

спр.

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

**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА
ВЫПУСК 47(107)

СТАНДАРТГИЗ
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД
1961

13

метрологич тух

200

1875
1876

m 12536a

КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

спр.

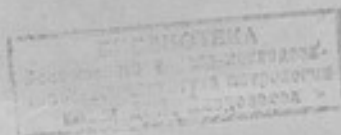
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ

m 12536a

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА
ВЫПУСК 47 (107)

Под редакцией
канд. техн. наук Л. К. КАЯКА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
СТАНДАРТГИЗ

МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

1961

УДК 62-50
ВВЕДЕНИЕ
ИЗДАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ В ОБЛАСТИ
ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ
ИЗМЕНЕНИЙ

ТРУДЫ НАУЧНОГО ЦЕНТРА
ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

Вып. 10
1960 г.

46982.2.21

ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКИ И ТЕХНИКИ

Ответственный редактор директор ВНИИМ
д-р техн. наук проф. В. О. АРУТЮНОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем сборнике помещены статьи о работах в области линейных и угловых измерений, выполненных во ВНИИМ и в других институтах Комитета стандартов, мер и измерительных приборов.

Ряд статей сборника посвящен исследованию и совершенствованию эталонов единиц измерений длины и углов. В этих статьях приведены результаты исследования штриховых эталонов длины в 1945—1959 гг. и компараторов, на которых производятся сличения эталонов, а также температурных погрешностей этих сличений. Описана новая эталонная установка ВНИИМ для измерения углов.

В статье Н. Р. Батарчуковой о новом эталоне для воспроизведения единицы длины дан достаточно подробный обзор современного состояния вопроса о переходе на новое определение единицы длины — метра — в длинах световых волн.

В статье Е. П. Алексеевой и О. Ю. Шошиной публикуются результаты ежегодных сличений интерференционных установок институтов Комитета, которые проводятся ВНИИМ с целью поддержания единства интерференционных измерений в стране. Об изменении длины стальных концевых мер и стеклянных шкал говорится в статьях А. З. Полковой и А. Н. Королевой.

Ознакомление с методами и условиями выполнения точных линейных и угловых измерений в метрологических институтах, по нашему мнению, будет способствовать удовлетворению значительно возросших в настоящее время требований к точности результатов измерений, предъявляемых в машиностроении и приборостроении, так как эти методы могут найти применение и в работе заводских измерительных лабораторий.

Вопросы применения и дальнейшего развития интерференционных методов измерений освещаются в статьях о тридцатиметровом интерференционном компараторе и об интерференционном приборе для измерения шкал. О применении интерференционного метода для измерения углов точных многогранных призм говорится в статье Л. Н. Логачевой и В. Я. Эйдинова. Результаты этих работ также могут быть внедрены в практику технических измерений.

В связи с поставленной в семилетнем плане задачей механизации и автоматизации линейных измерений представит интерес статья В. П. Коронкевича и Ю. И. Трулева о разработанном ими фотоэлектрическом устройстве для счета интерференционных полос.

В статьях сборника рассматриваются также различные вопросы поверочной практики и измерений в промышленности (измерение шероховатости поверхности, плоскостности пластин, прямолинейности направляющих и др.).

Настоящий сборник трудов посвящается памяти профессора доктора технических наук М. Ф. Романовой, под руководством и при непосредственном участии которой выполнялись либо были поставлены работы, результаты которых публикуются.

Редактор

ОТ РЕДАКЦИИ

Во время подготовки к печати настоящего сборника в Париже состоялась Одиннадцатая генеральная конференция по мерам и весам и ею 14 октября 1960 г. было принято новое определение единицы измерения длины: «Метр есть длина, равная 1650763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86». Генеральная конференция поручила Международному комитету мер и весов разработать инструкцию по осуществлению перехода на новое определение метра и продолжить работы по дальнейшему усовершенствованию эталонов длины. Важность принятых решений трудно переоценить, так как внедрение их в практику дает возможность повышения точности измерений эталонов длины.

28/XI 1960 г.

Н. Р. БАТАРЧУКОВА
ВНИИМ

НОВЫЙ ЭТАЛОН ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ

В работе изложено современное состояние вопроса о переходе на новый эталон для воспроизведения единицы длины, а также изложены дальнейшие пути усовершенствования нового эталона для воспроизведения метра.

Прогресс в технике и физике требует повышения точности и достоверности результатов измерений физических величин. Существующие точности воспроизведения единиц измерений с помощью материальных искусственных эталонов уже не удовлетворяют современную метрологию. Переход к системе единиц, основанной на мировых постоянных, является единственно правильным решением вопроса хранения и повышения точности воспроизведения единиц измерения.

Так, например, если обратиться к единице длины, то можно считать доказанным, что никакое усовершенствование штрихов на платино-иридиевом прототипе не позволит получить точность воспроизведения метра выше уже достигнутой ($1 \cdot 10^{-7}$), и только переход на новый эталон единицы длины — длину световой волны — дает возможность перейти к более высокому порядку точности.

Хорошо известно, что атом излучает квант света с частотой

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h},$$

где h — постоянная Планка;
 E_1 и E_2 — энергии двух состояний атома.

При распространении этого излучения в вакууме со скоростью c длина волны λ будет

$$\lambda = \frac{ch}{E_2 - E_1}.$$

С правой стороны этого выражения стоят физические константы. Таким образом, теоретически длина волны любого излучения атома, являясь константой, может служить для строгого определения единицы длины. Однако реально воспроизводимая по центру тяжести контура спектральной линии длина волны светового излучения определенного источника не есть физическая постоянная.

При исследованиях спектральных линий с помощью приборов высокой разрешающей силы установлено, что далеко не все они одинаково узки и что почти все обладают сложным строением. Ширина и сверхтонкая структура линий снижают точность установления центра тяжести ее контура и делают значение длины волны в довольно широких пределах неопределенным. Встал вопрос о выборе наиболее монохроматического излучения, длина волны которого воспроизводилась бы с максимально возможной точностью. Задача выбора первичной нормали длин волн впервые была поставлена и разрешена Майкельсоном в 1892—1895 гг. [1]. На основании подробнейшего изучения большого числа спектральных линий видимой области спектра Майкельсон предложил использовать в качестве первичной нормали длину волны красной линии естественного кадмия. В 1893 г. Майкельсон и Бенуа сравнили длину волны этой линии с длиной прототипа метра [2].

На конгрессе по изучению Солица в 1905 г. и на VII Генеральной конференции по мерам и весам в 1927 г. [3] были приняты значение длины волны первичной нормали $\lambda 6438,4696 \cdot 10^{-10}$ м красной линии естественного кадмия, спецификация источника, излучающего эту линию, и утверждено число длин волн в метре:

1 метр = 1553164,12 длины волн красной линии естественного кадмия,

распространяющихся в нормальном воздухе ($h = 760$ мм рт. ст., $t = 15^\circ \text{C}$, $f = 10$ мм рт. ст. и содержание CO_2 — 0,003%).

Долгое время красная линия кадмия считалась простой, так что выбор Майкельсона обеспечил спектроскопию и метрологию эталоном длин световых волн более чем на 50 лет. С 1927 г. следует считать определение единицы длины двойственным: через платино-иридиевый эталон и через длину световой волны. В последующие годы сравнение длины волны красной линии кадмия с длиной национальных эталонов метра повторялось в различных странах. В табл. 1 приведены результаты этих сравнений и среднее значение числа длин волн в метре, которое в точности совпало с принятым в 1927 г.

Совпадение среднего значения из девяти измерений длины волны красной линии кадмия с принятым ранее в пределах погрешности этих сравнений ($2 \cdot 10^{-6}$) указывает на достаточно удовлетворительную стабильность и идентичность различных национальных эталонов метра.

С развитием спектроскопии высокой разрешающей силы расширялись и дальнейшие исследования точности воспроизведения и сравнения длин волн излучений различных источников света. Было установлено, что численное значение длины волны как бы связано с той разностью хода в интерферометре, при которой она определяется [4]. Это заставило ввести понятие об «эффективной длине волны» (под которым обычно понимают значение, отнесенное к центру тяжести контура спектральной линии); величину последней фактически и используют при интерференционных измерениях длины.

Исследования излучений кадмия, гелия, ртути и криптона [4—7], проведенные в Международном бюро мер и весов, во ВНИИМ и в других национальных метрологических лабораториях, показали наличие периодических изменений «эффективной длины волны» в зависимости от разности хода в интерферометре. Эти кажущиеся изменения тем больше, чем сложнее сверхтонкая структура линии. Фактически они связаны с периодическим изменением видимости интерференционной картины с увеличением разности хода в интерферометре. Видимость же интерференционной картины зависит от числа составляющих сверхтонкой структуры линии, разрешенных при данной разности хода и пере-

наложившихся друг с другом. Такие периодические изменения «эффективной длины волны», хотя и очень незначительные, должны быть и у красной линии кадмия, наличие сверхтонкой структуры у которой было обнаружено в 1933 г. [8]. Начались поиски линий, более монохроматичных, чем красная линия естественного кадмия. До 40-х годов нашего столетия был сделан ряд предложений [9—11], касающихся замены первичной нормали, однако преимущества новых линий по сравнению с красной линией кадмия были столь незначительны, что не

Таблица 1

| Число длин волн в метре | Длина волны красной линии $Cd 1 \cdot 10^{-10}$ м | Годы | Наблюдатели |
|----------------------------|---------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1553164,25 | 6438,4691 | 1892 | Майкельсон и Бенуа. Международное бюро мер и весов, Париж |
| 1553163,96 | 6438,4703 | 1905—1906 | Бенуа, Фабри и Перо. Международное бюро мер и весов, Консерватория искусств и ремесел, Париж |
| 1553164,46 | 6438,4682 | 1927 | Ватанабе и Имайзуме. Центральное бюро мер и весов, Токио |
| 1553163,71 | 6438,4713 | 1933 | Сирс и Баррелл. Национальная физическая лаборатория, Теддингтон |
| 1553164,29 | 6438,4689 | 1933 | Кестерс и Лампе. Физико-технический институт, Шарлотенбург |
| 1553163,81 | 6438,4709 | 1934—1935 | Сирс и Баррелл. Национальная физическая лаборатория, Теддингтон |
| 1553164,27 | 6438,4690 | 1934—1935 | Кестерс и Лампе. Физико-технический институт, Шарлотенбург |
| 1553164,03 | 6438,4700 | 1937 | То же |
| 1553164,34 | 6438,4687 | 1940 | Романова, Варлих, Карташев и Батарчукова. Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии, Ленинград |
| Среднее 1553164,12 | 6438,4696 | | |

имело смысла пересматривать постановление VII Генеральной конференции. И только благодаря успехам ядерной физики и развитию техники разделения изотопов открылась возможность получения четно-четных элементов в чистом виде. Как известно, излучение их не имеет сверхтонкой структуры. Наглядным примером является зеленая линия Hg^{198} .

На рис. 1 представлена интерференционная картина колец равного наклона с разделенным полем. Правая часть снимка соответствует картине, полученной с эталоном Фабри и Перо при освещении его зеленой линией $\lambda 5461 \text{ \AA}$ естественной ртути, а левая часть — при освещении зеленой линией изотопа Hg^{198} . Сравнение двух систем интерференционных колец наглядно показывает преимущества простой линии в отношении точности определения положения интерференционного максимума, а следовательно, и центра тяжести контура спектральной линии [12].

Исключение сверхтонкой структуры не решает полностью вопроса о выборе какой-нибудь спектральной линии в качестве основной, так как и ширина контура играет не меньшую роль. Естественная ширина линии, хотя и очень малая, не может быть исключена потому, что она связана с конечной шириной уровней энергии излучающего атома. Если бы линия обладала только естественной шириной, то распределение интенсивности ее по длинам волн представляло бы симметричную функцию с полушириной порядка $0,000119 \text{ \AA}$. Такая полуширина контура линии позволила бы воспроизводить длину волны, отнесенную к острому симметричному максимуму с погрешностью на несколько порядков меньшей $2 \cdot 10^{-8}$.

Величина доплеровской ширины спектральных линий, связанной с тепловым движением излучающих атомов (пропорциональна $\sqrt{\frac{T}{M}}$, где T — абсолютная температура, а M — молекулярный вес), значительно превосходит естественную. Так, для красной области спектра даже для

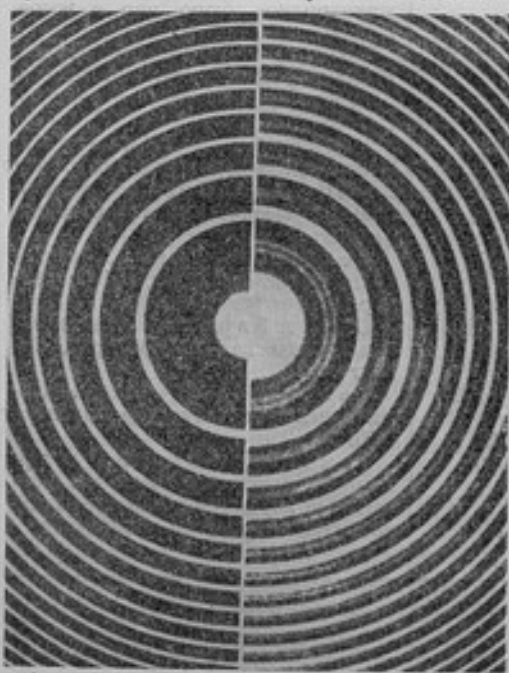


Рис. 1. Интерференционная картина колец равного наклона с разделенным полем для зеленой линии $\lambda 5461 \text{ Hg}$.

тяжелых элементов доплеровская ширина в 40 раз больше естественной. Она, так же как и естественная, имеет симметричный характер и не вызывает смещения максимума контура линии. Значительно более важным оказывается уширение контура линии, обусловленное давлением пара или газа в источнике света. Оно искажает контур линии, делает его асимметричным и может повести к смещению его максимума. Это уширение является результатом соударений излучающего атома с атомами светящегося газа или с атомами «постороннего газа», присутствующего в источнике в виде примеси или в виде добавочного газа, вводимого для облегчения возбуждения и поддержания разряда при малых количествах исследуемого вещества.

Явление полного самопоглощения, наблюдаемое почти на всех спектральных линиях, может превратить простую линию в дублет и ввести периодическое изменение «эффективной длины волны» с разностью хода. Частичное же самопоглощение асимметрично расширяет спектральную линию и снижает точность фиксации максимума.

Для того чтобы наглядно представить, как все приведенные выше явления изменяют значение эффективной длины волны в реальных условиях возбуждения спектральных линий и влияют на воспроизведение единицы длины через длину световой волны, полезно ввести понятие о «шкале длин волн», аналогичной обычным линейным шкалам [13]. Действительно, в интерферометрии порядок интерференции с увеличением разности хода растет по закону арифметической прогрессии. Еди-

ница «шкалы длин волн», аналогичная наименьшему промежутку в линейной шкале и представляющая собой разность между двумя последовательными порядками интерференции, инвариантна. Именно эти требования (инвариантность наименьшего промежутка и возрастание по закону арифметической прогрессии) и предъявляют обычно при построении линейных штриховых шкал. Однако для «шкалы длин волн» они выполняются со значительно более высокой степенью точности, даже если использовать для построения такой шкалы длину волны красной линии естественного кадмия.

Спектроскопические свойства контура линий, а именно: ширина, асимметрия, сверхтонкое строение, смещение максимума по спектру, являются причинами ошибок «шкалы длин волн». Наличие сверхтонкой структуры спектральной линии вносит периодические ошибки в эту «шкалу», а симметричное расширение и смещение максимума ведет к появлению прогрессивных ошибок. Если точно известны условия возбуждения спектра, то, подобно введению поправок к значению различных интервалов линейных шкал, можно вычислить и вводить поправки в «шкалу длин волн». Отсюда вытекает необходимость изучения источников света, применяемых при интерференционных измерениях длины.

На рис. 2 [13] представлен график периодических ошибок «шкалы длин волн» для голубой линии кадмия $\lambda 0,48012532$ мк [13]. Эта кривая получена при исследовании излучения ламп промышленного типа с естественным кадмием. По оси абсцисс отложена разность хода L (мм), а по оси ординат — относительная погрешность определения длины $\frac{\Delta L}{L}$. Величины этих ошибок зависят от сложности сверхтонкой структуры линии, а также от степени самообращения.

Применение «шкалы длин волн» линий естественного кадмия позволяет достичь при измерении длины метра точности в 0,1 мк/м. Для дальнейшего же повышения точности необходимо использовать спектральные линии, «шкала длин волн» которых может быть воспроизведена с точностью на порядок более высокой. Переход к линиям без сверхтонкой структуры обеспечивает исключение периодических ошибок «шкалы длин волн». Однако изучение условий возбуждения спектров остается по-прежнему необходимым, так как прогрессивные ошибки «шкалы», связанные с различными возмущающими воздействиями на уровне энергии атома, а следовательно, с искажениями контура линий, остаются неисключенными.

В 1948 г., когда метрологи и физики получили в свое распоряжение четно-четные элементы, появились предложения заменить красную линию кадмия линиями без сверхтонкой структуры [14—16]. Повышенные точности воспроизведения «шкалы длин волн» на порядок стало реальным.

В 1952 г. Международный комитет по мерам и весам принял решение об учреждении Консультативного комитета по определению метра. В задачи этого комитета входило: подведение итогов исследований по

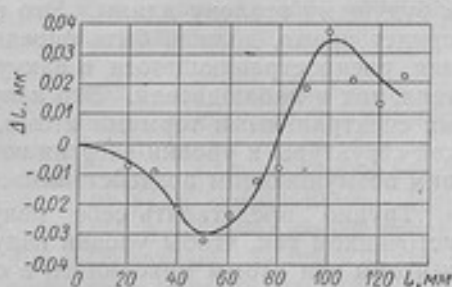


Рис. 2. Периодические ошибки «шкалы длин волн» для голубой линии кадмия $\lambda 0,48012532$ мк.

интерференционным измерениям длины и исследований монохроматических источников света, выбор новой первичной нормы длины волны и принятие рекомендации по переходу на новое определение единицы длины. Консультативный комитет по определению метра собирался два раза (в 1953 и 1957 гг.). Выработывая свои предложения, участники Консультативного комитета старались приблизить, насколько это возможно, реальное значение длины волны к атомной константе. Вопрос стоял не просто о выборе линии, более монохроматичной, чем красная линия естественного кадмия, а об определении единицы длины через естественную постоянную. Консультативный комитет своим предложением II [17] внес совершенно новые требования к длине волны как к будущему эталону длины. Это предложение гласит, что «метр, когда придет время, должен быть определен длиной волны светового излучения, распространяющегося в вакууме при состоянии покоя как излучателя, так и наблюдателя. Это излучение должно быть определено двумя спектральными термами атома, спектр которого не имеет сверхтонкой структуры и уровни энергии которого не подвержены никаким внешним возмущающим воздействиям».

Трудно представить себе излучение спектра монохроматическим источником так, чтобы уровни излучающих атомов не были возмущены и чтобы эти атомы находились в состоянии покоя относительно наблюдателя. Эти условия выполнимы лишь для идеального источника света. Принимая такое предложение, Консультативный комитет ставил перед исследователями задачу отыскания числовой разности между действительно воспроизводимой длиной волны и идеальной с тем, чтобы можно было, внося соответствующую поправку, получить значение естественной константы. С этой точки зрения и были рассмотрены излучения трех одноизотопных источников света с Cd^{114} , Hg^{198} и Kr^{85} . Все три излучения имеют свои преимущества и свои недостатки.

Красная линия Cd^{114} была предложена для рассмотрения на заседаниях Консультативного комитета Советским Союзом на основании исследований, проведенных в оптической лаборатории ВНИИМ [14]. Красную линию естественного кадмия изучали более полувека и она показала высокую воспроизводимость своей длины волны. Естественно было ожидать, что воспроизводимость длины волны красной линии изотопического кадмия будет еще выше [18].

Весьма важную роль при воспроизведении длин волн спектральных линий обогащенных изотопов играет процент обогащения. Во ВНИИМ были исследованы 3 четных изотопа: Cd^{112} , Cd^{114} , Cd^{116} , из них наиболее высокий процент обогащения имел Cd^{114} . Для красной линии с очень узкой в обычных источниках света сверхтонкой структурой, неразрешимой современной оптикой, была подсчитана графоаналитическим методом зависимость смещения центра тяжести спектральной линии от процентного содержания изотопов в смеси [19]. При этом подсчете величины изотопических смещений в красной линии кадмия были взяты по данным оптической лаборатории ВНИИМ [14] и по данным Вайса и Вандер Слюнса [20]. В результате оказалось, что для линий с такой узкой сверхтонкой структурой смещение центра тяжести контура с изменением процентного содержания изотопов на 30 составляет 0,0001 Å [19].

Для поддержания разряда и облегчения возбуждения спектра в парах кадмия в лампы обязательно добавляют аргон. На основании подробного исследования зависимости смещения максимума красной линии кадмия от давления аргона в лампе автором совместно с Г. Б. Дубровским было установлено, что увеличение давления аргона в источнике

света на 1 мк Hg вызывает смещение максимума контура линии на 0,00005 Å в красную сторону спектра [21].

