибольшими из них по своей величине являются погрешности, происходящие из-за неправильного освещения наблюдаемых в микроскоп штрихов, и погрешности температурные (недостаточная точность измерения температуры, неодинаковая температура сличаемых мер, необходимость приведения длины мер к определенной температуре: 0° или 20° С).

Для уменьшения величины этих погрешностей в 1947—1948 гг. у однометрового компаратора была изменена конструкция держателей микроскопов и были изготовлены новые поворачивающиеся осветители.

Была изготовлена также установка для измерения температуры сличаемых на компараторе эталонов при помощи дифференциальных термодар.

В 1950—1951 гг. подобные работы были проведены и у четырехметрового компаратора.

2. Усовершенствование микроскопов компаратора

Неправильное освещение штрихов, рассматриваемых в микроскопы компаратора, искажает их изображение и может вызвать погрешности в результатах измерений, достигающие нескольких микронов.

Для исключения этих погрешностей, возникающих как вследствие неправильностей в установке осветителей, так и благодаря неправильному положению самих микроскопов, в последнее время стали применяться оборачивающиеся микроскопы [2].

Разработанная нами с этой целью новая конструкция держателей микроскопов (рис. 1) дает возможность производить поворот микроскопов вокруг своей оси на 180° . При повороте микроскопа во время наблюдений на 180° направление пучка света также изменяется на 180° , и в среднем из результатов, полученных при двух положениях микроскопа, погрешность будет исключена.

Новый кронштейн микроскопа имеет два массивных кольца, наглухо скрепленных с основанием держателя. Внутри колец входят направляющие втулки, соприкасающиеся с кольцами своими опорными бортиками. Тубус микроскопа входит в направляющие втулки настолько плотно, чтобы обеспечить плавное вращение микроскопа вокруг своей оси. Благодаря тому, что опоры втулок имеют сферическую поверхность, возможно производить плавное изменение наклона оси микроскопа. Нижнее кольцо имеет три юстировочных винта, необходимых для приведения оси вращения микроскопа в вертикальное положение. Поворот микроскопа вокруг своей оси на 180° производится с помощью рукоятки.

После юстировки микроскопа направляющие втулки закрепляются при помощи зажимной гайки и закрепительных винтов. Закрепление всего микроскопа после его юстировки производится специальным зажимным кольцом. Конструкция держателя микроскопа позволяет производить точную регулировку положения микроскопа компаратора, надежное его закрепление, точный и плавный поворот микроскопа вокруг своей оси на 180° .

Известно, что одним из основных требований, которому должны удовлетворять первоклассные компараторы, является требование неподвижности микроскопов во время измерений.

Применение оборачивающихся микроскопов нарушает это основное требование. Поэтому нами была предусмотрена не только возможность поворота микроскопов вокруг своей оси, но и независимо от этого возможность поворота на 180° самих осветителей.

Поворачивая осветитель микроскопа на 180° , мы можем изменить направление пучка света, освещающего наблюдаемый в

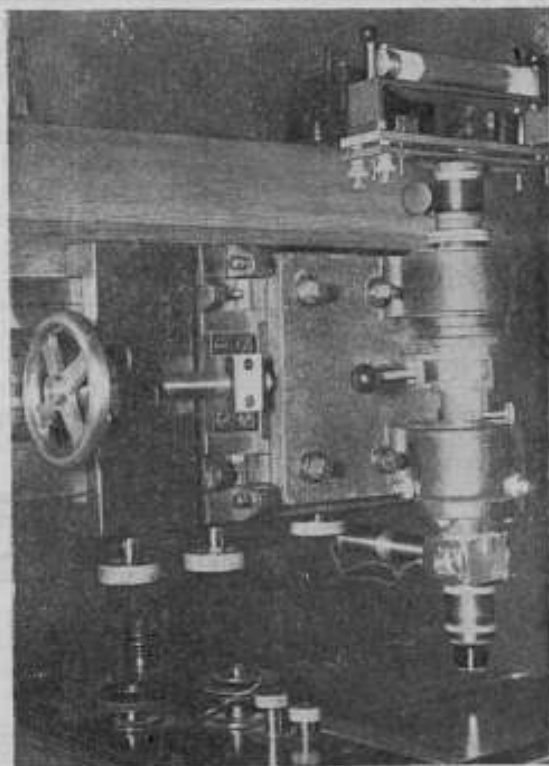


Рис. 1. Общий вид микроскопа однометровой компаратора с юстировочным столиком.

микроскоп штрих, сохранив неподвижное положение самих микроскопов.

В этом случае сравнение эталонов может производиться также при двух противоположных положениях осветителей. Проведенные уже на компараторе сравнения эталонов показали, что при этом достигается исключение погрешностей, возникающих из-за неправильного освещения наблюдаемых штрихов. Неподвижное положение микроскопов во время измерений гарантирует нас от возможности появления новых погрешностей, вызываемых сдвигом микроскопов.

Применение поворачивающихся осветителей у микроскопов однометрового компаратора дало положительные результаты. Поэтому лаборатория произвела в 1951 г. соответствующее усовершенствование и микроскопов четырехметрового компаратора. Для микроскопов четырехметрового компаратора были сконструированы поворачивающиеся осветители двух типов, показанные на рис. 2 и 3. Эти осветители отличны от осветителей однометрового компаратора и имеют следующее устройство.

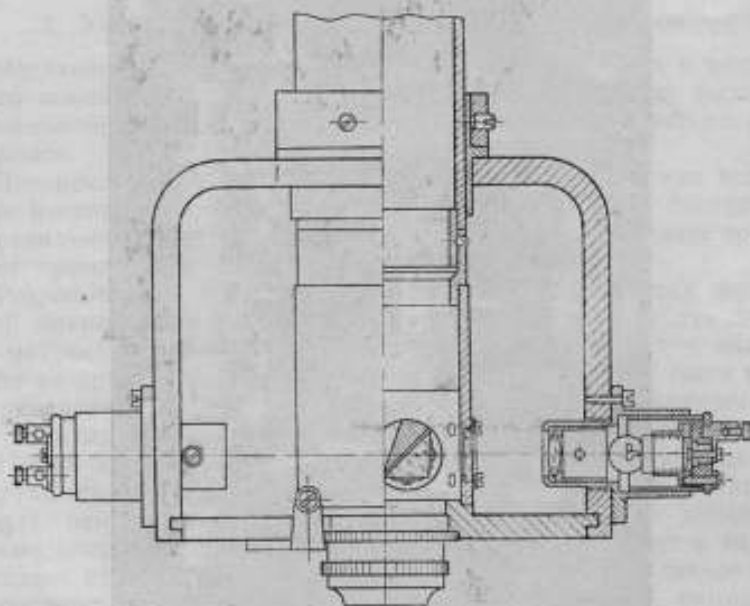


Рис. 2. Двойной осветитель с поворачивающейся призмой для микроскопа четырехметрового компаратора.

В обеих конструкциях объектив микроскопа связан с тубусом микроскопа при помощи жесткой скобы. Но в одном случае мы имеем два неподвижных осветителя и поворачивающуюся призму, а в другом случае осветитель скреплен с вращающимся кольцом и поворачивается вместе с призмой.

В обеих конструкциях осветителя имеются регулировочные винты для их юстировки. Конструкция микроскоподержателей не изменялась, и во время измерений микроскопы остаются закрепленными неподвижно.

При исследовании новых осветителей наилучшие результаты были получены для поворачивающегося осветителя, показанного на рис. 3.

Первая конструкция (рис. 2) дала худшие результаты, возможно из-за трудности точной установки двух неподвижных осветителей на одной оси.

Новые поворачивающиеся осветители установлены на микроскопах четырехметрового компаратора, и сличения на этом компараторе производятся сейчас с поворотом осветителей на 180° .

Для того чтобы определить, в какой мере поворот осветителей на 180° исключает погрешности, вызываемые неправильным освещением наблюдаемых штрихов, мы провели следующий опыт. При исследовании осветителей четырехметрового компаратора мы произвели сличение платино-иридиевых метров № 11 и П4 при различных положениях упорных винтов, ограничивающих поворот призмы. В первой серии сличений, когда упорные винты были установлены в одном крайнем положении, разность длин метров (№ 11—П4) получилась равной $-1,2$ мк.

Во второй серии сличений, когда упорные винты были установлены уже в другом крайнем положении, эта же разность оказалась равной $-7,0$ мк. Так как эти измерения производились с осветителями, показанными на рис. 2, то перемена положения упорных винтов вызывала резкое изменение характера освещения штрихов, соответствующее двум противоположным положениям осветителя. Когда у микроскопов были установлены осветители, показанные на рис. 3, и вместе с призмой поворачивались и осветители, то даже при тех же крайних, предельных положениях ограничительных винтов мы получили в первом случае разность длин метров (№ 11—П4) равной $-3,4$ мк и во втором случае $-4,5$ мк. Расхождение результатов сличений уменьшилось с 6 до 1 мк. При нормальном положении ограничительных винтов эта разность практически полностью исключается. Результаты этого опыта показали нам, что поворот осветителей на 180° с достаточной степенью точности исключает погрешности, вызываемые неправильным освещением штрихов.

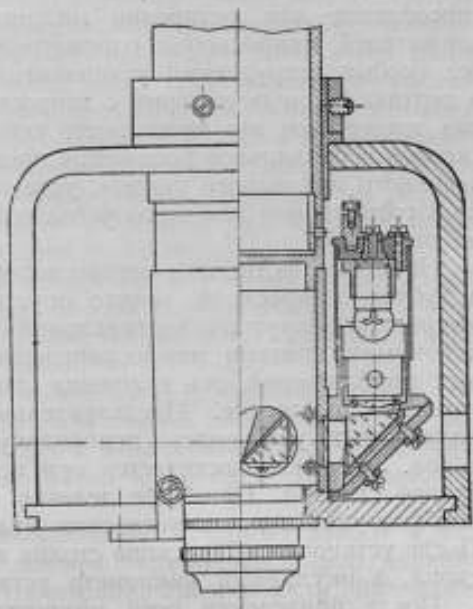


Рис. 3. Поворачивающийся осветитель для микроскопа четырехметрового компаратора.

3. Приспособление для юстировки микроскопов компаратора

При правильной установке микроскопов компаратора оси их должны быть вертикальны и точно параллельны между собой.

Применявшиеся до настоящего времени методы установки микроскопов и их осветителей не были совершенны. Микроскопы компаратора не были снабжены каким-либо средством для контроля правильности их установки.

При разработке конструкции и изготовлении держателей микроскопов было спроектировано и изготовлено специальное приспособление для юстировки микроскопов. Новая конструкция держателей микроскопов однометрового компаратора позволяет без особых затруднений установить ось вращения микроскопов в вертикальном положении с точностью до $1-2''$, т. е. во много раз точнее, чем это имеет место сейчас. Приведение оси микроскопа в вертикальное положение производится при помощи высокоточного накладного уровня, устанавливающегося на специально изготовленном для этого установочном столике (уровень виден на рис. 1).

На время юстировки микроскопов этот столик закрепляется в тубусе микроскопа вместо окулярного микрометра. Вращая микроскоп вокруг его вертикальной оси и пользуясь тремя юстировочными винтами микроскоподержателя, путем последовательных приближений, ось вращения микроскопа приводят в вертикальное положение. Предварительно ось накладного уровня должна быть установлена перпендикулярно оси вращения микроскопа. Это легко достигается при помощи юстировочных винтов самого столика. При цене деления шкалы уровня, равной $5''$, необходимая точность установки микроскопа легко достигается. После установки микроскопа столик вынимается из тубуса микроскопа, а окулярный микрометр устанавливается на свое место.

После приведения осей микроскопов однометрового компаратора в вертикальное положение с погрешностью не более 0,2 деления шкалы уровня, производилась проверка совпадения оси вращения микроскопа с его оптической осью. Под последней мы понимали прямую, соединяющую пересечение неподвижных нитей окулярного микрометра с центром объектива. При помощи регулировочных винтов коробки окулярного микрометра рамка его перемещалась так, чтобы вертикальная неподвижная нить сетки после поворота микроскопа на 180° не изменяла своего положения.

Так как конструкция окулярных микрометров не подвергалась изменениям, а они не имеют регулировочных винтов для перемещения горизонтальной нити сетки микрометра, то осуществить полное совмещение оптической оси с осью вращения оказалось невозможным. С вертикальной осью вращения микроскопа удалось совместить только плоскость, проходящую через вертикальную нить сетки и оптическую ось микроскопа.

При юстировке микроскопов четырехметрового компаратора мы так же при помощи столика с уровнем произвели их установку в вертикальное положение. Ввиду того, что конструкция держателей микроскопов у четырехметрового компаратора не изменялась, вместо поворота микроскопа на 180° нам приходилось производить поворот самого столика. Вместо юстировочных винтов мы пользовались закрепительными винтами кронштейнов этих микроскопов.

Все микроскопы четырехметрового компаратора, кроме того, были установлены в одной плоскости, что проверялось по струне.

Юстировка микроскопов обоих компараторов заканчивалась установкой их строго по одному горизонту. Для этого ванна компаратора наполняется водой до соответствующего уровня. Поверхность воды слегка посыпается пудрой. Оба микроскопа компаратора вращением фокусирующей гайки перемещаются в вертикальном направлении до тех пор, пока изображение пылцы пудры становится четким. Можно считать, что погрешность установки микроскопов по горизонту при помощи такого приема не превосходит двух-трех сотых долей миллиметра.

Регулировка осветителей микроскопов у обоих компараторов производится перемещением линз и диафрагмы осветителей, изменением наклона осветителя и соответствующей установкой ограничительных винтов.

Осветители микроскопов можно считать установленными правильно, если при поворотах осветителей микроскопов на 180° поле зрения микроскопов остается равномерно освещенным, изображение штрихов одинаково четки и не происходит смещения «зайчика».

При повороте самих микроскопов у однометрового компаратора «зайчик» также не должен перемещаться. Это является дополнительным средством контроля правильности положения самих микроскопов.

Осуществить проверку правильности положения микроскопов методом автоколлимации, на возможность чего указывают некоторые авторы, нам не удалось. Метод автоколлимации может быть осуществим при параллельном ходе лучей в оптической системе. Для осуществления этого метода необходимо было бы поверяемую микроскопическую систему превратить в телескопическую. Мы отказались от этого, так как применение каких-либо насадок давало бы нам новую оптическую систему, отличную от той, которую необходимо проверить.

4. Установка для измерения температуры сличаемых на компараторе мер

Измерение температуры сличаемых на компараторе мер до сего времени производилось при помощи трех или четырех образцовых ртутных термометров, устанавливаемых рядом с мерами на уровне их нейтральной плоскости. При помощи термометров

измеряется температура воды, в которой находятся эталоны. Если сличаемые меры установлены в ванне компаратора за несколько часов до начала наблюдений и произведено хорошее перемешивание воды, то можно полагать, что температура сличаемых мер очень мало отличается от температуры воды. Измеряя температуру воды, мы тем самым будем определять температуру сличаемых мер.

Температурные погрешности при сличении эталонов по своей величине являются наибольшими. Для повышения точности результатов сличения необходимо уменьшить как можно больше влияние различных источников, вызывающих эти температурные погрешности.

Температурные погрешности значительно возрастают, если сличения производятся в воздухе, например при сличении стальных мер, которые не могут быть помещены в воду.

Для повышения точности температурных измерений в 1947 г. была спроектирована и изготовлена установка для измерения температуры сличаемых эталонов при помощи дифференциальных термопар.

Установка для измерения температуры состоит из восьми медно-константановых дифференциальных термопар, со специаль-



Рис. 4. Зажим термопары.

ными зажимами для закрепления их на эталонах, зеркального гальванометра типа ГПЗ-2, с внутренним сопротивлением 21 ом и внешним сопротивлением 370 ом, чувствительностью 200 мм/мкА и термостата.

Длина проводников у термопар равна 2 м, а сечение 0,3—0,4 мм.

Рабочий спай каждой термопары (рис. 4) запаян в медной пластинке зажима. При закреплении зажима на мере этот спай термопары вплотную соприкасается с мерой.

Термостат состоит из деревянного ящика, оклеенного снаружи станолоевой бумагой. Внутри ящика, заполненного стеклянной ватой и пробкой, помещен сосуд Дьюара. В этом сосуде, наполненном трансформаторным маслом, помещаются вторые спай термопар. Они изолированы друг от друга и закреплены на специальном кольце. В этом же сосуде термостата на одном уровне со спаями термопар находятся резервуары двух хорошо изученных термометрической лабораторией ВНИИМ образцовых термометров № 13877 и 13882.

Шкалы этих термометров имеют подразделения $0,05^\circ$, что позволяет производить отсчеты при помощи отсчетной трубы с точностью до $0,005^\circ$.

Градуировка дифференциальных термопар производилась следующим образом. Зажимы с рабочими спаями термопар помещались в сосуд Дьюара, который мы называли вспомогательным. Вспомогательный сосуд наполнялся водой и в нем устанавливались три хорошо изученных образцовых ртутных термометра — № 16679, 15660 и 15658. Термометры устанавливались так, чтобы резервуары их находились примерно на одном уровне со спаями термопар. Первый из этих термометров имеет шкалу с подразделением через $0,05^\circ$, а два других — через $0,1^\circ$.

При градуировке производилось определение разности температуры термостата и вспомогательного сосуда двумя путями — по показаниям образцовых термометров и по показаниям градуируемой термопары.

Температура воды во вспомогательном сосуде постепенно менялась в пределах от $+18,5$ до $+20,5^\circ$. Для каждой термопары наблюдения производились в среднем в 15—20 точках.

Условия градуировки термопар были как можно более приближенными к условиям работы термопар в ванне компаратора.

При градуировке термопар погрешности измерения температуры во вспомогательном сосуде значительно сказываются на результатах градуировки, особенно при малой разности температур термостата и сосуда.

Поэтому во время наблюдений производилось тщательное перемешивание воды. Мы старались по возможности исключить также и влияние излучения, применяя соответствующие отражатели.

Принятые меры обеспечили вполне удовлетворительную точность измерения температуры при градуировке термопар, что подтверждается данными табл. 1, в которой приведены результаты измерений температуры в одной из серий градуировки.

Одновременно производилась градуировка сразу четырех термопар.

Отсчеты по шкале термометров термостата и вспомогательного сосуда во время градуировки производились при помощи отсчетных труб дважды: до и после отсчетов по шкале гальванометра. Отсчеты по шкале гальванометра производились при обоих положениях двухполюсного переключателя.

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений температуры в термостате равна $\pm 0,007^\circ$, а во вспомогательном сосуде $\pm 0,005^\circ$. При измерении температуры в термостате имела место некоторая малая по своей величине систематическая погрешность, зависящая, вероятно, от погрешности проверки самих термометров.

Для того чтобы убедиться в правильности работы всей схемы, оба спая каждой термопары были соединены между собой и поме-

Таблица 1

| № п/п | Измерение температуры в термостате | | | | Измерение температуры по вспомогательному сосуду | | | | Среднее из трех показаний термометров вспомогательного сосуда | | |
|-------|---|--------|--------------------------------|--|--|--------|--------|--------|---|--------|--------|
| | Средние отсчеты по термометрам в °С | | Разность показаний термометров | Среднее из пятикратных термометрических термостата | Средние отсчеты по термометрам в °С | | v | v | | | |
| | 13877 | 13882 | | | 15658 | 16679 | | | | | |
| 1 | 20,124 | 20,147 | -0,023 | 20,136 | 20,044 | -0,003 | 20,050 | +0,0,3 | 20,048 | +0,001 | 20,047 |
| 2 | 191 | 193 | 2 | 192 | 104 | 5 | 095 | 4 | 098 | 1 | 099 |
| 3 | 207 | 216 | 9 | 212 | 217 | 7 | 206 | 4 | 208 | 2 | 210 |
| 4 | 240 | 241 | 1 | 240 | 182 | 0 | 178 | 4 | 185 | 4 | 182 |
| 5 | 261 | 280 | 19 | 270 | 195 | 15 | 174 | 6 | 170 | 10 | 180 |
| 6 | 276 | 278 | 2 | 277 | 175 | 4 | 169 | 2 | 168 | 3 | 171 |
| 7 | 303 | 303 | 0 | 303 | 335 | 6 | 329 | 0 | 323 | 6 | 329 |
| 8 | 320 | 318 | 2 | 319 | 285 | 4 | 281 | 0 | 278 | 3 | 281 |
| 9 | 353 | 351 | 2 | 352 | 265 | 5 | 269 | 6 | 276 | 6 | 270 |
| 10 | 381 | 379 | 2 | 380 | 353 | 4 | 354 | 3 | 363 | 6 | 357 |
| 11 | 20,171 | 20,183 | - | 20,177 | 18,854 | - | 18,869 | 4 | 18,872 | 7 | 865 |
| 12 | 174 | 176 | 2 | 175 | 883 | 7 | 895 | 5 | 892 | 2 | 890 |
| 13 | 174 | 181 | 7 | 178 | 923 | 2 | 923 | 2 | 917 | 4 | 921 |
| 14 | 178 | 183 | 5 | 180 | 948 | 3 | 950 | 1 | 954 | 3 | 951 |
| 15 | 201 | 201 | 0 | 201 | 988 | 1 | 985 | 2 | 987 | 0 | 987 |
| 16 | 213 | 213 | 0 | 213 | 19,005 | 2 | 19,005 | 2 | 18,998 | 5 | 19,003 |
| 17 | 229 | 202 | 27 | 216 | 017 | 0 | 019 | 2 | 014 | 3 | 017 |
| 18 | 256 | 256 | 0 | 256 | 036 | 5 | 043 | 2 | 043 | 2 | 041 |
| 19 | 274 | 273 | 1 | 274 | 058 | 2 | 058 | 2 | 065 | 5 | 060 |
| 20 | 427 | 424 | 3 | 426 | 20,375 | 2 | 20,366 | 5 | 20,378 | 5 | 20,373 |
| 21 | 432 | 430 | 2 | 431 | 333 | 1 | 339 | 5 | 331 | 3 | 334 |
| 22 | 447 | 445 | 2 | 446 | 485 | 1 | 486 | 0 | 486 | 0 | 486 |
| | | | -0,082 | | +0,048 | | | +0,025 | | +0,030 | |
| | | | +0,043 | | -0,042 | | | -0,030 | | -0,040 | |
| | $\sigma = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}} = \pm 0,007$ | | | $\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum d^2}{n(k-1)}} = \pm 0,005$ | | | | | | | |

щены во вспомогательный сосуд, после чего поочередно включалась каждая термопара и производились отсчеты по шкале гальванометра. Так как температура спаев была одинакова, то отсчет по шкале должен быть равен нулю.

Практически отсчеты по шкале гальванометра несколько отклонялись от нуля, но не более чем на половину деления, что может быть объяснено как погрешностью самих отсчетов, так и погрешностью всей схемы.

Термопара № 1

Таблица 2

| № п/п | Цена деления термопары в °С | $v \cdot 10^5$ |
|-------------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 1 | 0,00578 | +23 |
| 2 | 0,00584 | +29 |
| 3 | 0,00537 | -18 |
| 4 | 0,00586 | +31 |
| 5 | 0,00575 | +20 |
| 6 | 0,00575 | +20 |
| 7 | 0,00579 | +24 |
| 8 | 0,00502 | -53 |
| 9 | 0,00518 | -37 |
| 10 | 0,00534 | -21 |
| 11 | 0,00533 | -22 |
| 12 | 0,00536 | -19 |
| 13 | 0,00567 | +12 |
| 14 | 0,00574 | +19 |
| 15 | 0,00582 | +27 |
| 16 | 0,00520 | -35 |
| 17 | 0,00549 | -6 |
| 18 | 0,00522 | -33 |
| 19 | 0,00612 | +57 |
| 20 | 0,00545 | -10 |
| 21 | 0,00537 | -18 |
| 22 | 0,00533 | -22 |
| 23 | 0,00543 | -12 |
| 24 | 0,00595 | +41 |
| 0,00555 | | |
| $\sigma = \pm 29 \cdot 10^{-5}$ | | |
| $\varepsilon = \pm 6 \cdot 10^{-5}$ | | |

В результате градуировки термопар значение средней цены деления было определено с погрешностью порядка $\pm 0,0001 - \pm 0,0002^\circ$. В табл. 2 показаны результаты градуировки одной из термопар.

При градуировке термопар наблюдалась некоторая систематическая погрешность. Знак этой погрешности изменялся в зависимости от того, выше или ниже была температура рабочих спаев термопар, чем температура термостата. Об этом говорит и харак-

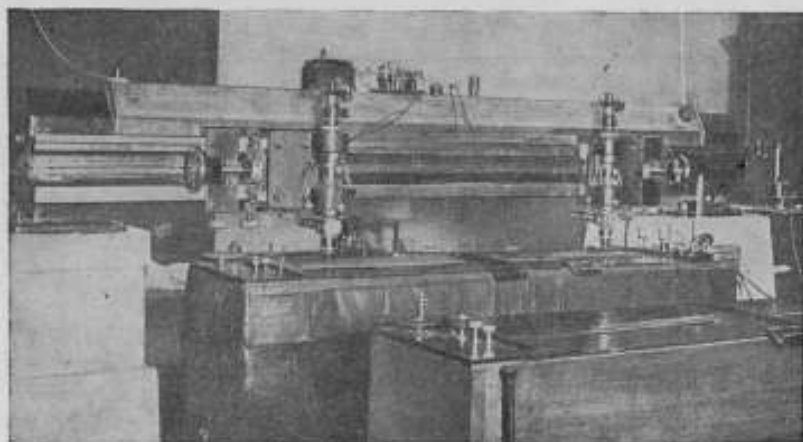


Рис. 5. Общий вид однометрового компаратора.

тер распределения остаточных погрешностей. Для исключения этой систематической погрешности, наблюдения располагались симметрично относительно нулевой точки.

На рис. 5 показан общий вид однометрового компаратора после его усовершенствования.

5. Анализ результатов измерения температуры при помощи термопар и исследование температурного режима в ванне компаратора

Основными погрешностями при измерении температуры сравниваемых мер термопарами являются погрешности измерения температуры в термостате, погрешности показаний термопар и погрешности, возникающие за счет нарушений температурного режима и связанного с этим градиента температуры вдоль меры.

Измерение температуры в термостате по двум образцовым термометрам производится, как показали наши исследования, со средней погрешностью не более $\pm 0,003^\circ\text{C}$. Полагая, что поправки шкалы каждого из термометров, поверка которых производится по рабочим эталонам, известны нам с погрешно-

стью порядка $\pm 0,005^\circ \text{C}$, мы можем считать, что температура спаев термодпар в термостате нам известна с погрешностью порядка $\pm 0,004-0,005^\circ \text{C}$.

При сличении эталонов возможные отклонения температуры мер от температуры термостата обычно не превышают нескольких десятых долей градуса. Полагая, что отсчеты по шкале гальванометра производятся с точностью до 0,5 деления шкалы, можно подсчитать погрешность измерения температуры при помощи термодпар. Эта погрешность при указанных условиях не превысит $\pm 0,005^\circ$.

Так как отсчеты термодпар производятся дважды, при двух положениях переключателя, то погрешность отсчета снизится до $\pm 0,003^\circ$.

Температура каждой из сличаемых мер определяется как среднее из показаний двух или трех термодпар. Поэтому погрешность определения температуры сличаемой меры будет определяться величиной не более $\pm 0,002^\circ$. Принимая же во внимание погрешность измерения температуры в термостате, мы можем считать, что общая погрешность определения температуры меры в каждом приеме измерений определяется величиной порядка $\pm 0,005^\circ \text{C}$. Величина этой погрешности, как мы увидим в дальнейшем, значительно возрастает из-за наличия температурного градиента у сличаемых мер.

Исследование температурного режима в ванне компаратора и определение величины температурного градиента производилось во время сличения метровой концевой меры № 1 с эталоном-копией платино-иридиевым метром М20°. Метровая концевая мера № 1 изготовлена из стали и сличение ее производилось в воздухе. На каждой мере было закреплено по две термодпары (на мере М20° — термодпары № 5 и 3, на концевой мере № 1 — термодпары № 4 и 1).

На каждую меру, кроме того, был положен один ртутный термометр. В ванне на специальных подставках на уровне сличаемых мер были установлены еще три ртутных термометра — № 4312, 4313 и 4314, обычно применяющиеся при сличениях. Показаниями этих термометров определялась температура воздушной среды в ванне компаратора.

Положение мер, термодпар и термометров в ванне компаратора показано на рис. 6 и 7.

Отсчеты термометров и термодпар производились по два раза. Сначала отсчитывались термометры № 4312, 4313 и 4314, затем термометр № 15658 и термодпары № 5 и 3, термометр № 15660 и термодпары № 4 и 1, после чего все отсчеты повторялись в обратном порядке. Средние отсчеты, взятые из двух соответственных отсчетов, могли быть отнесены к одному и тому же среднему моменту приема.

На рис. 7 показаны результаты восьми серий приемов измерений.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы о температурных условиях сличения в воздухе.

Температура сличаемых мер может значительно (до $0,2^\circ$) отличаться от средней температуры воздушной среды, определяемой по показаниям трех ртутных термометров. В среднем из 27 приемов эта разность равна $0,06^\circ$.

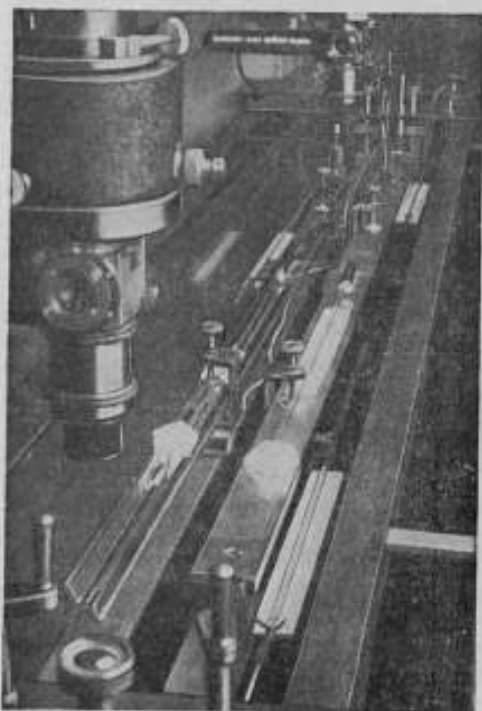


Рис. 6. Положение мер и термометров при исследовании температурного режима в ванне компаратора.

Температура двух сличаемых мер между собой также неодинакова. Эта разность в некоторых приемах достигает величины $0,08^\circ$, а в среднем равна $0,03^\circ$.

Показания термометра, лежащего на мере в специальной оправке, отличаются от показаний термопар в среднем на $0,02-0,01^\circ$, а в некоторых случаях разность этих показаний достигает величины $0,09^\circ$.

Сами сличаемые меры имеют по своей длине температурный градиент иногда порядка $0,02-0,03^\circ$.

Таким образом, полагая температуру сличаемых мер равной температуре окружающей воздушной среды, как это обычно делалось до сих пор, мы допускали значительную температурную погрешность.

Эти погрешности в действительности оказались примерно в два раза больше, чем это предполагалось прежде [1].

Наконец, проведенными опытами, что видно из рис. 7, с полной очевидностью подтверждается положение о том, что меры X-образного сечения (метр М20[°]) значительно быстрее принимают температуру окружающей среды, чем меры прямоугольного сечения (концевая мера).

Опыты подобного характера были проведены и при сличении мер в воде. С этой целью в ванне компаратора, наполненной водой, была установлена металлическая линейка прямоугольного сечения. На линейке были закреплены зажимы семи термопар. Одновременно в ванне были помещены три образцовых

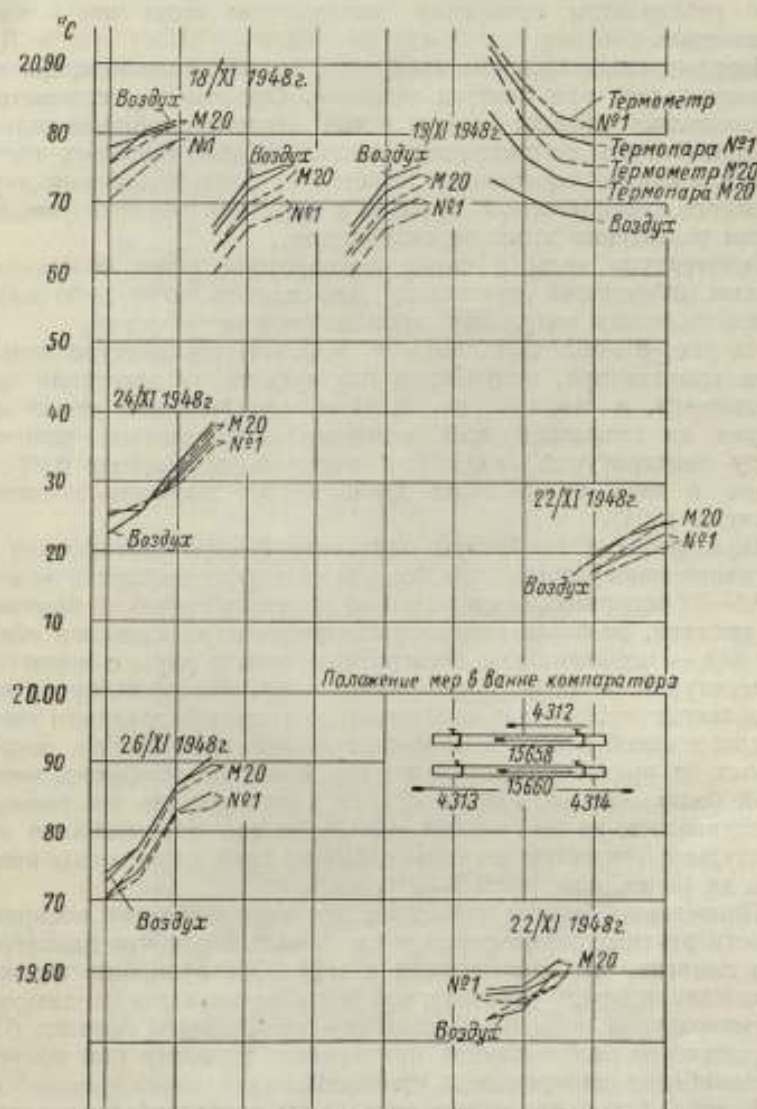


Рис. 7. Кривые изменения температуры в ванне компаратора при сличении в воздухе.

термометра — № 4312, 4313 и 11158. Определение температуры линейки производилось двумя путями: по показаниям термопар и по результатам измерения температуры воды при помощи термометров.

Перед каждым приемом измерения вода в ванне компаратора перемешивалась при помощи мешалок. Отсчеты по термометрам производились дважды — до и после отсчетов по шкале гальванометра. Отсчеты по шкале гальванометра производились поочередно для каждой термопары: сначала при одном положении двухполюсного переключателя, а затем в обратном порядке уже при другом положении этого переключателя.

Температура воды в ванне компаратора перед отдельными сериями наблюдений изменялась. Для этого в ванну либо добавлялась холодная вода, либо производился ее подогрев.

На рис. 8 ломаными линиями показаны температура воды в ванне компаратора, полученная как среднее из показаний трех термометров, и температура линейки, определенная также как среднее из показаний всех термопар. Наблюдаемые разности между температурой линейки и воды не превышают $0,02^\circ$, и только в двух приемах из двадцати эта разность достигает величины $0,04^\circ$.

Термометры и термопары одинаково быстро реагировали на изменение температуры воды. Резкое изменение температуры воды на $0,5-1^\circ$ воспринималось мерой за довольно короткий промежуток времени, не более одного часа, после чего начинался обратный ход — выравнивание температуры воды и меры с комнатной температурой. Правда, после такого короткого промежутка времени всегда наблюдался сравнительно большой градиент температуры у самой меры. Если обычно показания термопар, закрепленных на противоположных концах меры, не различались между собой более чем на $0,02-0,03^\circ$, то в этом случае эта разность увеличивалась до $0,07-0,09^\circ$. Окончательно выравнивание температуры с точностью до $0,01-0,02^\circ$ по всей длине меры наступало не ранее, как через $2-2\frac{1}{2}$ часа.

Проведенные опыты показали, что температурная восприимчивость ртутных термометров и сличаемых мер почти одинакова, если сличение их производится в воде. Обнаруженные же нами расхождения между температурой меры (по показаниям термопар) и температурой воды (по показаниям термометров) порядка $0,02^\circ$ указывают на необходимость применения термопар при проведении наиболее ответственных сличений.

В табл. 5 и 6 приведены результаты измерений температуры сличаемых мер на однометровом и на четырехметровом компараторах.

Как видно из этих таблиц, температура одной меры отличается от температуры другой меры при сличении в воде не более чем на $0,02^\circ \text{C}$.

В среднем эта разность не превышает $0,01^\circ \text{C}$.

Наблюдавшийся при этих сличениях температурный градиент в среднем был равен $0,01^\circ$ и только в двух-трех случаях достигал $0,03^\circ$.

Для того чтобы улучшить температурный режим в ванне одномерного компаратора, в 1950 г. были изготовлены новые крышки.

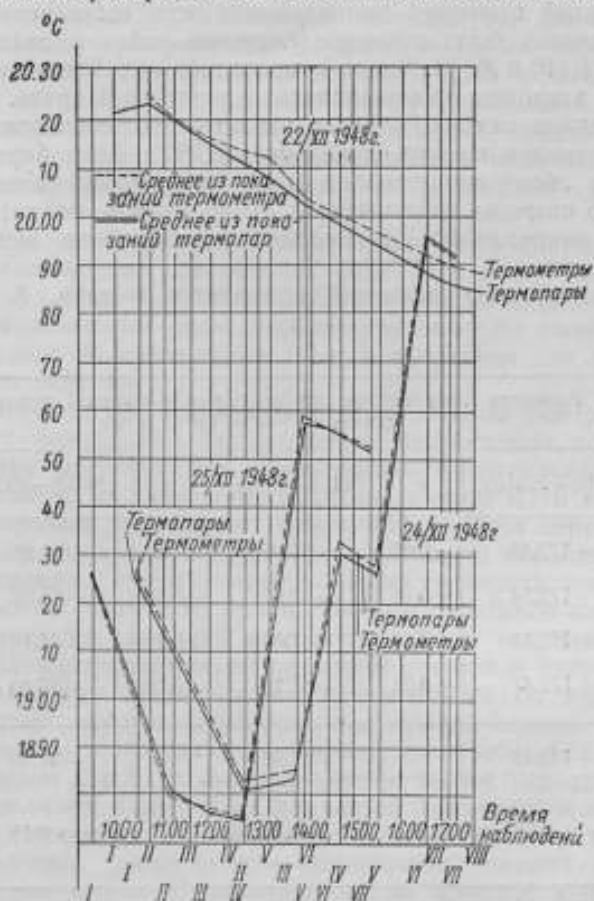


Рис. 8. Кривые изменения температуры в ванне компаратора при сличении в воде.

для большой ванны компаратора. Крышки состоят из трех металлических листов. Верхний и внутренний листы отполированы под зеркало. Между этими листами, закрепленными на деревянной раме, имеются воздушные прослойки. Эти крышки, как показали измерения, значительно лучше предохраняют находящиеся в ванне меры от излучения наблюдателя и ламп освещения. При работе с новыми крышками температурный градиент и разность температур сличаемых мер не превосходят $0,01^\circ \text{C}$.

6. Результаты сличений, проведенных на компараторе после его усовершенствования

Первые сличения на однометровом компараторе были проведены сразу же после окончания юстировки микроскопов и имели своей задачей проверку правильности всех выполненных работ.

Произведено было взаимное сличение рабочих эталонов метров R86, R116 и M318. Ванна компаратора водой не наполнялась. Сличения эталонов производились в воздушной среде.

В середине каждого приема наблюдений производился поворот микроскопов вокруг своей оси на 180° . Если барабаны микрометров обоих микроскопов в первом полуприеме находились справа (со стороны наблюдателя), то во втором полуприеме микроскопы закреплялись в положении «барабаны микрометров слева».

Результаты этих сличений приводятся в табл. 3.

Таблица 3

| № приемов | Разности длин метров, приведенные к средней температуре сличения $t = +19^\circ \text{C}$ в $\mu\text{к}$ | | | | | |
|-----------|---|----------|---------------------------|----------|-------------------------|----------|
| | (R86—M318) | σ | (R116—R86) | σ | (M318—R116) | σ |
| I | +172,35 | -0,07 | -87,86 | -0,30 | -85,16 | -0,17 |
| II | +172,34 | -0,08 | -87,56 | -0,10 | -85,32 | -0,33 |
| III | +172,53 | +0,11 | -87,46 | +0,10 | -84,48 | +0,51 |
| IV | +172,47 | +0,05 | -87,28 | +0,28 | -85,00 | -0,01 |
| | +172,42 | | -87,56 | | -84,99 | |
| | $s = \pm 0,05 \text{ мк}$ | | $s = \pm 0,12 \text{ мк}$ | | $s = + 0,18 \text{ мк}$ | |

Суммируя полученные разности длин метров (R 86—M318), (R116—R86) и (M138—R116), приведенные к одной и той же средней температуре $+19^\circ \text{C}$, имеем:

$$(R86—M318) + (R116—R86) + (M318—R116) = -0,13 \text{ мк.}$$

При отсутствии погрешностей измерений эта сумма должна была бы быть равна 0.

Вероятные погрешности результатов этого предварительного сличения рабочих эталонов длины, равные $\pm 0,03$, $\pm 0,08$ и

$\pm 0,12$ мк, и малое отклонение суммы определенных нами разностей длин от нуля говорят о правильности произведенной сборки и юстировки микроскопов компаратора.

Следующей работой на однометровом компараторе было сличение метровой концевой меры с эталоном-копией платино-иридиевым метром М20°. Измерение температуры сличаемых мер производилось при помощи дифференциальных термомпар. Во время сличения микроскопы компаратора были закреплены в положении «микрометры справа», и между отдельными полуприемами поворачивались только осветители. В первой половине приема осветители находились в положении «осветители сзади», а во второй половине приема — в положении «осветители впереди».

Результаты отдельных полуприемов, полученные при различных положениях осветителей, различались между собой в пределах от $+1,27$ до $-2,70$ мк. В 28 приемах наблюдений разность между результатами отдельных полуприемов по своей абсолютной величине не превосходит 1 мк, а в среднем для 40 приемов она равна 0,36 мк.

Для того чтобы установить, достигается ли поворотом осветителей у неподвижно закрепленных микроскопов компаратора исключение погрешностей, вызываемых неправильным освещением штрихов, мы произвели сличение метров R116 и M318 при двух различных положениях микроскопов. Одна серия приемов наблюдений была произведена при положении барабанов микрометров справа, другая серия — после поворота микроскопов вокруг осн на 180° , т. е. при положении барабанов микрометров слева. Во время сличений микроскопы были закреплены неподвижно. Поворот осветителей производился между полуприемами. Регулировка мер (фокусировка, установка их по азимуту и по длине) производилась в каждом полуприеме заново.

Результаты этого сличения приводятся в табл. 4.

Сличением было установлено почти точное совпадение средних результатов, полученных для обоих положений микроскопов: «микрометры справа» и «микрометры слева». Близкие результаты были получены также и для одинаковых условий освещения наблюдаемых штрихов: например, когда осветители находились сзади в положении микроскопов «микрометры справа» и впереди при положении микроскопов «микрометры слева». Таким образом, мы убедились, что при повороте осветителей в середине приема наблюдений достигаются такие же результаты, как и при повороте самих микроскопов. А так как при этом сами микроскопы остаются неподвижными, то одновременно выполняется и основное условие компарирования.

Для общей характеристики методов сличений эталонов длины на компараторах ВНИИМ, в табл. 5 и 6 приводятся результаты сличения метров R116 и R86, производившегося в 1949 г., на однометровом компараторе, и результаты сличения

метров № 11 и М20^о, производившегося в 1952 г. на четырехметровом компараторе.

Таблица 4

| №№ п/п | Разность длин метров (R116—M318), приведенная к $t = 20^{\circ}$, в мк | | | | | | | |
|--------|---|---------------------------------------|---------|----------|------------------|---------------------------------------|---------|----------|
| | Микрометры справа | | | | Микрометры слева | | | |
| | Осветители | | Среднее | σ | Осветители | | Среднее | σ |
| | сзади | впереди | | | сзади | впереди | | |
| 1 | +90,21 | +90,79 | +90,50 | -0,20 | +91,18 | +90,87 | +91,02 | +0,28 |
| 2 | +90,31 | +91,19 | +90,75 | +0,05 | +90,75 | +90,22 | +90,48 | -0,26 |
| 3 | +90,92 | +90,85 | +90,88 | +0,18 | +91,13 | +90,53 | +90,83 | +0,09 |
| 4 | +90,90 | +90,72 | +90,81 | +0,11 | +91,40 | +90,22 | +90,81 | +0,07 |
| 5 | +89,99 | +91,14 | +90,56 | -0,14 | +90,58 | +90,42 | +90,55 | -0,19 |
| | +90,47 | +90,94 | +90,70 | | +91,03 | +90,45 | +90,74 | |
| | | $\sigma = \pm 0,16$ $s = \pm 0,07$ | | | | $\sigma = \pm 0,22$ $s = \pm 0,10$ | | |

Сличения производились в воде, и температура мер измерялась при помощи дифференциальных термомпар. В середине каждого приема наблюдений производился поворот осветителей микроскопов на 180° .

Для характеристики сличений на однометровом компараторе мы взяли одну из серий приемов, производившихся при определении температурных коэффициентов удлинения, когда измерялась не только температура мер, но и температура воды в ванне компаратора. Это дало возможность обработать приведенные в табл. 5 результаты двояким способом. В первом случае температура мер принималась равной температуре воды в ванне компаратора. Во втором случае она определялась показаниями термомпар. В обоих случаях, как это видно из табл. 5, были получены почти одинаковые результаты, что говорит о равнозначности обоих способов измерения температуры, если сличение эталонов производится в воде, и о том, что погрешности измерения температуры сличаемых мер имеют случайный характер.

Приведенные нами результаты, а также и результаты других сличений эталонов длины на однометровом универсальном и на четырехметровом «геодезическом» компараторах говорят о том, что выполненные нами работы по усовершенствованию компараторов дали вполне удовлетворительные результаты. Вероятные погрешности результатов сличения не превышают $\pm 0,1$ мк, хотя в каждом полуприеме заново производилась фокусировка сличаемых мер и регулировка их по азимуту. Таким образом,

Таблица 3

| № при- еда | Средняя температура воздуха воды в ванне показаниям трех термометров в °С | Средняя температура слюняных мер по показаниям термометр в °С | | Наблюдаемая разность (R86 - R116) в мк | Разность (R86 - R116), приведенная к средней температуре 17,200°С, в мк | | | |
|---------------|--|--|--------|---|--|----------|----------------------------|--------------------------------|
| | | R86 | R116 | | по показаниям термометров | σ | по показаниям термометр | ν |
| 1 | 16,693 | 16,701 | 16,688 | +77,15 | +79,29 | -0,17 | +79,07 | -0,34 |
| 2 | 16,759 | 16,735 | 16,758 | +77,64 | +79,51 | +0,05 | +79,32 | -0,09 |
| 3 | 16,956 | 16,964 | 16,949 | +78,25 | +79,29 | -0,17 | +79,14 | -0,27 |
| 4 | 17,240 | 17,250 | 17,242 | +79,39 | +79,22 | -0,24 | +79,65 | +0,25 |
| 5 | 17,305 | 17,312 | 17,303 | +79,71 | +79,27 | -0,19 | +79,17 | -0,24 |
| 6 | 17,396 | 17,403 | 17,394 | +80,07 | +79,24 | -0,22 | +79,15 | -0,26 |
| 7 | 17,448 | 17,440 | 17,430 | +80,82 | +79,76 | +0,30 | +79,73 | +0,32 |
| 8 | 17,628 | 17,624 | 17,616 | +81,54 | +79,74 | +0,28 | +79,67 | +0,26 |
| 9 | 17,680 | 17,669 | 17,660 | +81,88 | +79,79 | +0,33 | +79,77 | +0,36 |
| | | | | | +79,46 | | +79,41 | |
| Принято: | | | | $t = 17,200^\circ\text{C}$ | $\sigma = \pm 0,25 \text{ мк}$ | | | $\sigma = \pm 0,29 \text{ мк}$ |
| | | | | $\sigma_{\text{тер}} = 11,32 + 0,005t$ | $\delta = \pm 0,08 \text{ мк}$ | | | $\delta = \pm 0,10 \text{ мк}$ |
| | | | | $\sigma_{\text{пл}} = 7,35 - 0,003t$ | | | | |

лаборатория освободилась от того положения, когда критерием правильности установки осветителей микроскопов являлся только личный опыт метролога. Результаты сличений эталонов тем самым получают большую достоверность.

Таблица 6

| № приемов | Средняя температура сличаемых мер по показаниям термометра в °С | | Наблюдаемая разность (М20 ^в - 11) в мк | Приведенная разность (М20 ^в - 11) в мк | σ |
|-----------|---|-----------------------|---|---|-------|
| | метр № 11 | метр М20 ^в | | | |
| 1 | 17,055 | 17,057 | -170,34 | -170,36 | +0,19 |
| 2 | 17,057 | 17,057 | -170,19 | -170,19 | +0,36 |
| 3 | 17,083 | 17,057 | -170,75 | -170,53 | +0,02 |
| 4 | 17,065 | 17,060 | -170,09 | -170,05 | +0,50 |
| 5 | 17,082 | 17,080 | -170,70 | -170,69 | -0,14 |
| 6 | 17,095 | 17,087 | -170,84 | -170,78 | -0,23 |
| 7 | 17,111 | 17,119 | -170,68 | -170,75 | -0,20 |
| 8 | 17,399 | 17,407 | -170,97 | -171,04 | -0,49 |
| 9 | 17,402 | 17,418 | -170,39 | -170,54 | +0,01 |
| Среднее | 17,149 | 17,149 | -170,55 | -170,55 | |
| | | | σ = ±0,31 мк | | |
| | | | s = ±0,10 мк | | |

Для сравнения приведем результаты довоенных сличений платино-иридиевых метров № 28, № 11 и П4, производившихся на однометровом компараторе в условиях, аналогичных нашим, когда фокусировка мер и установка осветителей в каждом приеме производилась заново. По этим данным, приведенным в монографии проф. В. А. Барнинова [1] на стр. 140—141, средняя квадратичная погрешность ряда измерений равна ±0,47 мк при сличении метров № 28 и № 11 четырнадцатью приемами и ±1,06 мк при сличении метров № 11 и П4 восьмью приемами.

Большое значение средней квадратичной погрешности для ряда измерений при сличении метров № 11 и П4 может быть объяснено плохим качеством штрихов у меры П4. Сличение метров № 28 и № 11, имеющих сравнительно удовлетворительные по своему качеству штрихи, произведено было с погрешностью, в два раза меньшей.