В видимой области спектра кадмия, кроме красной линии, имеются еще 3 интенсивные линии: $\lambda 5086$ Å, $\lambda 4800$ Å и $\lambda 4678$ Å. Это обстоятельство делает кадмиевый одноизотопный источник света особенно удобным для интерференционных измерений длины, так как обеспечивает определение целого числа длин волн в разности хода без применения других вспомогательных источников излучения. Лампы с накаливаемыми электродами, заполненные Cd^{114} , дают яркий спектр, удобны и просты в обращении и не требуют сложного оборудования для их питания. И, наконец, для сохранения преэмерсионности «эталона длин волн» красная линия Cd^{114} является наилучшей, так как сравнение длин волн двух близко расположенных спектральных линий может быть сделано с наивысшей степенью точности.

Зеленая линия ртути, самая яркая из всех спектральных линий, привлекла внимание еще Майкельсона. Однако ее исключительно сложная сверхтонкая структура (16 составляющих) заставила тогда отказаться от этой линии. Получение Hg^{198} путем бомбардировки чистого золота монохроматическим потоком нейтронов [19] дало возможность Бюро стандартов предложить зеленую линию Hg^{198} в качестве новой первичной нормали длин волн [16, 22]. Безэлектродные лампы Мергера с Hg^{198} , возбуждаемые с помощью генератора высокой частоты (100—200 МГц), имеют большой срок службы и просты по своей конструкции. В эти лампы, так же как и в кадмиевые, обязательно добавляют аргон или какой-либо другой газ. Влияние давления этого газа на положение максимума контура спектральной линии может быть уменьшено до пренебрежимо малых величин. Введение в источник света азота вместо аргона в сильной степени уменьшает самопоглощение в линии. Применение источников света с молекулярным пучком позволяет сузить линию в очень широких пределах [23].

Источники света с естественным криптоном давно уже применяются при интерференционных измерениях длины концевых мер до 100 мм как наиболее подходящие во всех отношениях. Метод термодиффузии [24] обеспечил выделение изотопа Kr^{86} с высоким процентом обогащения по Kr^{86} (99%).

Охлаждение источника до температуры тройной точки азота дает возможность получать очень узкие симметричные [15] линии, позволяющие в видимой области наблюдать интерференцию при разности хода до 800 мм. Зная давление P криптонового газа в лампе и плотность тока j , проходящего через разряд, можно подсчитать смещение максимума спектральной линии [25] и привести значение длины волны к иде-

$$\Delta n \approx (Pj)^{1/2} \quad (1)$$

альным условиям: при нулевом токе через разряд и нулевом давлении. На основании этих соображений Физико-технический институт ФРГ и Международное бюро мер и весов выдвинули для принятия в качестве первичной нормали длину волны линии видимой области спектра Kr^{86}

6056 Å. Хотя эта линия в обычных условиях возбуждения и не является более яркой по сравнению с многочисленными другими линиями видимого спектра криптона, но при температуре источника, соответствующей тройной точке азота (64° К), ее относительная интенсивность возрастает [26].

Все 3 излучения были подробнейшим образом изучены в Международном бюро мер и весов. Для всех одноизотопных излучений были сравнены: видимость интерференционной картины по Майкельсону, сим-

метрии и ширина контура, величина внешнего возмущающего воздействия на уровни энергии излучающих атомов. В результате этих исследований было установлено, что наименьшей шириной и наилучшей сим-

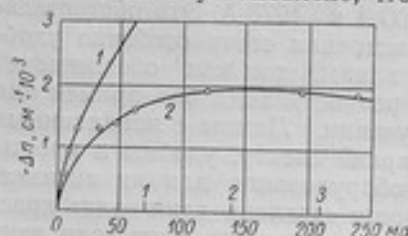


Рис. 3. Зависимость смещения $\Delta\lambda$ максимума контура оранжевой линии Kr^{86} от изменения давления и плотности тока.

1 — смещение $\Delta\lambda = 3,315 j^{1/2} a/cm^2$; 2 — смещение $\Delta\lambda = 3,315 j^{1/2} - 1,645 j a/cm^2$.

Недавние работы по исследованию оранжевой линии Kr^{86} , проведенные в Физико-техническом институте ФРГ [13], показали, что погрешность воспроизведения «шкалы длин волн» с помощью этой линии Kr^{86} действительно не превышает 10^{-9} . В этих же работах экспериментально определены зависимости смещения максимума контура оранжевой линии Kr^{86} от изменения давления криптона в лампе P и от изменения плотности тока j (рис. 3). Согласно теоретическим подсчетам [см. выражение (1)] смещение максимума $\Delta\lambda$ пропорционально плотности тока, однако, как видно из рис. 3, закон $j^{1/2}$ не выполняется для этой линии при больших плотностях тока. По всей вероятности, сказывается нагрев пространства, в котором происходит разряд, за счет проходящего через него тока большой силы. При этом опыт показывает, что чем тоньше стенки капилляров ламп, тем меньше отклонения от этого закона. Таким образом, степень теплопроводности стенок лампы следует учитывать при подсчете полного смещения максимума контура линии.

На основании этих экспериментов Энгельгарт вывел для оранжевой линии Kr^{86} формулу для подсчета полного смещения максимума $\Delta\lambda$, выраженного в милликэйзерах ($см^{-1} \cdot 10^{-3}$),

$$-\Delta\lambda = 4,44 (Pj)^{1/2} (1 - Bj) см^{-1} \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где P — давление в лампе;

j — плотность тока, проходящего через разряд;

B — коэффициент, зависящий от потери энергии в положительном столбе разряда, точнее — от формы и размеров лампы.

Для схематически изображенной на рис. 4 трубки с накалимым катодом $B = 0,17$. На рисунке указаны форма и размеры (мм) капил-

метрии контура обладает оранжевая линия Kr^{86} , определяемая спектральными термами $2p_{10}$ и $5d_5$. Последние в условиях излучения линии лампой с накалимыми электродами при температуре внешних стенок капилляра, отвечающей тройной точке азота, подвержены наименьшему возмущению [27, 28].

Уже на основании этих соображений Консультативный комитет на сессии 1957 г. предложил рекомендовать оранжевую линию Kr^{86} в качестве нового эталона единицы длины и длин волн.

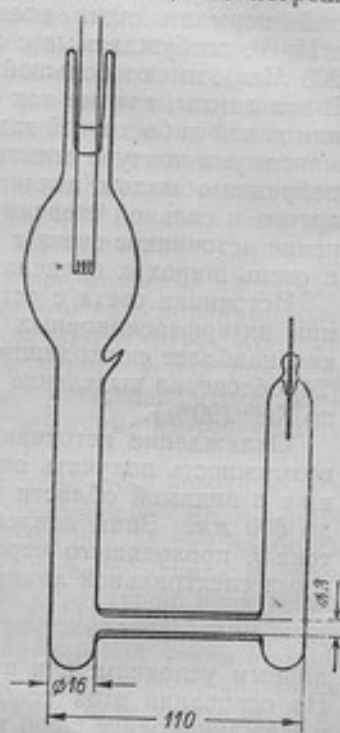


Рис. 4. Трубка с накалимым катодом.

ляра, в котором происходит свечение криптонового газа. Изменение формы и диаметра капилляра может вызвать, в свою очередь, уменьшение или увеличение значения V .

Известно, что если наблюдать спектр газоразрядной лампы поперек капилляра, то доплеровское смещение максимума контура спектральных линий пренебрежимо мало. Оно достигает измеряемых размеров при наблюдении вдоль капилляра, причем знак его зависит от того, производится ли наблюдение от анода к катоду или наоборот [29].

В табл. 2 даны значения доплеровского смещения для ряда линий Kr^{86} , полученные Барреллом [30].

Таблица 2

| $\lambda, \text{Å}$ | Обозначение термов по Меггерсу | Доплеровское смещение, относенное к длине волны $\pm \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$ |
|---------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6456 | $2 p_9 - 5 d_4$ | 2,1 |
| 6421 | $2 p_8 - 5 d_4$ | 1,7 |
| 6056 | $2 p_{10} - 5 d_5$ | 1,5 |
| 5870 | $1 s_4 - 2 p_2$ | 1,7 |
| 5649 | $1 s_3 - 3 p_{10}$ | 1,3 |
| 5580 | $1 s_2 - 3 p_5$ | 1,4 |
| 5570 | $1 s_5 - 2 p_3$ | 2,4 |
| 5562 | $1 s_6 - 2 p_2$ | 1,0 |

Можно подобрать такие условия возбуждения спектра криптона, при которых доплеровское смещение оказывается равным и противоположным по знаку смещению, вызванному увеличением давления газа в лампе.

Так, если производить наблюдение вдоль капилляра лампы от анода к катоду, то доплеровское смещение будет направлено в фиолетовую сторону, в то время как смещение от давления направлено в красную сторону. В табл. 3 приведены значения полного смещения максимума оранжевой линии Kr^{86} при постоянной плотности тока $j = 0,4 \text{ а/см}^2$, проходящего через разряд (30 ма через капилляр диаметром 3 мм).

Таблица 3

| Температура стенок капилляра, °К | Давление криптона в лампе, 10^{-3} мм рт. ст. | Смещение от давления $\Delta\lambda = 4,44(P)^{1/2}$, $\text{см}^{-1} \cdot 10^{-3}$ | Полное смещение (от давления + доплеровское), $\text{см}^{-1} \cdot 10^{-3}$ |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 58 | 4,6 | -0,068 | +0,180 |
| 59 | 6,9 | -0,089 | +0,159 |
| 60 | 10,1 | -0,116 | +0,133 |
| 61 | 14,8 | -0,149 | +0,099 |
| 62 | 21,4 | -0,190 | +0,058 |
| 63,14* | 31,8 | -0,248 | 0,000 |
| 64 | 42,7 | -0,302 | -0,054 |

* Тройная точка азота.

Как видно из табл. 3, при температуре стенок капилляра лампы, соответствующей тройной точке азота, полное смещение максимума контура оранжевой линии Kr^{86} оказывается равным нулю. Пользуясь формулой (2), можно подсчитать смещения максимума контура оранжевой линии криптона при различных плотностях тока j , давлениях криптона P и температурах стенок капилляра лампы. На рис. 5 представлена графическая зависимость этого смещения контура от температуры стенок капилляра лампы для различных плотностей тока. Горизонтальная пунктирная линия соответствует смещению в $-0,248 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, равному по величине и обратному по направлению доплеровскому смещению. По графику можно определить область давлений, температур источника и плотность тока, для которой суммарное смещение максимума контура линии близко к $-0,248 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$.

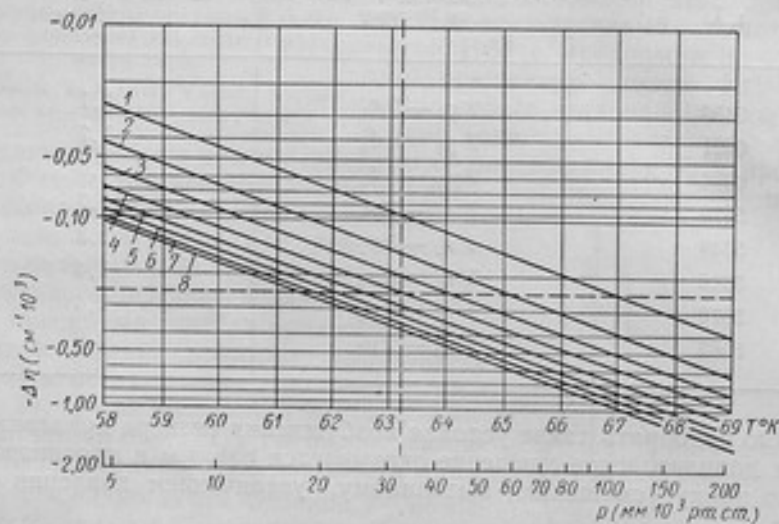


Рис. 5. Зависимость смещения максимума контура оранжевой линии Kr^{86} от температуры стенок капилляра T лампы для различных плотностей тока j и давлений криптона P .

- 1) $j = 0,1 \text{ а/см}^2$; 2) $j = 0,2$; 3) $j = 0,3$; 4) $j = 0,4$; 5) $j = 0,5$; 6) $j = 0,6$;
7) $j = 0,7$; 8) $j = 0,8$.

Таким образом, при спецификации условий возбуждения спектра криптона, с погрешностью $\approx 1 \cdot 10^{-9}$ следует считать уровни энергии, участвующие в данных переходах, находящимися в невозмущенном состоянии.

Подобных условий нельзя установить ни для спектра кадмия, ни для спектра ртути, так как определить точно давление в лампах с кадмием и ртутью довольно затруднительно. В них всегда содержится, кроме паров исследуемого вещества, добавочный газ, давление которого меняется вследствие абсорбции. Абсорбция непостоянна во времени и затрудняет контроль условий возбуждения спектров.

Проект спецификации для возбуждения спектра криптона в случае, если XI Генеральная конференция окончательно примет новое определение метра, выдвинут Говлеттом — председателем Консультативного комитета по определению метра.

Если длина волны спектра Kr^{86} , принятая в качестве нового эталона единицы длины, будет излучаться лампой с накаливаемыми электродами, снабженной капилляром с внутренним диаметром 2—4 мм и толщиной

стенки 1 мм, и если Kr^{86} будет чистотой не менее 99%, причем в количестве, достаточном для обеспечения наличия твердого криптона при 63° К, то можно считать, что длина волны спектральной линии соответствует переходу между невозмущенными уровнями с погрешностью до 10^{-9} при соблюдении следующих условий:

1) наблюдение излучения производится вдоль капилляра так, что световые лучи идут к наблюдателю от катода в сторону анода;

2) нижняя часть лампы и капилляр погружаются в охлаждающую ванну, поддерживаемую при температуре тройной точки азота с погрешностью $\pm 1^\circ$ К;

3) плотность тока в капилляре равна $(0,3 \pm 0,1) \text{ а/см}^2$.

Таким образом, можно надеяться, что в недалеком будущем эталон единицы длины будет воспроизводиться с погрешностью 10^{-9} . Такая перспективность в отношении повышения точности воспроизведения эталона метра через длину световой волны на 1—2 порядка, по сравнению с точностью воспроизведения его через платино-иридиевый прототип, заставили осенью 1958 г. Международный комитет по мерам и весам выработать следующий проект решения для XI Генеральной конференции 1960 г. [31].

«I. Одиннадцатая Генеральная конференция по мерам и весам, учитывая, что международный прототип не определяет метр с достаточной для современной метрологии точностью и что, с другой стороны, желательно принять естественный нерушимый эталон, решает:

1°. Метр есть длина, равная 1 650 763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома Kr^{86} .

2°. Определение метра, находящееся в действии с 1889 г., основанное на платино-иридиевом прототипе, отменяется.

II. Одиннадцатая Генеральная конференция призывает Международный комитет по мерам и весам:

1°. Составить инструкции для практического внедрения нового определения метра.

2°. Продолжить исследования, имеющие своей целью дальнейшие улучшения эталонов длины».

В этом проекте решения число длин волн оранжевой линии Kr^{86} в метре установлено не на основании непосредственного сравнения ее длины волны с прототипом метра, а на основании сравнений длин волн красной линии естественного кадмия, испускаемой лампой Майкельсона, и оранжевой линии Kr^{86} , испускаемой лампой Энгельгарта.

Сравнения были проведены в вакууме в пяти лабораториях, причем принятое на VII Генеральной конференции значение длины волны красной линии естественного кадмия $\lambda_{6438,4696 \text{ \AA}}$ в воздухе было приведено к вакууму на основании дисперсионной формулы Эдлена [32] по вычисленному значению показателя преломления для $\lambda_{\text{кр}}$ равному

$$n_{\lambda_{\text{кр}}} = 1,000276381.$$

Результаты этих сравнений приведены в табл. 4 [33].

Что касается длин волн остальных линий Kr^{86} , а также Hg^{198} и Cd^{114} , то они будут играть роль вторичных нормалей в спектроскопии и при интерференционных измерениях концевых и штриховых мер. Поэтому необходимо произвести точные сравнения этих длин волн с первичной нормалью в специфицированных условиях ее воспроизведения. Такая работа была выполнена во ВНИИМ. Полученные предварительные значения длин волн в вакууме Hg^{198} , Kr^{86} и Cd^{114} приведены в табл. 5. Средняя квадратичная погрешность сравнений не превышала $1 \cdot 10^{-14}$ м.

В проекте второго решения XI Генеральной конференции по мерам и весам Международное бюро, а следовательно, и национальные метрологические лаборатории призываются к проведению дальнейших исследований по усовершенствованию эталонов единицы длины. Эти работы

Таблица 4

| Лаборатория | λ оранжевой линии криптона, $1 \cdot 10^{-10}$ м |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Международное бюро мер и весов, Париж | 6057,8021 |
| Национальная физическая лаборатория, Теллингтон . . | 6057,8021 |
| Физико-технический институт, Брауншвейг | 6057,8023 |
| Центральный поверочный институт мер и весов Япо- нии, Токио | 6057,8021 |
| Национальный исследовательский центр Канады, Оттава | 6057,8021 |
| То же | 6057,8019 |
| Среднее | 6057,8021 |

будут иметь два направления: первое — должно быть связано с изучением монохроматических источников света, а второе — с усовершенствованием существующих и разработкой новых схем интерферометров для точных измерений длин волн, длины концевых и штриховых мер и показателя преломления.

Таблица 5

| Криптон 86 | | Кадмий 114 | | Ртуть 198 | |
|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| обозначения термов | $\lambda, 1 \cdot 10^{-10}$ м | обозначения термов | $\lambda, 1 \cdot 10^{-10}$ м | обозначения термов | $\lambda, 1 \cdot 10^{-10}$ м |
| $2p_9 - 5d_1^1$ | 6458,0723 | $5^1P_1 - 5^1D_2$ | 6440,2480 | $6^1P_1 - 6^1D_2$ | 5792,2670 |
| $2p_8 - 5d_4$ | 6422,8010 | $5^3P_1 - 6^3S_1$ | 4801,2520 | $6^3P_1 - 6^3D_2$ | 5771,1981 |
| $1s_3 - 2p_2$ | 5872,5422 | $5^3P_0 - 6^3S_1$ | 4679,4583 | $6^3P_2 - 7^3S_1$ | 5462,2705 |
| $1s_3 - 3p_{10}$ | 5651,1286 | | | | |
| $1s_4 - 3p_8$ | 4503,6165 | | | | |

Видеть картину интерференции при разности хода, превышающей 1 м, еще не значит суметь ее измерить. Работы последнего времени, связанные с расширением предела видимости интерференционной картины, показали, что применение источников света с молекулярным пучком позволяет наблюдать интерференцию при разностях хода, превышающих метр. Так, в свете резонансной линии естественного кальция $\lambda = 4226$ Å, излучаемой атомным пучком, Майснер [34] получил интерференционную картину в интерферометре Фабри и Перо при разности хода $2d$, равной 78 см, 94 см и 108 см (рис. 6). Полосы были также сфотографированы при разности хода, превышающей 130 см, что указывает на приближение ширины линии к ее естественной ширине. Для Hg¹⁹⁸ был создан подобный источник света с возбуждением молекулярного пучка потоком электронов. Ширина линий, излучаемых лампой с молекулярным пучком Hg¹⁹⁸, составляла всего лишь 0,002 см⁻¹. При такой ширине линии предел когерентности можно довести до 5 м [35].

Молекулярный пучок представляет собой экспериментальный, очень сложный по устройству источник света. Одной из самых больших труд-

ностей при работе с молекулярным пучком является очень слабая интенсивность спектральной линии. Для получения высокой коллимации пучка необходимы большие длины свободного пробега, а это ведет к малым концентрациям. Встречный поток электронов рассеивает пучок и, следовательно, не является идеальным возбудителем. Условия возбуждения линий в пучке не только еще не изучены, но даже до конца не разработаны.

Хорошо известно, что всякий выигрыш в ширине спектральной линии ведет к проигрышу в ее интенсивности и к усложнению источника света. Это тоже было учтено при выборе источника света, излучающего первичную нормаль, и, по-видимому, в настоящее время охлаждаемая до температуры тройной точки азота лампа, наполненная Kr^{86} , с накаливаемыми электродами воспроизводит первичную нормаль наилучшим образом. Однако создание источников света с суженными спектральными линиями, их изучение и усовершенствование для воспроизведения как первичной, так и вторичных нормалей длин волн является, по существу, задачей дальнейшего усовершенствования новых эталонов длины.

Вторичные нормали должны также обладать точностью воспроизведения, близкой к точности первичной нормали. Их роль в метрологии подобна роли вторичных материальных искусственных эталонов, так как с их помощью значение длины волны оранжевой линии Kr^{86} будет передаваться непосредственно рабочим мерам абсолютным интерференционным методом измерения концевых и штриховых мер.

Если для таких элементов, как ртуть и кадмий, невозможно создать условия для получения эмиссионного спектра как бы от невозмущенного атома, то следует для них перейти к исследованиям в поглощении. В эмиссионных источниках влияние на длины волны ртути и кадмия температуры, электромагнитного поля и давления излучающих атомов не поддается учету, в то время как в поглощающей камере электромагнитное поле не является обязательным, а давление и температура могут быть точно измерены. Инвариантность с высокой степенью точности значений длин волн линий поглощения является основным преимуществом при положительном решении задачи измерений с их помощью.