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений при сличении эталонов на компараторе ВНИИМ после усовершенствования получается значительно меньшей.

Поэтому мы можем считать, что произведенное нами усовершенствование компараторов дало положительные результаты.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ СЛИЧЕНИЙ НА КОМПАРАТОРЕ

Усовершенствование компараторов и методов сличения эталонов дало нам возможность несколько по-иному, чем это делалось прежде [1], оценить точность результатов, получаемых при сличении эталонов длины на компараторе.

Прежде всего рассмотрим более подробно сам процесс сличения двух эталонов. Во время сличения сличаемые эталоны устанавливаются в ванне компаратора, наполненной водой. При помощи регулировочных механизмов ванны компаратора производится тщательная регулировка эталонов по высоте, азимуту и по длине. В ванне укладываются на уровне нейтральной плоскости эталонов образцовые, хорошо изученные, ртутные термометры (не менее трех), или на самих мерах закрепляются рабочие спай дифференциальных термомпар (не менее как в двух точках на каждой мере).

Через несколько часов после окончания регулировки мер на компараторе производятся сами измерения. Сличение обычно состоит из двух серий отдельных приемов наблюдений, по 6—8 приемов в каждой серии. Каждый прием наблюдений выполняется в следующем порядке:

а) производят отсчеты термометров, установленных в термостате и в ванне компаратора. Отсчеты показаний термомпар по шкале гальванометра производятся помощником наблюдателя одновременно с отсчетами микроскопов;

б) наблюдают в левый и правый микроскопы соответственно начальный и конечный штрихи исходного эталона. При этом производят три отсчета слева, шесть отсчетов справа и опять три отсчета слева.

в) передвигают ванну компаратора и подводят под микроскопы поверяемый эталон;

г) наблюдают в том же порядке в левый и правый микроскопы начальный и конечный штрихи поверяемого эталона;

д) производят поворот осветителей микроскопов на 180° и меняют положение переключателя гальванометра;

е) повторяют наблюдение конечного и начального штрихов поверяемого эталона;

ж) перемешают ванну компаратора и подводят под микроскопы исходный эталон;

з) наблюдают в микроскопы штрихи исходного эталона;

и) производят отсчеты по всем термометрам.

Все указанные действия, необходимые для одного определения разности длин сличаемых эталонов, составляют один полный прием наблюдений.

Во второй половине приема, после поворота осветителей, наблюдения штрихов и отсчеты производятся в обратном порядке.

Между отдельными приемами измерений в ванне компаратора производится перемешивание воды. Между отдельными сериями приемов сличаемые эталоны перекадываются на 180° . Обработка результатов измерений производится непосредственно в журналах записи наблюдений.

В результате сличения при помощи компаратора определяется только, обычно небольшая по своей величине, разность длин сличаемых эталонов. Действительная же длина R поверяемого эталона вычисляется по формулам (1) и (2). Сначала по формуле (1) определяется длина поверяемого эталона при температуре сличения. Затем по формуле (2) вычисляют длину поверяемого эталона при нормальной температуре $+20^\circ\text{C}$:

$$R_t = M_{20} + M_{20} [\alpha_M + \beta_M (t - 20)] (t - 20) + \Delta l; \quad (1)$$

$$R_{20} = R_t - R_t [\alpha_R + \beta_R (t - 20)] (t - 20). \quad (2)$$

В этих формулах приняты следующие обозначения:

M_{20} — длина исходного эталона при нормальной температуре $+20^\circ\text{C}$;

α_M, β_M — температурные коэффициенты удлинения исходного эталона;

R_t — длина поверяемого эталона при температуре сличения;

R_{20} — длина поверяемого эталона при нормальной температуре $+20^\circ\text{C}$;

α_R, β_R — температурные коэффициенты удлинения поверяемого эталона;

t — температура сличения;

Δl — измеренная разность длин сличаемых эталонов.

Таким образом, для определения действительной длины поверяемого эталона необходимо знать не только разность длин сличаемых эталонов и их температуру, но должны быть известны из предварительных исследований длина исходного эталона и температурные коэффициенты удлинения сличаемых эталонов.

7. Погрешности сличений эталонов длины

Погрешность определения действительной длины поверяемого эталона складывается из погрешностей: значения длины исходного эталона, принятых температурных коэффициентов удлинения, измеренной на компараторе разности длин эталонов, измеренной температуры.

Определим численное значение этой погрешности сличения. После преобразования формул (1) и (2) имеем формулу:

$$R_{20} = M_{20} + (\alpha'_M - \alpha'_R) \Delta t + \Delta l, \quad (3)$$

где приняты следующие обозначения:

$$\alpha'_M = M [\alpha_M + \beta_M (t - 20)];$$

$$\alpha'_R = R [\alpha_R + \beta_R (t - 20)]; \quad \Delta t = t - 20^\circ.$$

Дифференцируя формулу (3), мы по закону сложения средних погрешностей будем иметь:

$$\sigma_R^2 = \sigma_M^2 + \Delta t^2 (\sigma_{\alpha_M}^2 + \sigma_{\alpha_R}^2) + (\alpha_M^2 + \alpha_R^2) \sigma_{\Delta t}^2 + \sigma_{\Delta l}^2. \quad (4)$$

Полагая, что погрешности определения температурных коэффициентов сличаемых эталонов одинаковы, т. е.

$$\sigma_{\alpha_M} = \sigma_{\alpha_R} = \sigma_{\alpha},$$

и введя обозначения

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= \sigma_M; \\ \xi_2 &= \Delta t \sqrt{2} \sigma_{\alpha}; \\ \xi_3 &= \sqrt{\alpha_M^2 + \alpha_R^2} \sigma_{\Delta t}; \\ \xi_4 &= \sigma_{\Delta l}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

будем иметь

$$\sigma_R = \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2 + \xi_4^2}. \quad (6)$$

В своих расчетах мы будем исходить из предельных погрешностей и крайних условий измерений. Поэтому в результате этих расчетов получим предельную погрешность определения действительной длины эталонов.

Погрешность определения длины исходного эталона σ_M для первого звена поверочной схемы можно принять равной нулю. Для следующего звена поверочной схемы эту погрешность в соответствии с нижеследующими нашими расчетами следует считать равной $\pm 0,24$ мк.

Величина ξ_2 определяется погрешностью определения температурных коэффициентов удлинения и зависит от величины отклонения температуры сличения от нормальной температуры $+20^\circ \text{C}$.

В настоящее время компараторный метод исследования температурных коэффициентов удлинения дает возможность определить значения температурных коэффициентов удлинения эталонов длины с погрешностью не более $\pm 0,03 \cdot 10^{-6}$. Так как температура сличений в компараторной может иногда отличаться от нормальной температуры на $2-3^\circ$, то ξ_2 может достигать величины:

$$\xi_2 = \pm 3 \sqrt{2} \cdot 0,03 = \pm 0,13 \text{ мк.}$$

Величина ξ_3 определяется погрешностью измерения температуры сличаемых эталонов и зависит от величины их температурных коэффициентов удлинения.

Наши исследования показали, что измерение температуры сличаемых эталонов дифференциальными термопарами производится в каждом отдельном приеме измерений с погрешностью $\pm 0,005^\circ$, а температурный градиент вдоль меры может достигать $\pm 0,01^\circ$. Поэтому можно считать, что действительная температура

меры нам известна с погрешностью $\pm 0,011^\circ$. Так как во время сличений мы производим перемешивание воды и перекидку мер на 180° , то погрешность, вызываемую температурным градиентом вдоль меры, можно считать погрешностью случайного характера.

В среднем для двух серий приемов (по шесть приемов в каждой серии) температуру меры можно считать известной с погрешностью $\pm 0,003$, т. е. с предельной погрешностью не более $\pm 0,009^\circ$. Сличаемые эталоны могут иметь различные температурные коэффициенты удлинения от $1 \cdot 10^{-6}$ до $12 \cdot 10^{-6}$. Поэтому для однометровых мер с малыми коэффициентами погрешность ξ_2 не превысит следующей величины:

$$\xi_2 = \sqrt{2} \cdot 0,009 = \pm 0,01 \text{ мк.}$$

а для мер с большими коэффициентами:

$$\xi_2 = \sqrt{12^2 + 1^2} \cdot 0,009 = \pm 0,15 \text{ мк.}$$

При сличении платино-иридиевых эталонов, температурный коэффициент удлинения которых равен $8,6 \cdot 10^{-6}$, эта погрешность будет равна

$$\xi_2 = \pm 0,10 \text{ мк.}$$

Погрешность ξ_4 , погрешность непосредственного измерения на компараторе разности длин сличаемых эталонов, включает в себя целый ряд погрешностей случайного и систематического характера:

- а) погрешность, вызываемую неправильной установкой сличаемых мер под микроскопами по высоте (фокусировка) и по направлению;
- б) погрешность наведения биссектора на штрих;
- в) погрешность, вызываемую неправильным освещением наблюдаемых штрихов;
- г) погрешность отсчета по барабанам микрометров;
- д) погрешность окулярных микрометров микрометров;
- е) погрешность установки микрометров;
- ж) погрешность определения цены деления барабанов окулярных микрометров;
- з) личные погрешности наблюдателей.

Некоторые из этих погрешностей, погрешности систематического характера, исключаются введением в результаты измерений соответствующих поправок или самой методикой измерений.

Неисключенные остатки этих систематических погрешностей будут являться уже погрешностями случайного характера и в среднем, как минимум из двенадцати приемов измерений, будут оказывать на результат сличения ничтожное влияние.

Из указанных восьми источников погрешностей в настоящее время мы имеем возможность не принимать во внимание четыре погрешности.

Погрешности, вызываемые неправильным освещением наблюдаемых штрихов, сейчас исключаются благодаря повороту осветителей микроскопов на 180° .

Погрешности окулярных микрометров учитываются введением в результаты измерений соответствующих поправок.

Для этого лабораторией было произведено исследование периодических и ходовых погрешностей окулярных микрометров микроскопов обоих компараторов. По своей величине эти погрешности выражаются сотыми долями микрона.

Для исключения погрешности, вызываемой установкой мер, мы сейчас производим фокусировку мер и установку их по азимуту в каждом приеме наблюдений, и если прежде эта погрешность В. А. Бариповым оценивалась как величина малая, то сейчас она уменьшается еще в \sqrt{n} раз, где n — число приемов наблюдений.

Неправильности в установке микроскопов при измерении разности двух мер одинаковой номинальной длины, как показал В. А. Барипов, вызывают погрешности, зависящие только от неточности фокусировки сличаемых мер. По своей величине эта погрешность принималась равной $0,01$ — $0,03$ мк. Так как фокусировку мер мы производим в каждом приеме, то в среднем из двенадцати приемов эта погрешность не будет превышать $\pm 0,01$ мк.

Величины двух погрешностей прием по данным В. А. Барипова, а именно:

а) погрешность наведения биссектора на штрих будем считать равной $\pm 0,05$ мк;

б) погрешность отсчета по барабану микрометра будем считать равной $\pm 0,02$ мк.

Так как в своих расчетах мы везде принимали предельные погрешности, то и в этом случае положим их равными, соответственно, $\pm 0,15$ и $\pm 0,06$ мк.

Определение средней цены деления окулярных микрометров микроскопов производится по изученным интервалам (0 — $0,5$) мм и ($0,5$ — $1,0$ мм) разделенных на десятые доли миллиметров рабочих эталонов — дециметров Д36 и Д76 или образцовой стеклянной шкалы № 5103.

С 1950 г. мы применили новый метод определения цены деления микрометров микроскопов измерением разностей длин двух блоков боковичков с притертой к ним микроинной концевой мерой и без нее. Предварительно эта разность длин блоков определяется абсолютным интерференционным методом на интерференционном компараторе. Этот метод определения цены деления и старый метод определения по рабочим эталонам дециметра дают результаты, согласующиеся между собой в пределах точностей самих определений.

Наблюдения при определении цены деления обычно производятся тремя наблюдателями, по восемь приемов каждым наблюдателем.

Средняя цена деления микрометров микроскопов определяется с погрешностью порядка $\pm 0,0002$ мк.

Измеряемые на компараторе разности длин эталонов обычно не превосходят 200 мк. Поэтому погрешность результата сличений за счет погрешности определения значения цены деления не превысит $\pm 0,04$ мк.

Личная погрешность наблюдателей зависит главным образом от качества штрихов. По своей величине эта погрешность для плохих по своему качеству штрихов может достигать величины $\pm 0,2$ мк, а в среднем оценивается величиной $\pm 0,1$ мк. Так как сличения обычно производятся несколькими наблюдателями, эта погрешность при оценке точности сличений обычно во внимание не принимается.

При оценке величины погрешности ξ_4 мы считаем необходимым учесть влияние и личных погрешностей наблюдателей.

Принимая во внимание, что личные погрешности наблюдателей в практике лаборатории частично исключаются тем, что цена деления микроскопов определяется отдельно для каждого наблюдателя, а сами сличения производятся двумя-тремя наблюдателями, мы положили эту погрешность равной $\pm 0,05$ мк.

Применяя закон сложения средних погрешностей, получим, что суммарная погрешность ξ_4 измерения разности Δl длин двух сличаемых на компараторе эталонов будет равна:

$$\xi_4 = \pm 0,17 \text{ мк.}$$

Правильность наших расчетов подтверждается тем, что средние квадратичные погрешности, вычисляемые при обработке результатов сличений по отклонениям отдельных приемов наблюдений от среднего, обычно лежат в пределах до $\pm 0,10$ мк.

При этом следует иметь в виду, что вычисляемые по результатам сличений средние квадратичные погрешности включают в себя не только погрешность ξ_4 , но и частично погрешности температурные.

Суммарная погрешность определения действительной длины поверяемого эталона, исходя из наших расчетов, будет равна для платино-иридиевых эталонов длины:

$$\lambda_{\text{пред.}} = 0,01 \sqrt{13^2 + 10^2 + 17^2} = \pm 0,24 \text{ мк,}$$

а для рабочих эталонов длины с малым температурным коэффициентом:

$$\lambda_{\text{пред.}} = \pm 0,01 \sqrt{24^2 + 13^2 + 8^2 + 17^2} = \pm 0,33 \text{ мк,}$$

и с большим температурным коэффициентом:

$$\lambda_{\text{пред.}} = \pm 0,01 \sqrt{24^2 + 13^2 + 15^2 + 17^2} = \pm 0,36 \text{ мк.}$$

Так как в своих расчетах отдельных погрешностей измерений мы всегда принимали крайние условия измерений и предельные

погрешности, то и вычисленную нами погрешность следует считать предельной.

Проф. В. А. Баринов в неоднократно цитированной уже работе принимал погрешность определения длины исходного эталона равной $\pm 0,13$ мк, погрешности вторичных эталонов равными $\pm 0,17$ мк, а погрешности рабочих эталонов равными $\pm 0,21-0,35$ мк.

Полученные нами значения погрешностей несколько отличаются от этих данных, превышая их.

Это объясняется тем, что в своих расчетах В. А. Баринов не только не принимал во внимание погрешности, вызываемые неправильным освещением штрихов, погрешности определения цены деления микрометров, а также и личные погрешности, но и значительно выше оценивал точность измерения температуры сличаемых эталонов. Преуменьшены были значения и некоторых других погрешностей. Поэтому погрешности результатов сличений у В. А. Баринова и оказались заниженными.

Приведенные в настоящей статье результаты исследования компараторов после их усовершенствования говорят не только о некотором общем повышении точности и большей объективности результатов сличений, но и о повышении достоверности, правильности определения действительной длины сличаемых эталонов.

Вместе с этим, закончив первоочередные работы по повышению точности сличения, лаборатория получила уверенность и в том, что при осуществлении в дальнейшем остальных намеченных нами мероприятий, как-то: замена микроскопов и изготовление эталонов со штрихами высокого качества, точность сличений штриховых эталонов длины может быть повышена по крайней мере в два раза.

ГЛАВА III

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСЛЕВОЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СЛИЧЕНИЙ ЭТАЛОНОВ ДЛИНЫ

Регулярные сличения эталонов длины лабораторией были возобновлены в 1945 г. За прошедшее время были произведены два раза сличения всей группы платино-иридиевых эталонов. Сличения рабочих эталонов длины и образцовых геодезических жезлов производились лабораторией ежегодно.

В 1948—1949 гг. в лаборатории было произведено повторное определение температурных коэффициентов удлинения рабочих эталонов длины. Ниже приводятся результаты этих сличений и исследований.

8. Сличения группы платино-иридиевых эталонов длины

При первом сличении группы платино-иридиевых эталонов метров № 28, № 11, М20° и П4 было выполнено 100 приемов сличений на одвометровом компараторе и 46 приемов на четырехметровом компараторе.

Обработка результатов наблюдений производилась по способу наименьших квадратов.

Решение нормальных уравнений дало следующие значения неизвестных разностей длин эталонов:

$$\left. \begin{aligned} (\text{№ 11} - \text{№ 28})_{0^\circ \text{С}} &= -1,31 \text{ мк}; \\ (\text{П4} - \text{№ 28})_{0^\circ \text{С}} &= -5,16 \text{ мк}; \\ (\text{М20}^\circ - \text{№ 28})_{0^\circ \text{С}} &= -172,48 \text{ мк}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Принимая в качестве исходной длины длину метра № 28 по его уравнению

$$\text{№ 28} = 1 \text{ м} + 0,71 \text{ мк} + (8,621 + 0,00180t)t \text{ мк}, \quad (8)$$

для эталонов № 11, М20° и П4 были получены уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \text{№ 11}_{t=0^\circ} &= 1 \text{ м} - 0,6 \text{ мк}; \\ \text{П4} \left(\frac{1}{3} - 10 \frac{1}{9} \right) \delta M_{t=0^\circ} &= 1 \text{ м} - 4,4 \text{ мк}; \\ \text{М20}_{t=0^\circ} &= 1 \text{ м} + 0,6 \text{ мк}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Средняя квадратичная погрешность полученных результатов определялась величиной порядка $\pm 0,12 - \pm 0,15 \text{ мк}$.

Результаты этого первого послевоенного сличения платино-иридиевых эталонов длины показали:

1) изменения в длине платино-иридиевых эталонов длины не выходят за пределы точности компараторных измерений;

2) эвакуация и реэвакуация платино-иридиевых эталонов, а также изменение условий их хранения, имевшие место в годы Великой Отечественной войны 1941—1945 гг., не сказались на состоянии эталонов длины.

В 1948 г. лабораторией было проведено сличение метров № 28 и № 11. В среднем из восьми серий сличений, производившихся на однометровом и на четырехметровом компараторах, было получено:

$$(\text{№ 11} - \text{№ 28})_{0^\circ \text{С}} = -1,08 \text{ мк} \pm 0,07 \text{ мк}.$$

Второе сличение группы платино-иридиевых эталонов длины производилось в 1949—1950 гг. уже после окончания работ по усовершенствованию однометрового универсального компаратора.

Взаимные внутригрупповые сличения платино-иридиевых эталонов производились во всех возможных комбинациях их друг с другом. Всего было выполнено 173 приема в 30 сериях, из них на однометровом компараторе 87 приемов и на четырехметровом компараторе 86 приемов.

Результаты сличений были совместно обработаны по способу наименьших квадратов. При вычислении принимались во внимание веса результатов отдельных серий измерений.

Решение нормальных уравнений дало следующие значения разностей длин эталонов при температуре 0° С:

$$\left. \begin{aligned} \text{№ 11} - \text{№ 28} &= -1,03 \text{ мк} \pm 0,07 \text{ мк}; \\ \text{П4 } (10^1/2 - 10^1/2) \text{ дм} - \text{№ 28} &= -4,50 \text{ мк} \pm 0,08 \text{ мк}; \\ \text{M20}^\circ - \text{№ 28} &= -170,99 \text{ мк} \pm 0,08 \text{ мк}. \end{aligned} \right\} (10)$$

Результаты (7) предыдущего сличения для метра M20° значительно отличаются от результатов (10).

Вследствие того, что методы сличения эталонов на однометровом компараторе после его усовершенствования были отличными от метода сличения их на четырехметровом компараторе, мы произвели обработку материалов наблюдений раздельно.

Результаты этой обработки приведены в табл. 7.

Таблица 7

| | № 11 — № 28 | 114 — № 28 | M20° — № 28 |
|--|-------------|------------|-------------|
| По результатам сличений на четырехметровом компараторе | -1,09 мк | -4,51 мк | -171,35 мк |
| По результатам сличений на однометровом компараторе | -0,96 мк | -4,36 мк | -170,48 мк |

Раздельная обработка результатов наблюдений подтвердила наше предположение о том, что изменение разности длин эталонов (M20° — № 28) вызвано не изменением длины метра M20°, а изменением условий сличения на однометровом компараторе.

Платино-иридиевый метр M20° имеет сравнительно узкие штрихи (не более 4—5 мк), но вследствие несовершенной полировки нейтральной плоскости метра и малой глубины штрихов изображение их получается нечеткое. Поэтому незначительные отклонения в положении осветителей микроскопов, при установке их только по четкости изображения, могли вызвать несоответствие измеряемой при помощи компаратора длины эталона его действительной длине.

Для окончательного разрешения вопроса о новом уравнении метра M20° лаборатория провела в 1950 г. на однометровом компараторе еще одно сличение метров № 28, № 11 и M20°. Произведено было около 50 приемов наблюдений.

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

$$\begin{aligned} \text{№ 11} - \text{№ 28} &= -1,09 \text{ мк}; \\ \text{M20}^\circ - \text{№ 11} &= -170,12 \text{ мк}; \\ \text{M20}^\circ - \text{№ 28} &= -171,04 \text{ мк}. \end{aligned}$$

Результаты сличений 1950 г. оказались весьма близкими к данным 1949 г. На основании сличений 1949 и 1950 гг. для эталонов-копий платино-иридиевых метров М20°, П4 и № 11 были получены следующие уравнения:

$$\text{Метр № 11} = 1 \text{ м} - 0,35 \text{ мк} + (8,621 + 0,00180 t) t \text{ мк};$$

$$\text{Метр М20}^\circ = 1 \text{ м} + 2,35 \text{ мк} + [8,644 + 0,0006(t-20)](t-20) \text{ мк};$$

$$\text{Метр П4 (13-10}^{1/10}) \text{ дм} = 1 \text{ м} - 3,8 \text{ мк} + (8,62 + 0,0018 t) t \text{ мк}.$$

9. Результаты сличений рабочих эталонов длины

Сличения рабочих эталонов производились как на однометровом универсальном компараторе, так и на четырехметровом геодезическом компараторе, в воде, при комнатной температуре.

Начиная с 1950 г., приведение действительной длины рабочих эталонов метров М318, R86 и R116 к нормальной температуре или к 0° С производилось по новым температурным формулам этих метров, определенным лабораторией в 1949 г.

Ниже приводятся прежние и новые значения температурных коэффициентов удлинения метров М318, R116 и R86.

Метр М318:

$$\alpha_{1900 \text{ г.}} = 1,91 \cdot 10^{-6}; \quad \beta_{1900 \text{ г.}} = -0,005 \cdot 10^{-6};$$

$$\alpha_{1949 \text{ г.}} = 2,00 \cdot 10^{-6}; \quad \beta_{1949 \text{ г.}} = -0,007 \cdot 10^{-6}.$$

Метр R116:

$$\alpha_{1928 \text{ г.}} = 7,35 \cdot 10^{-6}; \quad \beta_{1928 \text{ г.}} = -0,003 \cdot 10^{-6};$$

$$\alpha_{1949 \text{ г.}} = 7,37 \cdot 10^{-6}; \quad \beta_{1949 \text{ г.}} = -0,004 \cdot 10^{-6}.$$

Метр R86:

$$\alpha_{1928 \text{ г.}} = 11,32 \cdot 10^{-6}; \quad \beta_{1928 \text{ г.}} = +0,005 \cdot 10^{-6};$$

$$\alpha_{1949 \text{ г.}} = 11,36 \cdot 10^{-6}; \quad \beta_{1949 \text{ г.}} = +0,003 \cdot 10^{-6}.$$

Погрешности определения новых значений температурных коэффициентов удлинения не превышают величин порядка для α — $\pm 0,02 \cdot 10^{-6}$ и для β — $\pm 0,001 \cdot 10^{-6}$.

В табл. 8 приводятся результаты сличений рабочих эталонов длины.

Сопоставление результатов послевоенных сличений рабочих эталонов с результатами, полученными до 1941 г. [1], позволяет сделать следующие выводы:

а) длина платинитового метра R116 остается неизменной в пределах точности компараторных измерений и за годы войны не претерпела каких-либо изменений;

б) при сличении метра R86 в 1945 г. нами было обнаружено значительное изменение его длины.

Последующие же сличения этого эталона дали результаты, очень близкие к среднему значению длины метра R86 за многие годы;

в) изменение длины инварного метра М318 в сторону его удлинения вполне закономерно, так как оно свойственно всем инварным метрам.

Таблица 8

| Метр М318 | | Метр R116 | | Метр R36 | |
|--------------|---|--------------|---|--------------|---|
| Год сличений | Действительная длина метра при температуре 0° | Год сличений | Действительная длина метра при температуре 0° | Год сличений | Действительная длина метра при температуре 0° |
| 1945 | 1 м + 19,4 мк | 1945 | 1 м + 2,3 мк | 1945 | 1 м + 10,3 мк |
| 1946 | + 21,4 . | 1946 | + 2,7 . | 1946 | + 11,8 . |
| 1947 | + 20,9 . | 1947 | + 2,4 . | 1947 | + 11,5 . |
| 1948 | + 21,3 . | 1948 | + 2,6 . | 1948 | + 11,6 . |
| 1949 | + 21,1 . | 1949 | + 2,6 . | 1949 | + 11,3 . |
| 1950 | + 19,8 . | 1950 | + 2,2 . | 1950 | + 11,3 . |
| 1951 | + 21,5 . | 1951 | + 2,4 . | 1951 | + 11,9 . |
| 1952 | + 20,1 . | 1952 | + 2,0 . | 1952 | + 11,1 . |

Обращает на себя внимание, что в 1950 и 1952 г. метр М318 значительно изменял свою длину. Но эти резкие изменения длины метра М318 не могут вызывать каких-либо опасений, так как инварный метр М318 в практике лаборатории применяется только при определении температурных коэффициентов удлинения.

10. Результаты сличений образцовых геодезических жезлов

Геодезические трехметровые жезлы являются образцовыми мерами длины при проведении основных геодезических работ на территории Советского Союза. Они изготавливаются из различных сплавов никелевой стали и поэтому, точно так же как и рабочие эталоны длины, подлежат периодическим сличениям с государственными эталонами длины.

Начиная с 1945 г., мы ежегодно производили сличения трехметрового инварного жезла № 541, являющегося образцовой мерой московского 24-метрового геодезического компаратора.

Проведено было также сличение и трехметровых инварных жезлов: Е12, № 615, G14; трехметровых платинитовых жезлов: № 585 и 613.

Трехметровые геодезические жезлы всегда сличаются во ВНИИМ с трехметровым платинитовым жезлом Н15. Трехметровый платинитовый жезл Н15, таким образом, является исходной мерой для всех ведущихся у нас геодезических работ. В 1946 г. нами было произведено сличение жезла Н15 с основным государственным эталоном длины СССР — метром № 28.

Определение действительной длины жезла Н15 производилось путем последовательного сличения длины его однометровых

интервалов 0—1, 1—2 и 2—3 м с длиной метра № 28 на четырехметровом геодезическом компараторе. Сличения производились в воде при комнатной температуре.

Наблюдения производились в ночные часы, когда стихает уличное движение и изображения наблюдаемых в микроскоп компаратора штрихов спокойны. В результате сличений обнаружилось значительные изменения длины жезла Н15 — жезл укоротился более чем на 3 мк.

В январе и в мае месяцах 1947 г. это изменение было подтверждено повторными сличениями жезла Н15 с эталоном-копией платино-иридиевым метром № 11.

В 1949 г. было определено также и новое значение температурного коэффициента удлинения платинитового жезла Н15.

Это исследование дало следующие значения коэффициентов температурной формулы жезла Н15:

$$\alpha = 22,23 \text{ мк} \pm 0,01 \text{ мк};$$

$$\beta = 0,011 \text{ мк} \pm 0,0004 \text{ мк}.$$

Результаты исследования жезла Н15 подробно описаны в нашей статье [4].

В 1951—1952 гг. было проведено повторное сличение жезла Н15 с эталоном-копией метром № 11.

В сводной табл. 9 приводятся результаты всех сличений жезла Н15.

Таблица 9

| Интервалы жезла Н15 в м | Действительная длина интервалов жезла Н15 | | | Изменение длины жезла Н15 в мк | |
|-------------------------|---|----------------|----------------|--------------------------------|------------------------|
| | 1927 г. | 1916—1947 гг. | 1951—1952 гг. | За время 1927—1947 гг. | За время 1917—1952 гг. |
| 0—1 | 1 м — 11,51 мк | 1 м — 13,45 мк | 1 м — 13,97 мк | —1,94 | —0,52 |
| 1—2 | 1 м + 11,81 мк | 1 м + 9,88 мк | 1 м + 9,52 мк | —1,93 | —0,36 |
| 2—3 | 1 м + 32,42 мк | 1 м + 30,83 мк | 1 м + 29,84 мк | —1,59 | —0,99 |
| | 3 м + 52,72 мк | 3 м + 27,25 мк | 3 м + 25,31 мк | —5,46 | —1,87 |

В табл. 10 приводятся результаты сличений некоторых трехметровых геодезических жезлов. Результаты всех послевоенных сличений, начиная с 1945 г., пересчитаны по новому уравнению жезла Н15.

Таблица 10

| Год измерения | Длина при температуре 0° | Год измерения | Длина при температуре 0° |
|---------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Инварный жезл № 541 | | Платинитовый жезл № 585 | |
| 1945 | 3 м - 77,4 мк | 1947-1948 | 3 м - 335,1 мк |
| 1946 | -77,8 " | 1951 | -337,0 " |
| 1947 | -77,6 " | Инварный жезл № 615 | |
| 1948 | -76,7 " | 1947 | 3 м - 66,6 мк |
| 1949 | -77,9 " | 1949 | -66,9 " |
| 1950 | -78,2 " | 1950 | -66,8 " |
| 1951 | -78,7 " | Инварный жезл g14 | |
| 1952 | -78,4 " | 1947 | 3 м + 46,3 мк |
| | | 1950 | 3 м + 45,5 " |

ЛИТЕРАТУРА

1. Барильов В. А., Современное состояние эталонов длины и методы точного измерения длины, Л, ВНИИМ, 1941.
2. Volet Ch., *Revue d'optique*, 21, 1942.
3. Романова М. Ф., Волкова Е. А., Кляк Л. К., Сравнение длины государственного эталона метра с длиной волны красной линии кадмия, Труды ВНИИМ, вып. 16/17, Машгиз, 1951.
4. Кляк Л. К., Результаты нового исследования трехметрового платинитового жезла Н15, Сборник научно-технических и производственных статей, вып. XXXIII, Геоледиздат, 1950.

А. Н. КОРОЛЕВА

О ТОЧНОСТИ МЕТОДА КАЛИБРОВКИ ШКАЛ НА СТЕРЕОКОМПАРАТОРЕ

В 1951 г. лаборатория мер длины произвела одновременное исследование группы образцовых шкал 1-го разряда, которые должны были в дальнейшем являться исходными мерами при поверке образцовых шкал 2-го разряда и шкал точных измерительных приборов.

Поправки сантиметровых подразделений образцовых шкал определялись нами с помощью калибровки их на стереокомпараторе.

В качестве метода калибровки сантиметровых подразделений образцовых шкал был выбран метод калибровки их со вспомогательной шкалой, дающий возможность определить поправки подразделений главной и вспомогательной шкалы, а также погрешности результатов.

Порядок наблюдений и обработка результатов калибровки описаны в статье Л. К. Каяка и А. Н. Королевой «Исследование стереокомпаратора», сборник ВНИИМ, № 18/78, 1952 г.

Особенности устройства стереокомпаратора заставили нас ввести следующие изменения в обычно принятый порядок калибровки: в отдельных сериях измерений сличение главных промежутков производилось с различными интервалами вспомогательной шкалы, а не наоборот. Калибровка сантиметровых подразделений интервалов 0—100 мм и 100—200 мм производилась раздельно. Раздельно производилась также калибровка миллиметровых подразделений для отдельных сантиметровых интервалов.

При всех калибровках исходной шкалой являлась стеклянная стомиллиметровая шкала № 490541, а поверяемые шкалы № 5101, 5103, 5105, 5107 являлись вспомогательными. Это дало возможность, с одной стороны, определить поправки шкалы № 490541 с высокой степенью точности, как среднее из многократной калибровки, а с другой стороны, определить погрешности принятого метода калибровки шкал. Средняя квадратичная погреш-

ность результатов калибровки подразделений шкал вычислялась непосредственно при обработке результатов наблюдений по формулам:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-m}}; \quad (1)$$

$$S_{x_i} = \sigma \cdot Q_i \quad (2)$$

где σ — средняя квадратичная погрешность начальных уравнений;

v — остаточные погрешности начальных уравнений;

n — число начальных уравнений;

m — число неизвестных;

Q_i — коэффициент, обратно пропорциональный корню квадратному из соответствующего веса P_x неизвестного;

S_x — средняя квадратичная погрешность результатов калибровки.

Средняя квадратичная погрешность S вычисленных значений поправок шкал уже с учетом погрешности исходных данных определялась по формуле

$$S = \pm (S_x + bL10^{-6}), \quad (3)$$

где b — коэффициент, зависящий от погрешности определения общей длины вспомогательной шкалы.

Значения коэффициентов Q_i при обработке результатов наблюдений принимались по данным Перара в среднем равными 0,4.

Нами были определены средние квадратичные погрешности для всех калибровок сантиметровых интервалов.

В среднем эта погрешность оказалась равной $\pm 0,06$ мк.

Для более подробного исследования погрешностей метода калибровки было произведено 12 калибровок шкалы № 490541 по различным шкалам.

В табл. 1 приводятся результаты калибровки сантиметровых подразделений шкалы № 490541.

Из рассмотрения табл. 1 видно, что поправки подразделений шкалы № 490541, полученные как среднее из 12 калибровок, определены со средней квадратичной погрешностью, лежащей в пределах от $\pm 0,03$ до $\pm 0,05$ мк.

Эта погрешность возрастает пропорционально длине.

В погрешности калибровки входят погрешности определения общей длины вспомогательных шкал.

Результаты определения общей длины вспомогательных шкал № 5101, 5103, 5105, 5107 приведены в табл. 2.

Общая длина интервалов 0—100 мм и 100—200 мм вспомогательных шкал определена со средней квадратичной погрешностью от $\pm 0,08$ до $\pm 0,22$ мк.

Для выяснения влияния на результаты калибровки погрешностей определения общей длины вспомогательной шкалы нами было произведено повторное вычисление поправок шкалы

Таблица 1
 Результаты калировки сантиметровых подразделений шкалы № 49054 с различными шкалами

| Калируемые шкалы и их интервалы | Поправки сантиметровых подразделений шкалы № 49054 в мм | | | | | | | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0-10 | 0-20 | 0-30 | 0-40 | 0-50 | 0-60 | 0-70 | 0-80 | 0-90 | 0-100 | |
| 5101 | 0-100 | -0,25 | -0,32 | -0,23 | +0,02 | +0,24 | +0,33 | +0,34 | +0,60 | +0,58 | +0,82 |
| | 100-200 | -0,14 | -0,09 | -0,11 | +0,08 | +0,31 | +0,44 | +0,44 | +0,71 | +0,68 | +0,83 |
| 5103 | 0-100 | -0,28 | -0,33 | -0,30 | -0,19 | -0,15 | -0,01 | -0,05 | +0,20 | +0,16 | +0,36 |
| | 100-200 | -0,26 | -0,14 | -0,21 | -0,04 | +0,19 | +0,28 | +0,34 | +0,60 | +0,59 | +0,84 |
| 5105 | 0-100 | -0,37 | -0,13 | -0,28 | -0,14 | +0,02 | +0,08 | +0,16 | +0,43 | +0,37 | +0,61 |
| | 100-200 | -0,19 | -0,10 | -0,19 | -0,04 | +0,16 | +0,22 | +0,27 | +0,50 | +0,48 | +0,67 |
| 5107 | 0-100 | -0,08 | +0,06 | -0,05 | -0,03 | +0,14 | +0,25 | +0,25 | +0,48 | +0,40 | +0,53 |
| | 100-200 | -0,33 | -0,21 | -0,30 | -0,19 | -0,10 | +0,19 | +0,11 | +0,42 | +0,38 | +0,61 |
| 18776 1 прием | 0-100 | -0,26 | -0,17 | -0,15 | -0,04 | +0,22 | +0,26 | +0,29 | +0,61 | +0,59 | +0,81 |
| | 100-200 | -0,08 | +0,15 | +0,08 | +0,24 | +0,42 | +0,53 | +0,56 | +0,81 | +0,86 | +1,06 |
| 18776 2 прием | 0-100 | -0,38 | -0,03 | -0,16 | +0,09 | +0,30 | +0,39 | +0,42 | +0,69 | +0,65 | +0,94 |
| | 100-200 | -0,29 | -0,12 | -0,14 | +0,07 | +0,27 | +0,34 | +0,41 | +0,68 | +0,65 | +0,90 |
| Среднее | | -0,24 | -0,09 | -0,17 | -0,01 | +0,17 | +0,27 | +0,29 | +0,55 | +0,53 | +0,75 |
| Средняя квадратичная погрешность ряда | | ±0,09 | ±0,11 | ±0,11 | ±0,12 | ±0,17 | ±0,15 | ±0,16 | ±0,16 | ±0,18 | ±0,19 |
| Средняя квадратичная погрешность результата | | ±0,03 | ±0,03 | ±0,03 | ±0,03 | ±0,05 | ±0,04 | ±0,04 | ±0,04 | ±0,05 | ±0,05 |

Таблица 2

Результаты определения общей длины интервалов 0—100 и 100—200 мк образцовых шкал № 5101, 5103, 5105, 5107 по рабочим эталонам длины и шкалам № 18776 и 490541

| Образцовые шкалы и следующие интервалы | | Погрешка общей длины интервалов образцовых шкал в мк | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|--|-------|------------|-------|----------|-------|------------|-------|----------|-------|------------|-------|----------|-------|------------|-------|
| | | № 5101 | | | | № 5103 | | | | № 5105 | | | | № 5107 | | | |
| | | 0—100 мк | 0 | 100—200 мк | 0 | 0—100 мк | 0 | 100—200 мк | 0 | 0—100 мк | 0 | 100—200 мк | 0 | 0—100 мк | 0 | 100—200 мк | |
| RI16 | -3,20 | -0,42 | -0,80 | +0,06 | -0,73 | -0,23 | -0,95 | -0,06 | -0,80 | -0,06 | -1,79 | -0,28 | -1,28 | -0,46 | -1,24 | -0,46 | |
| Д40 | -2,50 | +0,28 | -1,44 | -0,49 | -0,50 | 0,00 | 0,97 | -0,04 | -0,67 | +0,07 | -1,43 | +0,08 | -0,55 | -0,13 | -1,02 | -0,31 | |
| Д76 | -3,28 | -0,50 | - | - | -0,23 | +0,27 | -1,58 | -0,57 | -1,02 | -0,28 | -1,75 | -0,24 | -1,14 | -0,32 | - | - | |
| № 18776 | -2,53 | +0,25 | -1,02 | -0,07 | -0,44 | +0,06 | -0,66 | +0,35 | -0,57 | +0,17 | -1,18 | +0,33 | -0,35 | +0,47 | -0,38 | +0,40 | |
| № 490541 | -2,38 | +0,40 | -0,45 | +0,50 | -0,61 | -0,11 | 0,90 | +0,11 | -0,63 | +0,11 | -1,42 | +0,09 | -0,36 | +0,46 | -0,42 | +0,36 | |
| Среднее | -2,78 | | -0,95 | | -0,50 | | -1,01 | | -0,74 | | 1,51 | | -0,82 | | -0,78 | | |
| Средняя квадратичная погрешность ряда измерений . . . | ±0,13 | | ±0,41 | | ±0,19 | | ±0,34 | | ±0,15 | | ±0,18 | | ±0,26 | | ±0,44 | | ±0,45 |
| Средняя квадратичная погрешность результатов . . . | ±0,19 | | ±0,20 | | ±0,08 | | ±0,15 | | ±0,08 | | ±0,12 | | ±0,20 | | ±0,20 | | ±0,22 |

№ 490541. При повторном вычислении величину общей длины вспомогательной шкалы мы принимаем только по данным сличения с эталонной шкалой № 18776 на стереокомпараторе, считая, что сличение двух стеклянных шкал на стереокомпараторе можно производить точнее, чем сличение каждой из них с рабочими эталонами дециметра на универсальном компараторе.

Средняя квадратичная погрешность определения длины вспомогательных шкал в этом случае уменьшилась и оказалась равной $\pm 0,08$ мк.

Однако средняя квадратичная погрешность определения поправок подразделений мало изменилась и попрежнему лежала в пределах $\pm 0,03$ — $\pm 0,05$ мк.

В большей степени погрешности результатов калибровки уменьшаются в том случае, когда общая длина вспомогательной шкалы определена с высокой степенью точности. Например, определение общей длины миллиметра, разделенного на 0,1 мм, на шкалах № 5101, 5105, 5107 и 5110, как видно из табл. 3, было произведено со средней квадратичной погрешностью, не превосходящей $\pm 0,04$ мк.

Таблица 3

Результаты определения длины миллиметра, разделенного на 0,1 мм, на шкалах № 5101, 5105, 5107, 5110 в мк

| Наименование меры, с которой производилось сличение | Шкалы | | | | | | | |
|---|------------|----------|-------|----------|-------|----------|------------|----------|
| | 5101 | σ | 5105 | σ | 5107 | σ | 5110 | σ |
| 10-й миллиметр XI сантиметра шкалы № 18776 | +0,31 | -0,03 | -0,23 | +0,05 | +0,38 | -0,04 | -0,20 | -0,04 |
| 9-й миллиметр XI сантиметра шкалы № 18776 | +0,33 | -0,01 | -0,29 | -0,01 | +0,51 | +0,09 | -0,18 | -0,02 |
| D40 (миллиметр, разделенный на 0,1 мм) . . | +0,37 | +0,03 | -0,30 | -0,02 | +0,44 | +0,02 | -0,14 | +0,02 |
| D36 (миллиметр, разделенный на 0,1 мм) . . | +0,35 | +0,01 | -0,32 | -0,04 | +0,35 | -0,07 | -0,13 | +0,03 |
| Среднее | +0,34 | | -0,28 | | +0,42 | | -0,16 | |
| Средняя квадратичная погрешность ряда измерений | +0,03 | | +0,04 | | +0,07 | | +0,03 | |
| Средняя квадратичная погрешность результата | $\pm 0,01$ | | +0,02 | | +0,04 | | $\pm 0,01$ | |

Результаты калибровки подразделений в 0,1 мм на шкале № 5103 по соответствующим подразделениям шкал № 5101, 5105, 5107, 5110 приведены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что подсчитанная средняя квадратичная погрешность поправок подразделений шкалы № 5103 не превосходит $\pm 0,03$ мк.

Таблица 4

Результаты калибровки подразделений в 0,1 мм шкалы № 5103

| Проверяемые интервалы | Результаты калибровки шкалы № 5103 по шкалам в мм | | | | | Средняя квадратичная погрешность в мк | |
|-----------------------|---|--------|--------|--------|--------|---------------------------------------|------------|
| | № 5101 | № 5105 | № 5107 | № 5110 | средн. | шкалы | результата |
| 0-0,1 | +0,03 | 0,00 | 0,00 | -0,02 | 0,00 | $\pm 0,02$ | $\pm 0,01$ |
| 0-0,2 | +0,06 | -0,09 | -0,04 | -0,06 | -0,03 | $\pm 0,06$ | $\pm 0,03$ |
| 0-0,3 | -0,08 | -0,07 | -0,05 | -0,12 | -0,08 | $\pm 0,05$ | $\pm 0,02$ |
| 0-0,4 | -0,11 | -0,04 | -0,09 | -0,18 | -0,10 | $\pm 0,06$ | $\pm 0,03$ |
| 0-0,5 | -0,07 | -0,10 | -0,12 | -0,11 | -0,10 | $\pm 0,03$ | $\pm 0,01$ |
| 0-0,6 | +0,14 | +0,07 | +0,03 | +0,01 | +0,05 | $\pm 0,06$ | $\pm 0,03$ |
| 0-0,7 | +0,28 | +0,21 | +0,18 | +0,17 | +0,21 | $\pm 0,04$ | $\pm 0,02$ |
| 0-0,8 | +0,30 | +0,21 | +0,25 | +0,21 | +0,24 | $\pm 0,04$ | $\pm 0,02$ |
| 0-0,9 | +0,16 | +0,05 | +0,11 | +0,08 | +0,10 | $\pm 0,05$ | $\pm 0,02$ |
| 0-1,0 | -0,01 | -0,07 | -0,01 | -0,07 | -0,04 | $\pm 0,03$ | $\pm 0,01$ |

Такого же порядка были получены результаты и по данным многократной калибровки миллиметровых подразделений XI сантиметра шкалы № 18776 по миллиметрам пяти различных сантиметровых интервалов шкалы № 490541. В этом случае подсчеты показали, что средняя квадратичная погрешность результатов калибровки S не превышает $\pm 0,02$ мк.

Длина вспомогательной шкалы в этом случае оставалась неизменной, поэтому можно считать, что средняя квадратичная погрешность $S = \pm 0,02$ мк характеризует точность метода калибровки наших шкал на стереокомпараторе.

На основании вышесказанного можно сделать выводы:

1. Принятый нами метод калибровки шкал на стереокомпараторе дает возможность определять поправки подразделений образцовых шкал 1-го разряда с погрешностью, не превышающей величины $\pm 0,05$ мк.

2. Анализ результатов исследования группы образцовых шкал показал, что погрешности результатов калибровки зависят главным образом от погрешностей определения общей длины вспомогательной шкалы.

Поэтому основное внимание при калибровках шкал должно уделяться повышению точности определения общей длины вспомогательных шкал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баринов В. А., Современное состояние эталонов длины и методы точного измерения длины, 1941.
2. Баринов В. А., Исследование круговой делительной машины Г. Гейде № 9859 в эталонной лаборатории мер длины ВИМС, «Геодезист», № 1—2, 1933.

| № | Имя | Фамилия | Имя | Фамилия | Имя | Фамилия |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | Баринов | В. А. | Баринов | В. А. | Баринов | В. А. |
| 2 | Гейде | Г. | Гейде | Г. | Гейде | Г. |
| 3 | Гейде | Г. | Гейде | Г. | Гейде | Г. |
| 4 | Гейде | Г. | Гейде | Г. | Гейде | Г. |
| 5 | Гейде | Г. | Гейде | Г. | Гейде | Г. |
| 6 | Гейде | Г. | Гейде | Г. | Гейде | Г. |
| 7 | Гейде | Г. | Гейде | Г. | Гейде | Г. |
| 8 | Гейде | Г. | Гейде | Г. | Гейде | Г. |
| 9 | Гейде | Г. | Гейде | Г. | Гейде | Г. |
| 10 | Гейде | Г. | Гейде | Г. | Гейде | Г. |

ВВЕДЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ

2. ВВЕДЕНИЕ

3. ВВЕДЕНИЕ

4. ВВЕДЕНИЕ

5. ВВЕДЕНИЕ

6. ВВЕДЕНИЕ

7. ВВЕДЕНИЕ

8. ВВЕДЕНИЕ

9. ВВЕДЕНИЕ

10. ВВЕДЕНИЕ

11. ВВЕДЕНИЕ

12. ВВЕДЕНИЕ

13. ВВЕДЕНИЕ

14. ВВЕДЕНИЕ

15. ВВЕДЕНИЕ

16. ВВЕДЕНИЕ

17. ВВЕДЕНИЕ

18. ВВЕДЕНИЕ

19. ВВЕДЕНИЕ

20. ВВЕДЕНИЕ

21. ВВЕДЕНИЕ

22. ВВЕДЕНИЕ

23. ВВЕДЕНИЕ

24. ВВЕДЕНИЕ

25. ВВЕДЕНИЕ

26. ВВЕДЕНИЕ

27. ВВЕДЕНИЕ

28. ВВЕДЕНИЕ

29. ВВЕДЕНИЕ

30. ВВЕДЕНИЕ

31. ВВЕДЕНИЕ

32. ВВЕДЕНИЕ

33. ВВЕДЕНИЕ

34. ВВЕДЕНИЕ

35. ВВЕДЕНИЕ

36. ВВЕДЕНИЕ

37. ВВЕДЕНИЕ

38. ВВЕДЕНИЕ

39. ВВЕДЕНИЕ

40. ВВЕДЕНИЕ

41. ВВЕДЕНИЕ

42. ВВЕДЕНИЕ

43. ВВЕДЕНИЕ

44. ВВЕДЕНИЕ

45. ВВЕДЕНИЕ

46. ВВЕДЕНИЕ

47. ВВЕДЕНИЕ

48. ВВЕДЕНИЕ

49. ВВЕДЕНИЕ

50. ВВЕДЕНИЕ

51. ВВЕДЕНИЕ

52. ВВЕДЕНИЕ

53. ВВЕДЕНИЕ

54. ВВЕДЕНИЕ

55. ВВЕДЕНИЕ

56. ВВЕДЕНИЕ

57. ВВЕДЕНИЕ

58. ВВЕДЕНИЕ

59. ВВЕДЕНИЕ

60. ВВЕДЕНИЕ

61. ВВЕДЕНИЕ

62. ВВЕДЕНИЕ

63. ВВЕДЕНИЕ

64. ВВЕДЕНИЕ

65. ВВЕДЕНИЕ

66. ВВЕДЕНИЕ

67. ВВЕДЕНИЕ

68. ВВЕДЕНИЕ

69. ВВЕДЕНИЕ

70. ВВЕДЕНИЕ

71. ВВЕДЕНИЕ

72. ВВЕДЕНИЕ

73. ВВЕДЕНИЕ

74. ВВЕДЕНИЕ

75. ВВЕДЕНИЕ

76. ВВЕДЕНИЕ

77. ВВЕДЕНИЕ

78. ВВЕДЕНИЕ

79. ВВЕДЕНИЕ

80. ВВЕДЕНИЕ

81. ВВЕДЕНИЕ

82. ВВЕДЕНИЕ

83. ВВЕДЕНИЕ

84. ВВЕДЕНИЕ

85. ВВЕДЕНИЕ

86. ВВЕДЕНИЕ

87. ВВЕДЕНИЕ

88. ВВЕДЕНИЕ

89. ВВЕДЕНИЕ

90. ВВЕДЕНИЕ

91. ВВЕДЕНИЕ

92. ВВЕДЕНИЕ

93. ВВЕДЕНИЕ

94. ВВЕДЕНИЕ

95. ВВЕДЕНИЕ

96. ВВЕДЕНИЕ

97. ВВЕДЕНИЕ

98. ВВЕДЕНИЕ

99. ВВЕДЕНИЕ

100. ВВЕДЕНИЕ

К ВОПРОСУ О ПОГРЕШНОСТИ ЗА СЧЕТ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСИЛИЯ ПРИ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

При производстве измерений толщины тел с помощью существующих контактных приборов, измерительное усилие которых доходит до 500 Г, неизбежно наблюдается деформация в зоне контакта, вследствие чего арифметическое среднее из ряда измерений иногда значительно отличается от истинного значения толщины, особенно в тех случаях, когда материал измеряемого тела обладает малой твердостью. Это обстоятельство, однако, обычно не принимается во внимание, в то время как влияние деформации за счет измерительного усилия достаточно велико, и поэтому целесообразно искать пути его исключения или уменьшения.