Обычно интерференцию в линиях поглощения наблюдают на фоне участка сплошного спектра или уширенной свободной от самообращения эмиссионной спектральной линии. Участок фона должен быть, по

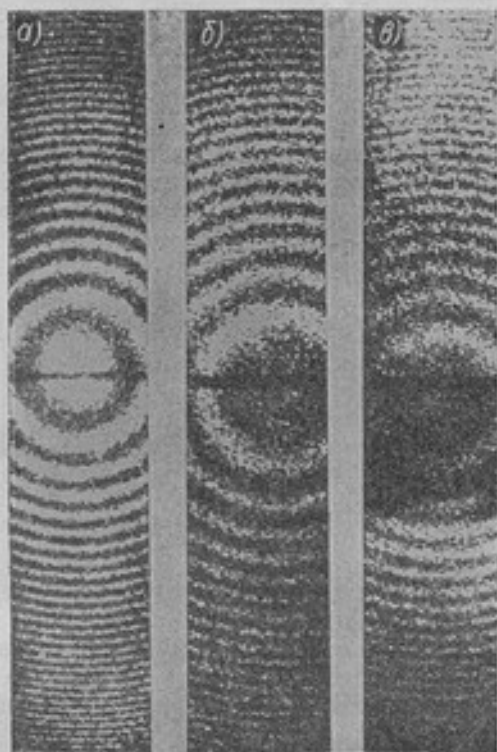


Рис. 6. Интерференционная картина колец равного наклона и резонансной линии кальция.

а) разность хода $2d = 78$ см; б) $2d = 94$ см;
в) $2d = 108$ см.

БИБЛИОТЕКА
Физического института им. П. Н. Лебедева
Московский физико-технический институт
им. А. И. Алферова

возможности, однородным по интенсивности и достаточно узким, чтобы не слишком уменьшать пределы когерентности. Таким путем была недавно исследована линия йода на фоне зеленой линии Hg^{202} и Hg^{198} с целью выяснения возможности использования линий йода в качестве первичной нормали [36]. Этот метод наблюдения интерференции в линиях йода не дал никаких преимуществ в отношении уменьшения их ширины.

Частичное поглощение может быть применено для искусственного сужения спектральных линий. На этом основаны так называемые зеемановский «фильтр» [35] и «атомная щель». Зеемановский абсорбционный «фильтр» может быть применен для сужения любой резонансной линии. Кеслеру и его сотрудникам [35] удалось выделить из резонансной линии $\lambda 2537 \text{ \AA}$ Hg^{198} абсорбционным зеемановским «фильтром» симметричный участок шириной в $0,006 \text{ см}^{-1}$. Принцип действия этого фильтра основан на образовании симметричной щели между двумя зеемановскими компонентами линии. Если поглощающая камера помещается в однородное магнитное поле, направленное перпендикулярно

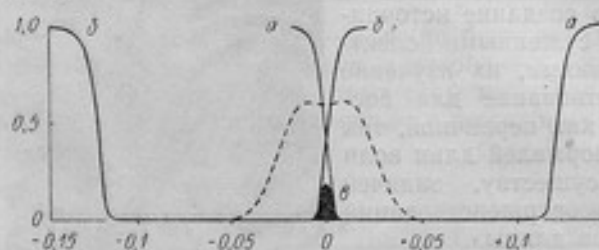


Рис. 7. Схема «фильтрации» зеемановским фильтром.

к светящемуся пучку, проходящему через нее, то абсорбционный контур будет расщеплен на некоторое число компонентов, зависящих от j и g чисел энергетических уровней, участвующих в соответствующем переходе, и от поляризации падающего пучка. При переходе $^1S_0 - ^3P_1$ линии $\lambda 2537 \text{ \AA}$ ртути абсорбционный контур состоит из трех компонентов.

Компонент, поляризованный в направлении поля, поглощается целиком, а два других, поляризованных в направлении, перпендикулярном полю, смещены (рис. 7) один (a) в сторону высоких частот, а другой (b) в сторону низких, так что между ними образуется щель, через которую и проходит отфильтрованное излучение $в$. Оба компонента, a и b , обладают одинаковой интенсивностью и совершенно симметричны. Пунктиром на рисунке обозначен контур линии испускания, от которого после прохождения щели остается лишь затемненный участок $в$.

Подобно зеемановской щели, для линий с достаточно большими изотопическими смещениями можно осуществить такую же «атомную щель».

Так, например, если в качестве поглотителя взять смесь из двух изотопов в одинаковой концентрации и с одинаково высоким процентом обогащения (99%) по данному изотопу Cd^{112} и Cd^{116} или Cd^{116} и Cd^{114} , а в качестве излучателя — соответственно Cd^{114} или Cd^{112} , то для линии $\lambda 4416 \text{ \AA}$ можно рассчитать «фильтр», позволяющий сузить эту линию приблизительно в 1,5 раза при условии, если ширина линий поглощения и линий испускания одинакова и равна доплеровской. Линия $\lambda 4416 \text{ \AA}$ не является резонансной, поэтому при таком фильтровании имеется

некоторое затруднение, связанное с необходимостью добавочного возбуждения камеры. Для резонансных линий фильтрование с помощью «атомной щели» происходит точно так же, как и с помощью зеемановской.

Следует подчеркнуть, что оба эти метода еще находятся в стадии исследования. Вопрос воспроизводимости отфильтрованного таким образом участка еще должен быть подробно изучен.

Особый интерес представляет собой способ наблюдения интерференции в линиях поглощения, основанный на обращении спектра поглощения. Оказывается, что с помощью явления интерференции света можно заставить «светиться» темные полосы поглощения и получить таким образом когерентный источник света [37]. Если в одно из плеч интерферометра Рождественского, установленного на нулевую разность хода, поместить поглощающую камеру с парами йода при малом давлении, то в поле зрения наблюдательной системы при освещении интерферометра белым светом на фоне широких минимумов появятся «светлые полосы». Эти «светлые полосы» как раз соответствуют линиям поглощения йода. Так как поглощение происходит только в одном из интерферирующих пучков, а во втором длины волн остаются свободными (им не с чем интерферировать), то в поле зрения и появляются «светлые полосы» поглощения спектра йода.

Аналогичное явление можно наблюдать и с интерферометром Майкельсона. Замена обычной поглощающей камеры молекулярным пучком позволяет таким способом получить узкие «светлые полосы поглощения». Сотрудники Бюро стандартов США, воспользовавшись интерферометром Майкельсона, получили «светлую линию поглощения» резонансной линии Hg^{198} [35]. Молекулярный пучок естественной ртути 2 (рис. 8), введенный в одно из плеч интерферометра Майкельсона 1, освещенного безэлектродной лампой с Hg^{198} , поглощает в одном из интерферирующих пучков узкую полосу, соответствующую контуре линии Hg^{198} в молекулярном пучке. И на фоне темного минимума можно наблюдать «светлую полосу поглощения» резонансной линии Hg^{198} с полушириной в $0,002 \text{ см}^{-1}$ — линию Hg^{198} в условиях, близких к отсутствию внешних возмущающих воздействий на определяющие ее спектральные термы. Регистрация обращенных полос поглощения также имеет большое значение. Как это видно из схематического сложения интенсивностей интерферирующих пучков (рис. 8, а — без поглощения и рис. 8, б — с поглощением), правильная картина может быть визуально замечена или сфотографирована только при тщательном выравнивании интенсивностей обоих интерферирую-

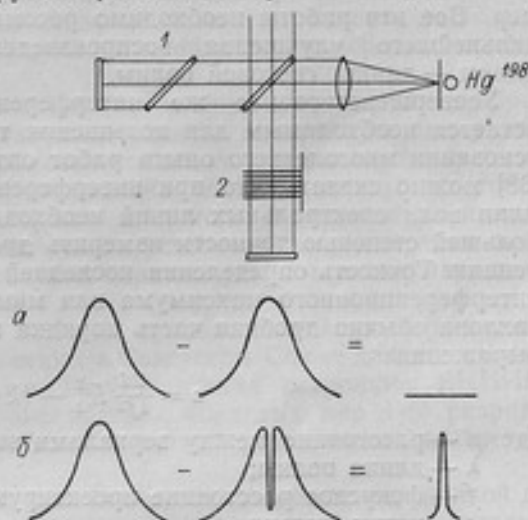


Рис. 8. Сложение интенсивностей интерферирующих пучков: а — без поглощения; б — с поглощением.

1 — интерферометр Майкельсона; 2 — пучок Hg.

щих пучков. Применение фотоэлектрической компенсационной схемы для регистрации интерференционной картины освобождает от этого затруднения.

Линии поглощения, суженные молекулярным пучком и обращенные в «светлые полосы» каким-либо из интерферометров, могут быть получены и для других четно-четных элементов, таких, как Pb, Cd, Mg, Zn, Sr. Однако все эти элементы, так же как и ртуть, имеют резонансные линии в ультрафиолетовой области спектра. Отсюда вытекает необходимость создания интерферометров для работы в ультрафиолетовой части спектра.

Следует подчеркнуть, что эти исследования только еще начаты и техника возбуждения атомных пучков и обращения спектров поглощения представляет собой сложные и тонкие эксперименты. Поэтому вряд ли такой когерентный источник света в недалеком будущем найдет широкое практическое применение при измерениях концевых и штриховых мер. Все эти работы необходимо рассматривать лишь с точки зрения дальнейшего улучшения воспроизведения самого нового эталона длины — длины световой волны.

Усовершенствование же интерференционных методов измерения остается необходимым для повышения точности измерения длины. На основании многолетнего опыта работ оптической лаборатории ВНИИМ [38] можно сказать, что при интерференционных измерениях длины и длин волн спектральных линий необходимо прежде всего с возможно большей степенью точности измерить дробную часть порядка интерференции. Точность определения последней зависит от точности фиксации интерференционного максимума или минимума. Для колец равного наклона обычно дробная часть порядка интерференции вычисляется из выражения

$$\epsilon = \frac{2d}{\lambda f^2} R_k^2 - (k - 1),$$

где d — расстояние между зеркалами эталона Фабри и Перо;

λ — длина волны;

f — фокусное расстояние проектирующей линзы;

k — номер кольца;

R — его радиус.

Из этого выражения вытекает, что для «шкалы длин волн» при интерференции равного наклона разность квадратов радиусов колец $R_k - R_{k-1} = \text{const}$ есть инварианта шкалы.

Таким образом, точность воспроизведения «шкалы длин волн» будет зависеть от точности выполнения закона квадратов радиусов. Однако при визуальных наблюдениях в связи с длительностью измерений возможны изменения условий (температуры, давления), а следовательно, и значительные отклонения от закона квадратов. В случае фотографической регистрации, если кольца располагаются в изображении интерференционной картины так, что закон квадратов справедлив, то, измеряя диаметры все большего числа колец и обрабатывая эти совокупные измерения по методу наименьших квадратов, можно было бы уточнить значение дробной части порядка интерференции [37]. Однако многочисленные измерения ее для различных спектральных линий показывают, что отклонения от закона квадратов превышают погрешность фиксации максимумов на снимках интерференционной картины и погрешности отсчетных устройств измерительных микроскопов. Таким образом, при фотографической регистрации интерференционной картины искажения, вносимые проектирующими оптическими системами, зерном пленки, недостаточной разрешающей способностью фотослоя, не позволяют

повысить точность воспроизведения «шкалы длин волн» выше 10^{-6} . Более совершенный современный метод регистрации — фотоэлектрическая запись максимумов при сканировании интерференционной картины изменением давления в эталоне Фабри и Перо — позволяет повысить точность определения дробной части порядка интерференции на целый порядок. Можно надеяться, что дальнейшие усовершенствования этого метода, а также переход к измерениям в вакууме дадут возможность повысить точность измерения длины и длин волн до 10^{-10} . Такая точность определения длины является почти предельной, ибо следующий порядок уже связан с квантовомеханической неопределенностью самого физического понятия длины [39].

Заключение

Следует еще раз подчеркнуть, что ближайшее окончательное утверждение эталона единицы длины позволит повысить точность не только воспроизведения самого эталона, но и точность измерений длины вообще.

Будет устранена двойственность в определении метра и, таким образом, окажется возможным установить единую поверочную схему для передачи значения единицы в области концевых и штриховых мер.

Если будет принят в качестве эталона единицы длины «световой метр», узаконится система поддержания единства измерения длины посредством сличений интерференционных установок для измерения концевых и штриховых мер как внутри страны, так и в международном масштабе.

Уже в течение почти 25 лет ВНИИМ проводит сличения интерференционных установок, предназначенных в Советском Союзе для аттестации концевых мер длиной до 100 мм. Такие сличения позволяют ВНИИМ следить за проведением в стране проверок концевых мер 1-го разряда и поддерживать единство абсолютных интерференционных измерений концевых мер длины.

Создание новой аппаратуры для измерения концевых мер длиной до 1200 мм и штриховых мер до 1000 мм интерференционными методами и широкое внедрение их в практику поверочных работ позволит в ближайшем будущем поставить вопрос о расширении проведения сличений до 1000 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Michelson A., *Phil. Mag.*, 34, 1894, S. 280.
2. Michelson A., *Astroph. J.*, 2, 1895, S. 251.
3. C. R. Conf. gen. d. Poids et Mes., 1927.
4. Perard A., *Revue d'Optique*, 7, 1928, p. 1.
5. Jackson C. V., *Phil. Trans. (A)*, 236, 1936, p. 1.
6. Варлих Г. В. и Карташев А. И., Об эффективных значениях длин волн кадмия и криптона, Труды ВНИИМ, вып. 4(49), 1941.
7. Sears a. Barrell H., *Proc. Roy. Soc. (A)*, 202, 1933.
8. Романова М. Ф. и Ферхман А. А., О сверхтонкой структуре в красной линии кадмия, ДАН СССР, 55, 1933.
9. Kesters, *Werkstofftechnik und Werksleiter*, 23, 1936, S. 23.
10. Perard A., *Reunion de l'Institut d'Optique*, 1935.
11. Познизовский Л. Б., О новом эталоне метра, «Природа», № 2, 1945, стр. 27.
12. Wiens I. H., *Phys. Rev.*, 70, 1946, p. 910.
13. Engelhard E., *Symposium on Interferometry*, NPL, Teddington, June, 1959.
14. Батарчукова Н. Р., Карташев А. И. и Романова М. Ф., О возможности применения излучения стабильных четных изотопов кадмия для воспроизведения единицы длины, ДАН СССР, т. 90, № 2, 1953, стр. 153.

15. Kesters W. et Engelhard E., Proc. Verb. Com. Int. Pds. Mes., XXII, 1950, p. 137.
16. Мергерс В. Ф., УФН, 34, № 1, 1948, стр. 105.
17. Proc. Verb. C. C. d. M., 1953, M-23.
18. Батарчукова Н. Р., Карташев А. И. и Романова М. Ф., Измерение длины волны излучения Cd^{114} в видимой области спектра, Труды ВНИИМ, спец. вып. 1954.
19. Батарчукова Н. Р., Об изотопическом смещении в линиях кадмия, «Вестник ЛГУ», серия физики и химии, 16, 3, 1959, стр. 10.
20. Wise I. H. a. van der Sluis K. Z., JOSA, 46, 1956, S. 587.
21. Батарчукова Н. Р. и Дубровский Г. Д., Влияние изменения давления аргона в безэлектродном разряде на воспроизведение длины волны красной линии Cd^{114} , «Оптика и спектроскопия», 1, 1956, стр. 330.
22. Meggers W. a. Kessler K., JOSA, 40, 11, 1950, S. 737.
23. Baird K. M. a. Smith D. S., Can. J. Phys., 35, 1957, S. 455.
24. Clausius K. und Dickel G., Zeitschr. f. Phys. Chem. (B), 52, 1942, S. 348.
25. Engelhard E., Proc. Verb. C. C. d. M., 1957, p. M-71.
26. Engelhard E. et Bayer-Helms F., Proc. Verb. C. C. d. M., 1957, p. M-66.
27. Terrien J., Proc. Verb. C. C. d. M., 1957, p. M-135.
28. Masui P., Terrien J. et Hamon I., Proc. Verb. C. C. d. M., 1957, p. M-157.
29. Engelhard E., Proc. Verb. C. C. d. M., 1957, p. M-59.
30. Barrell H., Proc. Verb. Com. Int. P. et Mes., II Série, 26-B, 1958, p. M-80.
31. Proc. Verb. Com. Int., 2 Série, 26-A, 75, 1958.
32. Edlén B., JOSA, 43, 1953, S. 339.
33. Proc. Verb. C. C. d. M., 1957, p. M-15.
34. Meissner K. W. a. Kaufman V., JOSA, 49, 10, 1959, S. 943.
35. Kessler K. G., Barger R. Z. and Schweitzer W. G., Symposium on Interferometry, NPL, Teddington, June, 1959.
36. Fastie W. G., J. Phys. et Rad., 19, № 3, 1958, p. 405.
37. Griffiths R. B. and Dicke R. H., Rev. Sci. Inst., 28, 1957, p. 646.
38. Батарчукова Н. Р., Карташев А. И., Романова М. Ф., Исследование излучения четных стабильных изотопов Cd в видимой области спектра, Труды ВНИИМ, 26(86), 1955.
39. Baird K. M., Symposium on Interferometry, NPL, Teddington, June, 1959.

Поступила в редакцию
11/XII 1959 г.

Л. К. КАЯК
ВНИИМ

ЭТАЛОНЫ ДЛИНЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ СЛИЧЕНИЙ

В статье приводятся результаты исследований и сличений эталонов-копий и рабочих эталонов длины, с помощью которых осуществляется передача значения единицы длины от государственного эталона к образцовым и рабочим штриховым мерам длины.

Основным государственным эталоном единицы длины в СССР служит платино-иридиевый метр № 28. Кроме того, Советский Союз имеет еще несколько эталонов-копий, которые являются вторичными эталонами длины.

В повседневной метрологической и поверочной работе применяются рабочие эталоны, с помощью которых осуществляется связь между рабочими и образцовыми мерами длины с одной стороны и государственным эталоном — с другой. Определение действительной длины рабочих эталонов производится сличением их с эталонами-копиями, а иногда и непосредственно с основным государственным эталоном.

Многолетние исследования и наблюдения лаборатории мер длины ВНИИМ, Международного бюро мер и весов, а также и метрологических учреждений других государств показали, что если платино-иридиевые эталоны длины являются эталонами, неизменными по своей длине во времени (в пределах современной точности компараторных измерений), то рабочие эталоны, изготавливаемые обычно из никелевых сплавов, с течением времени меняют свою длину. Для того чтобы знать их действительную длину с необходимой для практических нужд точностью, сличения рабочих эталонов длины с платино-иридиевыми эталонами производятся ежегодно.

Во ВНИИМ производят два вида сличений эталонов длины: взаимные сличения группы платино-иридиевых эталонов (включая метр № 28), выполняемые обычно через 3—4 года в порядке кругового сличения, и ежегодные сличения отдельных рабочих эталонов с одним из эталонов-копий или непосредственно с государственным эталоном.

Сличения производятся на 1-метровом или 4-метровом компараторах, которые в 1948—1951 гг. были усовершенствованы. В связи с этим частично изменилась методика измерений на компараторах [1] и несколько снизились погрешности. Усовершенствование сказалось также на повы-

шении достоверности определения действительной длины сличаемых эталонов.

Каждое полное сличение эталонов состоит из 2 серий измерений не менее чем по 6—8 приемов в одной серии. Между отдельными сериями измерений сличаемые эталоны поворачивают на 180° для того, чтобы изменить их положение относительно микроскопов компаратора. При выполнении более ответственных сличений производят 4 серии по 6 приемов измерений, причем эталоны располагаются во всех возможных комбинациях относительно друг друга.

Платино-иридиевые эталоны

В группу платино-иридиевых эталонов единицы длины, кроме платино-иридиевого метра № 28, входит еще 3 эталона: эталон-копия — платино-иридиевый метр № 11, полученный из Международного бюро в 1889 г. одновременно с метром № 28, эталон-копия — платино-иридиевый метр M_{20}° , изготовленный лабораторией мер длины ВНИИМ в 1933—1934 гг. из материала основной плавки Маттеи, и специальный эталон метра, ярда и аршина — платино-иридиевая мера П4, изготовленная по указанию Д. И. Менделеева в 1894 г. при возобновлении прототипов русских мер.

В настоящее время группа платино-иридиевых эталонов пополнилась еще одним эталоном-копией — штрихо-концевым платино-иридиевым метром № 2. Все платино-иридиевые меры имеют λ -образное поперечное сечение.

За последние годы лаборатория выполнила несколько взаимных сличений группы платино-иридиевых эталонов. Обработка результатов всех наблюдений при проведении круговых сличений производится совместно по способу наименьших квадратов. При вычислении в качестве исходной принимается длина метра № 28 по данным Международного бюро мер и весов (сертификат № 17 от 21/X.1948 г.), полученным при сличении в 1935—1936 гг.

$$\text{№ 28} = 1 \text{ м} + 0,71 \text{ мк} + (8,621 + 0,0018 t) t \text{ мк.}$$

Средняя квадратичная погрешность результатов сличений обычно не превышает $\pm 0,1 \text{ мк}$.