Для подтверждения сказанного приведем несколько примеров определения деформации по формулам Герца. При измерении концевых мер, лент, фольги и других плоских тел с помощью сферического наконечника (случай контакта шара с плоскостью) величина сближения точек соприкасающейся пары, удаленных от зон контакта и находящихся на линии направления усилия, может быть определена по формуле:

$$w = 1,55 \sqrt[3]{\frac{P^2}{E^2 D}},$$

где w — величина сближения в см;
 P — приложенное усилие в кг;
 E — модуль продольной упругости в кг/см²;
 D — диаметр сферы наконечника в см.

Для наших целей эту формулу удобнее преобразовать применительно к единицам, обычным для линейных измерений, и тогда она приобретает вид:

$$w = 332,7 \sqrt[3]{\frac{P^2}{E^2 D}}, \quad (1)$$

где w — величина сближения в мк;
 P — измерительное усилие в Г;
 E — модуль продольной упругости в кг/см²;
 D — диаметр сферы наконечника в мм.

Для случая измерения стальных тел, в частности концевых мер, с помощью стального сферического наконечника, т. е. при E , равном $2,2 \cdot 10^6$ кг/см², формулу можно преобразовать до вида:

$$w = 0,02 \sqrt[3]{\frac{P^2}{D}}. \quad (2)$$

Подставляя в эту формулу конкретные значения P и D , получим ряд значений, характеризующих зависимость деформации от величины измерительного усилия и диаметра сферы наконечника. Значения эти сведены в табл. 1.

Таблица 1

| P в Г | 500 | 200 | 100 | 50 | 20 | 10 | 5 | 1 |
|----------|----------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| D в мм | w в мк | | | | | | | |
| 2,0 | 1,00 | 0,54 | 0,34 | 0,21 | 0,11 | 0,07 | 0,040 | 0,015 |
| 3,6 | 0,82 | 0,44 | 0,28 | 0,17 | 0,09 | 0,05 | 0,038 | 0,013 |
| 10,0 | 0,59 | 0,32 | 0,20 | 0,13 | 0,07 | 0,04 | 0,030 | 0,009 |
| 38,0 | 0,38 | 0,20 | 0,13 | 0,08 | 0,04 | 0,02 | 0,010 | 0,006 |

Из таблицы видно, как резко уменьшается деформация при снижении величины измерительного усилия, и, кроме того, очевидно, что изменение диаметра сферы наконечника влияет на изменение деформации в значительно меньшей степени, чем изменение величины измерительного усилия.

О влиянии упругости материала измеряемого объекта на величину деформации можно судить по нижеприведенной табл. 2, отличающейся от предыдущей таблицы тем, что она относится к случаю измерения кварцевых мер агатовым наконечником, а модуль упругости агата и кварца значительно меньше модуля упругости стали.

Таблица 2

| P в Г | 500 | 200 | 100 | 50 | 20 | 10 | 5 | 1 |
|----------|----------|------|------|------|------|------|------|-------|
| D в мм | w в мк | | | | | | | |
| 2,0 | 2,10 | 1,13 | 0,71 | 0,44 | 0,23 | 0,15 | 0,10 | 0,032 |
| 3,6 | 1,72 | 0,92 | 0,59 | 0,36 | 0,19 | 0,13 | 0,09 | 0,027 |
| 10,0 | 1,24 | 0,65 | 0,42 | 0,25 | 0,13 | 0,09 | 0,06 | 0,019 |
| 38,0 | 0,80 | 0,42 | 0,27 | 0,17 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,013 |

Как видно из таблицы, деформация при измерении тел с пониженной упругостью при измерительном усилии 500 Г весьма значительна, достигая при малых диаметрах сферы наконечника величины порядка 2 мк, в то время как при усилиях от 1 до 5 Г она не превышает 0,1 мк, а при усилии 1 Г не достигает даже 0,05 мк.

Выше упоминалось, что влияние измерительного усилия на величину деформации значительнее, чем влияние диаметра сферы измерительного наконечника. Из нижеследующего примера ясно, какое практическое применение следует из этого вывода.

Пусть требуется произвести измерение стальной меры с погрешностью от деформации, не превышающей 0,04 мк, то есть при условии $w \leq 0,04$ мк.

При измерении с помощью стандартного стального наконечника с диаметром сферы, равным 3,6 мм, на приборе с измерительным усилием 200 Г, погрешность, как это следует из таблицы 1, составит 0,44 мк.

Для определения значений P и D , удовлетворяющих условию $w \leq 0,04$ мк, преобразуем формулу (2) в следующие:

$$D = 8 \cdot 10^{-6} \frac{P^2}{w^3} \quad (3)$$

и

$$P = 353,4w \sqrt{wD}. \quad (4)$$

Определим, каков должен быть диаметр сферы наконечника, чтобы при измерительном усилии, равном 200 Г, погрешность от деформации не превышала 0,04 мк:

$$D = 8 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 10^4}{(4 \cdot 10^{-2})^3} \approx 5000 \text{ мм},$$

то есть практически следует применить плоский наконечник.

Теперь определим, при каком измерительном усилии можно, используя стандартный сферический наконечник с диаметром сферы 3,6 мм, получить погрешность, не превышающую 0,04 мк:

$$P = 353,4 \cdot 0,04 \sqrt{0,04 \cdot 3,6} = 5,4 \text{ Г}.$$

Итак, перед нами два варианта:

1) сочетание плоского наконечника с измерительным усилием, равным 200 Г;

2) сочетание сферического наконечника с измерительным усилием, равным 5 Г.

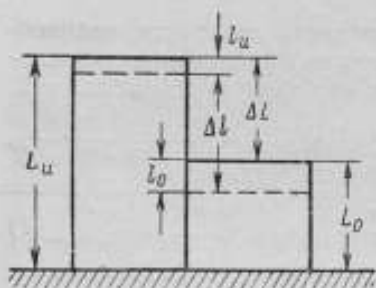
Преимущества на стороне второго варианта, так как при применении плоского наконечника возможна погрешность от непараллельности плоскостей наконечника измеряемой меры; в этом случае может возникнуть удельное усилие, значительно превышающее измерительное, в результате чего эта дополнительная погрешность может поглотить в себе расчетную. Кроме того,

вероятность появления погрешности от пыли при использовании плоского наконечника неизмеримо выше, чем при использовании сферического.

В практике измерений пользуются двумя методами: методом непосредственной оценки и разностным методом. В первом случае наконечник последовательно опускается на столик прибора и на измеряемое тело, во втором случае — на образец или образцовую меру и на измеряемое тело.

Для определения погрешности за счет деформации для обоих методов рассмотрим наиболее общий случай.

На рисунке введены следующие обозначения:



- L_0 — размер образцового тела;
- L_n — размер измеряемого тела;
- ΔL — действительная разность размеров тел;
- l_0 — деформация образцового тела под влиянием измерительного усилия, или расстояние между положениями наконечника в момент его контакта с поверхностью тела и в момент окончания процесса деформации;

l_u — та же величина, но для измеряемого тела;

a_0 — отсчет по шкале прибора в момент окончания деформации образцового тела;

a_n — та же величина, но для измеряемого тела;

τ_n — цена деления шкалы прибора.

Тогда

$$L_n = L_0 + \Delta L = L_0 + (a_n - a_0)\tau_n - l_0 + l_u.$$

Обозначая $(a_n - a_0)$ через n , то есть через число делений в интервале между отсчетами, будем иметь:

$$L_n = L_0 + n\tau_n + l_u - l_0, \quad (5)$$

для случая измерения разностным методом.

Приравняв L_0 нулю, получим формулу для случая измерения методом непосредственной оценки:

$$L_n = n\tau_n + l_u - l_0, \quad (6)$$

из которой ясно, что измерение последним методом является вариантом измерения разностным методом, когда размер образцового тела равен нулю. В этом случае l_0 обозначает деформацию стола прибора, или опоры, на которой установлены образцовое и измеряемое тела.

Разность величин деформаций $(l_u - l_0)$ может быть либо положительной, когда твердость измеряемого тела меньше твердости

образцового, либо отрицательной — в противном случае, либо может равняться нулю — при одинаковой твердости обоих тел.

В первом случае значение размера измеряемого тела, полученное в результате измерения, окажется заниженным против действительного значения на величину разности деформаций. Во втором случае «измеренное» значение окажется завышенным против действительного. И, наконец, в третьем случае, при одинаковой твердости тел, «измеряемое» и действительное значения будут равны между собой, так как погрешность за счет деформации будет отсутствовать.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1) при измерениях разностным методом следует, если это возможно, пользоваться образцовым телом (мерой), имеющим такую же упругость, как и измеряемое;

2) при измерениях методом непосредственной оценки следует применять накладные столики, упругость которых равна упругости измеряемого тела.

Однако соблюдение этих правил не всегда возможно, ибо в практике измерений часто встречаются случаи, когда материалами объектов являются латунь, медь, алюминий, кварц, стекло и другие.

В частности, такое положение имеет место при определении диаметра медной проволоки для эталонных и образцовых катушек, применяемых при электрических и магнитных измерениях; при измерениях толщины пластин конденсаторов, изготовленных из алюминия; при сличении кварцевых плоскопараллельных концевых мер и во многих других случаях.

Большое количество объектов измерения имеет форму цилиндра. К этому виду следует отнести проволоку. Измерение таких объектов плоскими наконечниками на плоском столике нельзя рекомендовать, так как в случае непрямолинейности объекта, возможность чего весьма велика, может возникнуть погрешность, соизмеримая по величине с диаметром объекта, при малых его размерах. Применение сферических наконечников также нецелесообразно ввиду трудности установки строго по диаметру цилиндра. Наиболее подходящей формой рабочего конца наконечника следует признать цилиндрическую с диаметром порядка 2 мм.

Для определения деформации в этом случае (контакт пересекающихся под углом 90° цилиндров) существует формула:

$$\omega = \lambda \sqrt[3]{\frac{P^2}{\left(\frac{E_1}{1-\mu_1^2} + \frac{E_2}{1-\mu_2^2}\right)^2} \cdot \frac{D_1 + D_2}{D_1 D_2}}$$

где ω — величина деформации в направлении приложения усилия в см;

P — приложенное усилие в кг;

E_1 и E_2 — модули продольной упругости материала цилиндров в $\kappa\Gamma/\text{см}^2$;

ν_1 и ν_2 — коэффициенты Пуассона материала цилиндров;

D_1 и D_2 — диаметры цилиндров в см ;

λ — коэффициент, зависящий от D_1/D_2 .

Для случая измерения стальных цилиндров, то есть при $E_1 = E_2 = 2,1 \cdot 10^6$ и $\nu_1 = \nu_2 = 0,28$, формула примет вид:

$$\omega = 37 \cdot 10^{-6} \sqrt[3]{\rho^2 \frac{D_1 + D_2}{D_1 D_2}}.$$

Определим величину деформации проволоочки для измерения среднего диаметра резьбы. Диаметр проволоочки примем равным 0,201 мм (по ГОСТ 2475—44), диаметр цилиндрического конца наконечника — равным 2 мм.

При $D_1/D_2 = 10$ коэффициент λ равен (из таблицы) 1,613, и тогда формулу можно преобразовать в следующую:

$$\omega_1 = 10^{-4} \sqrt[3]{\rho^2}, \quad (7)$$

откуда:

при P , равном 200 Г, значение ω_1 равно 0,34 мк;

при P , равном 10 Г, значение ω_1 равно 0,05 мк;

при P , равном 1 Г, значение ω_1 равно 0,01 мк.

Для определения погрешности за счет деформации необходимо учесть также величину деформации при установлении нулевого отсчета на шкале, то есть при положении наконечника на столике прибора. Эта деформация может быть определена по формуле для контакта цилиндра с плоскостью. Для двух тел с одинаковыми модулями упругости и коэффициентами Пуассона формула имеет вид:

$$\omega = 4\rho \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right) \left(\frac{1}{3} + \ln \frac{2D}{c} \right),$$

где обозначения сохранены те же, что и в приводившихся ранее формулах; новыми обозначениями являются:

ρ — нагрузка на единицу длины цилиндра в $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ и

c — ширина прямоугольной площадки контакта, определяемая по формуле

$$c = 2,02 \sqrt{\rho D \frac{1-\mu^2}{E}}.$$

Преобразуя формулы для случая контакта двух стальных тел, будем иметь:

$$c = 15 \cdot 10^{-4} \sqrt{\rho D}$$

и тогда формула примет вид:

$$\omega_2 = 156 \cdot 10^{-6} \left(0,333 + \ln \frac{2D}{c} \right). \quad (8)$$

При наконечнике с цилиндром, диаметр D которого равен 2 мм, а длина 5 мм, и при измерительном усилии 200 Г нагрузка приобретает значение 0,4 кг.

Тогда

$$c = 15 \cdot 10^{-4} \sqrt{0,4 \cdot 0,2} = 0,00065 \text{ см} = 6,5 \text{ мк}$$

и

$$\omega_2 = 156 \cdot 10^{-5} \cdot 0,4 \left(0,333 + \ln \frac{2 \cdot 0,2}{0,00065} \right) = 0,000004 \text{ см} = 0,04 \text{ мк}.$$

Как следует из формулы (5), погрешность за счет деформации равна $l_n - l_0$. В нашем случае l_n и l_0 представлены соответственно величинами деформации при положениях наконечника на цилиндре (ω_1) и на образцовой мере, или на столике (ω_2), то есть

$$l_n - l_0 = \omega_1 - \omega_2 = 0,34 \text{ мк} - 0,04 \text{ мк} = 0,30 \text{ мк}.$$

Учитывая, что по ГОСТ 2475—44 допуск на диаметр проволоки толщиной 0,2 мм равен 0,50 мк, приходится констатировать, что погрешность за счет деформации составляет 60% этого допуска.

При измерении проволочек между двумя наконечниками с плоскими поверхностями погрешность несколько уменьшается, но увеличивается вероятность перекоса наконечников, следствием чего является увеличение удельного измерительного усилия.

Выводы

Из изложенного следует, что задача уменьшения погрешности измерения, зависящей от измерительного усилия, должна, в первую очередь, решаться по линии снижения величины последнего по следующим причинам.

1. Даже при измерении стальных закаленных плоскопараллельных концевых мер с помощью сферического наконечника, либо при измерении стальных шаров малого диаметра с помощью плоского наконечника, возникает значительная деформация, порядка 0,6—0,8 мк при использовании приборов с измерительным усилием, равным 400—500 Г (миниметры, электроиндуктивные микрометры и другие), и деформация порядка 0,3—0,5 мк при использовании приборов с измерительным усилием, равным 200—250 Г (оптиметр, ультраоптиметр и другие).

2. Существующие приборы для контактного измерения предоставляют весьма ограниченные возможности уменьшения деформации — лишь путем увеличения диаметра сферы наконечника, что, однако, нецелесообразно, так как при незначительном влиянии увеличения этого диаметра на величину деформации возникает опасность появления погрешности за счет попадания пыли в зону контакта. Применение же плоских наконечников при измерении плоских тел должно быть категорически отвергнуто.

ввиду невозможности достижения абсолютной параллельности соприкасающихся поверхностей. К тому же в этом случае резко увеличится погрешность за счет пыли.

3. При измерении тел с различной упругостью при малом измерительном усилии, возникающие деформации, ничтожные сами по себе, настолько мало отличаются друг от друга по абсолютной величине, что практически их можно считать равными, то есть разностью между ними можно, ввиду ее малости, пренебречь, как не влияющей на результат измерения.

В самом деле, если обратиться к таблицам 1 и 2, то можно видеть, что в области больших измерительных усилий — от 200 до 500 Г — разность между деформациями при малых диаметрах сферы наконечника находится в пределах 0,5—1 мк, в то время как при усилиях от 1 до 5 Г эта разность не превышает 0,05 мк.

4. При измерении посредством приборов с малыми измерительными усилиями исключается влияние формы рабочего конца наконечника, что особенно ясно видно из таблицы 2, если сравнивать величины деформации, возникающие при измерении с помощью наконечников, диаметры сферы которых равны 2 и 38 мм. При измерительном усилии 500 Г соответствующие величины деформации равны 2,10 и 0,80 мк, следовательно разность между этими величинами составляет 1,30 мк, в то время как при измерительном усилии 1 Г эта разность не достигает даже 0,02 мк.

5. Применение малых измерительных усилий делает реальной возможность точного измерения тел с малыми размерами, в частности проволоки, фольги, шариков, вне зависимости от материала и размеров этих тел.

В результате большого количества измерений с помощью экспериментального прибора, в котором было осуществлено измерительное усилие 1 Г, установлено, что при таком усилии вполне обеспечена надежность контакта измерительного наконечника с поверхностью измеряемого тела.

ОБРАЗЦЫ С РЕГУЛЯРНЫМ ПРОФИЛЕМ ДЛЯ ПОВЕРКИ И ГРАДУИРОВКИ ЩУПОВЫХ ПРИБОРОВ

В настоящее время в СССР создано большое количество приборов для проверки чистоты обработанных поверхностей; значительное место занимают приборы, основанные на контактном принципе.

Из числа приборов, основанных на контактном принципе, наибольшее распространение получили профилометры, измеряющие чистоту поверхности непосредственно в значениях $H_{ск}$.

Как показала практика, поверка и градуировка этих приборов должны производиться только по образцам с регулярным профилем, которые изготавливаются по специальной методике и являются непревзойденными с точки зрения однородности по сравнению с образцами, полученными обычными видами механической обработки.

Ввиду того, что ВНИИМ является единственной организацией, которая в СССР занимается вопросами изготовления образцов с регулярным профилем, поверкой и градуировкой приборов по этим образцам, мы хотели бы поделиться опытом их изготовления, а также показать результаты их исследования.

Этот опыт может оказать помощь многочисленным организациям, занимающимся изготовлением приборов, которые должны градуироваться по образцам с регулярным профилем.

Методика изготовления образцов чистоты поверхности с регулярным профилем

Получение однородных образцов в основном зависит:

- 1) от материала образца,
- 2) материала инструмента и чистоты доводки его лезвия,
- 3) способа доводки поверхности образца и чистоты его поверхности,
- 4) жесткости машины — станка, на которой производится изготовление образцов чистоты поверхности.

Сущность разработанной методики изготовления однородных образцов чистоты поверхности заключается в следующем: на

доведенной до зеркального вида поверхности образца, лишенной каких-либо отдельных шероховатостей, наносятся алмазным резцом через определенные промежутки риски одинакового профиля, глубины и ширины. Изменяя глубину и расстояние между рисками, можно получить необходимый класс чистоты поверхности по ГОСТ 2789—51. При этом методе изготовления мы искусственно на «абсолютно» гладкой поверхности создаем нужную нам по величине шероховатость.

Материал образцов и способ доводки поверхности под нарезание

Материалом для образцов должна служить сталь без посторонних включений, однородная по структуре, по твердости и т. д., которая легко принимала бы хорошую зеркальную доводку.

Для изготовления образцов с регулярным профилем наилучшие результаты были получены на сталях ХВГ и ХГ, применяемых для изготовления концевых мер.

Стали марки ХВГ и ХГ имеют небольшой разброс твердости после закалки и очень хорошо доводятся до зеркального вида. Кроме того, эти стали имеют мелкозернистую структуру, что очень важно при нанесении штрихов. Качество доводки поверхности под нарезание должно быть такое, при котором получались бы штрихи, однородные по высоте неровности и с ровными краями. Чистота поверхности должна быть возможно более высокой. Дефекты поверхности образца, как-то: волнистость, шероховатость, посторонние включения, не допускаются.

На основании ряда экспериментов нами было установлено, что поверхность, на которую необходимо наносить штрихи, должна иметь шероховатость не ниже $\nabla\nabla\nabla\nabla 14$. Получение такой поверхности заключается не только в придании ей заданной геометрической формы и необходимой гладкости, но при ее предварительной обработке не могут допускаться микроскопические разрушения поверхности. Такие разрушения трудно обнаружить при помощи оптических приборов, но однородность глубины риски зависит от наличия на поверхности микроскопических разрушений, полученных в результате неправильной предварительной обработки заготовки.

Как показали эксперименты, микроскопические разрушения появляются в результате неправильного выбора метода обработки поверхности, на которую надлежит нанести штрихи. В результате шлифования крупными зёрнами абразива на шлифованной поверхности получают невидимые трещины, распространяющиеся от поверхности вглубь, и выбоины (каверны). Эти невидимые трещины и выбоины при дальнейшей доводке не выводятся, а заглаживаются наплывшим со всех сторон, пластически деформированным материалом заготовки. На вид поверхность получается зеркально-чистой, и даже самое большое увеличение на микроскопе не обнаруживает заглаженных дефектов.

Дефекты поверхности выявляются только при нанесении штриха алмазным резцом. Штрих получается не ровный, а рваный. Для получения поверхности без дефектов в виде микроскопических невидимых трещин и выбоин необходимо придерживаться правильной подготовки поверхности под доводку. Переход от крупного абразива к полировальному необходимо производить через ряд последовательных номеров его с тем, чтобы все трещины, произведенные ударами зерен крупнозернистого абразива, были выведены снятием материала последующими, более мелкими, абразивами, дающими при работе мелкие трещины. Соблюдение такой последовательности важно как при шлифовке, так и при доводке.

Нами был принят следующий технологический процесс предварительной и окончательной обработки, давший наилучшие результаты.

1. Стrojка плоскостей.

2. Термическая обработка:

а) закалка при $t = 825^\circ$ в соляной ванне, содержащей 50% NaCl и 50% BaCl;

б) отпуск при $t = 70^\circ$ С в масляной ванне.

После термообработки твердость заготовок оказалась $H_{RC} = 62-64$.

3. Шлифование плоскости предварительно карборундовым кругом, зернистостью 46, при очень малых глубинах врезания и при обильном охлаждении, во избежание местных прижогов поверхностей.

4. Шлифование кругом зернистостью 60.

5. Шлифование кругом зернистостью 80.

6. Доводка вручную на чугунных притирах пастой ГОИ. При доводке был применен ряд последовательных переходов от грубой пасты до тонкой.

Вся доводка была разбита на следующие переходы:

а) доводка пастой ГОИ с керосином, величина зерна пасты от 40 до 17 мк;

б) доводка пастой ГОИ с керосином, величина зерна от 16 до 8 мк;

в) доводка пастой ГОИ с керосином, величина зерна от 7 до 1 мк.

Ввиду того, что самая тонкая паста оставляет на поверхности тонкую штриховку глубиной в 0,1—0,3 мк, окончательная доводка поверхности до зеркального блеска производилась тонкой (прокаленной) окисью хрома с водой на латунном диске с смоляной подкладкой.

Инструменты для нанесения штрихов

Инструмент для нанесения штрихов играет решающую роль для получения однородных штрихов при нарезании. Применение стального реза или реза из твердых сплавов не приводит

к желаемым результатам, так как в процессе нанесения штрихов форма лезвия его меняется из-за износа. Наилучшие результаты мы получили при применении алмазного реза. Для получения образцов чистоты поверхности, форма рисок которых близко подходила бы к форме рисок при обычных видах механической обработки, нами был выбран профиль реза с углом в плане $155-162^\circ$.

Особое внимание нами было уделено вопросу чистоты поверхности передней грани и лезвия реза. Чистота передней грани была доведена до 14-го класса чистоты. Лезвие реза было доведено до состояния, при котором отсутствовали какие-либо отдельные неровности. Все неровности на лезвии копируются непосредственно на образце, и поэтому чистоте поверхности лезвия нужно уделять особенное внимание.

Механизм для нанесения рисок

Для получения совершенно идентичных нарезаемых рисок как по глубине, так и по ширине, необходимо подобрать такой механизм, при котором отсутствовало бы влияние субъективных особенностей оператора и который можно было бы настраивать для получения рисок различной глубины и ширины. Наиболее удачным механизмом является автоматическая делительная машина, служащая для нанесения рисок на точных шкалах.

Автоматическая делительная машина дает возможность:

1) наносить штрих, постоянный по глубине и ширине на всем протяжении, так как давление на резец в процессе резания не меняется;

2) изменять давление на резец для получения различной глубины штриха;

3) нарезать штрихи через определенные интервалы, начиная от 2 мк и более.

После выбора инструмента и машины для нарезания мы определили наиболее выгодные режимы нарезания (угол резания, скорость резания), а также произвели градуировку машины. Градуировка машины заключалась в определении зависимости получаемых высот неровностей от давления на резец.

Наиболее выгодным углом резания, при котором получались штрихи без завалов по краям, являлся угол $\delta = 96-100^\circ$. При градуировке машины, которая производилась экспериментальным путем, были изготовлены образцы с различными твердостями: $H_{RC}=25$; $H_{RC}=31$; $H_{RC}=42$ и $H_{RC}=64$. Градуировка машины заключалась в следующем: устанавливался образец определенной твердости, и производилось нанесение штриха при установке определенного номера нагрузочной пружины и противовеса на балансир реза, затем измерялась глубина неровности $H_{\text{макс}}$ полученная при нарезании. Предварительно была определена упругость каждой пружины.

Упругость пружины и градуировка машины показаны в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Упругости пружин от автоматической делительной машины

| № пружины | Длина пружины в свободном состоянии в мм | Диаметр проволоки пружины в мм | Наружный диаметр пружины в мм | Количество витков пружины | Упругость пружины в сжатом состоянии в кг |
|-----------|--|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---|
| 1 | 59 | 0,5 | 10 | 22 | 0,070 |
| 2 | 60 | 0,58 | 10,5 | 20 | 0,135 |
| 3 | 62 | 0,60 | 10,5 | 25 | 0,135 |
| 4 | 70 | 0,71 | 10 | 28 | 0,460 |
| 5 | 65 | 0,75 | 10 | 27 | 0,690 |
| 6 | 85 | 1,00 | 10 | 31 | 5,350 |
| 7 | 50 | 2,70 | 10,5 | 17 | 15,000 |

Наивыгоднейшей скоростью нарезания, при которой не происходило вибрации реза и получалась одинаковая по глубине неровностей риска, является $0,6 \text{ м/мин}$.

Из таблицы градуировки видно, что методом нарезания возможно изготовить образцы с высотой неровности $H_{\text{макс}} = 0,03 \text{ мк}$ и более, то есть от 14-го класса и ниже.

Исследование образцов с регулярным профилем

По разработанной методике в 1949, 1950, 1951 гг. образцы с регулярным профилем изготавливались заводом «Эталон».

На рис. 1 показаны общий вид поверхности образца чистоты поверхности с регулярным профилем и снятая профилограмма на профилографе ИЗП-17.

На рис. 2 показан общий вид поверхности образца того же класса, полученный при обычном методе обработки — шлифованием, и снятая профилограмма на профилографе ИЗП-17.

Из рисунков видно, что параметры образцов в среднем приблизительно одинаковы; разница заключается в том, что первый однороден по значениям $H_{\text{ср}}$ и $H_{\text{ск}}$, а второй неоднороден.

Образцы с регулярным профилем были предназначены для проверки и градуировки профилометров, измеряющих среднеквадратичное отклонение высоты неровностей от средней линии профиля ($H_{\text{ск}}$) в пределах от 5-го по 12-й класс, согласно ГОСТ 2789—51; поэтому и образцы были изготовлены с чистотой поверхности от 5-го по 12-й класс.

Все образцы, изготавливаемые для системы Коммерприбора, исследовались нами на однородность по высоте неровностей.

Градуировка автоматической делительной машины

| № п/п | Номер устанавливаемой пружины | Противовес в г | Твердость материала | | | |
|-------|-------------------------------|-------------------|--|------------|------------|------------|
| | | | $HRC = 64$ | $HRC = 42$ | $HRC = 31$ | $HRC = 25$ |
| | | | Глубина неровности нарезаемой риски в мк (H_{\max}) | | | |
| 1 | 1 | 73,6 | 0,03 | 0,44 | 0,8—0,82 | 1,3 |
| 2 | 1 | 49,5 | 0,18 | 0,55 | 1,2—1,30 | 2,2 |
| 3 | 1 | 37 | 0,36 | 1,00 | 2—2,2 | 3,4 |
| 4 | 1 | 27,2 | | 1,4 | 3,0 | 4,0 |
| 5 | 1 | 14,7 | 0,45 | 1,80 | 3,5 | 5,1 |
| 6 | 1 | 7,8 | | 1,95—2,0 | 3,7 | 5,5 |
| 7 | 1 | 0 | 0,54 | 2—2,2 | 4,0 | 5,8—6,0 |
| 8 | 2 | 73,6 | 0,40 | | | |
| 9 | 2 | 49,5 | 0,60 | | | |
| 10 | 2 | 27,2 | 0,80 | | | |
| 11 | 2 | 12,5 | 1,0 | | | |
| 12 | 2 | 0 | 1,2 | | | |
| 13 | 4 | 73,6 | 1,6 | | | |
| 14 | 4 | 49,5 | 2,2 | | | |
| 15 | 4 | 37 | 2,4 | | | |
| 16 | 4 | 27,2 | 2,6 | | | |
| 17 | 4 | 14,7 | 2,9 | | | |
| 18 | 4 | 12,5 | 3,0 | | | |
| 19 | 4 | 0 | 4,0 | | | |
| 20 | б/пруж. | 49,5 | 0,06 | 0,24 | | |
| 21 | " | 37 | 0,12 | 0,44 | | |
| 22 | " | 27,2 | 0,24 | 0,80 | | |
| 23 | " | 14,7 | | | | |
| 24 | " | 12,5 | 0,30 | 1,20 | | |
| 25 | " | 7,8 | 0,33 | 1,40 | | |
| 26 | " | 0 | 0,36 | 1,60 | | |

Методика исследования их заключалась в определении средне-квадратичной высоты неровностей $H_{\text{ск}}$ и средней высоты неровностей $H_{\text{ср}}$ по трем образующим по оптическим и по контактному приборам.

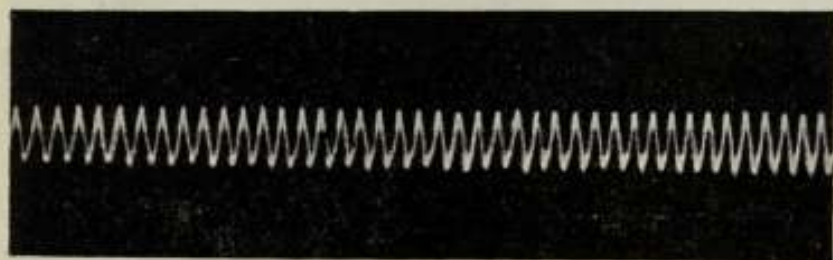
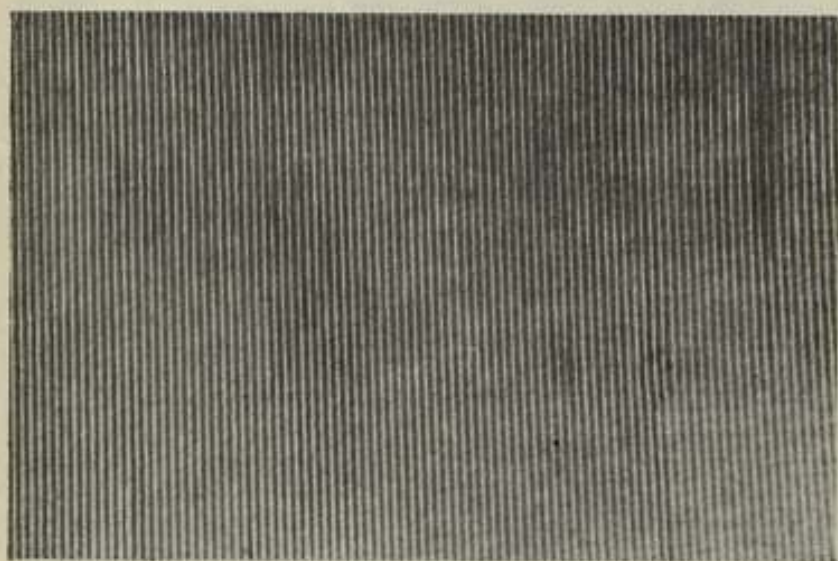
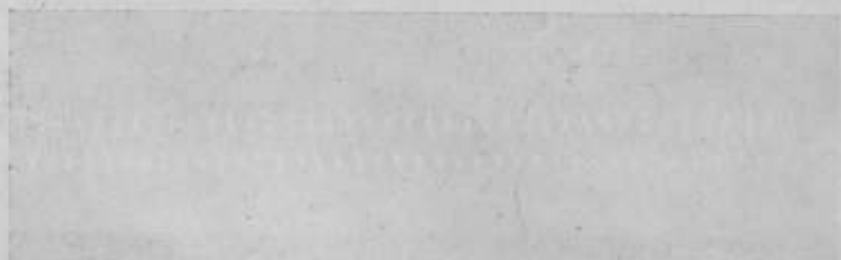


Рис. 1.

Вверху. Поверхность образца чистоты поверхности с регулярным профилем.

Увеличение $\sim 50\times$.

Внизу. Профилограмма поверхности этого же образца, снятая на профилографе ИСП-17. Вертикальное увеличение $2650\times$, горизонтальное увеличение $100\times$. $H_{\text{ср}} = 3,029 \text{ мк}$.



[Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side of the page.]

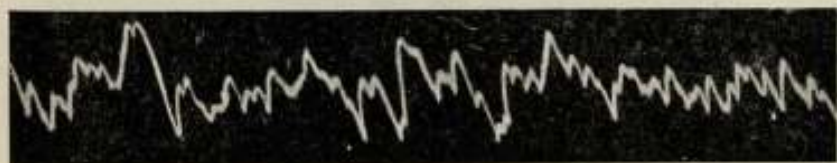
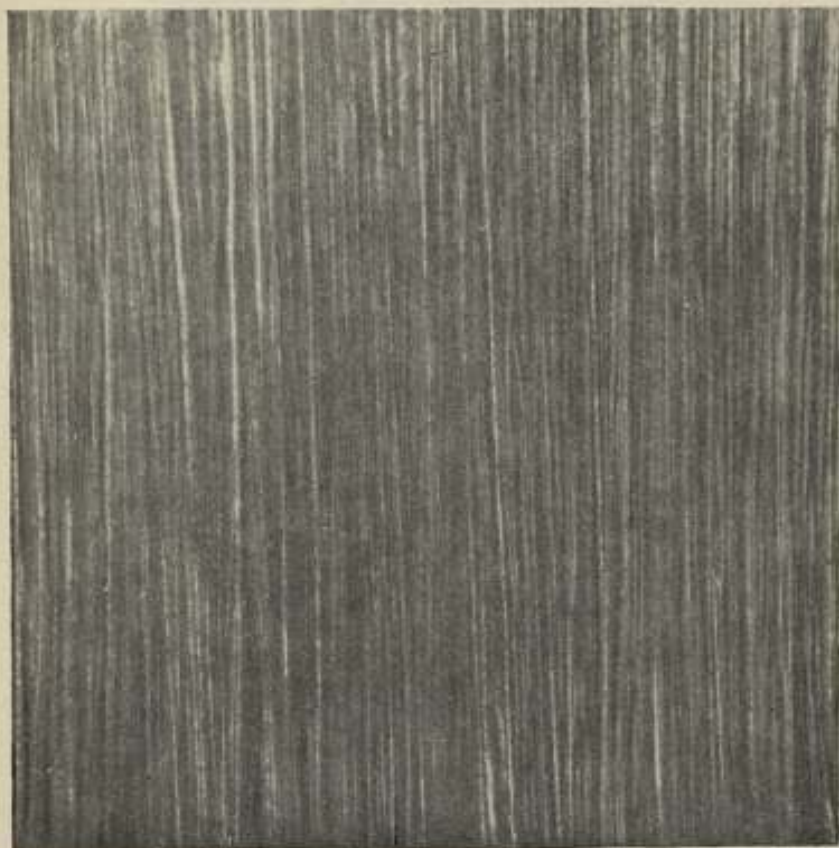
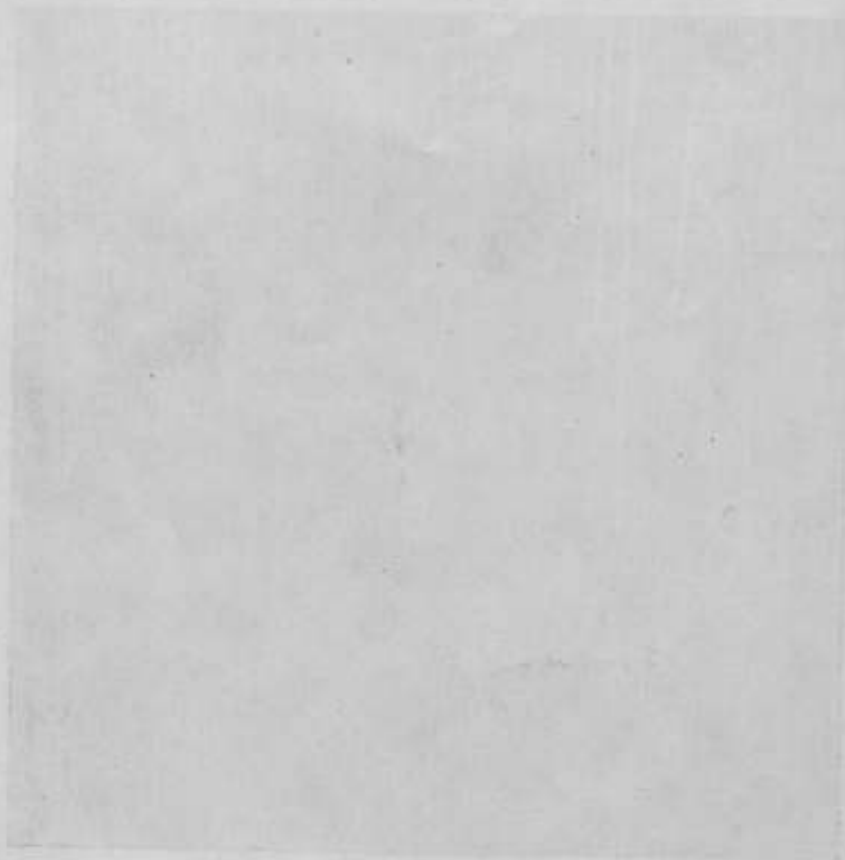


Рис. 2.

Вверху. Поверхность образца чистоты поверхности 8-го класса, полученная шлифованием. Увеличение $\sim 50\times$.

Внизу. Профилограмма поверхности этого же образца, снятая на профилографе ИЗП-17. Вертикальное увеличение $2650\times$, горизонтальное увеличение $100\times$. $H_{cp} = 3,100$ мк.



Very faint, illegible text at the bottom of the page, possibly bleed-through from the reverse side.

Определение средне-квадратичного отклонения высоты неровностей от средней линии профиля $H_{ск}$ по оптическим приборам

Определение средне-квадратичного отклонения высоты неровностей от средней линии профиля $H_{ск}$ производилось на трех участках, как показано на рис. 3.

Длина участка выбиралась в зависимости от класса чистоты с 5-го по 9-й класс — 2 мм, с 9-го по 12-й — 1 мм. Измерение образцов чистоты классов с 5-го по 9-й производилось на двойном микроскопе МИС-11, а образцов с 9-го по 12-й — на интерференционном микроскопе МИИ-1.

Определение $H_{ск}$ производилось следующим образом.

На образце выбирались три направления, как показано на рис. 3; на каждом направлении методом фотографирования снимались пять участков, так что всего с образца было получено 15 снимков профиля. Фотографирование производилось аппаратом ФЭД, при помощи специального приспособления, предложенного канд. техн. наук А. Ю. Гиделем. Схема установки для фотографирования показана на рис. 4.

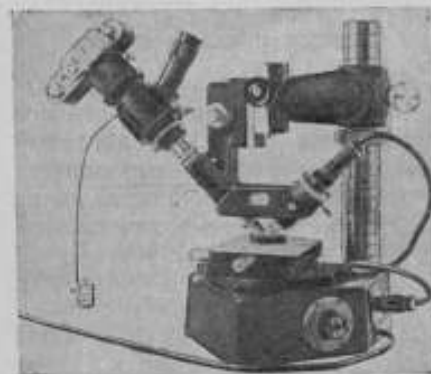


Рис. 4. Двойной микроскоп МИС-11 с приспособлением для фотографирования при помощи аппарата ФЭД.

арифметическое, которое принималось за $H_{ск}$, среднее для всего образца.

При определении $H_{ск}$ по профилограмме, зарисованной на миллиметровке (рис. 5), проводилась прямая линия через область преобладающих точек впадин профиля. Через каждые

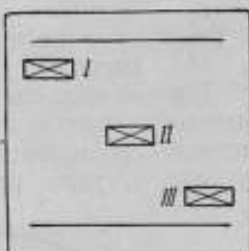


Рис. 3. Расположение участков на образце, по которым производилось определение $H_{ск}$ и $H_{ср}$.

Каждая снятая профилограмма увеличивалась на проекторе в 10 раз, и профиль зарисовывался на миллиметровой бумаге. Увеличенная профилограмма на миллиметровой бумаге статистически обрабатывалась с целью нахождения $H_{ск}$.

Из пяти обработанных таким методом профилограмм для каждого направления бралось средне-арифметическое значение $H_{ск}$, которое соответствовало данной трассе.

Затем из значения $H_{ск}$ для трех трасс бралось средне-

2 мм брались ординаты b_i , затем значение $H_{ск}$ подсчитывалось по формуле:

$$H_{ск} = \sqrt{\frac{\sum b_i^2 \cdot n_i}{\sum n_i} - \left(\frac{\sum b_i \cdot n_i}{\sum n_i}\right)^2} \cdot M,$$

где b_i — значение ординаты в мм;
 n_i — количество ординат, соответствующее значению b_i ;
 $\sum n_i$ — суммарное количество ординат;
 M — масштаб.

Так как образцы имели строго регулярный профиль, нами была выведена формула для определения $H_{ск}$, исходя из основных параметров неровности, а именно, глубины неровности $H_{макс}$, ширины штриха a , угла профиля α и расстояния между штрихами s .

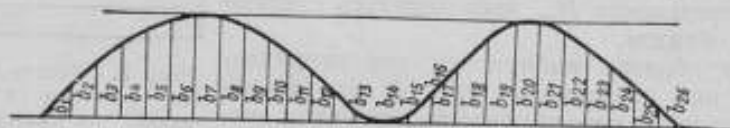


Рис. 5. Схематический вид профиля поверхности образцов чистоты поверхности.

Подсчеты по этой формуле сокращали время при определении $H_{ск}$ образца в несколько раз.

Определение $H_{ск}$ по $H_{макс}$, шагу между рисками и углу профиля α

Согласно определению ГОСТ 2789—51, средне-квадратичное отклонение неровностей поверхности есть корень квадратный из среднего квадрата расстояний точек профиля неровностей до его средней линии. Средняя линия профиля неровностей делит профиль таким образом, что площади по обеим сторонам от этой линии до профиля равны между собой, то есть

$$H_{ск} = \sqrt{\frac{1}{s} \int_0^s h^2 \cdot ds}. \quad (1)$$

Средняя линия профиля определяется из условия, что

$$F_1 + F_2 + F_4 = F_3 \quad (2)$$

(рис. 6).

Преобразуем выражение под радикалом:

$$\frac{1}{s} \int_0^s h^2 \cdot ds.$$

Интеграл $\int_0^s h^2 \cdot ds$ можно представить в таком виде:

$$\int_0^s 2 \cdot \frac{h}{2} \cdot h \cdot ds = 2 \int_0^s \frac{h}{2} h \cdot ds.$$

Подынтегральное выражение $\int_0^s \frac{h}{2} h \cdot ds$ может быть рассматриваемо как статический момент элементарной площадки $h \cdot ds$ относительно средней линии.

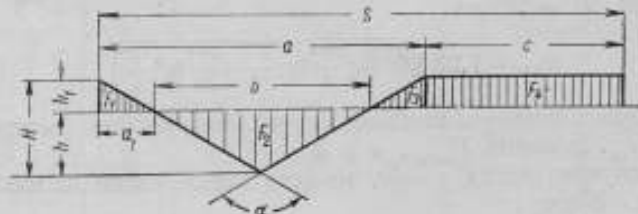


Рис. 6. Схематический вид профиля нарезанной риски на образцах чистоты поверхности с регулярным профилем.

Выражая F_1 ; F_2 ; F_3 ; F_4 через H_{\max} , s и α и произведя ряд математических преобразований, получаем окончательную формулу для определения $H_{\text{ср}}$ в следующем виде:

$$H_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{2}{s} \left(\frac{H^3}{3} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \frac{H^4}{2s} \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \right)}, \quad (3)$$

где $H_{\text{ср}}$ — средняя квадратичная высота неровностей;
 H — максимальная высота неровностей;
 s — расстояние между штрихами нарезанного образца;
 α — угол профиля нарезанного штриха.

Таким образом, зная значения максимальной высоты неровности, расстояние между штрихами и угол профиля, мы можем определить значение средне-квадратичной высоты неровности на образцах с регулярным профилем.

При выводе формулы (3) мы предполагали, что радиус закругления впадины равен нулю. В действительности в нарезных образцах радиус закругления находится в пределах 12—15 мк. Учитывая это, мы ввели поправки на радиус закругления на основании графических построений для разных значений радиуса.

Формулы для определения значения $H_{\text{ср}}$ с учетом поправки на радиус закругления можно представить в следующем виде.

1. Для $R = 0$:

$$H_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{2}{s} \left(\frac{H^3}{3} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \frac{H^4}{2s} \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \right)}. \quad (4)$$

2. Для $R = 5 \text{ мк}$

$$H_{\text{ср}} = 1,015 \sqrt{\frac{2}{s} \left(\frac{H^3}{3} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \frac{H^4}{2s} \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \right)}. \quad (5)$$

3. Для $R = 10 \text{ мк}$

$$H_{\text{ср}} = 1,02 \sqrt{\frac{2}{s} \left(\frac{H^3}{3} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \frac{H^4}{2s} \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \right)}. \quad (6)$$

4. Для $R = 15 \text{ мк}$

$$H_{\text{ср}} = 1,05 \sqrt{\frac{2}{s} \left(\frac{H^3}{3} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \frac{H^4}{2s} \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \right)}. \quad (7)$$

5. Для $R = 20 \text{ мк}$

$$H_{\text{ср}} = 1,08 \sqrt{\frac{2}{s} \left(\frac{H^3}{3} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \frac{H^4}{2s} \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \right)}. \quad (8)$$

Пользуясь вышеуказанными формулами, можно быстро определить $H_{\text{ср}}$, измерив $H_{\text{макс}}$, a и s .

Для случая, когда $s = a$, то есть когда имеем пилообразный профиль, формула

$$H_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{2}{s} \left(\frac{H^3}{3} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \frac{H^4}{2s} \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \right)}$$

принимает следующий простой вид:

$$H_{\text{ср}} = \frac{H_{\text{макс}}}{\sqrt{12}}. \quad (9)$$

Для различных радиусов закругления формула дает следующие значения $H_{\text{ср}}$:

1. Для $R = 5 \text{ мк}$

$$H_{\text{ср}} = 0,293 H_{\text{макс}}. \quad (10)$$

2. Для $R = 10 \text{ мк}$

$$H_{\text{ср}} = 0,295 H_{\text{макс}}. \quad (11)$$

3. Для $R = 15 \text{ мк}$

$$H_{\text{ср}} = 0,303 H_{\text{макс}}. \quad (12)$$

4. Для $R = 20 \text{ мк}$

$$H_{\text{ср}} = 0,312 H_{\text{макс}}. \quad (13)$$

Измерение средней высоты неровностей $H_{\text{ср}}$

Измерение средней высоты неровностей проводилось на двойном микроскопе акад. Линника МИС-11 и интерференционном микроскопе МИИ-1 при помощи окулярного микрометра. На образце выбирались три произвольных направления, как указано на рис. 3, на расстоянии 5 мм от краев образца.

Таблица 3

Значения средне-квадратичной высоты неровностей на различных участках образца, полученные путем подсчета по профилограмме

| Условный номер образца | Значение $H_{Ск}$ средн. образца в мк | Значение $H_{Ск}$ первой образующей в мк | $\Delta H_{Ск}$ | | Значение $H_{Ск}$ второй образующей в мк | $\Delta H_{Ск}$ | | Значение $H_{Ск}$ третьей образующей в мк | $\Delta H_{Ск}$ | |
|------------------------|---------------------------------------|--|-----------------|-----|--|-----------------|-----|---|-----------------|-----|
| | | | в мк | в % | | в мк | в % | | в мк | в % |
| 5 (40) | 0,852 | 0,553 | 0,029 | 3,3 | 0,904 | 0,022 | 2,5 | 0,875 | 0,007 | 0,8 |
| 2 | 0,982 | 1,033 | 0,051 | 5,2 | 0,960 | 0,022 | 2,2 | 0,954 | 0,028 | 2,9 |
| 3 | 0,988 | 1,088 | 0,020 | 2,1 | 0,968 | 0,020 | 2,1 | 0,986 | 0,002 | 0,2 |
| 15 | 0,442 | 0,445 | 0,030 | 6,6 | 0,430 | 0,012 | 2,7 | 0,450 | 0,008 | 1,8 |
| 4 (0) | 0,633 | 0,615 | 0,018 | 2,8 | 0,609 | 0,024 | 3,8 | 0,674 | 0,041 | 6,5 |
| 7 (H) | 0,263 | 0,251 | 0,012 | 4,5 | 0,274 | 0,011 | 4,2 | 0,262 | 0,011 | 4,2 |
| 50 | 0,095 | 0,097 | 0,002 | 2,1 | 0,092 | 0,003 | 3,2 | 0,096 | 0,001 | 1,1 |

Измерение производилось в десяти положениях по каждому направлению, из десяти значений $H_{\text{макс}}$ бралось среднее арифметическое и оно принималось за $H_{\text{ср}}$ данного направления. За $H_{\text{ср}}$ образца принималось среднее арифметическое из $H_{\text{ср}}$ для трех направлений.