Результаты сличений платино-иридиевых эталонов приводятся в табл. 1. По результатам последних сличений получены следующие уравнения эталонов-копий:

$$\text{№ 11} = 1 \text{ м} - 0,33 \text{ мк} + (8,621 + 0,0018 t) t \text{ мк};$$

$$M_{20}^\circ = 1 \text{ м} + 1,93 \text{ мк} + [8,644 + 0,0006 (t - 20)] \cdot (t - 20) \text{ мк};$$

$$\text{П4} \left(\frac{1}{3} - 10 \frac{1}{3} \right) \text{ дм} = 1 \text{ м} - 3,74 \text{ мк} + (8,62 + 0,0018 t) t \text{ мк.}$$

В уравнении метра M_{20}° температурный коэффициент удлинения приведен к температуре 20°C по формуле

$$\alpha_{20} = \alpha_0 + 2\beta t.$$

Разность длин метров № 28 и № 11 в течение почти 60 лет практически оставалась постоянной и в среднем за последние 25 лет составляла $1,08 \text{ мк}$.

Высокая стабильность платино-иридиевых эталонов длины во времени подтверждается результатами измерений длины метра № 28 в длинах световых волн, выполненных во ВНИИМ в 1940 и 1949 гг., в результате которых установлено, что длина его изменилась на $0,06 \text{ мк}$ [2 и 3].

Если вычислить среднее квадратичное отклонение ряда измерений, рассматривая приведенные в табл. 1 результаты сличений метров № 28 и № 11 как один ряд измерений, то оно будет равно 0,11 мк. Такова примерно величина суммарной погрешности сличений на компараторе [1 и 4], причем погрешности юстировки компараторов и личные ошибки наблюдателей в этом случае следует считать случайными.

Таблица 1

| Годы | Разности длин платино-иридиевых эталонов при температуре 0°C, мк | | | | |
|-----------|------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|-----------|-------------|
| | № 11—28 | M20° — № 28 | П4 — № 28 | П4 — № 11 | M20° — № 11 |
| 1889 | -1,01 | — | — | — | — |
| 1896 | — | — | -5,20 | -4,20 | — |
| 1931 | -0,98 | — | -5,13 | -4,14 | — |
| 1934 | — | -172,76 | — | — | -171,76 |
| 1937—1938 | -1,17 | — | -5,40 | -4,28 | — |
| 1939 | -1,14 | -172,41 | -5,24 | -4,10 | — |
| 1946—1947 | -1,31 | -172,48 | -5,16 | -3,83 | -171,17 |
| 1948 | -1,08 | — | — | — | — |
| 1949 | -1,03 | -170,99 | -4,50 | -3,47 | -169,96 |
| 1950 | -1,09 | -171,04 | — | — | -169,95 |
| 1952 | — | — | — | -3,66 | -170,12 |
| 1953 | -0,91 | — | — | — | -169,84 |
| 1956 | -1,04 | — | — | — | — |
| 1959 | — | -171,42 | -4,45 | — | — |

В результате сличений, выполненных после усовершенствования компараторов, когда стали применять новые методы контроля правильности юстировки микроскопов и в них были установлены поворачивающиеся осветители, для метра M20° получено уравнение, значительно (больше чем на 1 мк) отличающееся от прежнего. Учитывая сравнительно плохое качество штрихов метра M20°, вероятнее будет предположить, что изменение его уравнения вызвано изменением условий сличения, а не удлинением самой меры.

В последующие годы при сличении метра M20° также наблюдались относительно большие изменения разностей его длины, в особенности при сравнении с метром № 28. Примерно на 0,5 мк изменились в 1949 г. и разности длин меры П4 с метрами № 28 и 11. Так как штрихи, нанесенные на мере П4, очень широки (порядка 13—15 мк) и плохого качества, то изменение условий наблюдения штрихов также могло явиться причиной изменения ее уравнения. На рис. 1 показаны профилограммы штрихов метра № 11 и меры П4, полученные на профилографе ВЭИ завода «Калибр».

Штрихи метра № 11 хотя и уже, чем у меры П4, но по качеству также недостаточно удовлетворительны. Поэтому в 1956 г. метр № 11 был направлен в Международное бюро для нанесения новых штрихов. Эта работа была поручена фирме SIP в Женеве и производилась одновременно с нанесением новых штрихов на национальные эталоны некоторых других государств.

Новые штрихи у эталона-копии метра № 11 нанесены в 1958 г., причем была произведена полировка всей нейтральной плоскости метра и на ней нанесена шкала миллиметровых делений. Кроме последнего штриха шкалы, соответствующего длине 1 м при температуре 20° С, у метра № 11 нанесен еще один штрих, соответствующий длине 1 м при температуре 0° С. Новые штрихи по своему качеству значительно лучше прежних, ширина их равна 5 мк. Расстояние между двумя продольными осевыми штрихами равно 0,1 мм.

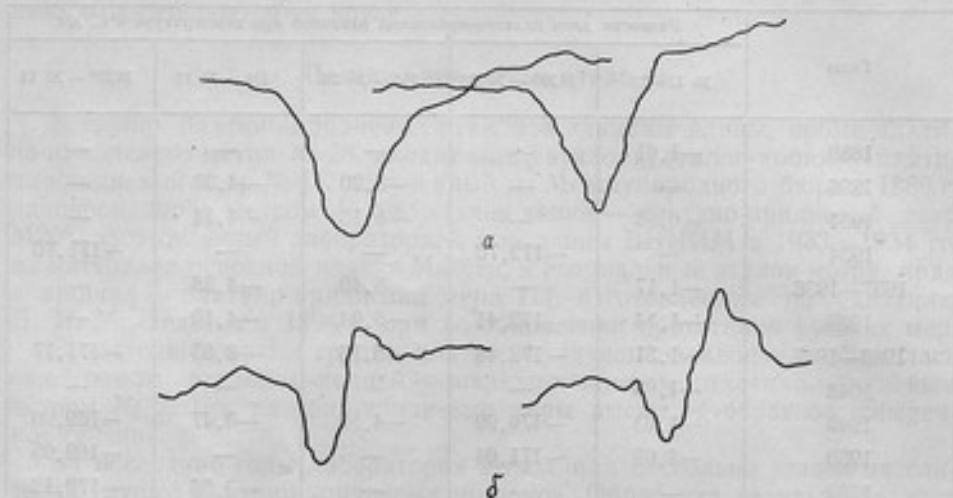


Рис. 1. Профилограмма штрихов.
а — меры М4; б — метра № 11.

В июне — ноябре 1959 г. метр № 11 был сличен с эталонами Международного бюро мер и весов и получены следующие результаты:

$$\text{№ 11}_t = 1 \text{ м} + 0,79 \text{ мк} + (8,621 + 0,0018 t) t \text{ мк};$$

$$\text{№ 11}_t = 1 \text{ м} + 1,07 \text{ мк} + [8,693 + 0,0018(t - 20^\circ)](t - 20^\circ) \text{ мк}.$$

В июне 1960 г. метр № 11 сличен на 4-метровом компараторе с государственным эталоном — метром № 28 и эталоном-копией — метром № 2.

В результате этого сличения для метра № 11 получены следующие уравнения:

$$\text{№ 11}_t = 1 \text{ м} + 0,85 \text{ мк} + (8,621 + 0,0018 t) t \text{ мк};$$

$$\text{№ 11}_t = 1 \text{ м} + 1,25 \text{ мк} + [8,693 + 0,0018(t - 20^\circ)](t - 20^\circ) \text{ мк}.$$

Штрихи метра № 28, примерно, такие же, как были у метра № 11, но, поскольку он с 1918 г. является основным государственным эталоном длины, то для сохранения необходимой преемственности в деле поддержания единства измерений в стране было признано целесообразным оставить метр № 28 в неприкосновенности, а новые штрихи нанести только на метр № 11.

В связи с подготовкой к переходу на новое определение единицы длины — метра — в длинах световых волн, в 1950 г. в лаборатории начались работы по созданию нового эталона-копии — метра № 2. Для этого на нейтральной плоскости платино-иридиевого концевого метра № 2 были отполированы зеркальные площадки, на которых у самых концов стержня нанесены штрихи. Штрихи получились хорошего каче-

ства и шириной около 4 мк (рис. 2). Метр № 2 является штрихо-концевой мерой длины и после осуществления перехода на новое определение метра эта мера будет служить в качестве эталона сравнения при передаче единицы длины штриховым мерам. Погрешности компараторного метода перехода от концевых мер к штриховым при помощи метра № 2 (сличения с которым производятся в воде, т. е. в наиболее благоприятных температурных условиях) по сравнению с методом боковичков значительно снизятся.

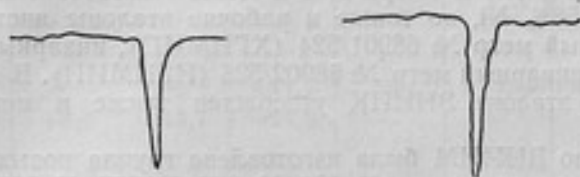


Рис. 2. Профилограмма штрихов метра № 2.

В 1954 г. произведено определение температурного коэффициента удлинения метра № 2 абсолютным компараторным методом по полной программе и получено следующее его значение

$$\alpha = 8,661 + 0,0020 (t - 20).$$

Метр № 2 как штриховая мера в 1956—1959 гг. сличался с государственным эталоном — метром № 28. Были получены следующие разности длин метров № 28 и 2, приведенные к температуре 20° С.

| Год | 1956 | 1957 | 1958 | 1959 |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|
| Разности длин мер, мк | -378,98 | -379,37 | -379,49 | -379,40 |

По результатам последнего сличения установлено следующее уравнение метра № 2:

$$\text{№ 2 (штрих.)} = 1 \text{ м} - 205,55 \text{ мк} + [8,661 + 0,0020 (t - 20^\circ)] (t - 20^\circ) \text{ мк}.$$

Как концевая мера метр № 2 измерялся на эталонной интерференционной установке. При этом были получены следующие результаты:

| Год, месяц | 1956, март | 1956, декабрь | 1958, декабрь |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Длина метра № 2 при 20° С | 1 м + 157,85 мк | 1 м + 157,59 мк | 1 м + 157,97 мк |

Постоянная разность между длиной метра № 2 как меры концевой и как меры штриховой, может быть определена непосредственным измерением на компараторе. Эта постоянная разность получилась равной 363,56 мк, тогда как из вычислений по результатам последних сличений на компараторе и интерферометре мы имеем значение 363,52 мк. Начи-

ная с 1957 г. (после отправки метра № 11 в Севр), метр № 2 применялся в качестве исходной меры при сличении рабочих эталонов длины.

Рабочие эталоны

Группа рабочих эталонов длины включает не только эталоны ВНИИМ — платинитовый метр R116, содержащий 42% Ni, инварный метр M318 (36% Ni) и метры R86 и R175, — изготовленные из сплава, содержащего 58% Ni, но также и рабочие эталоны институтов Комитета — инварный метр № 68901/524 (ХГИМИП), инварный метр № 598 (ВНИИК) и инварный метр № 68902/525 (НГИМИП). В 1956 г. в качестве рабочего эталона ВНИИК утвержден также и метр № 387813 (58% Ni).

В 1956 г. во ВНИИМ была изготовлена группа новых рабочих эталонов, состоящая из метров № 564, № 566, № 567, № 568 и № 569.

Кроме 1-метровых мер, рабочими эталонами также являются 4-метровая инварная мера № 1903, 3-метровый платинитовый жезл H15 и дециметровые меры Д36 (42% Ni), Д40 (36% Ni), Д76 (58% Ni) и Д29 (36% Ni).

Все рабочие эталоны, кроме дециметровых, имеют H-образное поперечное сечение и штрихи на них нанесены на нейтральной плоскости. Дециметровые эталоны имеют прямоугольное поперечное сечение и штрихи нанесены на верхней их плоскости.

Программа первого послевоенного сличения рабочих эталонов ВНИИМ в 1945 г. в отличие от обычных довоенных сличений была более обширной, так как одновременно было произведено круговое сличение шести метров — № 28, № 11, П4, R116, R86 и M318.

В 1946 г. программа была сокращена, но каждый рабочий эталон все же сличался с обоими платино-иридиевыми метрами № 28 и № 11. Все последующие годы рабочие эталоны сличались только с одной платино-иридиевой мерой, т. е. по нормальной программе (чаще всего с метром № 11).

Средняя квадратичная погрешность результатов сличений в среднем была равна $\pm 0,10 \div 0,15$ мк. В табл. 2 приводятся результаты всех послевоенных сличений рабочих эталонов. В этой же таблице приведены некоторые результаты довоенных сличений рабочих эталонов. Полная таблица результатов довоенных сличений рабочих эталонов длины ВНИИМ имеется в монографии проф. В. А. Барина [4].

В табл. 3 приведены результаты определения действительной длины новых рабочих эталонов.

Результаты сличений рабочих эталонов показывают:

1. Длина рабочих эталонов метров R116 и R86 за последние 15 лет остается практически неизменной в пределах точности измерений. Единичные случаи значительных изменений длины у метра R86 в 1945 и 1946 гг. можно объяснить влиянием каких-либо механических воздействий, вполне возможных при перевозке эталона.

2. Продолжающиеся удлинения инварных метров M318 и № 68901 вполне закономерны и свойственны всем инварным мерам. Но, если среднее годовое изменение длины метра M318 в период 1906—1940 гг. было равно $+0,7$ мк, то в послевоенные годы оно значительно сократилось, и за последние 15 лет длина метра M318 изменилась только на 3 мк, т. е. примерно на 0,2 мк в год. Правда, изменения длины инварных мер в некоторых случаях носят случайный характер, как например, у метров № 598 и № 68902, период естественного старения которых, по-видимому, уже окончился.

Таблица 2

| Годы | Действительная общая длина мер | | | | | | |
|------|--------------------------------|---------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | при температуре 0°C | | | при температуре 20°C | | | |
| | R116 | R86 | M318 | № 598 | № 68901 | № 68902 | № 387813 |
| 1906 | — | — | 1 м - 4,5 мк | — | — | — | — |
| 1912 | 1 м + 3,7 мк | — | + 4,3 | — | — | — | — |
| 1918 | — | 1 м + 13,2 мк | — | — | — | — | — |
| 1926 | — | — | +14,2 | — | 1 м + 7,0 мк | 1 м + 6,2 мк | — |
| 1929 | +4,2 | +13,7 | +14,9 | — | — | — | — |
| 1932 | — | — | — | — | +14,6 | — | — |
| 1933 | +3,0 | +10,6 | +15,4 | 1 м - 5,5 мк | — | — | — |
| 1935 | — | — | — | -22,8 | — | — | — |
| 1936 | +1,8 | +11,6 | +16,5 | -20,6 | +21,3 | — | — |
| 1938 | — | — | — | -18,2 | — | — | — |
| 1940 | +3,0 | +12,8 | +19,4 | -15,3 | — | — | — |
| 1941 | +2,5 | +12,0 | +18,8 | -16,2 | +24,4 | — | — |
| 1945 | +2,3 | +10,3 | +19,4 | -17,0 | — | +9,6 | — |
| 1946 | +2,7 | +11,8 | +21,4 | -16,8 | — | — | — |
| 1947 | +2,4 | +11,5 | +20,9 | -17,0 | — | — | — |
| 1948 | +2,6 | +11,6 | +21,3 | -15,7 | +29,3 | +10,7 | — |
| 1949 | +2,6 | +11,3 | +21,1 | -15,8 | +29,7 | +11,2 | — |
| 1950 | +2,2 | +11,3 | +19,8 | -17,2 | +29,3 | + 9,5 | — |
| 1951 | +2,4 | +11,9 | +21,5 | -16,7 | +30,0 | +10,8 | — |
| 1952 | +2,0 | +11,1 | +20,1 | -17,2 | +29,6 | + 9,1 | — |
| 1953 | +2,4 | +11,2 | +20,3 | -16,9 | +31,0 | + 9,9 | — |
| 1954 | +2,0 | +11,2 | +20,7 | -17,2 | +31,2 | + 9,5 | — |
| 1955 | +2,3 | +11,2 | +21,4 | -17,1 | +32,3 | + 9,7 | 1 м + 0,9 мк |
| 1956 | +2,2 | +11,2 | +21,5 | -16,7 | +32,6 | +10,5 | +1,3 |
| 1957 | +2,4 | +11,4 | +21,9 | — | +32,5 | +10,2 | — |
| 1958 | +2,6 | +11,5 | +22,4 | — | +32,8 | +10,5 | +1,8 |
| 1959 | +2,3 | +10,9 | +22,3 | -16,8 | +32,8 | + 9,9 | — |
| 1960 | +2,2 | +11,0 | — | — | +33,2 | + 9,7 | +1,9 |

Таблица 3

| Годы | Действительная общая длина мер при температуре +20°C | | | | |
|------|------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | № 564 | № 566 | № 567 | № 568 | № 569 |
| 1957 | 1 м - 22,9 мк | 1 м - 3,5 мк | 1 м + 1,1 мк | 1 м + 8,2 мк | — |
| 1958 | -22,9 | -3,7 | +0,8 | +8,3 | 1 м - 5,4 мк |
| 1960 | — | — | +0,5 | — | -3,3 |

Анализ погрешностей измерений при сличении штриховых эталонов длины [1, 4] показал, что предельная суммарная погрешность результатов сличений на компараторах ВНИИМ не превышает $\pm 0,24$ мк для эталонов-копий и $\pm 0,36$ мк для рабочих эталонов.

За последние годы погрешности измерения температуры сличаемых мер были несколько снижены и можно считать, что температура мер в среднем из двух серий измерений известна с погрешностью не более $\pm 0,005^\circ$ С. Поэтому предельные погрешности результатов сличений в настоящее время могут оцениваться величиной порядка $\pm 0,2$ мк для эталонов-копий и $\pm 0,3$ мк для рабочих эталонов.

Расчеты погрешности подтверждаются и опытными данными. Обработав совместно результаты 27 серий измерений, выполненных в 1953 г. при взаимном сличении группы платино-иридиевых эталонов и сличении рабочих эталонов с эталонами-копиями (всего 216 приемов), мы получили среднее квадратичное отклонение $\sigma = 0,29$ мк. При этом в 160 случаях отклонения от среднего арифметического отдельных серий измерений не превышали величины σ и только в трех случаях из 216 приемов были больше 2σ .

Так как сличения каждого эталона производится не менее чем двумя сериями измерений (по 8 приемов в каждой), то средняя квадратичная погрешность результата сличений будет не более $\pm 0,07 \div 0,08$ мк. Если считать предельную погрешность измерений равной $\pm 0,3$ мк, то годовые изменения длины рабочих эталонов превышают эту предельную погрешность только в редких случаях. Однако при рассмотрении табл. 2 можно заметить, что изменения длины различных мер по годам носят одинаковый характер. Это может служить указанием на наличие в результатах сличений систематических погрешностей. Так как юстировка компараторов производится ежегодно, то, возможно, изменяются и инструментальные погрешности.

Для того чтобы установить степень влияния систематических погрешностей (погрешностей юстировки компараторов и погрешностей исходной меры) на результаты измерений, был произведен корреляционный анализ годовых изменений длины метров R86, R116 и M318 за 17 лет, и метров № 598, № 68901 и № 68902 за 5—10 лет (выбирались те годы, когда применялись одни и те же исходные меры). Были получены следующие значения коэффициентов корреляции: $r_{86/116} = 0,45$; $r_{318/116} = 0,01$; $r_{598/116} = 0,49$; $r_{68901/116} = 0,37$ и $r_{68902/116} = 0,70$.

Между результатами сличений метров R116 и M318 корреляционный анализ никакой связи не установил. Наличие существенного влияния систематических погрешностей на результаты компарирования обнаружено при сопоставлении результатов сличений метров R116 и № 68902, когда коэффициент корреляции оказался значительно больше 0,5.

В остальных случаях можно говорить о наличии систематических погрешностей, но их влияние оказалось несущественным. Это дает право предполагать, что систематические погрешности компараторов по своей величине не превышают погрешностей случайного характера.

Длина рабочих эталонов ВНИИМ отнесена к температуре 0° С, а сличение их и поверки образцовых мер по ним производятся при комнатной температуре около $+20^\circ$ С. Поэтому погрешность приведения длины эталонов к температуре измерений в значительной мере зависит от точности принимаемых при вычислении значений их температурных коэффициентов удлинения. Так как предыдущее определение температурных коэффициентов удлинения метров R116 и R86 производилось в 1928 г., а метра M318 — в 1909 г., то в 1948—1949 гг. было произведено новое исследование этих коэффициентов.

Определение температурных коэффициентов производилось на 1-метровом универсальном компараторе абсолютным методом. Исходной мерой при исследовании метров R86 и R116 служил метр M318, а при исследовании его самого — метр R116. Температура воды ванны компаратора, в которой находились исследуемые меры, во время исследования изменялась в пределах $0-34^{\circ}\text{C}$. Производилось 6—8 серий измерений при различных температурах, в среднем по 5 приемов в каждой серии.

Определение температурных коэффициентов метров R86 и M318 было выполнено дважды, а для метра R116 — три раза.

По результатам каждого определения были составлены системы из 30—40 уравнений с двумя искомыми коэффициентами α и β . Решение уравнений произведено по способу наименьших квадратов, результаты приводятся в табл. 4.

Таблица 4

| Годы | R116 | | R86 | | M318 | |
|---------|------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|
| | α мк/град | β мк/град ² | α мк/град | β мк/град ² | α мк/град | β мк/град ² |
| 1909 | — | — | — | — | +1,91 | -0,005 |
| 1928 | +7,35 | -0,003 | +11,32 | +0,005 | — | — |
| 1948 | $+7,39 \pm 0,02$ | $-0,003 \pm 0,001$ | $+11,36 \pm 0,02$ | $+0,005 \pm 0,001$ | $+1,96 \pm 0,03$ | $-0,005 \pm 0,001$ |
| 1949 | $+7,35 \pm 0,04$ | $-0,004 \pm 0,002$ | $+11,37 \pm 0,03$ | $+0,002 \pm 0,001$ | $+2,02 \pm 0,02$ | $-0,008 \pm 0,001$ |
| 1949 | $+7,37 \pm 0,03$ | $-0,005 \pm 0,001$ | — | — | — | — |
| Среднее | $+7,37 \pm 0,02$ | $-0,004 \pm 0,001$ | $+11,36 \pm 0,02$ | $+0,003 \pm 0,001$ | $+2,00 \pm 0,02$ | $-0,007 \pm 0,001$ |

Температурные коэффициенты удлинения метров R116 и R86 изменились в пределах точности их определений. У инварного метра M318 это изменение более значительно. Так как определение линейного и квадратичного температурных коэффициентов производилось совместно по результатам одних и тех же наблюдений, то вычисленные значения коэффициентов α и β не являются независимыми друг от друга величинами. При увеличении коэффициента α значение коэффициента β уменьшалось. Поэтому средние температурные коэффициенты для интервала от 0 до 20°C , вычисленные по температурным формулам 1928 и 1949 гг., как для метра R116, так и для метра R86 остаются одинаковыми. Для метра M318 изменение величины среднего коэффициента остается значительным (табл. 5).

Новые температурные формулы рабочих эталонов ВНИИМ применяются с 1950 г. и этим частично объясняется значительное изменение уравнения метра M318 в 1950 г.

Значения температурных коэффициентов удлинения рабочих эталонов институтов Комитета, а также новых рабочих эталонов длины приведены в табл. 6.

Поправки дециметровых подразделений шкал рабочих эталонов метров R116 и R86 определяются методом калибровки. Первая их калибровка производилась в 1928—1930 гг.

Полагая, что изменение длины эталонов происходит равномерно по всей длине меры, значения поправок дециметровых подразделений его шкалы в последующие после калибровки годы изменялись в соответствии с изменением общей его длины.

В 1949—1953 гг. была выполнена новая калибровка дециметровых подразделений метров R116 и R86. Калибровка метра R116 (1949 г.) производилась по методу Гей-Люссака. Калибровка подразделений метров R116 и R86 (в 1953 г.) была произведена по методу Перара. При этом с целью уменьшения температурных погрешностей измерений и повышения точности результатов калибровки интервалы шкалы метра

Таблица 5

| Год | № метра | Средний температурный коэффициент, мк/град |
|------|---------|--------------------------------------------|
| 1928 | R11 | $7,35 - 0,003 \cdot 20 = 7,29$ |
| 1949 | R116 | $7,37 - 0,004 \cdot 20 = 7,29$ |
| 1928 | R86 | $11,32 + 0,005 \cdot 20 = 11,42$ |
| 1949 | R86 | $11,36 + 0,003 \cdot 20 = 11,42$ |
| 1909 | M318 | $1,91 - 0,005 \cdot 20 = 1,81$ |
| 1949 | M318 | $2,00 - 0,007 \cdot 20 = 1,86$ |

Таблица 6

| Год | Метры | Температурный коэффициент удлинения | |
|------|----------|-------------------------------------|------------|
| | | α мк/град | β мк/град² |
| 1933 | № 598 | 1,18 | — |
| 1930 | № 68901 | 1,56 | +0,0001 |
| 1930 | № 68902 | 1,70 | +0,0002 |
| 1951 | № 387813 | 11,34 | — |
| 1957 | № 564 | 2,56* | -0,008 |
| 1957 | № 566 | 6,92* | -0,014 |
| 1949 | № 567 | 11,41* | -0,002 |
| 1957 | № 568 | 1,85* | +0,001 |
| 1951 | № 569 | 14,5* | — |

* Значения α относятся к $t = 20^\circ\text{C}$.

сравнивались не с длиной компаратора, а с соответствующими начальными интервалами того же метра, т. е. все дециметровые интервалы были сличены с первым дециметром, все 2-дециметровые интервалы — с интервалом 0—2 дм и т. д. Производилось не менее четырех приемов измерений двумя наблюдателями и вычислялось среднее.

Новые значения поправок подразделений метров R116 и R86, приведенные в табл. 7 и 8, в некоторых случаях значительно разошлись со значениями поправок, полученными при калибровке в 1928—1930 гг. Расхождения превышают возможные погрешности измерений, что указывает на неравномерность изменения длины меры.

Калибровка дециметровых подразделений метра R116 была повторена в 1956 и 1959 гг., а метра R86 — в 1959 г.

Таблица 7

| Интервалы шкалы, см | Поправки дециметровых подразделений метра R116 по годам, мк | | | | |
|------------------------|-------------------------------------------------------------|------|-------|-------|-------|
| | 1930 | 1943 | 1953 | 1956 | 1959 |
| 0—10 | +3,29 | +2,8 | +2,91 | +3,11 | +3,10 |
| 0—20 | +5,10 | +4,0 | +4,26 | +4,32 | +4,33 |
| 0—30 | +1,42 | +0,4 | +0,27 | +0,22 | +0,28 |
| 0—40 | +5,71 | +4,5 | +4,12 | +4,21 | +4,33 |
| 0—50 | +3,33 | +2,4 | +2,11 | +2,31 | +2,26 |
| 0—60 | 0 | -0,5 | -0,83 | -0,45 | -0,34 |
| 0—70 | +6,38 | +6,2 | +5,82 | +6,35 | +6,55 |
| 0—80 | +1,34 | +1,2 | +1,07 | +1,36 | +1,56 |
| 0—90 | +3,13 | +2,8 | +2,95 | +3,07 | +3,19 |
| 0—100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 8

| Интервалы шкалы, см | Поправки дециметровых подразделений метра R86 по годам, мк | | |
|------------------------|------------------------------------------------------------|-------|-------|
| | 1930 | 1953 | 1959 |
| 0—10 | +2,92 | +2,36 | +2,75 |
| 0—20 | +1,36 | +0,49 | +0,70 |
| 0—30 | +1,28 | +0,02 | +0,18 |
| 0—40 | +0,78 | -0,40 | -0,15 |
| 0—50 | +1,29 | -0,08 | -0,07 |
| 0—60 | -0,30 | -1,46 | -1,20 |
| 0—70 | -0,88 | -1,90 | -1,78 |
| 0—80 | -1,48 | -1,97 | -1,77 |
| 0—90 | -1,59 | -1,66 | -1,54 |
| 0—100 | 0 | 0 | 0 |

В 1956 г. была выполнена перекрестная калибровка сантиметровых подразделений двух дециметровых интервалов шкалы метра R116: 0—10 см и 30—40 см.

Приведенные в табл. 7 и 8 значения поправок дециметровых подразделений вычислены в результате обработки наблюдений, полученных при калибровке. Так как при этом поправки общей длины калибруемой меры принимались равными нулю, то вычисленные значения поправок являются отклонениями дециметровых штрихов шкалы метров от их теоретического положения относительно крайних штрихов метра. В действительности общая длина меры имеет некоторую поправку и для получения действительных значений поправок дециметровых подразделений рабочих эталонов поправки из табл. 7 и 8 должны быть соответственно пересчитаны. Погрешности результатов калибровки не превышают $\pm 0,05$ мк. Принимая же во внимание погрешность определения действительной общей длины метра, можно считать, что поправки отдельных дециметровых интервалов шкалы рабочих эталонов методом калибровки определяются с предельной погрешностью не более $\pm 0,1$ мк.

Дециметровые рабочие эталоны

При поверке точных шкал и подразделений образцовых штриховых мер в качестве исходных во ВНИИМ применяются 4 дециметровых рабочих эталона — инварные дециметры Д40 и Д29, платинитовый дециметр Д36 и дециметр Д76 (58% Ni).

Кроме основной шкалы с миллиметровыми подразделениями дециметры имеют дополнительную шкалу длиной 1 мм, разделенную на десятые доли миллиметра. По этим дополнительным шкалам в лаборатории определяется цена деления окулярных микрометров микроскопов.

Сличения дециметровых эталонов производились довольно редко. Первоначально эти эталоны были изучены в 1900 г. в Международном бюро мер и весов. Во ВНИИМ сличение дециметров Д36, Д40 и Д76 как между собой, так и с подразделениями эталона-копии — меры П4 — было произведено в 1938 г. В 1948 и в 1953 гг. сличения дециметров были повторены. Результаты всех этих сличений и изменения длины Δl дециметров приведены в табл. 9.

Таблица 9

| Год | Общая длина дециметров при $t = 20^\circ\text{C}$ и изменение их длины | | | | | | | |
|------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| | Д76 | $\Delta l, \text{мк}$ | Д36 | $\Delta l, \text{мк}$ | Д40 | $\Delta l, \text{мк}$ | Д29 | $\Delta l, \text{мк}$ |
| 1900 | 100 мм + +20,23 мк | — | 100 мм + +14,77 мк | — | 100 мм— —3,28 мк | — | 100 мм— —5,88 мк | — |
| 1938 | +20,23 | 0 | +13,87 | -0,90 | -2,28 | +1,00 | — | — |
| 1948 | +20,39 | +0,16 | +13,53 | -0,34 | -2,10 | +0,18 | -4,54 | +1,34 |
| 1950 | — | — | +13,32 | -0,21 | -2,09 | +0,01 | — | — |
| 1953 | +20,07 | -0,22 | +13,18 | -0,14 | — | — | — | — |

В 1952 и 1959 гг. производились сличения дополнительных шкал дециметровых рабочих эталонов, а в 1959 г. была выполнена и калибровка их подразделений (табл. 10). Кроме того, общая длина дополнительных шкал была измерена интерференционным методом.

Таблица 10

| Дециметр | Интервалы, мм | Действительная длина интервалов при $t = 20^\circ\text{C}$, мк | | |
|----------|------------------|-----------------------------------------------------------------|---------|---------|
| | | Международное бюро мер и весов, 1900 г. | ВНИИМ | |
| | | | 1952 г. | 1959 г. |
| Д36 | 0—0,5 | 499,48 | 499,57 | 499,55 |
| | 0,5—1,0 | 500,84 | 500,73 | 500,71 |
| | 0—1,0 | 1000,32 | 1000,30 | 1000,26 |
| Д76 | 0—0,5 | 499,93 | 499,86 | 499,85 |
| | 0,5—1,0 | 499,22 | 499,29 | 499,28 |
| | 0—1,0 | 999,15 | 999,15 | 999,13 |
| Д40 | 0—0,5 | 498,41 | 498,39 | 498,43 |
| | 0,5—1,0 | 501,31 | 501,45 | 501,33 |
| | 0—1,0 | 999,72 | 999,84 | 999,76 |
| Д29 | 0—0,5 | 498,51 | 498,54 | 498,49 |
| | 0,5—1,0 | 501,11 | 501,14 | 501,02 |
| | 0—1,0 | 999,62 | 999,68 | 999,561 |

Геодезические жезлы

В послевоенные годы большое внимание уделялось изучению рабочего эталона платинитового 3-метрового жезла Н15, являющегося исходной мерой при поверке всех образцовых 3-метровых геодезических жезлов. Первое послевоенное сличение этого жезла было произведено в 1946 г. [5]. Однометровые интервалы жезла Н15 были сличены непосредственно с государственным эталоном — метром № 28, — и, поскольку при этом было обнаружено значительное изменение длины жезла Н15, то в 1947 г. сличения были повторены. В последующие годы сличения жезла Н15 с эталонами-копиями повторялись более регулярно.

В 1949 и 1954 гг. были произведены определения температурных коэффициентов удлинения жезла Н15. Исходной мерой при этом служил 3-метровый жезл Д11.

В табл. 11 приводятся результаты определений температурных коэффициентов, а в табл. 12 — результаты всех сличений жезла Н15.

Таблица 11

| Годы | Температурные коэффициенты удлинения жезла Н15 | |
|-----------|------------------------------------------------|------------------|
| | α м/град | β м/град |
| 1908 | +22,04 | -0,0102 |
| 1926—1928 | +22,08 ± 0,02 | -0,0101 ± 0,0011 |
| 1949 | +22,23 ± 0,01 | -0,0107 ± 0,0004 |
| 1954 | +22,21 ± 0,01 | -0,0153 ± 0,0010 |

Таблица 12

| Годы | Действительная длина интервалов жезла Н15 при $t = 0^\circ$ | | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0—1 м | 1—2 м | 2—3 м | 0—3 м |
| 1927 | 1 м — 11,5 мк | 1 м + 11,8 мк | 1 м + 32,4 мк | 3 м + 32,7 мк |
| 1946—1947 | -13,4 | +9,9 | +30,8 | +27,3 |
| 1951 | -14,0 | +9,3 | +30,3 | +25,7 |
| 1952 | -13,9 | +9,4 | +29,8 | +25,3 |
| 1954 | -13,8 | +9,0 | +29,9 | +25,2 |
| 1955 | -13,9 | +8,7 | +29,8 | +24,6 |
| 1957 | -13,6 | +8,9 | +29,7 | +25,0 |
| 1960 | -14,2 | +9,2 | +29,4 | +24,4 |

Исследование 1954 г. подтвердило обнаруженное в 1949 г. изменение значения температурного коэффициента удлинения жезла Н15. Что касается изменений длины жезла Н15, то можно считать, что в пределах погрешностей сличений за последние годы длина жезла остается постоянной. Общая длина 3-метрового рабочего эталона жезла Н15 вычисляется как сумма длин его 1-метровых интервалов, определенных сличением с эталоном-копией.

Пользуясь принятым нами ранее [1] методом расчета погрешностей измерения на компараторе и приняв во внимание некоторое усовершенствование техники измерения за последние годы, мы можем подсчитать предельную погрешность сличения 1-метрового интервала; она будет равна $\pm 0,15$ мк (без учета погрешности длины эталона-копии).

При оценке погрешности определения общей длины 3-метрового жезла предельная погрешность длины эталона-копии, принимаемая нами равной $\pm 0,2$ мк, должна рассматриваться как погрешность систематического характера. Поэтому предельная погрешность определения общей длины 3-метрового жезла будет не более

$$\delta_{np} = \sqrt{(0,2 \cdot 3)^2 + (0,15 \sqrt{3})^2} = \pm 0,6 \text{ мк.}$$

В связи с созданием во ВНИИМ в 1956 г. стенного 24-метрового компаратора были проведены исследования рабочего эталона — 4-метровой инварной меры 1903/М4 (далее в статье она называется М4). В 1949 г. было произведено первое определение его температурных коэффициентов удлинения абсолютным компараторным методом. Исходной мерой служил 3-метровый жезл Д11. Было получено 52 начальных уравнения и в результате для 3-метрового интервала жезла вычислено значение коэффициентов $\alpha = 6,937$ мк/град и $\beta = -0,0088$ мк/град².

Относя значение коэффициентов ко всей длине меры М4, примем для нее следующую температурную формулу

$$\alpha_M = (9,25 \pm 0,03) - (0,012 \pm 0,001) t.$$

Действительная длина меры М4 также в 1949 г. была определена по частям сличением ее 2-метровых интервалов с интервалом 1—3 м жезла Н15; было получено уравнение

$$M4 = 4 \text{ м} + 243,3 \text{ мк} + (9,25 - 0,012t) t \text{ мк.}$$

Последующие сличения меры М4 с жезлом Н15 производились в 1951 и 1957 гг. и были получены следующие результаты:

$$1951 \text{ г. . . . } M4 = 4 \text{ м} + 248,9 \text{ мк};$$

$$1957 \text{ г. . . . } M4 = 4 \text{ м} + 253,3 \text{ мк.}$$

В 1959 г. длина 4-метровой меры была определена сличением всех его 1-метровых интервалов с платино-иридиевым метром № 2 и были получены следующие результаты (табл. 13).

Геодезические 3-метровые 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 метрологические эталоны, подлежат регулярным сличениям с эталонами ВНИИМ.

Работы по эталонированию геодезических жезлов возобновлены в 1945 г. сразу же после восстановления 4-метрового компаратора. С тех

пор ежегодно производится эталонирование 3-метрового инварного жезла № 541, являющегося образцовой мерой 24-метрового геодезического компаратора Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (МИИГАиК).

Таблица 13

| Интервалы меры № 1903 | 0-1 м | 1-2 м | 2-3 м | 3-4 м | 0-4 м |
|------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| Действительная длина интервалов при температуре 0° С | 1 м + 66,8 мк | 1 м + 64,6 мк | 1 м + 65,8 мк | 1 м + 54,4 мк | 1 м + 251,6 мк |

Менее регулярно проводилось сличение 3-метровых инварных жезлов: № 615 (Москва), G14 и D11 (Ленинград), 3-метровых платинитовых жезлов № 585 и 613 (Москва) и др.

Трехметровые геодезические жезлы обычно сличались с платинитовым жезлом N15. Иногда при их сличениях производилось также и определение длины их 1-метровых интервалов сличением с рабочими эталонами метра.

В табл. 14 приведены значения температурных коэффициентов удлинения геодезических жезлов.

Таблица 14

| Год | Жезл | Температурные коэффициенты удлинения | |
|------|-------|--------------------------------------|------------------------------|
| | | α мк/град | β мк/град ² |
| 1950 | № 541 | +5,388 | -0,0068 |
| 1952 | № 541 | +5,365 | -0,0073 |
| 1959 | № 541 | +5,386 | -0,0077 |
| 1950 | G14 | +2,427 | +0,004 |
| 1958 | C10 | +4,549 | -0,0095 |
| 1926 | D11 | +2,356 | +0,0057 |
| 1906 | B | +5,70 | -0,009 |
| 1935 | F13 | +3,292 | -0,003 |
| 1930 | № 613 | +22,12 | -0,006 |
| 1954 | № 615 | +4,036 | +0,0166 |
| 1929 | № 585 | +16,202 | -0,014 |
| 1956 | № 585 | +16,196 | -0,013 |

Результаты послевоенных исследований инварных образцовых геодезических жезлов (табл. 15) говорят о том, что наблюдавшееся прежде систематическое изменение длины жезлов почти у всех мер уже прекратилось. Период естественного старения инварных жезлов, продолжавшийся несколько десятков лет, фактически закончился.

Таблица 15

| Год | Действительная общая длина жезлов при температуре 0° | | | | | | | | |
|------|------------------------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|
| | № 541 | № 615 | № 613 | G14 | № 585 | D11 | C10 | B | F13 |
| 1908 | — | — | — | — | — | — | 3 м— -62,8 мк | 3 м+ +148,8 мк | — |
| 1909 | — | — | — | 3 м+ +23,2 мк | — | 3 м— -3,5 мк | — | — | 3 м+ +7,3 мк |
| 1926 | 3 м— -93,1 мк | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1929 | — | — | — | — | 3 м— -331,0 мк | — | — | — | — |
| 1930 | — | 3 м— -79,3 мк | 3 м— -425,0 мк | — | — | — | — | — | — |
| 1935 | — | — | — | — | — | — | — | — | +28,5 |
| 1936 | — | — | — | — | — | — | +12,5 | — | — |
| 1938 | — | — | — | — | -331,1 | — | — | +241,0 | — |
| 1940 | -77,5 | -68,8 | -413,9 | +47,3 | — | +13,3 | — | — | — |
| 1945 | -77,4 | — | — | — | — | +16,6 | — | — | — |
| 1946 | -77,8 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1947 | -77,6 | -66,6 | — | +46,3 | — | — | — | — | — |
| 1948 | -77,7 | — | — | — | -335,1 | — | — | — | — |
| 1949 | -77,9 | -66,9 | — | — | — | — | — | — | — |
| 1950 | -78,2 | -66,8 | — | +45,5 | — | — | — | — | — |
| 1951 | -78,7 | — | — | — | -337,1 | — | — | — | — |
| 1952 | -78,4 | — | — | — | — | — | — | +253,0 | +27,8 |
| 1953 | -78,9 | -66,3 | — | — | — | — | — | — | — |
| 1954 | -78,8 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1955 | -78,2 | -68,4 | — | — | — | — | — | — | — |
| 1956 | -77,9 | -68,5 | — | +44,3 | -338,0 | — | +16,6 | — | +28,0 |
| 1957 | -77,5 | — | — | — | — | — | — | +256,4 | — |
| 1958 | -77,5 | -66,4 | — | +46,0* | — | — | +17,1 | — | +28,5 |
| 1959 | -77,1 | — | — | — | — | -62,2** | — | — | — |
| 1960 | -77,3 | — | — | +45,3 | -338,1 | — | — | — | — |

* В 1958 г. у жезла G14 была произведена подчистка шкалы штрихов и форма штрихов изменялась.
 ** В 1958 г. шкаловые площадки жезла D11 были отполированы и на них нанесены новые штрихи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каяк Л. К., Об усовершенствовании метода сличения эталонов длины, Труды ВНИИМ, вып. 20 (80), Машгиз, 1953.
2. Романова М. Ф., Варлих Г. В., Карташев А. И., Батарчукова Н. Р., Сравнение прототипа метра с длиной волны красной линии кадмия, Доклады АН СССР, т. XXXVII, № 2, 1942.
3. Романова М. Ф., Волкова Е. А., Каяк Л. К., Сравнение длины государственного эталона метра с длиной волны красной линии кадмия, Труды ВНИИМ, вып. 16(76), 1951.
4. Баринов В. А., Современное состояние эталонов длины и методы точного измерения длины, ВНИИМ, 1940.
5. Каяк Л. К., Результаты нового исследования трехметрового платинитового жезла H15, Сборник научно-технических и производственных статей, вып. XXXIII, Геозидздат, 1950.