Определения средне-квадратичной высоты неровностей образцов с регулярным профилем

Так как образцы с регулярным профилем в основном предназначались для поверки приборов, измеряющих средне-квадратичное отклонение неровностей от средней линии профиля, то особый интерес представляло сравнение данных, полученных из определения $H_{\text{ск}}$ по профилограммам упрощенным методом по формуле, и на профилометрах различных конструкций.

Измерение средне-квадратичной высоты неровностей изготовленных образцов производилось несколькими методами. Основным способом определения $H_{\text{ск}}$ был способ определения $H_{\text{ск}}$ по точкам профилограммы, снятой при помощи оптических приборов фотографическим путем и увеличенной на проекторе. Способ определения был указан выше.

Кроме этого способа, мы, исходя из измеренных значений $H_{\text{макс}}$ ширины штриха и расстояния между штрихами, определяли $H_{\text{ск}}$ по формулам, которыми можно пользоваться для ускоренного процесса определения $H_{\text{ск}}$. Затем, учитывая то, что образцы с регулярным профилем в основном предназначались для поверки приборов, работающих на контактном принципе, мы произвели измерение образцов на различных приборах этого типа. Результаты измерения образцов приведены в табл. 3, 4, и 5.

Таблица 4

Сравнение средней высоты неровностей ($H_{\text{ср}}$), полученных измерением на оптических бесконтактных приборах и на профилографе ИЗП-17

| № п/п | Условный номер образца | Средняя высота неровностей ($H_{\text{ср}}$), измеренная на оптических приборах в мк | Средняя высота неровностей ($H_{\text{ср}}$), измеренная профилографом ИЗП-17 в мк | ΔH | |
|-------|------------------------|--|--|------------|-----|
| | | | | в мк | в % |
| 1 | 5 (40) | 3,029 | 2,894 | 0,135 | 4,5 |
| 2 | 2 | 2,183 | 2,051 | 0,132 | 6,1 |
| 3 | 4 (0) | 1,366 | 1,310 | 0,056 | 4,1 |
| 4 | 15 | 1,100 | 1,030 | 0,07 | 6,4 |
| 5 | 7 (H) | 0,998 | 0,915 | 0,083 | 8,3 |
| 6 | 6 | 0,599 | 0,561 | 0,038 | 6,3 |
| 7 | 6/№ | 0,500 | 0,488 | 0,012 | 2,4 |
| 8 | 50 | 0,310 | 0,280 | 0,03 | 10 |

Таблица 5
 Значения $H_{сх}$ образцов с регулярным профилем, измеренные различными методами и на контактных приборах различных конструкций

| № п/п | № образцов | Средняя квадратичная величина шероховатостей $H_{сх}$ в мк | | | | | |
|-------|------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------------------|
| | | получены в результате под-ста. по профилю лампы | измерена на профиле-лометре Ф. Браун | измерена на профиле-лометре Ф. Аббот | измерена на профиле-лометре КЭ-1 № 33 | измерена на профиле-лометре КЭ-1 № 318 | получены по выхвату по формуле |
| 1 | 1 | 1,53 | 1,62 | 1,60 | 2,00 | 1,70 | 1,52 |
| 2 | 2 | 1,20 | 1,28 | 1,20 | 1,7—1,8 | 1,30 | 1,21 |
| 3 | 8 | 0,96 | 0,95 | 1,05 | 1,3 | 0,8—1,0 | 0,98 |
| 4 | 4 | 0,63 | 0,60 | 0,80 | 1,1—1,2 | 0,6—0,65 | 0,71 |
| 5 | 5 | 0,62 | 0,60 | 0,59 | 0,65 | 0,65 | 0,61 |
| 6 | 6 | 0,33 | 0,26 | 0,25 | 0,45—0,52 | 0,3—0,32 | 0,33 |
| 7 | 7 | 0,33 | 0,22 | 0,20 | 0,35—0,37 | 0,3—0,32 | 0,33 |
| 8 | 8 | 0,33 | 0,25 | 0,28 | 0,35—0,42 | 0,3—0,32 | 0,33 |
| 9 | 9 | 0,38 | 0,27 | 0,25 | 0,35—0,40 | 0,35 | 0,38 |
| 10 | 10 | 0,32 | 0,22 | 0,29 | 0,4—0,45 | 0,28 | 0,32 |

Из табл. 3 видно, что отклонения значений $H_{ск}$ на различных участках образцов от среднего значения $H_{ск}$ не превышают 6,6%, что показывает высокую однородность шероховатости на образцах с регулярным профилем.

Из табл. 4 видно, что максимальная разность показаний оптических бесконтактных приборов и профилографа ИЗП-17 не превышает 10%.

Из табл. 5 видно, что значения $H_{ск}$, полученные из профилограмм и по формулам (3)—(8), идентичны, в то время как значения $H_{ск}$, полученные различными приборами, имеют между собой значительные расхождения. Это дает основание предполагать, что градуировка некоторых приборов производилась по недостаточно однородным образцам.

Выводы

Разработанная методика позволяет получать образцы чистоты поверхности с регулярным профилем, однородные по значению $H_{ск}$.

Образцы, ввиду их однородности, могут быть применены для градуировки и поверки профилометров по значению $H_{ск}$ и профилографов по значению $H_{сп}$.

Предложенная формула вполне пригодна для определения $H_{ск}$, исходя из основных параметров неровностей образца, а именно H_{max} ; a ; α ; s , так как дает совершенно идентичные значения с методом определения $H_{ск}$ по увеличенной профилограмме и сокращает время определения $H_{ск}$ в несколько раз.

ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ УДЛИНЕНИЯ ТЕЛ¹

Идея предлагаемого нами динамического метода определения температурных коэффициентов удлинения тел заключается в том, что температурные коэффициенты определяются из наблюдений за изменением длины и времени в процессе охлаждения или нагревания этих тел. Температура тела, за исключением начальной температуры, вычисляется по изменениям длины этого же тела, а не по показаниям каких-либо термометров, что освобождает температурные коэффициенты от ошибок, вносимых температурной инерцией. Этот метод имеет целый ряд неоспоримых преимуществ перед обычными статическими методами, так как не требует создания стационарных температурных состояний и не нуждается в каком-либо специальном оборудовании.

Заметим, что в 1947 г. в оптической лаборатории ВНИИМ Е. А. Волковой был разработан динамический метод определения температурных коэффициентов удлинения плоскопараллельных концевых мер длины². Этот метод основан на измерении приращений температуры и длины меры в процессе повышения температуры окружающей среды по линейному закону, допуская, что термическая инерция тела в процессе нагревания остается постоянной.

Исходя из этого, предполагается, что приращение температуры, оцениваемой с помощью термопары, закрепленной на мере, равно приращению средней объемной температуры тела.

Этот метод требует весьма сложной аппаратуры, специального оборудования и создания специального температурного режима.

¹ Температурный коэффициент удлинения тел следует отличать от температурного коэффициента расширения, определяемого выражением: $\alpha_0 = \frac{1}{v_0} \frac{dv}{dt}$, где v_0 — объем тела при 0°С. Употребляемые в литературе названия «коэффициент линейного расширения» и «коэффициент кубического расширения» с нашей точки зрения не являются удачными.

² Волкова Е. А., Динамический метод определения термического коэффициента линейного расширения плоскопараллельных концевых мер длины, Труды ВНИИМ, вып. 7/67, 1949.

изменяющегося по строго линейному закону. Этим методом можно определять только линейные температурные коэффициенты удлинения плоскопараллельных концевых мер длины, а для определения квадратичных температурных коэффициентов удлинения он не применим¹.

Динамический метод, предложенный оптической лабораторией, не может быть использован для определения температурных коэффициентов тел различной формы, различных размеров и из различных материалов, а следовательно, и не сможет найти широкого применения в различных приложениях науки.

В различных областях науки и техники в связи с новыми, повышенными требованиями к точности измерений сейчас уже недостаточно знать для данного сплава только один линейный температурный коэффициент, взятый из таблиц. В ряде случаев для некоторых сплавов, с большой величиной квадратичного температурного коэффициента, необходимо определять не только линейный, но и квадратичный температурный коэффициент, что весьма важно, например, в авиационном приборостроении. Кроме того, температурные коэффициенты, определяемые для образцов материала, в большинстве случаев не совпадают с температурным коэффициентом для всего тела. Отсюда следует, что температурные коэффициенты нужно определять для всего тела, а не для образцов определенных размеров и форм. Между тем, известные нам методы определения температурных коэффициентов, не говоря об их трудоемкости, не могут быть полностью использованы для определения температурных коэффициентов различных тел, так как предполагают, что исследуемые тела должны иметь определенные размеры и определенную форму.

Таким образом, хорошо разработанных, быстрых и точных методов, годных для определения температурных коэффициентов различных тел, нет.

Учитывая сказанное, мы сочли необходимым разработать новый метод определения температурных коэффициентов удлинения тел, основанный на других принципах, позволяющих быстро определять температурные коэффициенты для самых различных тел в обычных лабораторных условиях без специального оборудования и без создания стационарных температурных состояний для тела.

В связи с тем, что в нашем динамическом методе определения температурных коэффициентов используется процесс охлаждения или нагревания тел, то нам представляется целесообразным,

¹ Линейными и квадратичными температурными коэффициентами удлинения тел мы называем коэффициенты α и β , которые входят в эмпирическую формулу 2-й степени $l_t = l_0 (1 + \alpha t + \beta t^2)$, выражающую зависимость длины тела от температуры.

хотя бы весьма кратко, осветить некоторые вопросы охлаждения тел как с точки зрения общепринятой теории тепла, так и с точки зрения наших соображений.

Заметим, что вопросы нагревания тел решаются так же, как и для охлаждения, поэтому ниже мы будем рассматривать только охлаждение тел.

При решении вопросов охлаждения тел в общем случае следует считать распределение температуры внутри тела неравномерным, то есть

$$t = t(x; y; z; \tau),$$

где t — температура в какой-либо точке P внутри тела,

$x; y; z$ — текущие координаты точки P .

За температуру t_0 , общую всему телу, можно принимать среднюю объемную температуру, то есть

$$t_0 = \frac{\int t dv}{v}, \quad (1)$$

где v — объем тела.

Формула (1) показывает, что для определения температуры t_0 необходимо найти аналитическое выражение для функции t . При этом, искомая функция t должна описывать распределение температуры в охлаждающемся теле для любого заданного момента времени τ .

Таким образом, для решения общей задачи об охлаждении тел необходимо указать сначала то общее условие, которому должна удовлетворять функция t , то есть составить уравнение, выражающее процесс передачи тепла внутри тела. Затем для однозначного определения функции t нужно указать начальные и граничные условия.

В качестве общего условия, которому должна удовлетворять функция t , берут основное уравнение аналитической теории тепла, устанавливающее связь между пространственными и временными изменениями температуры.

Это уравнение имеет вид:

$$a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial t}{\partial \tau}; \quad (2)$$

$$a = \frac{\lambda}{c\delta},$$

где a — коэффициент температуропроводности;

λ — коэффициент теплопроводности;

δ — плотность вещества;

c — удельная теплоемкость.

Решение основного уравнения (2) при определенных начальных и граничных условиях является решением задачи об охлаждении тел.

Начальные и граничные условия при температуре окружающей среды $\vartheta = \text{const}$ можно выбрать следующим образом:

$$t = t(x; y; z) \text{ при } \tau = 0;$$

$$\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_z + h(t_s - \vartheta) = 0, \quad (3)$$

где n — направление внешней нормали к поверхности σ ;
 h — коэффициент теплоотдачи.

В аналитической теории тепла доказывается, что решение уравнения (2) при выбранных условиях, представленное в виде:

$$t - \vartheta = \sum_{i=1}^{\infty} A_i R_i e^{-m_i \tau}, \quad (4)$$

выражает собою общий закон охлаждения, справедливый для любого охлаждающегося тела¹.

В выражении (4) обозначено:

A_i — постоянные коэффициенты, зависящие от температурного состояния тела в начальный момент времени;

R_i — функции координат точек; физические постоянные тела входят в выражения этих функций в качестве параметров;

m_i — постоянные положительные числа, расположенные в ряде (4) в порядке возрастания.

При решении задач об охлаждении тел можно считать, что с момента перехода предварительно нагретого тела в среду для охлаждения с $\vartheta = \text{const}$ прошло такое время, что сумма ряда (4) отличается от его первого члена на пренебрежимо малую величину, то есть считать возможным замену формулы (4) формулой

$$t = \vartheta + A R e^{-m \tau}. \quad (5)$$

Подставляя t из выражения (5) в формулу (1), получим

$$t_{\sigma} = \vartheta + A \vartheta e^{-m \tau}, \quad (6)$$

где

$$\vartheta = \frac{\int R d\sigma}{v}. \quad (7)$$

Заметим, что величина m в формулах (5) и (6) считается для данного тела постоянным положительным числом.

Проведенное нами экспериментальное изучение процесса охлаждения различных тел убедительно показало, что величина m не является постоянной величиной. Даже и при небольших разностях температур между поверхностью тела и средой величина m в процессе охлаждения изменяется весьма существенно; она уменьшается с течением времени охлаждения.

¹ Кондратьев Г. М., Испытания на теплопроводность, Стандартгиз, 1936.

Это обстоятельство говорит о том, что закон охлаждения, даваемый выражением (6), является всего лишь весьма грубым приближением к действительности. Причину этого следует искать, повидимому, не в замене формулы (4) формулой (5) и не в допущении постоянства коэффициентов a ; λ и h , а в том, что исходное уравнение (2) не учитывает тех вторичных или попутных процессов, которые происходят в теле во время температурных изменений.

Исходное уравнение (2) предполагает, что при нагревании тела все количество тепла, воспринятое телом из окружающей среды, целиком идет на повышение температуры этого тела, а при охлаждении воспринятое ранее тепло отдается в окружающую среду в строгом соответствии с уменьшением температуры охлаждающего тела.

Мы предполагаем, что в действительности количество тепла, воспринятое телом из окружающей среды, не целиком идет на повышение температуры тела. Часть тепла расходуется на вторичные, попутные процессы, которые могут происходить в теле во время нагревания. Эти процессы могут быть непосредственно связаны с расширением тела и с работой против сил связи, удерживающих частицы вещества в том или ином положении внутри тела.

При охлаждении тела в окружающую среду отдается тепла несколько больше, чем это должно было бы быть только за счет одного уменьшения температуры тела.

В связи с этим действительная скорость охлаждения, а следовательно, и действительная кривая охлаждения будет отличаться от теоретического графика, даваемого формулой (6). Последнее полностью подтверждается нашими экспериментами.

Для учета теплоты, расходуемой на вторичные процессы, происходящие в теле, следует дополнить правую часть уравнения (2) членом, пропорциональным температуре, а именно:

$$a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \psi(\tau) \cdot t, \quad (8)$$

где ψ — некоторая сложная функция времени τ , выражающаяся через изменение размеров тела.

Заметим, что для обобщения дифференциального уравнения (2) следовало бы исходить не из задания некоторой неизвестной функции времени, а из первого закона термодинамики и уравнений состояния тела — калорического и термического.

Однако такое решение затронутого вопроса выходит за рамки этой статьи.

Пользуясь для решения уравнения (8) подстановкой вида

$$t = e^{-\int \psi d\tau} \cdot t',$$

и относя для практического удобства начало отсчета температуры

тела к температуре окружающей среды, при соответствующих начальных и граничных условиях, получим:

$$t = \vartheta + e^{-\int \psi dt} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} A_i R_i e^{-m_i t} \quad (9)$$

В уравнении (9), при известном допущении, можно заменить сумму ряда его первым членом, так как по мере увеличения времени τ величины $e^{-m_i \tau}$ быстро уменьшаются, и к началу наблюдений сумма ряда будет отличаться от его первого члена на пренебрежимо малую величину.

Таким образом, закон распределения температуры t в теле может быть выражен формулой

$$t = \vartheta + A R e^{-\left(m + \frac{\int \psi dt}{\tau}\right) \tau} \quad (10)$$

или

$$t = \vartheta + A R e^{-\eta \tau}, \quad (11)$$

где

$$\eta = m + \frac{\int \psi dt}{\tau}. \quad (12)$$

Подставляя выражение для t из формулы (11) в формулу (1), получим:

$$t_v = \vartheta + A \vartheta e^{-\eta \tau}, \quad (13)$$

где

$$\vartheta = \frac{\int R dv}{v}.$$

Формула (13) по внешнему виду аналогична формуле (6). Но в действительности между ними имеется принципиальное различие. Это различие заключается в том, что в формуле (6) коэффициент m считается постоянной величиной, тогда как в формуле (13) величина η представляет собой сложную функцию времени τ .

Формула (13) явилась исходной формулой для разработки динамического метода определения температурных коэффициентов удлинения тел.

Измеряя изменения длины тела Δl_i в процессе охлаждения или нагревания в строго определенные моменты времени τ_i и вычисляя по формуле (13) среднюю объемную температуру t_{v_i} тела для тех же самых моментов времени τ_i , можно составить условные уравнения вида:

$$\Delta l_i = \alpha l_0 (t_{v_i} - \vartheta) + \beta l_0 (t_{v_i}^2 - \vartheta^2), \quad (14)$$

где $\Delta l_i = l_i - l_0$;

l_i — длина тела при температуре t_{v_i} ;

l_0 — длина тела при температуре ϑ ;

l_0 — длина тела при $\vartheta = 0$;

α — линейный коэффициент удлинения тела, отнесенный к $\vartheta = 0$;

β — квадратичный коэффициент удлинения тела.

Решение этих уравнений позволяет найти наимвероятнейшие значения температурных коэффициентов α и β .

Заметим, что принимая объемную температуру t_0 тела за действительную его температуру, мы знали о том, что в процессе охлаждения или нагревания может иметь место весьма сложное, неравномерное распределение температуры в теле. Однако при решении вопроса об определении температурных коэффициентов, как легко понять, нет необходимости изучать температурные градиенты в теле. Действительно, в конечном счете нас интересует не температура в отдельных точках тела, а та температура, от изменения которой зависит температурное изменения длины тела. Конечно, такая температура будет зависеть от характера распределения температуры в различных частях тела, но в то же время эта температура будет являться и результатом какого-то осреднения температур в различных частях тела.

Известно, что длина тела при изменении температуры меняется непрерывно. На основании этого, при любом неравномерном распределении температуры по телу, можно выбрать такое общее значение температуры, что та длина, которая соответствует этой температуре в условиях равномерного температурного распределения, будет в точности равна длине тела в данный момент времени при неравномерном распределении температуры.

Полученную таким образом температуру мы назвали эффективной температурой тела.

При определении температурных коэффициентов динамическим методом мы определяем температуру тела по изменению его общей длины независимо от распределения температуры внутри тела, но по изменению вызываемому общим эффективным действием именно этого распределения температуры в данный момент времени. Таким образом, мы определяем температуру, от изменения которой зависят наблюдаемые изменения длины тела, то есть определяем эффективную температуру.

Отсюда следует, что при определении температурных коэффициентов нашим методом нет необходимости изучать распределение температуры внутри тела и учитывать различные температурные градиенты.

Определение изменений длины тела в определенные моменты времени при его охлаждении или нагревании можно производить на любом измерительном приборе (оптиметре, измерительной машине и компараторе) достаточно точно относительно любого начального отсчета по шкале прибора. Общую длину l при определении температурных коэффициентов достаточно знать приближенно.

Определение моментов времени, соответствующих отсчетам по шкале измерительного прибора, можно производить по точным часам с секундной стрелкой. На основании сказанного легко понять, что наблюдения при определении температурных коэффициентов динамическим методом можно производить чрезвычайно

просто, не прибегая к созданию различных стационарных температурных условий.

Рассмотрим теперь вопрос об определении средней объемной температуры тела для различных моментов времени при охлаждении.

Из формулы (12) и (13) следует, что для определения средней объемной температуры t_0 необходимо знать величины A , b ; m и значение функции

$$\varphi = \frac{\int \psi d\tau}{\tau}.$$

Температура θ окружающей среды оценивается по термометру.

Заметим, что при выводе формулы (13) предполагалось, что $\theta = \text{const}$. Если температура во время наблюдений θ менялась, то такие наблюдения следует исправлять соответствующими поправками на изменение температуры окружающей среды, пользуясь приближенно известным значением температурного коэффициента.

Если изменения температуры θ были незначительными, то в этом случае можно пользоваться средним значением температуры θ . Моменты времени τ известны из наблюдений. Величины A и b могут быть найдены, если принять за начало отсчета времени момент $\tau_0 = 0$. Из формулы (13) в этом случае будем иметь:

$$Ab = t_{\tau_0} - \theta,$$

где t_{τ_0} — температура тела в момент $\tau_0 = 0$.

Величина m — постоянное число, равное значению η при $\tau = 0$.

Строгое аналитическое выражение функции φ мы еще не нашли, а потому ограничились выбором соответствующей эмпирической формулы:

$$\varphi = k\Delta l + p\tau.$$

При выборе эмпирической формулы мы пользовались графическим методом выравнивания, а именно подбирали такую функциональную систему координат, в которой искомая зависимость имела бы вид:

$$y = ax + b,$$

то есть была бы линейной. Такой системой координат оказалась система

$$[\eta; (\Delta l + q\tau)].$$

На основании этого мы приняли, что

$$\eta = k(\Delta l + q\tau) + m$$

или

$$\eta = m + k\Delta l + p\tau,$$

где $p = k \cdot q$.

Количественная оценка погрешностей, полученных из сопоставления наблюдаемых величин с вычисленными, показала, что выбранная таким путем формула достаточно хорошо согласуется с действительностью.

На основании сделанных замечаний мы сочли возможным для определения средней объемной температуры пользоваться вместо формулы (13) формулой:

$$t_v - \theta = (t_{v_0} - \theta) e^{-(m+k\Delta l+p\tau)\tau} \quad (15)$$

или

$$t_v - \theta = (t_{v_0} - \theta) e^{-\tau\eta}, \quad (16)$$

где

$$\eta = m + k\Delta l + p\tau. \quad (17)$$

Укажем теперь способ наименее вероятнейшего определения величины m ; k и p выражения (17).

С этой целью, дифференцируя уравнение (15), получим:

$$d(t_v - \theta) = -(t_{v_0} - \theta) e^{-(m+k\Delta l+p\tau)\tau} \cdot d(m\tau + k\Delta l \cdot \tau + p\tau^2)$$

или

$$-\frac{d(t_v - \theta)}{t_v - \theta} = d(m\tau + k\Delta l \tau + p\tau^2). \quad (18)$$

С достаточной степенью точности можно считать, что

$$\frac{d(t_v - \theta)}{t_v - \theta} = \frac{d(t_{v_0} - \theta)}{t_{v_0} - \theta}.$$

Следовательно:

$$d(m\tau + k\Delta l \cdot \tau + p\tau^2) = -d \ln \Delta l, \quad (19)$$

где

$$\Delta l = l_{t_v} - l_{\theta}.$$

На основании выражения (19) легко составить систему условных уравнений, решая которую можно определить значения m ; k и p , а затем по формуле (17) вычислить величину η_i для каждого выбранного момента времени τ_i . По формуле (16), зная величины η_i и τ_i , можно найти среднюю объемную температуру t_{v_i} тела, соответствующую наблюдавшимся изменениям Δl_i длины тела.

Зная значения Δl_i и соответствующие им значения $t_{v_i} - \theta$, легко составить условные уравнения вида (14) и определить температурные коэффициенты α и β .

Проведенный нами анализ погрешностей показал, что изменения Δl_i , следовательно и изменения Δt_{v_i} , в начале охлаждения можно определять довольно грубо, но по мере выравнивания температуры тела с температурой окружающей среды изменения Δl_i нужно оценивать как можно точнее.

Отметим в связи с этим весьма важное обстоятельство, которое нужно учитывать при определении температурных коэффициентов динамическим методом.

По мере выравнивания температуры тела с температурой окружающей среды изменения Δt_{v_i} , следовательно и изменения Δl_i , делаются все меньше и меньше. Если к концу наблюдений точность определения величин Δl_i не повышать, то относительные погрешности измеряемых величин Δl_i , а следовательно, и вычисляемых величин Δt_{v_i} будут возрастать.

В этом случае, если не учитывать указанного обстоятельства, легко выйти за пределы допустимых погрешностей и дать ошибочные значения температурных коэффициентов.

Точность определения величин Δl_i в конце наблюдений можно повысить путем составления средних значений Δl_{cp} из ряда отдельных определений Δl_i . Полученное таким образом значение Δl_{cp} необходимо относить к соответствующему моменту времени τ_{cp} , полученному путем осреднения отдельных моментов времени τ_i , соответствовавших Δl_i .

Это вполне допустимо, так как в конце наблюдений, с одной стороны, как показали расчеты, моменты времени τ_i можно знать весьма приближенно, и, с другой стороны, зависимость Δl_i от τ_i приближается к линейной зависимости, что и позволяет к концу наблюдений осуществлять интерполяцию величин Δl_i и τ_i на средние значения. Однако, заметим, что даже путем осреднения отдельных значений Δl_i мы можем оценивать изменения длины в лучшем случае с погрешностью не менее $\pm 0,05$ мк. Это обстоятельство приводит к тому, что при составлении условных уравнений вида (14) для определения температурных коэффициентов с относительной погрешностью $\pm 0,003$ нельзя использовать изменения Δl_i длины менее 15 мк (для стальных мер), что следует из отношения абсолютной погрешности к относительной.