Поступила в редакцию
27/III 1959 г.

А. Н. КОРОЛЕВА
ВНИИМ

ЮСТИРОВКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОМЕТРОВОГО И ЧЕТЫРЕХМЕТРОВОГО КОМПАРАТОРОВ

В статье приводятся результаты работ, выполняемых во ВНИИМ ежегодно с целью исследования компараторов, на которых производится сличение эталонов длины. По данным исследований, инструментальные погрешности компараторов по своей величине не превосходят случайных погрешностей, имеющих место при компараторных сличениях.

Сличения штриховых эталонов длины во ВНИИМ производятся на 1-метровом или на 4-метровом компараторах. В лаборатории принято ежегодно, перед началом сличений, производить юстировку микроскопов компараторов, определять среднюю цену деления барабанов окулярных микрометров микроскопов и градуировать дифференциальные термодомы. Это необходимо для того, чтобы убедиться в неизменности и правильности положения микроскопов компаратора, цены деления их микрометров, а также для исключения систематических погрешностей измерений на компараторе.

При юстировке оси микроскопов устанавливаются в вертикальное положение с помощью специального накладного уровня (с ценой деления 2") и столика, который закрепляется в тубусе микроскопа вместо окулярного микрометра и служит опорой для уровня. Микроскоп считается установленным правильно, если при повороте его или столика на пол оборота пузырек уровня смещается от среднего положения не более чем на 0,5 деления шкалы уровня.

Предметные плоскости микроскопов должны находиться в одной горизонтальной плоскости. Это достигается фокусировкой микроскопов на поверхность воды в ванне компаратора. Оптические оси всех микроскопов 4-метрового компаратора также устанавливаются в одной вертикальной плоскости по тонкой струне (0,1—0,2 мм).

При юстировке микроскопов устанавливаются в правильное положение и их осветители так, чтобы при повороте осветителей на 180° поле зрения микроскопов оставалось равномерно освещенным, изображения штрихов были бы одинаково четкими, а световой «зайчик» не смещался бы. Изменения отсчетов по микрометру при наведении на штрих до и после поворота осветителя не должны превышать погрешности наведения на штрих.

Определение погрешностей винтов окулярных микрометров производится в лаборатории периодически. Последнее определение, произведенное после ремонта и юстировки всех микрометров 4-метрового компаратора, относится к 1959 г. При этом были определены периодические и ходовые погрешности винтов.

Определение периодических погрешностей производилось для двух оборотов каждого винта на специальном приборе Askania Werke методом калибровки с последующей обработкой результатов наблюдений по схеме Перара [1].

Ходовые погрешности винтов определялись тем же методом, с использованием шкалы оборотов самих микрометров. Периодические погрешности, вычисленные для различных оборотов, отличались друг от друга лишь в пределах точности самих определений, поэтому за окончательный результат принималось среднее значение. Подобное исследование винтов окулярных микрометров производилось в 1930 и в 1952 гг.

На рис. 1 и 2 приведены результаты исследования погрешностей винтов в 1952 г., на рис. 3 и 4 — в 1959 г. Как в том, так и в другом случаях величина периодических погрешностей только иногда достигает 0,1 мк, в основном же она не превосходит 0,05 мк.

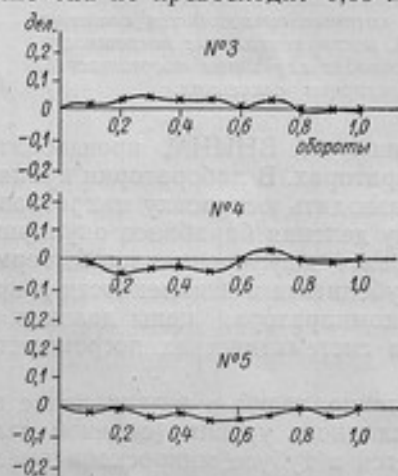


Рис. 1. Периодические погрешности винтов микроскопов № 3, 4 и 5.

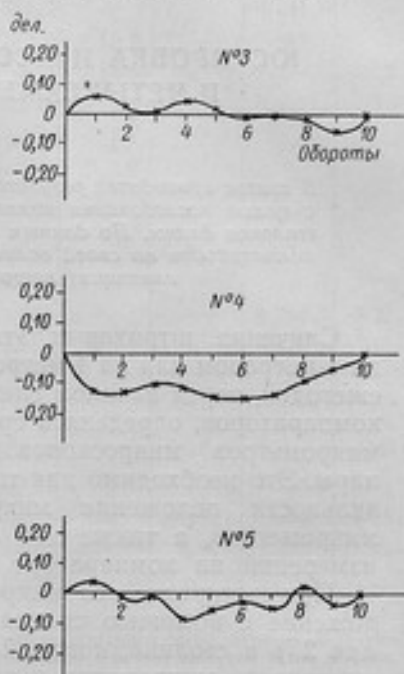


Рис. 2. Ходовые погрешности винтов окулярных микрометров микроскопов № 3, 4 и 5.

Ходовые погрешности оказались более значительными и иногда достигали 0,25 мк, поэтому при сличении эталонов необходимо пользоваться либо определенными участками винтов, либо в результаты измерения вводить соответствующие поправки.

Погрешности одних и тех же микрометров, определенные в 1952 и в 1959 гг., не могут быть сравнены между собой из-за того, что в 1959 г. микрометры были в ремонте. Можно лишь сказать, что после ремонта характер и периодических и ходовых погрешностей винтов остался тем же.

Средняя цена деления барабанов окулярных микрометров микроскопов определяется для каждого из наблюдателей по результатам изме-

рения этими микрометрами интервалов дополнительных шкал (общей длиной 1 мм с делениями через 0,1 мм), имеющих на рабочих эталонах дециметров, действительная длина которых известна с высокой степенью точности.

Определение цены деления для повышения точности производят по дециметрам Д36, Д40 и Д76, причем на каждом дециметре измеряются два интервала: 0—0,5 мм и 0,5—1,0 мм. Таким образом, окончательное значение цены деления вычисляется как среднее из измерений шести интервалов.

В табл. 1 приведены в качестве примера результаты определения цены деления микрометров микроскопов 4-метрового компаратора в 1957 г., причем средняя квадратичная погрешность результата не превосходит $\pm 0,0004$ мк.

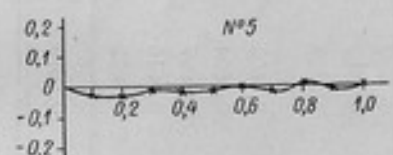
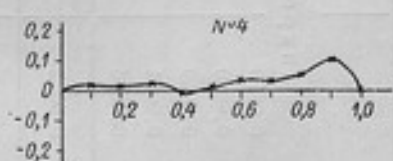
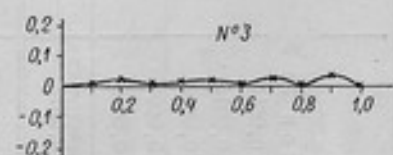
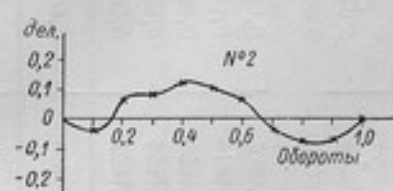


Рис. 3. Периодические погрешности винтов окулярных микрометров № 2, 3, 4 и 5.

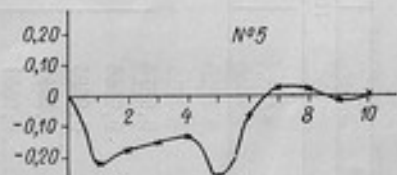
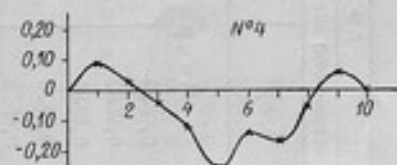
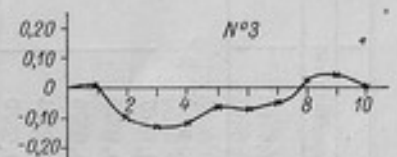
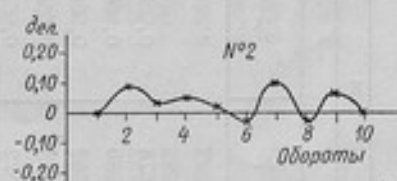


Рис. 4. Ходовые погрешности винтов окулярных микрометров микроскопов № 2, 3, 4 и 5.

Из табл. 1 видно, что расхождения v_1 между средней ценой деления и ценой деления каждого из наблюдателей (см. последний вертикальный столбец таблицы) только в одном случае превышает среднюю квадратичную погрешность результата.

Если сопоставить остаточные погрешности v_2 , приведенные в последних строчках таблицы для каждого из микроскопов, то можно сделать вывод, что погрешности цены деления для различных микроскопов по одним и тем же интервалам исходных шкал носят случайный характер. Это, в свою очередь, подтверждает наше предположение о том, что

Таблица 1

| Идентификатор | Д36 | | | | Д40 | | | | Д76 | | | | Средняя цена одного деления барабана окулярного микрометра микроскопа, мк | $v_k \cdot 10^4$ |
|----------------------|---------------------------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|---------------------------------------------------------------------------|------------------|
| | Цена деления (мк) для интервалов (мк) | | | | | | | | | | | | | |
| | 0-0,5 | 0,5-1,0 | 0-0,5 | 0,5-1,0 | 0-0,5 | 0,5-1,0 | 0-0,5 | 0,5-1,0 | | | | | | |
| Микроскоп № 2 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0,9571 | 0,9576 | 0,9573 | 0,9567 | 0,9578 | 0,9581 | 0,9574 | 0,9578 | 0,9574 | 0,9580 | 0,9582 | 0,9577 | 0,9575 | -4 |
| 2 | 0,9577 | 0,9586 | 0,9582 | 0,9570 | 0,9580 | 0,9583 | 0,9581 | 0,9582 | 0,9580 | 0,9582 | 0,9582 | 0,9577 | 0,9575 | +2 |
| 3 | 0,9579 | 0,9585 | 0,9588 | 0,9578 | 0,9582 | 0,9581 | 0,9578 | 0,9582 | 0,9580 | 0,9582 | 0,9582 | 0,9577 | 0,9575 | +4 |
| 4 | 0,9571 | 0,9582 | 0,9578 | 0,9574 | 0,9575 | 0,9582 | 0,9577 | 0,9582 | 0,9578 | 0,9582 | 0,9582 | 0,9577 | 0,9575 | -1 |
| 5 | 0,9576 | 0,9581 | 0,9572 | 0,9570 | 0,9572 | 0,9578 | 0,9574 | 0,9572 | 0,9572 | 0,9572 | 0,9572 | 0,9577 | 0,9575 | -3 |
| Среднее . . | 0,9575 | 0,9582 | 0,9579 | 0,9572 | 0,9577 | 0,9581 | 0,9578 | 0,9577 | 0,9578 | 0,9580 | 0,9582 | 0,9577 | 0,9575 | - |
| $v_k \cdot 10^4$ | -3 | +4 | +1 | -6 | -1 | +3 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Микроскоп № 3 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0,9610 | 0,9605 | 0,9620 | 0,9616 | 0,9607 | 0,9614 | 0,9612 | 0,9607 | 0,9612 | 0,9616 | 0,9623 | 0,9621 | 0,9620 | -7 |
| 2 | 0,9617 | 0,9624 | 0,9620 | 0,9615 | 0,9616 | 0,9621 | 0,9619 | 0,9616 | 0,9619 | 0,9621 | 0,9623 | 0,9621 | 0,9620 | 0 |
| 3 | 0,9614 | 0,9627 | 0,9629 | 0,9620 | 0,9620 | 0,9625 | 0,9623 | 0,9620 | 0,9623 | 0,9625 | 0,9623 | 0,9622 | 0,9620 | +4 |
| 4 | 0,9618 | 0,9615 | 0,9624 | 0,9621 | 0,9628 | 0,9622 | 0,9621 | 0,9628 | 0,9621 | 0,9622 | 0,9623 | 0,9622 | 0,9620 | +2 |
| 5 | 0,9619 | 0,9622 | 0,9616 | 0,9616 | 0,9627 | 0,9622 | 0,9620 | 0,9627 | 0,9620 | 0,9622 | 0,9623 | 0,9622 | 0,9620 | +1 |
| Среднее . . | 0,9616 | 0,9619 | 0,9622 | 0,9618 | 0,9620 | 0,9621 | 0,9619 | 0,9620 | 0,9619 | 0,9621 | 0,9622 | 0,9621 | 0,9620 | - |
| $v_k \cdot 10^4$ | -3 | 0 | +3 | -1 | +2 | +2 | - | +2 | - | +2 | - | - | - | - |

| Наблюдатель | Д36 | | | | | Д40 | | | | | Д76 | | | | | Средняя цена одного летца барабана окулярного микроскопа, мк | $v_f \cdot 10^4$ |
|------------------|-------------------------------------|---------|--------|---------|--------|-------------------------------------|--------|---------|--------|---------|-------------------------------------|---------|--------|---------|--------|--------------------------------------------------------------|------------------|
| | Цена летца (мк) для интервалов (мк) | | | | | Цена летца (мк) для интервалов (мк) | | | | | Цена летца (мк) для интервалов (мк) | | | | | | |
| | 0-0,5 | 0,5-1,0 | 0-0,5 | 0,5-1,0 | 0-0,5 | 0,5-1,0 | 0-0,5 | 0,5-1,0 | 0-0,5 | 0,5-1,0 | 0-0,5 | 0,5-1,0 | 0-0,5 | 0,5-1,0 | | | |
| | Микроскоп № 4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0,9557 | 0,9560 | 0,9562 | 0,9564 | 0,9567 | 0,9562 | 0,9564 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9571 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9571 | 0,9573 | 0,9566 | 0,9561 | -3 |
| 2 | 0,9558 | 0,9566 | 0,9564 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9564 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9571 | 0,9564 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9571 | 0,9573 | 0,9564 | 0,9564 | 0 |
| 3 | 0,9570 | 0,9565 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9571 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9571 | 0,9573 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9571 | 0,9573 | 0,9575 | 0,9565 | 0,9565 | +1 |
| 4 | 0,9559 | 0,9564 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9571 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9571 | 0,9573 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9571 | 0,9573 | 0,9575 | 0,9562 | 0,9562 | -1 |
| 5 | 0,9568 | 0,9580 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9571 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9571 | 0,9573 | 0,9567 | 0,9569 | 0,9571 | 0,9573 | 0,9575 | 0,9566 | 0,9566 | +2 |
| Среднее . . | 0,9562 | 0,9567 | 0,9565 | 0,9563 | 0,9563 | 0,9565 | 0,9563 | 0,9563 | 0,9563 | 0,9563 | 0,9563 | 0,9563 | 0,9563 | 0,9563 | 0,9562 | 0,9564 | - |
| $v_k \cdot 10^4$ | -2 | +3 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | - |
| | Микроскоп № 5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0,9576 | 0,9577 | 0,9583 | 0,9578 | 0,9579 | 0,9583 | 0,9578 | 0,9579 | 0,9581 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9575 | 0,9579 | 0 |
| 2 | 0,9574 | 0,9577 | 0,9580 | 0,9576 | 0,9579 | 0,9580 | 0,9576 | 0,9579 | 0,9581 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9581 | 0,9580 | +1 |
| 3 | 0,9575 | 0,9579 | 0,9578 | 0,9579 | 0,9581 | 0,9578 | 0,9579 | 0,9581 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9582 | 0,9579 | 0 |
| 4 | 0,9575 | 0,9579 | 0,9585 | 0,9587 | 0,9588 | 0,9585 | 0,9587 | 0,9588 | 0,9588 | 0,9588 | 0,9588 | 0,9588 | 0,9588 | 0,9588 | 0,9578 | 0,9582 | +3 |
| 5 | 0,9575 | 0,9573 | 0,9575 | 0,9574 | 0,9577 | 0,9575 | 0,9574 | 0,9577 | 0,9579 | 0,9580 | 0,9580 | 0,9580 | 0,9580 | 0,9580 | 0,9572 | 0,9575 | -4 |
| Среднее . . | 0,9575 | 0,9577 | 0,9580 | 0,9579 | 0,9579 | 0,9580 | 0,9579 | 0,9579 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9583 | 0,9578 | 0,9579 | - |
| $v_k \cdot 10^4$ | -4 | -2 | +1 | 0 | +1 | +1 | 0 | +4 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | - |

значения длин интервалов дециметров Д36, Д40, Д76 не имеют больших систематических погрешностей.

В последние годы в лаборатории пришли к выводу, что цену деления следует определять каждому из наблюдателей с тем, чтобы уменьшить влияние личной погрешности на результаты измерений на компараторе.

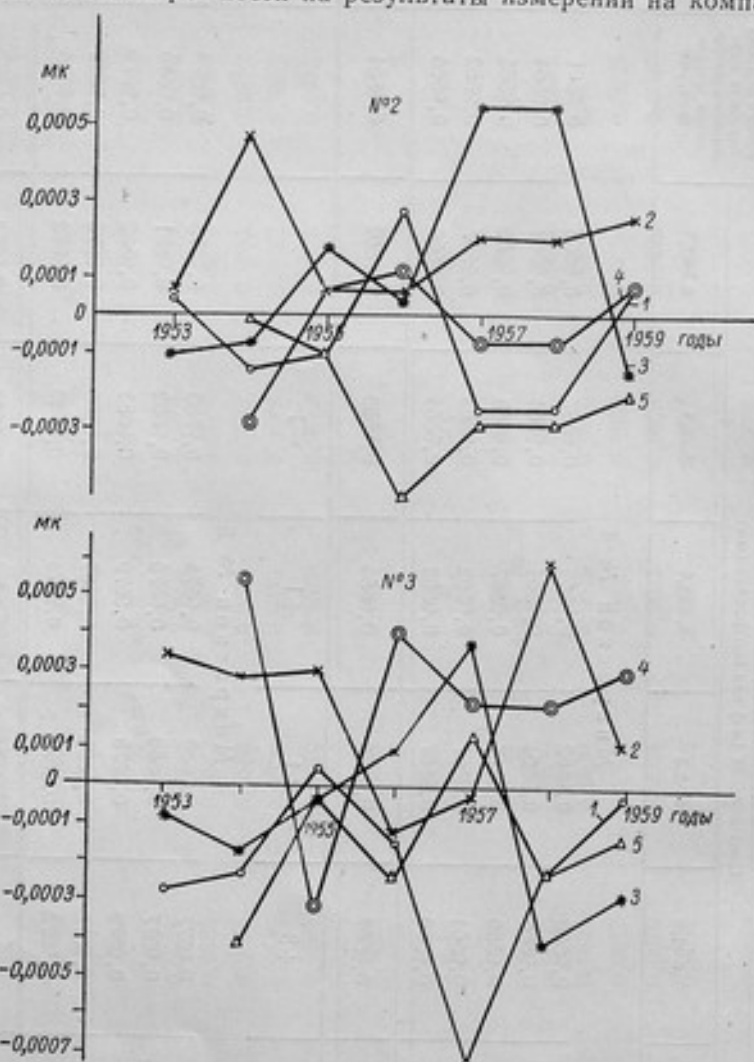


Рис. 5. Отклонение цены деления микрометров микроскопов № 2 и 3 каждого из пяти наблюдателей от средней цены деления.

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, а также на рис. 5, показал, что изменения цены деления для отдельных наблюдателей (1-5) с течением времени (1953-1959 гг.) не носят систематический характер, хотя определения производились по одним и тем же исходным мерам.

То же самое можно сказать, если посмотреть на изменение цены деления, определенной каждым из наблюдателей для различных микроскопов за один и тот же год. Поэтому, по нашему мнению, при работе на компараторах следует пользоваться средней ценой деления.

Для измерения температуры сличаемых мер применяются медь-константановые дифференциальные термопары. Величина т. э. д. с. этих термопар измеряется с помощью гальванометра, имеющего внутреннее сопротивление 15 ом, постоянную по току $C_1 = 1,3 \cdot 10^{-9}$ а/мм/м и при внешнем сопротивлении порядка 20 ом постоянную по напряжению $C_2 = 1 \cdot 10^{-7}$ в/дел.

У каждого из компараторов имеется своя установка для измерения температуры мер с помощью дифференциальных термопар. Термопары градуируются непосредственно в лаборатории.

На рис. 6 приведены кривые одной из градуировок для термопар № 5, 6, 8. Кривые зависимости т. э. д. с. от температуры имеют прямой характер, что дает право пользоваться средней ценой деления. Прохождение градуировочной кривой через начало координат свидетельствует об отсутствии систематических погрешностей в измерениях температуры спаев термопары во время градуировки. Цена деления

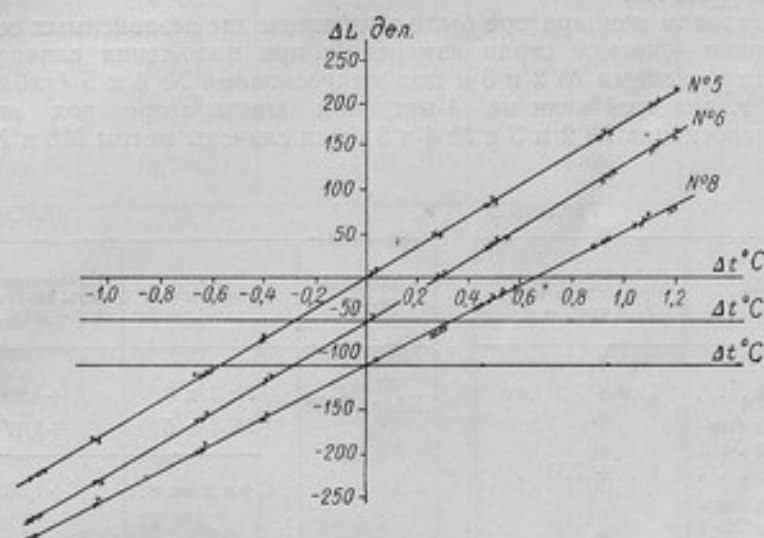


Рис. 6. Кривые градуировки термопар № 5, 6 и 8.

шкалы гальванометра может быть определена из графика как тангенс угла наклона градуировочной кривой. Эту величину более точно можно определить, обрабатывая результаты измерения по способу наименьших квадратов. Цена деления шкалы гальванометра для термопар компараторов в среднем равна $0,003^\circ \text{C}$.

В 1957 г. для 1-метрового компаратора были изготовлены новые медь-константановые дифференциальные термопары для измерения температуры мер при определении их температурных коэффициентов удлинения. Обычно температурные коэффициенты удлинения штриховых мер длины определяются в интервале температур $0 \rightarrow 35^\circ \text{C}$. Поэтому применить дифференциальные термопары с гальванометром в этом случае можно лишь, если температура термостата, в который помещаются свободные концы термопар, будет изменяться, примерно, в тех же пределах. Возможность регулирования температурного режима в термостате, в который помещались свободные концы термопар, и была предусмотрена в нашем случае.

Цена деления шкалы гальванометра для каждой из специальных термопар определялась принятым в лаборатории методом в пределах шкалы гальванометра тремя сериями при температурах, близких к 3, 18 и 35° С.

Цены деления шкалы гальванометра термопар, вычисленные для указанных выше серий, различались между собой лишь в пределах погрешности определения цены деления. Поэтому для термопар № 9, 10, 11 и 12 было решено в диапазоне температур 0 ÷ 35° С пользоваться средней ценой деления.

С целью определения неисключенных остатков инструментальных погрешностей компараторов выполняются специальные исследования. Так, например, в 1956 г. производилось измерение разности длин двух эталонов метра R116 и № 11 под различными парами микроскопов на 4-метровом и 1-метровом компараторах. Если юстировка была произведена удовлетворительно, то результаты этих измерений могут расходиться лишь в пределах погрешностей компараторных сличений, т. е. в пределах ±0,2 мк.

На 1-метровом компараторе были выполнены две независимых серии, на 4-метровом — четыре серии измерений: при положении сличаемых мер под микроскопами № 2 и 3 и под микроскопами № 4 и 5 (табл. 2).

В 1958 г. для этой цели на 4-метровом компараторе под двумя парами микроскопов № 2 и 3 и № 4 и 5 были сличены метры М8 и № 28 (табл. 3).

Таблица 2

| Компаратор | Действительное значение длины метра R116 при $t = 0^\circ\text{C}$ |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 1-метровый . . . | 1 м + 2,21 мк |
| 4-метровый (микроскопы № 2 и 3) | 1 . + 2,33 . |
| 4-метровый (микроскопы № 4 и 5) | 1 . + 2,25 . |
| Среднее . . . | 1 м + 2,26 мк |

Таблица 3

| Сличаемый эталон | № микроскопа | Измеренная разность, приведенная к $t = 20^\circ\text{C}$, мк |
|------------------|---------------|----------------------------------------------------------------|
| М8 и № 28 | { № 2 и 3 | +1,29 |
| | { № 4 и 5 | +1,47 |
| | Среднее . . . | +1,38 |

Во всех случаях условия наблюдения были примерно одинаковы, т. е. температура мер измерялась с погрешностью не более ±0,005° С, в измерениях принимали участие одни и те же наблюдатели, в каждой из серий выполнялось одинаковое число приемов наблюдений.

Таким образом, расхождения между результатами, полученными при измерении на разных компараторах, равны 0,12 мк и по своей величине не превосходят погрешностей случайного характера, сопровождающих обычные компараторные измерения.

В табл. 4 приведены результаты отдельных приемов измерений в двух сериях сличений платино-иридиевых метров № 28 и № 11 на 4-метровом компараторе.

Как видно из табл. 4, средняя квадратичная погрешность результата сличений двух штриховых эталонов в первой серии равна 0,06 мк, во второй — 0,05 мк.

Таблица 4

| Температура метров, °C | | Измеренная разность сличаемых мер, мк | Разность сличаемых мер, приведенная к $t_{ср}$, мк | Отклонения от среднего, мк |
|------------------------|--------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|
| № 28 | № 11 | | | |
| I серия | | | | |
| 18,908 | 18,913 | -0,75 | -0,75 | +0,25 |
| 18,941 | 18,950 | -1,21 | -1,26 | -0,26 |
| 18,562 | 18,574 | -1,07 | -1,14 | -0,14 |
| 18,682 | 18,684 | -1,28 | -1,27 | -0,27 |
| 18,952 | 18,954 | -0,78 | -0,80 | +0,20 |
| 18,684 | 18,682 | -1,26 | -1,21 | -0,21 |
| 18,741 | 18,740 | -0,75 | -0,70 | +0,30 |
| 18,670 | 18,672 | -1,17 | -1,15 | -0,15 |
| 18,670 | 18,678 | -0,79 | -0,82 | +0,18 |
| 18,690 | 18,691 | -1,04 | -1,02 | -0,02 |
| 18,691 | 18,696 | -0,88 | -0,89 | +0,11 |
| 18,745 | 18,749 | -1,00 | -1,00 | $S = \pm 0,06$ |
| II серия | | | | |
| 18,588 | 18,593 | -1,25 | -1,23 | -0,05 |
| 18,620 | 18,630 | -1,22 | -1,24 | -0,06 |
| 18,645 | 18,650 | -1,41 | -1,40 | -0,22 |
| 18,652 | 18,658 | -1,20 | -1,20 | -0,02 |
| 18,653 | 18,654 | -1,45 | -1,35 | -0,17 |
| 18,660 | 18,662 | -0,98 | -0,94 | +0,24 |
| 18,664 | 18,669 | -1,09 | -1,07 | +0,11 |
| 18,671 | 18,675 | -1,11 | -1,08 | +0,10 |
| 18,429 | 18,444 | -1,35 | -1,42 | -0,24 |
| 18,416 | 18,438 | -1,05 | -1,17 | -0,01 |
| 18,414 | 18,421 | -0,93 | -0,93 | +0,25 |
| 18,439 | 18,446 | -1,07 | -1,09 | +0,09 |
| 18,571 | 18,578 | -1,18 | -1,18 | $S = \pm 0,05$ |

Косвенным подтверждением отсутствия больших систематических погрешностей при сличении эталонов может служить сопоставление результатов измерения мер во ВНИИМ с результатами, полученными в метрологических учреждениях других стран. Например, по результатам измерений платино-иридиевого метра № 11 во ВНИИМ его длина при $t = 0^\circ \text{C}$ была равна

$$\text{№ 11} = 1 \text{ м} - 0,35 \text{ мк},$$

а по данным Международного бюро [2]

$$\text{№ 11} = 1 \text{ м} - 0,45 \text{ мк}.$$

Расхождение между данными Международного бюро и ВНИИМ составляет только 0,10 мк.

В 1957 г. во ВНИИМ производилось сличение метра № 122/57, незадолго до этого аттестованного в Национальной физической лаборатории Англии (НФЛ). Во ВНИИМ длина этого метра при $t = 20^{\circ}\text{C}$ получилась равной

$$\text{№ 122/57} = 1 \text{ м} - 4,34 \text{ мк},$$

а при сличениях в НФЛ было получено

$$\text{№ 122/57} = 1 \text{ м} - 4,50 \text{ мк},$$

т. е. на 0,16 мк меньше.

Таким образом, можно утверждать, что инструментальные погрешности компараторов для сличения штриховых эталонов длины по своей величине малы и не выходят за пределы случайных погрешностей, имеющих место при компараторных сличениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев М. А., Исследование окулярных микрометров, Труды ВИС, вып. 5 (21), 1934.
2. Procès Verbaux des séances, 2-e serie, T. 26-B, 1958.

Поступила в редакцию
27/XI 1959 г.

С. И. ТОРОПИН
ВНИИМ

О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭТАЛОНОВ ДЛИНЫ ПРИ СЛИЧЕНИИ НА КОМПАРАТОРАХ

В статье произведен анализ погрешностей измерения температуры сличаемых мер с помощью дифференциальных термометров и выявлены возможности дальнейшего повышения точности измерения температуры.

В связи с развитием отечественного машино- и приборостроения значительно расширилось применение штриховых мер, а вместе с тем повысились и требования к точности поверки этих мер и особенно тех, которые применяются для поверки и юстировки высокоточных приборов и станков. Отсюда повысились требования и к точности сличений эталонов длины.

В настоящее время сличения штриховых эталонов производятся со средней квадратичной погрешностью $\pm 0,1 \pm 0,15$ мк при условии, что температура мер известна с погрешностью не более $\pm 0,01^\circ$ С. Одновременно и у нас и за границей ведутся работы по созданию новых приборов и новых штриховых мер, имеющие целью уменьшить погрешности сличений до $\pm 0,02 \pm 0,05$ мк.

При сличении штриховых мер на компараторе основными погрешностями являются оптические, инструментальные и температурные.

При значительном снижении инструментальных и оптических погрешностей измерения доминирующими становятся температурные погрешности и они в этом случае ограничивают возможность повышения точности измерения штриховых мер. Чтобы погрешность сличения штриховых мер не превышала $\pm 0,02$ мк, температура меры должна быть известна с погрешностью не более $\pm 0,002^\circ$ С.

Задачей настоящего исследования являлось определение погрешности измерения температуры сличаемых эталонов и выявление возможности дальнейшего повышения точности измерения их температуры.

Сличения эталонов длины во ВНИИМ производятся на 1-метровом и 4-метровом компараторах.

Однометровый компаратор установлен в центральной внутренней комнате главного здания ВНИИМ, окруженной коридорами, изменения температуры в которой не превышают $0,5^\circ$ С в течение суток и $3-4^\circ$ С — в течение года. Менее благоприятны условия термостатирования в специальном помещении, где установлен 4-метровый компаратор. Здесь колебания температуры в течение года могут достигать 6° С, а суточные изменения доходят до 1° С.

Каждый компаратор имеет две ванны из красной меди, в которые помещают сличаемые меры. Эти ванны — двойные, причем между наружной и внутренней ванной имеется свободное пространство. Во время сличения ванны заполняют водой, что предохраняет воду во внутренней ванне от теплообмена с окружающей средой.

Для лучшего термостатирования наружная ванна обшита деревом и сверху закрывается крышками, также имеющими теплоизоляцию. Для выравнивания температуры воды в наружной и внутренней ваннах имеются мешалки.

До 1948 г. температуру сличаемых мер определяли с помощью 4 ртутных термометров, расположенных около мер на уровне их нейтральных плоскостей. Толщина слоя воды над верхней плоскостью меры равна примерно 15 мм.

При таком способе определения температуры сличаемых мер температурные погрешности могут быть значительны, так как, строго говоря, температура, отсчитываемая по термометрам, температура воды и температура меры различны.

После усовершенствования компараторов в 1947—1950 гг. [1] для повышения точности измерения сличаемых мер стали применять дифференциальные термопары.

Установка для измерения температуры состоит из 8 медно-константановых дифференциальных термопар с зажимами для закрепления их на эталонах, зеркального гальванометра, термостата и зрительной трубы со шкалой. Шкала имеет миллиметровые подразделения по 250 мм по обе стороны от нулевого штриха.

Длина проводников термопар 4 м, сечение: 0,3 мм — константана и 0,4 мм — меди. Внутреннее сопротивление зеркального гальванометра составляет 21 ом, внешнее — 370 ом, чувствительность — 200 мм/мкА.

Термостат состоит из деревянного ящика, оклеенного снаружи фольгой и заполненного стеклянкой ватой и изрезанной мелко пробкой. В ящике установлен сосуд Дьюара с трансформаторным маслом. В сосуде находятся свободные спаи термопар.

Для изоляции друг от друга свободные спаи термопар закреплены на специальном кольце, расположенном по середине резервуаров двух образцовых ртутных термометров, с помощью которых определяется температура свободных спаев. Шкалы образцовых термометров имеют подразделения 0,01°С, что позволяет производить отсчет с помощью зрительной трубы с точностью до 0,001—0,002°С.

Рабочий спай каждой термопары запаян в медной пластинке зажима. При закреплении зажима на мере спай термопары вплотную соприкасается с нею.

В цепи гальванометра установлены два бестермоточных переключателя ПБ-43 и ПБ-12 завода «Эталон», из которых один служит для включения в цепь гальванометра той или другой термопары, а второй, двухполюсный, служит для изменения направления тока в цепи гальванометра.

Температура сличаемой меры t_m при измерении термопарой вычисляется по формуле

$$t_m = T_T + a + N\delta, \quad (1)$$

где T_T — температура свободного спая термопары;
 N — число делений по шкале гальванометра, мм;
 a — постоянная уравнения термопары;
 δ — цена деления шкалы гальванометра.

Температуру свободных спаев в термостате определяют по двум термометрам дважды: до и после сличения мер.

Постоянные a и δ определяются заранее, при градуировке термопар. Если значение постоянной a находится в пределах точности измерения температуры ($0,001 \pm 0,002^\circ \text{C}$), ее можно не принимать во внимание.

Градуировка термопар производится ежегодно следующим образом. Четыре зажима с рабочими спаями термопар одновременно помещают во вспомогательный сосуд Дьюара, который заполняют дистиллированной водой.

Во вспомогательном сосуде устанавливают также два палочных ртутных термометра с ценой деления шкалы в $0,01^\circ \text{C}$ так, чтобы середина резервуара термометра находилась на уровне рабочих спаев термопар. Во время градуировки для каждой термопары определяют разности температур ΔT между рабочим и свободным спаями по термометрам, находящимся в термостате и во вспомогательном сосуде, и производят одновременно отсчеты по шкале гальванометра при двух положениях двухполюсного переключателя.

Отсчеты по термометрам производят дважды: до и после отчета показаний по шкале гальванометра. Градуировку термопар производят в пределах разности температур между ее спаями от $\pm 0,05$ до $\pm 1,5^\circ \text{C}$.

Особое внимание при градуировке термопар следует обращать на постоянство заданного температурного режима воды во вспомогательном сосуде Дьюара. Для устранения вертикального градиента температуры воды во время градуировки ее тщательно перемешивают. Температуру регулируют, добавляя воду. Результаты измерений наносят на график и если градуировочные прямые проходят через начало координат, то в уравнении термопары (1) постоянную a можно считать равной нулю и определение цены деления шкалы гальванометра производить по формуле

$$\delta = \frac{\Delta T}{N}. \quad (2)$$

За окончательное значение постоянной δ термопары принимается среднее из n значений

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta T_i}{N_i}.$$

В табл. 1 в качестве примера приведены результаты градуировки термопары № 6 в 1957 г.

Средняя цена деления $\delta_{\text{ср}} = 0,00563^\circ \text{C}/\text{мм}$ определена со средней квадратичной погрешностью $\pm 2 \cdot 10^{-6}^\circ \text{C}/\text{мм}$.

Упрощенный способ определения цены деления вносит систематическую ошибку. Действительно, умножая среднюю цену деления на отсчет по шкале гальванометра N_i , можно получить разность температур спаев термопары ΔT по показаниям самой термопары. Вычисленную таким способом разность температур между спаями термопары обозначим через $\Delta T'$.

При отсутствии систематической ошибки в определении средней цены деления разности $\Delta T - \Delta T'$ будут иметь случайный характер и при большом числе измерений сумма $\Sigma(\Delta T - \Delta T')$ должна быть близка к нулю. В действительности она оказалась равной $-0,372$.

Таблица 1

| Температура спая термопары | | $T_2 - T_1 = \Delta T$, °C | Отсчет по шкале гальванометра, N_i | Цена деления термопары, δ_i град/мм | $\sigma_i = (\delta_i - \delta_{cp}) \cdot 10^5$ | $\Delta T'$, °C | $(\Delta T - \Delta T')$, °C | Уравнения погрешностей | |
|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| свободного в термостате, T_1 , °C | рабочего в сосуде, T_2 , °C | | | | | | | $d_i = (a + N_i \delta - \Delta T) \cdot 10^3$, °C | $d_i' = (d_i - \theta) \cdot 10^3$, °C |
| 18,254 | 18,426 | +0,172 | + 30,35 | 0,00567 | + 4 | +0,171 | +0,001 | + 9 | +9,24 |
| 18,332 | 18,381 | +0,049 | + 8,75 | 0,00560 | - 3 | +0,049 | 0,000 | + 8 | +8,24 |
| 18,306 | 17,254 | -1,052 | -182,60 | 0,00576 | +13 | -1,028 | -0,024 | -15 | -14,76 |
| 18,304 | 17,256 | -1,048 | -184,75 | 0,00567 | + 4 | -1,040 | -0,008 | + 1 | +1,24 |
| 18,304 | 17,258 | -1,046 | -184,35 | 0,00567 | + 4 | -1,038 | -0,008 | 0 | +0,24 |
| 18,305 | 17,264 | -1,041 | -183,90 | 0,00566 | + 3 | -1,035 | -0,006 | + 3 | +3,24 |
| 18,305 | 17,268 | -1,037 | -183,50 | 0,00565 | + 2 | -1,033 | -0,004 | + 5 | +5,24 |
| 18,306 | 17,272 | -1,034 | -183,25 | 0,00562 | - 1 | -1,032 | -0,002 | + 6 | +6,24 |
| 18,380 | 17,074 | -1,306 | -230,85 | 0,00566 | + 3 | -1,300 | -0,006 | + 2 | +2,24 |
| 18,380 | 17,078 | -1,302 | -230,10 | 0,00566 | + 3 | +1,295 | -0,007 | + 2 | +2,24 |
| 18,378 | 17,092 | -1,286 | -226,80 | 0,00567 | + 4 | -1,277 | -0,009 | 0 | +0,24 |
| 18,378 | 17,096 | -1,282 | -225,95 | 0,00567 | + 4 | -1,272 | -0,010 | - 1 | -5,76 |
| 18,378 | 17,106 | -1,272 | -224,50 | 0,00566 | + 3 | -1,264 | -0,008 | + 6 | +1,24 |
| 18,389 | 17,776 | -0,613 | -106,15 | 0,00568 | + 5 | -0,598 | -0,015 | - 7 | -6,76 |
| 18,398 | 17,776 | -0,622 | -107,90 | 0,00576 | +13 | -0,607 | -0,015 | - 6 | -5,76 |
| 18,405 | 17,777 | -0,628 | -108,75 | 0,00577 | +14 | -0,612 | -0,016 | - 6 | -5,76 |
| 18,412 | 17,778 | -0,634 | -109,75 | 0,00578 | +15 | -0,618 | -0,016 | - 8 | -7,76 |
| 18,420 | 17,777 | -0,643 | -111,10 | 0,00579 | +16 | -0,625 | -0,018 | - 9 | -8,76 |
| 18,436 | 17,784 | -0,652 | -112,95 | 0,00577 | +14 | -0,636 | -0,016 | - 8 | -7,76 |
| 18,354 | 19,558 | +1,204 | +215,65 | 0,00558 | - 5 | +1,214 | -0,010 | - 3 | -2,76 |
| 18,362 | 19,554 | +1,192 | +212,70 | 0,00560 | - 3 | +1,198 | -0,006 | + 2 | +2,24 |
| 18,476 | 19,420 | +0,944 | +169,65 | 0,00556 | - 7 | +0,955 | -0,011 | - 4 | -3,76 |
| 18,485 | 19,418 | +0,933 | +167,65 | 0,00556 | - 7 | +0,944 | -0,011 | - 3 | -2,76 |
| 18,498 | 19,408 | +0,910 | +163,15 | 0,00557 | - 6 | +0,919 | +0,009 | - 1 | -0,76 |
| 18,622 | 18,918 | +0,296 | + 54,00 | 0,00548 | -15 | +0,304 | -0,008 | 0 | +0,24 |
| 18,618 | 18,908 | +0,290 | + 53,05 | 0,00547 | -16 | +0,299 | -0,009 | - 1 | -0,76 |
| 18,618 | 18,904 | +0,286 | + 52,25 | 0,00547 | -16 | +0,294 | -0,008 | 0 | +0,24 |
| 18,618 | 18,903 | +0,285 | + 51,55 | 0,00553 | -10 | +0,290 | -0,005 | + 3 | +3,24 |
| 18,618 | 18,899 | +0,281 | + 51,00 | 0,00551 | -12 | +0,287 | -0,006 | + 2 | +3,24 |
| 18,618 | 18,898 | +0,280 | + 50,55 | 0,00554 | - 9 | +0,285 | -0,005 | + 3 | +3,24 |
| 18,626 | 18,900 | +0,274 | + 49,32 | 0,00556 | - 7 | +0,278 | -0,004 | + 4 | +4,24 |
| 18,752 | 19,298 | +0,546 | + 97,65 | 0,00559 | - 4 | +0,550 | -0,004 | + 4 | +4,24 |
| 18,776 | 19,287 | +0,511 | + 91,65 | 0,00558 | - 5 | +0,516 | -0,005 | + 3 | +3,24 |
| 18,788 | 19,288 | +0,500 | + 89,50 | 0,00559 | - 4 | +0,504 | -0,004 | + 4 | +4,24 |
| 18,802 | 19,288 | +0,486 | + 88,10 | 0,00552 | -11 | +0,496 | -0,010 | - 2 | -1,76 |
| 18,812 | 19,290 | +0,478 | + 86,25 | 0,00554 | - 9 | +0,486 | -0,008 | 0 | +0,24 |
| 18,834 | 19,963 | +1,129 | +203,30 | 0,00555 | - 8 | +1,145 | -0,016 | - 8 | -7,76 |
| 18,834 | 19,958 | +1,124 | +201,65 | 0,00557 | - 6 | +1,135 | -0,011 | - 4 | -3,76 |
| 18,830 | 19,953 | +1,123 | +201,05 | 0,00558 | - 5 | +1,132 | -0,009 | - 1 | -0,76 |
| 18,829 | 19,939 | +1,110 | +198,30 | 0,00560 | - 3 | +1,116 | -0,006 | + 1 | +1,24 |
| 18,847 | 18,455 | -0,392 | - 68,75 | 0,00570 | + 7 | -0,387 | -0,005 | + 3 | +3,24 |
| 18,848 | 18,455 | -0,393 | - 68,90 | 0,00570 | + 7 | -0,388 | -0,005 | + 3 | +3,24 |
| 18,850 | 18,456 | -0,394 | - 69,25 | 0,00569 | + 6 | -0,390 | -0,004 | + 4 | +4,24 |
| 18,862 | 18,460 | -0,402 | - 70,55 | 0,00570 | + 7 | -0,397 | -0,005 | + 3 | +3,24 |
| 18,867 | 18,465 | -0,402 | - 70,80 | 0,00568 | + 5 | -0,399 | -0,003 | + 5 | +5,24 |