В табл. 1, на основании произведенной нами количественной оценки погрешностей тех величин, которые входят в формулу для определения температурных коэффициентов однометровых стальных мер длины динамическим методом, показано, что для получения значений температурных коэффициентов α и β с веро-

Таблица 1

| Название величины | Обозначение | Единица измерения | Вероятная абсолютная погрешность |
|---|-------------|-------------------|----------------------------------|
| Изменение длины меры при изменении температуры на $(t_v - \theta)$ | Δl | мк | $\pm 0,2$ |
| Температура меры в начальный момент времени | t_{v_0} | градус | $\pm 0,3^\circ$ |
| Температура меры в момент времени τ , соответствующий Δl | t_v | градус | $\pm 0,01^\circ$ |
| Время, соответствующее моменту определения Δl | τ | час | $\pm 0,003$ |
| Температурная активность меры | γ | 1/час | $\pm 0,005$ |

ятной абсолютной погрешностью для $\alpha \pm 0,03$ мк/м·град. и для $\beta \pm 0,0005$ мк/м·град². необходимо, чтобы погрешности определения величин Δl ; t_{v_0} ; t_v ; τ ; η не превышали следующих значений (см. табл. 1).

Для повышения точности определения температурных коэффициентов динамическим методом весьма целесообразно применять тот или иной способ искусственного замедления процесса охлаждения или нагревания тел, что особенно важно при определении температурных коэффициентов быстро охлаждающихся тел малого размера.

Искусственное замедление процесса охлаждения или нагревания легко осуществить, увеличивая массу исследуемого тела или заворачивая тело в теплоизолирующий материал и оставляя небольшие отверстия для ввода цоколей или микроскопов измерительного прибора. Легко понять, что этот путь повышения точности определения температурных коэффициентов динамическим методом не нарушает правильности теоретических выводов, так как, с одной стороны, выведенные нами формулы являются общими, справедливыми для любой охлаждающейся системы тел, и, с другой стороны, во всех случаях применения динамического метода температура тела определяется по изменению его общей длины независимо от тех температурных градиентов, которые могут образоваться при искусственном замедлении процесса охлаждения или нагревания тела.

Этим приемом достигается повышение точности согласования моментов времени τ_i с определяемыми изменениями Δl_i длины тела, а следовательно, и с температурой t_{v_i} , что и приводит к повышению точности определения температурных коэффициентов.

Для опробования нового динамического метода мы произвели определение температурных коэффициентов целого ряда весьма разнообразных тел, начиная от штриховых и плоскопараллельных концевых мер длины в несколько сантиметров и кончая четырехметровыми штихмассами или поворотными маятниками сложной формы, составленными из дюралюминия, бронзы и пирекса. Полученные результаты показали, что значения температурных коэффициентов различных тел, полученные динамическим методом, весьма близко совпадают со значениями, полученными статическим методом. При этом оказалось, что динамический метод по точности даваемых им результатов не уступает статическим методам, а в отдельных случаях может превосходить их. Для иллюстрации динамического метода мы даем краткое описание экспериментов по определению температурных коэффициентов удлинения этим методом для некоторых тел.

Стальная заготовка для штрихо-концевой меры ($l = 230$ мм)

Стальная заготовка для штрихо-концевой меры длиной 230 мм с присоединенным к ней термометром до наблюдений была завернута в полотняную материю для того, чтобы замедлить в дальней-

Вычисление температурных коэффициентов стальной

Таблица 2

заготовки ($l = 230$ мм) для штрихо-концевой меры

Вычисление m, k и p

| t | Δt_l | $\frac{\Delta t_l^2}{l}$ | $\Delta t_l \cdot t_l$ | $\ln t_l$ | $\sigma_l = \gamma_l - \gamma_0$ | $\rho_l = \frac{1}{10} (\Delta t_l \gamma_l - \Delta t_l \rho_l)$ | $\epsilon_l = \gamma_l^2 - \gamma_0^2$ | $d_l = \ln \Delta t_l k - \ln \Delta t_l j$ | $s_l = \sigma_l + \rho_l + \epsilon_l + d_l$ |
|--------|--------------|--------------------------|------------------------|-----------|----------------------------------|---|--|---|--|
| 0,0000 | 153,20 | 0,0000 | 0,0000 | 5,0317 | 0,0500 | 0,6933 | 0,0021 | 0,0993 | 0,8453 |
| 0,0500 | 138,70 | 0,0025 | 6,9050 | 4,9324 | 0,0417 | 0,4780 | 0,0059 | 0,0834 | 0,6080 |
| 0,0917 | 127,75 | 0,0084 | 11,7147 | 4,8500 | 0,0500 | 0,4694 | 0,0117 | 0,0981 | 0,6292 |
| 0,1417 | 115,80 | 0,0201 | 16,4089 | 4,7519 | 0,0416 | 0,3149 | 0,0135 | 0,0819 | 0,4519 |
| 0,1833 | 106,70 | 0,0336 | 19,5581 | 4,6700 | 0,0334 | 0,2134 | 0,0134 | 0,0639 | 0,3240 |
| 0,2167 | 100,10 | 0,1470 | 21,6917 | 4,6062 | 0,0416 | 0,2201 | 0,0197 | 0,0790 | 0,3604 |
| 0,2583 | 92,50 | 0,0667 | 23,8928 | 4,5272 | 0,0417 | 0,1757 | 0,0233 | 0,0787 | 0,3194 |
| 0,3000 | 85,50 | 0,0900 | 25,6500 | 4,4485 | 0,0417 | 0,1378 | 0,0268 | 0,0778 | 0,2841 |
| 0,3417 | 79,10 | 0,1168 | 27,0285 | 4,3707 | 0,1383 | 0,2684 | 0,1136 | 0,2462 | 0,7655 |
| 0,4800 | 61,90 | 0,2304 | 29,7120 | 4,1256 | 0,2300 | -0,1048 | 0,2737 | 0,3066 | 0,8935 |
| 0,7100 | 41,78 | 0,5041 | 29,6638 | 3,7269 | 0,5983 | -0,6769 | 1,2073 | 0,8667 | 1,9956 |
| 1,3083 | 17,50 | 1,7116 | 22,8902 | 2,8622 | | | | | |

Вычисление α и β

| $k \cdot \Delta t_l$ | $p \cdot \gamma_l$ | $\gamma_l \cdot \gamma_l + \rho \cdot \gamma_l$ | $\gamma_l \cdot \gamma_l$ | $e^{-\gamma_l \gamma_l}$ | $t \cdot \gamma_l$ | γ_l^2 | $\sigma_l^2 = t \cdot \gamma_l - \rho = (t \cdot \gamma_0 - \rho) e^{-\gamma_l \gamma_l}$ | $\rho_l^2 = \frac{1}{100} (t \cdot \sigma_l - \rho^2)$ | $d_l^2 = \Delta t_l - \lambda_0 (t \cdot \gamma_l - \rho)$ |
|----------------------|--------------------|---|---------------------------|--------------------------|--------------------|--------------|---|--|--|
| -0,116 | 0,000 | 1,980 | 0,000 | 1,0000 | 76,20 | 5814,06 | 55,710 | 53,922 | 2,783 |
| -0,105 | -0,016 | 1,975 | 0,009 | 0,90574 | 70,999 | 5040,86 | 50,459 | 46,190 | 2,461 |
| -0,197 | -0,030 | 1,969 | 0,181 | 0,83444 | 67,027 | 4492,62 | 46,487 | 40,707 | 2,235 |
| -0,088 | -0,046 | 1,962 | 0,278 | 0,75730 | 62,729 | 3934,93 | 42,189 | 35,130 | 1,890 |
| -0,081 | -0,019 | 1,956 | 0,359 | 0,69837 | 59,446 | 3533,83 | 38,906 | 31,119 | 1,654 |
| -0,076 | -0,070 | 1,950 | 0,423 | 0,65308 | 57,035 | 3252,99 | 36,496 | 28,311 | 1,563 |
| -0,070 | -0,084 | 1,942 | 0,502 | 0,60732 | 54,262 | 2944,36 | 33,722 | 25,225 | 1,451 |
| -0,065 | -0,097 | 1,934 | 0,580 | 0,55990 | 51,732 | 2676,20 | 31,192 | 22,543 | 1,282 |
| -0,060 | -0,111 | 1,925 | 0,658 | 0,51789 | 49,392 | 2445,66 | 28,802 | 19,238 | 1,200 |
| -0,047 | -0,156 | 1,893 | 0,909 | 0,40293 | 42,987 | 1847,88 | 22,447 | 14,260 | 1,293 |
| -0,032 | -0,230 | 1,834 | 1,302 | 0,27199 | 35,693 | 1273,09 | 15,153 | 8,521 | 0,867 |
| -0,013 | -0,425 | 1,658 | 2,169 | 0,11429 | 26,907 | 723,99 | 6,367 | 3,021 | 0,309 |

$t_{20} = 76,75^\circ; \quad \theta = 20,54^\circ; \quad t_{20} - \theta = 55,71^\circ; \quad \lambda_0 = 2,7 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}}$

$a) \begin{cases} [a] & [b] & [c] & [d] & [s] \\ 0,4448 & -0,2484 & 0,8000 & 0,6723 & 1,6747 \\ & -0,5326 & 1,8121 & 1,5115 & 3,7651 \\ & -0,1387 & 0,4591 & 0,3755 & 0,9353 \\ b) & 1,7030 & -0,7589 & -0,3871 & 0,4096 \\ & 1,5643 & -0,3088 & 0,0884 & 1,3439 \\ & -0,1974 & 0,0565 & 0,8591 & \\ & -0,0610 & 0,0174 & 0,2653 & \\ & -1,4606 & -1,2183 & -3,0347 & \\ c) & 1,5481 & 1,1923 & 2,7874 & \\ & 0,0265 & -0,0086 & 0,0180 & \\ & & -0,3246 & & \end{cases}$

$p = -0,3246$
 $k' = -0,1974 - 0,3246 + 0,0565 = -0,4655$
 $m = -0,5585 - 0,0076 + 1,8121 - 0,3246 + 1,5115 = 2,0855$
 $k = \frac{1}{10} k' = -0,00076$

$[av] = [d'd'] - [a'a']x - [b'b']y = 0,215$
 $p_x = [a'a'] - \frac{[a'b']^2}{[b'b']} = 316,648$
 $p_y = [b'b'] - \frac{[a'b']^2}{[a'a']} = 222,770$

$x = \sqrt{\frac{[av]}{p_x - 2}} = \pm 0,147; \quad s_x = \frac{s}{\sqrt{p_x}} = \pm 0,008; \quad s_y = \frac{s}{\sqrt{p_y}} = \pm 0,0098$
 $s_x = \frac{1}{s} s_x = \pm 0,003; \quad s_y = \frac{1}{100 \cdot l} s_y = \pm 0,0004$

$[a'a'] = 16\,152,801$
 $[a'b'] = 13\,414,961$
 $[b'b'] = 11\,363,945$
 $[a'd'] = 751,919$
 $[b'd'] = 617,382$
 $[d'd'] = 35,256$

$x = \frac{[b'b'] [a'd'] - [a'b'] [b'd']}{[a'a'] [b'b'] - [a'b']^2} = 0,0357$
 $\lambda = \lambda_0 = \lambda_0 + x = 2,700 + 0,036 = 2,736$
 $\lambda_0 = 0,23046$
 $\alpha = \frac{2,736}{0,23046} = 11,872$
 $y = \frac{[a'a'] [b'd'] - [a'b'] [a'd']}{[a'a'] [b'b'] - [a'b']^2} = 0,01306$
 $y = 100B; \quad B = \beta_0 = 0,0001306$
 $\beta = \frac{0,0001306}{0,23046} = 0,00056$
 $s_t = \alpha + 2\beta$
 $\alpha_{20} = 11,894$

$s_{v_l} = \frac{\alpha}{l_0} \sqrt{\frac{[b'b'] - 0,04 [a'b']^2 + 0,0008 [a'a']^2}{[a'a'] \cdot p_y}}$
 $s_{\alpha_{20}} = \pm 0,02$
 $\alpha = (11,87 \pm 0,03) 10^{-6} \frac{1}{\text{град}}$
 $\beta = (0,0006 \pm 0,0004) 10^{-6} \frac{1}{\text{град}^2}$
 $\alpha_{20} = (11,89 \pm 0,02) 10^{-6} \frac{1}{\text{град}}$

в книге проф. М. Ф. Мзлкова „Основы метрологии“, часть 1, 1949 г.

Примечание. Решение нормальных уравнений следует производить по схеме, приведенной

шем процесс охлаждения. После этого стальная заготовка выдерживалась в течение 15 часов в термостатном шкафу с температурой воздуха около 80°C . Наблюдения за изменением длины исследуемой меры производились на горизонтальном оптиметре. При этом, исследуемая мера, с целью изоляции ее от массы прибора, устанавливалась на столике оптиметра на двух кварцевых пластинках. Наблюдения за изменением длины меры при охлаждении производились сначала через одну, две минуты, затем через пять и десять минут.

Отдельные наблюдения в конце охлаждения осреднялись.

Моменты определения длины меры фиксировались по часам с секундной стрелкой с погрешностью отсчета порядка ± 3 сек. Полученные результаты оказались следующими:

$$\alpha = (11.87 \pm 0.03) \cdot 10^{-6};$$

$$\beta = (0.0005 \pm 0.0004) \cdot 10^{-6};$$

$$\alpha_{20} = (11.89 \pm 0.02) \cdot 10^{-6}.$$

Обработка наблюдений и вычисление температурных коэффициентов этой меры показаны в табл. 2.

Плоскопараллельная концевая мера длиной 100 мм

Для того чтобы замедлить в дальнейшем процесс охлаждения этой меры, к ней были вплотную прижаты две другие такие же меры. Вместе с этими мерами она выдерживалась в течение 15 часов в термостатном шкафу при температуре $+130^{\circ}\text{C}$. Наблюдение за изменением длины исследуемой меры производилось на горизонтальном оптиметре. Для того чтобы изолировать исследуемую меру от массы оптиметра, на столик оптиметра устанавливались две кварцевые подкладки. На этих подкладках и лежали меры во время наблюдений. Изменение длины концевой меры определялось сначала через каждые 5 минут, а затем через 10 минут и через 15 минут.

При обработке результатов наблюдений были получены следующие значения температурных коэффициентов для стальной стомиллиметровой меры:

$$\alpha = (9.05 \pm 0.01) \cdot 10^{-6};$$

$$\beta = (0.058 \pm 0.001) \cdot 10^{-6};$$

$$\alpha_{20} = (11.37 \pm 0.01) \cdot 10^{-6}.$$

Однометровый инварный стержень от маятниковых астрономических часов № 14

Наблюдения по определению температурных коэффициентов однометрового инварного стержня № 14 производилось на однометровом универсальном компараторе.

С целью замедления процесса охлаждения инварный стержень был с вечера помещен в ванну компаратора с горячей водой.

Наблюдения были начаты утром следующего дня при $t_{e_0} = +39,5^\circ \text{C}$; наблюдаемые изменения длины Δl стержня относились к среднему моменту времени между отсчетами левого и правого микроскопов компаратора. Этот момент принимался за время τ_1 . После обработки наблюдений были получены следующие результаты:

$$\begin{aligned} \alpha &= (+1,76 \pm 0,07) 10^{-6}; \\ \beta &= (0,006 \pm 0,001) 10^{-6}; \\ \alpha_{20} &= (+2,00 \pm 0,05) 10^{-6}. \end{aligned}$$

Эти результаты определения температурных коэффициентов динамическим методом совпадают с результатами, полученными компараторным методом в пределах погрешностей самих определений:

$$\begin{aligned} \alpha &= (1,82 \pm 0,06) 10^{-6}; \\ \beta &= (0,005 \pm 0,02) 10^{-6}; \\ \alpha_{20} &= (2,02 \pm 0,05) 10^{-6}. \end{aligned}$$

Совпадение результатов, полученных принципиально различными методами, подтверждает правильность теоретических положений динамического метода.

Поворотные маятники L_{50} и L_{25}

Наблюдения при определении температурных коэффициентов удлинения поворотных маятников длиной 50 см и 25 см производились на шестиметровой машине. Маятники предварительно выдерживались в течение 15 часов в термостатном шкафу с температурой $t_{e_0} = +50,0^\circ \text{C}$ и $t_{e_0} = 54,1^\circ \text{C}$.

Поворотные маятники представляют собой сложное тело двухтавровой формы, изготовленное из дюралюминия с отдельными деталями из бронзы и пирекса.

Обработка наблюдений дала следующие результаты:

| Маятник L_{50} | Маятник L_{25} |
|---|---|
| $\alpha = (19,6 \pm 0,2) 10^{-6};$ | $\alpha = (20,3 \pm 0,3) 10^{-6};$ |
| $\beta = (0,002 \pm 0,003) 10^{-6};$ | $\beta = (0,001 \pm 0,003) 10^{-6};$ |
| $\alpha_{20} = (19,7 \pm 0,1) 10^{-6}.$ | $\alpha_{20} = (20,3 \pm 0,2) 10^{-6}.$ |

Составной четырехметровый штихмасс № С 5 (ЧИЗ)

Четырехметровые штихмассы этого типа в собранном виде представляют собою тело весьма сложной формы.

Температурные коэффициенты штихмасса определялись в процессе свободного нагревания после пребывания его в условиях низких температур, около -6°C . Температурные коэффициенты штихмасса определялись в зимнее время; поэтому для придания

штихмассу низкой температуры он выносился на четыре или пять часов на улицу. После этого штихмасс вносился в термостатную комнату и устанавливался на шестиметровую концевую машину, на которой и производились наблюдения за изменением длины штихмасса в процессе нагревания.

Начальная температура штихмасса определялась как среднее из отсчетов по двум термометрам, симметрично закрепленным на штихмассе.

Вычисление температурных коэффициентов штихмасса дало следующие результаты:

$$\begin{aligned}\alpha &= (10,7 \pm 0,4) 10^{-6}; \\ \beta &= (-0,02 \pm 0,02) 10^{-6}; \\ \alpha_{20} &= (9,9 \pm 0,2) 10^{-6}.\end{aligned}$$

Четырехметровый штихмасс № 2/3965

Этот штихмасс имеет сигарообразную форму, пустотелый, с тонкими стенками, а потому является быстроохлаждающимся телом.

С целью искусственного замедления процесса выравнивания температуры штихмасса с температурой окружающей среды штихмасс был обернут бумагой и вынесен на улицу с температурой воздуха, приблизительно равной $+2^\circ$. После 15 часов пребывания в условиях пониженной температуры штихмасс был перенесен в помещение и установлен на шестиметровую концевую машину, на которой производились дальнейшие наблюдения.

Обработка наблюдений дала следующие результаты:

$$\begin{aligned}\alpha &= (9,1 \pm 0,9) 10^{-6}; \\ \beta &= (-0,04 \pm 0,03) 10^{-6}; \\ \alpha_{20} &= (7,5 \pm 0,3) 10^{-6}.\end{aligned}$$

Однометровая стальная мера № 1*

Обработка результатов наблюдений была произведена как для охлаждения, так и для нагревания. Полученные результаты хорошо совпали между собой. Измерение длины меры производилось на четырехметровом геодезическом компараторе сличением с длиной метра R116.

Моменты определения длины меры отсчитывались по часам с секундной стрелкой с точностью до ± 5 секунд.

При вычислении коэффициентов результаты отдельных наблюдений осреднялись.

При обработке наблюдений были получены следующие результаты:

$$\begin{aligned}\alpha_{20} &= (11,04 \pm 0,02) 10^{-6}; \\ \beta &= (0,015 \pm 0,005) 10^{-6}.\end{aligned}$$

Заметим, что при определении температурных коэффициентов меры № 1* динамическим методом мы не устраняли и не учитывали явлений теплопроводности через металлические ролики, на которых устанавливалась мера в ванне компаратора во время наблюдений. Несмотря на этот недостаток, полученные динамическим методом результаты хорошо согласуются с результатами определения коэффициентов этой же меры, полученными обычным компараторным методом:

$$\alpha_{20} = (10,95 \pm 0,01) 10^{-6};$$

$$\beta = (0,021 \pm 0,002) 10^{-6}.$$

По данным наблюдений, производившихся при исследовании меры № 1*, значения температурных коэффициентов удлинения меры были вычислены также по обычным формулам. Это оказалось возможным потому, что наряду с измерениями длины меры № 1* в процессе понижения или повышения ее температуры после предварительного нагревания или охлаждения мы производили измерение ее температуры по образцовому ртутному термометру, закрепленному на мере. Ртутный резервуар термометра при этом входил внутрь специальной латунной накладки, плотно соприкасающейся с мерой. Результаты отдельных приемов наблюдений были сгруппированы в отдельные серии приемов, близких друг другу по температуре наблюдения.

Обработаны были два ряда измерений, произведенных в процессе охлаждения меры № 1*, и два ряда измерений, произведенных в процессе нагревания меры № 1*.

Результаты вычислений приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Значение температурных коэффициентов меры № 1*

| Условия определения коэффициентов | № ряда | α_{20} | β |
|--|---------------|---------------|---------|
| I. При повышении температуры меры от +10° до +20° | 1 | +10,23 | -0,019 |
| | 2 | +10,23 | -0,032 |
| | Среднее . . . | +10,23 | -0,026 |
| II. При понижении температуры меры от +35° до +20° | 1 | +11,73 | +0,050 |
| | 2 | +11,67 | +0,012 |
| | Среднее . . . | +11,70 | +0,031 |
| Общее среднее . . . | | +10,97 | +0,002 |

Результаты вычислений, приведенные в табл. 3, говорят о том, что наблюдения, полученные из динамических процессов, нельзя обрабатывать с помощью обычных формул статического метода,

так как в этом случае, что видно из табл. 3, результаты наблюдений сопровождаются погрешностями систематического характера.

Средние же из значений коэффициентов, определенных при повышении и при понижении температуры меры, довольно близко совпадают с результатами, полученными нами как динамическим, так и статическим методами.

Таким образом, результаты предварительного опробования динамического метода следует считать хорошими, так как значения температурных коэффициентов весьма различных тел, найденные этим методом, отличаются от значений, полученных статическим методом, на величину порядка точности самих определений.

Проведенная работа показала, что предлагаемый нами метод определения температурных коэффициентов имеет ряд существенных преимуществ как перед обычными статическими методами, так и перед динамическим методом, предложенным оптической лабораторией ВНИИМ.

Наш динамический метод, не требуя никакого специального оборудования и не нуждаясь в создании стационарных температурных состояний или какого-либо особого температурного режима, дает достаточно точные результаты во много раз быстрее, чем применяемые в настоящее время методы.

Можно надеяться, что это обстоятельство позволит в дальнейшем с успехом применять наш динамический метод для определения температурных коэффициентов различных образцов и тел самых разнообразных размеров и форм.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Предисловие | 3 |
| М. Л. Б р ж е з н и с к и й. Измерительная машина с автоколлимационной оптической системой для линейных измерений | 5 |
| Л. К. К а в я к. Об усовершенствовании методов сличения эталонов длины | 23 |
| А. Н. К о р о л е в а. О точности метода калибровки шкал на стереокомпараторе | 60 |
| А. Ю. Г и д е л ь. К вопросу о погрешности за счет измерительного усилия при линейных измерениях | 67 |
| М. Г. Б о г у с л а в с к и й. Образцы с регулярным профилем для поверки и градуировки шуповых приборов | 75 |
| Н. Н. М е д в е д е в. Динамический метод определения температурных коэффициентов удлинения тел | 93 |

БИБЛИОТЕКА
Всесоюзная научно-исследовательская
станция метрологического
вида И. И. Менделеева

Технический редактор *Е. А. Длугоканская* Корректор *В. М. Хорошкевич*

Подписано к печати 21/II 1953 г. М-01992. Формат бумаги 60×92^{1/16}

Печ. листов 7. Уч.-изд. листов 6,7. Тираж 600 экз. Заказ 3415.

1-я типография Машгиза. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

| Стр. | Строка | Напечатано | Должно быть | По чьей вине |
|------|---------------------|------------|-------------|-----------------|
| 44 | Табл. 4 (6-я графа) | 90,58 | 90,68 | Авт. |
| 63 | Табл. 2 (8-я графа) | 0,97 | -0,97 | Тип. |
| 65 | Табл. 4 (головка) | в мм | в МК | Корр. |
| 102 | 19-я сверху | к конце | в конце | • |

ВНИМАНИЕ

135

ИСПОЛНЕНИЕ ЗАКАЗА

| № п/п | наименование | количество | единица измерения | сумма |
|-------|--------------|------------|-------------------|--------|
| 1 | Книжка | 600 экз. | экз. | 600,00 |
| 2 | Листы | 700 экз. | экз. | 700,00 |
| 3 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 4 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 5 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 6 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 7 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 8 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 9 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 10 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 11 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 12 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 13 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 14 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 15 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 16 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 17 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 18 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 19 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 20 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 21 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 22 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 23 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 24 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 25 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 26 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 27 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 28 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 29 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 30 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 31 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 32 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 33 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 34 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 35 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 36 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 37 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 38 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 39 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 40 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 41 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 42 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 43 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 44 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 45 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 46 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 47 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 48 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 49 | Книжки | 10 экз. | экз. | 10,00 |
| 50 | Листы | 10 экз. | экз. | 10,00 |

Итого

Технический редактор *Е. А. Длугоканская* Корректор *В. М. Хорошневич*
 Подписано к печати 21/II 1953 г. М-01992. Формат бумаги 60×92¹/₁₆
 Печ. листов 7. Уч.-изд. листов 6,7. Тираж 600 экз. Заказ 3415.
 1-я типография Машгиза. Ленинград, ул. Мойсеенко, 10.

135

AMERICAN MUSEUM OF NATURAL HISTORY

100th Street, New York, N. Y.

3 р. 35 к.



ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА

Ленинград, Невский пр., 58