$$\delta_{cp} = 0,00563; \sigma = \sqrt{\frac{\sum \sigma_i^2}{n-1}} = \pm 9 \cdot 10^{-5}; \sum (\Delta T - \Delta T') = -0,372; \sum_{i=1}^{45} d_i = -0,011;$$

$$\sum_{i=1}^{45} d_i' = -0,0002; S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \pm 2 \cdot 10^{-5}$$

Это говорит о том, что принятая нами цена деления для термопары № 6 содержит систематическую погрешность из-за того, что в уравнении термопары (1) постоянная a принималась равной нулю.

Появление постоянного члена a в уравнении (1) может быть вызвано наличием некоторого вертикального градиента температуры в термостате со свободными спаями термопар, и если свободный спай термопары будет смещен относительно середины резервуара термометра даже на небольшую величину, температуры спая термопары и резервуара термометра будут различны.

Для определения постоянных a и δ термопары по результатам наблюдений, приведенным в табл. 1, составлена система из 45 условных уравнений вида $a + N_i \delta_i = \Delta T_i$, решение которых по способу наименьших квадратов [2] дает возможность получать следующую систему двух нормальных уравнений:

$$\begin{aligned} 45 a - 658,33\delta &= -4,078 \\ + 955643,71\delta &= 5388,889, \end{aligned}$$

решив которые мы получим значения неизвестных

$$a = -0,0083; \delta = +0,005633$$

и их весовые коэффициенты

$$P_a = 44,55; \quad P_\delta = 946012,63.$$

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений будет:

$$\sigma = \sqrt{\frac{[d'd']}{n-q}} = \pm 0,005,$$

где n — число уравнений;

q — число неизвестных.

После подстановки найденных значений a и δ в левую часть условных уравнений получим разность температур между свободным и рабочим спаями термопары, т. е. $\Delta T''$, по показаниям термопары.

Сравнивая разности температур ΔT и $\Delta T''$, измеренные двумя путями: по термометрам и по термопарам, можно определить погрешность измерения температуры термопарами.

Разности

$$\Delta T - \Delta T'' = d_i$$

являются истинными погрешностями разности двух равнозначных измерений, и при достаточно большом числе пар измерений

$$\sum d_i = 0.$$

В нашем случае $\sum d_i = -0,011$.

Среднее значение остаточных систематических погрешностей равно

$$\Theta = \frac{[d]}{n} = \frac{-0,011}{45} = -0,00024,$$

и, подсчитав значения $d_i - \Theta = d'_i$, получим вероятнейшие погрешности разностей, избавленные от влияния систематических погрешностей.

Среднюю квадратичную погрешность одного измерения, вычисленную по разностям двойных измерений, равную

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{[d'd']}{2(n-1)}} = \sqrt{\frac{1085,864}{2(45-1)}} \cdot 10^{-3} = \pm 0,0035,$$

можно рассматривать как погрешность измерения температуры с помощью термомпары.

В табл. 2 приведены результаты градуировки термомпар за несколько лет.

Таблица 2

| № термомпары | Цена деления шкалы гальванометра по годам | | | | | | |
|--------------|-------------------------------------------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | 1950 | 1951 | 1952 | 1953 | 1954 | 1955 | 1957 |
| 1 | 0,0054 | 0,00547 | 0,00556 | 0,00556 | 0,00524 | 0,00558 | 0,00562 |
| 2 | 0,0053 | 0,00539 | 0,00553 | 0,00546 | 0,00517 | 0,00551 | 0,00554 |
| 3 | 0,0056 | 0,00537 | 0,00554 | Ремонт | 0,00619* | 0,00641 | 0,00668 |
| 4 | 0,0053 | 0,00540 | 0,00554 | 0,00559 | 0,00629* | 0,00645 | 0,00651 |
| 5 | 0,0054 | 0,00536 | 0,00556 | 0,00560 | 0,00552 | 0,00560 | 0,00563 |
| 6 | 0,0054 | 0,00539 | 0,00545 | 0,00553 | 0,00551 | 0,00562 | 0,00563 |
| 7 | 0,0053 | 0,00541 | 0,00534 | 0,00558 | 0,00632* | 0,00644 | 0,00650 |
| 8 | 0,0054 | 0,00532 | 0,00540 | 0,00552 | 0,00635* | 0,00662 | 0,00660 |

* Определения производились после ремонта термомпар.

Многолетние наблюдения показывают, что характеристики термомпар достаточно постоянны, а небольшие изменения цены деления в различные годы носят случайный характер и обусловлены, по всей вероятности, погрешностями градуировок.

Суммарная погрешность измерения температуры дифференциальными термомпарами складывается из погрешностей:

- измерения температуры свободных спаев термомпар в термостате;
- градуировки термомпар;
- отсчетов по шкале гальванометра;
- определения температурных коэффициентов удлинения сличаемых эталонов, а также погрешностей:
- вносимых температурной инерцией рабочих спаев термомпар;
- вызываемых неустойчивостью температурного режима воды в ванне компаратора во время сличения эталонов.

Погрешность измерения температуры свободных спаев термомпар зависит от погрешности поверки термометров и погрешности отсчета по их шкале.

Температура термостата определяется по двум термометрам с ценой делений $0,01^\circ\text{C}$, отсчеты по шкале которых производятся с помощью зрительной трубы с погрешностью σ_t , не более $\pm 0,002^\circ\text{C}$.

Термометры периодически поверяются в лаборатории средних температур ВНИИМ и поправки их известны с точностью до $0,001^\circ\text{C}$.

Отсчеты по термометрам производятся дважды: в начале и в конце каждого приема сличений. Температура свободных спаев термомпар,

таким образом, определяется как среднее из двух отсчетов по двум термометрам, т. е. с погрешностью σ_1 , равной

$$\sigma_1 = \frac{\sqrt{\left(\frac{0,002}{2}\right)^2 + (0,001)^2}}{\sqrt{2}} = \pm 0,001^\circ\text{C}.$$

Как правило, температуры термостата и ванны компаратора близки между собою и отсчет по шкале гальванометра не превышает 100 делений. Поэтому погрешность определения температуры меры из-за неточности определения цены деления термопары не будет превосходить $\pm 0,002^\circ\text{C}$. Наибольшая погрешность при отсчете по шкале гальванометра 250 делений будет $\pm 0,005^\circ\text{C}$.

Температура меры определяется по двум термопарам, поэтому погрешность среднего σ_m будет:

$$\sigma_m = \frac{\pm 0,005}{\sqrt{2}} = \pm 0,004^\circ\text{C}.$$

Этой погрешностью можно пренебречь, если температура свободных и рабочих спаев термопар примерно одинакова. Для этого необходимо хорошее термостатирование помещения.

Отсчет по шкале гальванометра с помощью зрительной трубы производится с погрешностью до $\pm 0,2$ деления и не превышает $\pm 0,5$ деления, что может вызвать погрешность в определении температуры меры не более $\pm 0,003^\circ\text{C}$. Ввиду того, что отсчет по шкале гальванометра производится дважды (при двух положениях переключателя), погрешность уменьшится до $\pm 0,002^\circ\text{C}$.

Так как чувствительность установки 180 дел/град , то для измерения разности температур с точностью $0,001^\circ\text{C}$ точность отсчета по шкале гальванометра должна быть 0,1 деления. Желательно, чтобы чувствительность установки была доведена до $1 \text{ дел}/0,001^\circ\text{C}$.

Определение погрешностей, вносимых температурной инерцией рабочих спаев термопар, потребовало дополнительных опытов.

В большую ванну 4-метрового компаратора, наполненную водой с температурой, близкой к комнатной, была помещена термопара № 2. Термопару № 1 сначала помещали во вспомогательный сосуд, температура воды в котором значительно отличалась от температуры воды в ванне компаратора. После отстойки в этом сосуде в течение 2 ч термопару № 1 быстро перекладывали в ванну компаратора, устанавливали рядом с термопарой № 2 и определяли время, через которое термопары № 1 и 2 будут указывать одну и ту же температуру. В ванне компаратора непрерывно перемешивали воду, а отсчеты по шкале гальванометра производили через каждую минуту.

Опыт показал (см. рисунок), что через 4 мин после погружения термопары № 1 в ванну ее температура отличалась от температуры воды не более чем на $0,002 + 0,003^\circ\text{C}$. При различных опытах температура рабочего спая термопары № 1 за 4-ю мин изменялась от 0,01 до $0,05^\circ\text{C}$, т. е. значительно быстрее изменения температуры воды в ванне компаратора, изменяющейся обычно в этих пределах только за 15—20 мин. Это дает право считать, что температурная инерция рабочих спаев термопар не оказывает влияния на точность измерения температуры сличаемых мер.

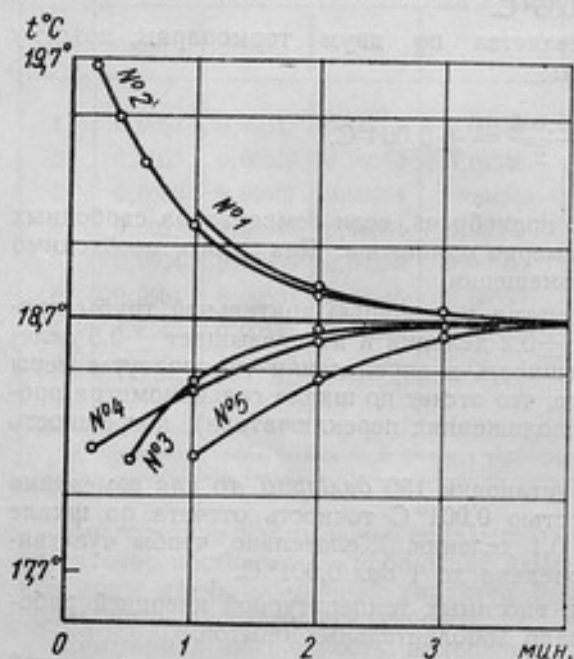
На основании проведенного анализа суммарная погрешность определения температуры меры с помощью термопары будет:

$$\sigma_t = \sqrt{(0,001)^2 + (0,002)^2 + (0,002)^2} = \pm 0,003^\circ\text{C},$$

т. е. практически та же, что была получена по разностям двойных измерений.

Точность определения температуры меры зависит не только от точности измерения ее термопарой, но также и от постоянства температурного режима воды в ванне компаратора.

При отсутствии хорошего термостатирования в помещении во время измерений происходит изменение температуры воды в ванне компаратора и появляются вертикальный и горизонтальный градиенты температуры. При этом существенное влияние на точность определения температуры сличаемых мер будет оказывать тепловая инерция как воды, так и самих мер.



Кривые изменения температуры погружаемой в ванну с водой (\$18,7^\circ\text{C}\$) термопары № 1 при начальной температуре ее \$^\circ\text{C}\$ в опытах:

№ 1 — 35,6°; № 2 — 31,5°; № 3 — 12,6°; № 4 — 15,6°;
№ 5 — 15,8°.

и глубиной 10 мм, в которые были заделаны спаи термопары № 11. По показаниям этой термопары определялась разность внутренней температуры метра на его концах.

Рабочий спай термопары № 10, присоединенный к метру с наружной боковой поверхности на уровне нейтральной плоскости, для термоизоляции от окружающей среды был залит толстым слоем парафина. Свободный спай термопары № 10 был расположен рядом с термопарой № 6, установленной около метра на уровне его нейтральной плоскости. Рядом с термопарой № 6 был установлен также термометр № 13882.

Рабочие спаи термопар № 9 и 12, предназначенные для определения внутренней температуры метра на его концах, были вставлены в отверстия метра, а их свободные спаи установлены около термопары № 6.

тора и появляются вертикальный и горизонтальный градиенты температуры. При этом существенное влияние на точность определения температуры сличаемых мер будет оказывать тепловая инерция как воды, так и самих мер.

Для определения температурной инерции сличаемых эталонов, а также для сравнения поверхностной и внутренней температуры меры с температурой воды были произведены специальные опыты с одним из метров, имеющим, как и все рабочие эталоны, H-образное сечение.

Для этих опытов были изготовлены вспомогательные дифференциальные термопары № 9, 10, 11 и 12. С обоих концов нейтральной плоскости метра были высверлены отверстия диаметром 1 мм

Термопара № 6 вместе с термопарой № 1 и термометром служила для определения температуры и температурного градиента воды вдоль метра. С помощью термопары № 6 определялась также температура свободных спаев термопар № 9, 10, 12.

Кроме вспомогательных термопар, на метре были закреплены термопары № 2, 3, 4 и 5, служившие вместе с термопарой № 10 для определения наружной температуры метра.

Метр был помещен в большую ванну 4-метрового компаратора, наполненную водой с температурой около 10° С.

Таблица 3

| № опыта | Время отсчета, ч и мин | t_B | t_A | t_B | Δt_{AB} | $\Delta t_{\text{№ 11}}$ | $t_{\text{ин}}$ | $t_B - t_{\text{ин}}$ | Примечание |
|---------|------------------------|--------|--------|--------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 16-30 | 11,854 | 11,837 | 11,828 | +0,009 | +0,010 | 11,832 | +0,022 | За 10 мин до начала опыта включены печи для подогрева воды и мешалки для перемешивания ее |
| 2 | 16-35 | 12,145 | 12,122 | 12,113 | +0,009 | +0,010 | 12,118 | +0,027 | |
| 3 | 16-40 | 12,296 | 12,274 | 12,269 | +0,005 | +0,010 | 12,272 | +0,024 | |
| 4 | 16-45 | 12,511 | 12,489 | 12,480 | +0,009 | +0,010 | 12,484 | +0,027 | |
| 5 | 16-50 | 12,737 | 12,713 | 12,706 | +0,007 | +0,010 | 12,710 | +0,027 | |
| 6 | 16-55 | 12,902 | 12,880 | 12,871 | +0,009 | +0,010 | 12,876 | +0,026 | |
| 7 | 17-00 | 13,138 | 13,113 | 13,107 | +0,006 | +0,010 | 13,110 | +0,028 | |
| 8 | 17-05 | 13,369 | 13,348 | 13,337 | +0,006 | +0,010 | 13,340 | +0,029 | |
| 9 | 17-10 | 13,540 | 13,524 | 13,509 | +0,015 | +0,007 | 13,516 | +0,024 | |
| 10 | 17-15 | 13,731 | 13,704 | 13,700 | +0,004 | +0,007 | 13,702 | +0,029 | |
| 11 | 17-20 | 13,950 | 13,922 | 13,920 | +0,002 | +0,007 | 13,921 | +0,029 | |
| 12 | 17-25 | 14,144 | 14,115 | 14,112 | +0,003 | +0,007 | 14,114 | +0,030 | |

В табл. 3-5 приняты следующие обозначения:

| | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Температура: воды в ванне | t_B |
| метра внутренняя на конце А | t_A |
| метра внутренняя на конце В | t_B |
| метра внутренняя | $t_{\text{ин}} = \frac{t_A + t_B}{2}$ |
| метра наружная | $t_{\text{нар}}$ |
| воздуха в комнате | $t_{\text{возд}}$ |
| Градиент внутренней температуры метра | $\Delta t_{AB} = t_A - t_B$ |
| То же по измерениям термопарой № 11 | $\Delta t_{\text{№ 11}}$ |
| Разность температуры воды и метра | $t_B - t_{\text{ин}}$ |

Спустя 4 ч после заполнения ванны водой, были включены электропечи для подогрева воды и мешалки для ее перемешивания. Для определения температуры свободных спаев термопар через каждые 5 мин производили отсчеты по шкале гальванометра для термопар № 9, 11 и 12 и отсчет по термометрам. Результаты наблюдений (табл. 3 и 4) показали, что:

1) при нагревании воды в ванне компаратора со скоростью 2° С/ч с такой же скоростью происходит повышение температуры метра;

2) температура метра при повышении температуры воды в ванне компаратора отстает от температуры воды примерно на 0,02 ÷ 0,06° С, что соответствует отставанию по времени на 0,5 ÷ 1,5 мин;

3) внутренняя температура метра на его концах различается примерно на 0,010 ÷ 0,015° С.

Когда температура воды в ванне компаратора была близка к комнатной, печи и мешалки выключали, а измерения температуры воды, наружной и внутренней температуры метра и градиента внутренней

Таблица 4

| № опыта | Время отсчета, ч и мин | t_B | t_A | t_B | Δt_{AB} | $\Delta t_{\text{№ 11}}$ | $t_{\text{ин}}$ | $t_B - t_{\text{ин}}$ | Примечание |
|---------|------------------------|--------|--------|--------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 11—55 | 16,226 | 16,207 | 16,189 | -0,018 | -0,011 | 16,198 | +0,028 | За 5 мин до опыта включены печи для подогрева воды и мешалки для перемешивания ее. В 13-00 ч выключены печи, в 13-25 ч выключены мешалки |
| 2 | 12—00 | 16,385 | 16,346 | 16,336 | -0,010 | -0,013 | 16,341 | +0,044 | |
| 3 | 12—05 | 16,550 | 16,501 | 16,485 | -0,016 | -0,013 | 16,493 | +0,057 | |
| 4 | 12—10 | 16,779 | 16,725 | 16,714 | -0,011 | -0,014 | 16,720 | +0,059 | |
| 5 | 12—15 | 16,929 | 16,876 | 16,859 | -0,017 | -0,014 | 16,862 | +0,067 | |
| 6 | 12—20 | 17,129 | 17,072 | 17,057 | -0,015 | -0,014 | 17,064 | +0,065 | |
| 7 | 12—25 | 17,309 | 17,253 | 17,236 | -0,017 | -0,014 | 17,244 | +0,065 | |
| 8 | 12—30 | 17,481 | 17,428 | 17,414 | -0,014 | -0,015 | 17,421 | +0,063 | |
| 9 | 12—35 | 17,689 | 17,632 | 17,616 | -0,016 | -0,014 | 17,624 | +0,065 | |
| 10 | 12—40 | 17,879 | 17,823 | 17,809 | -0,014 | -0,015 | 17,816 | +0,063 | |
| 11 | 12—45 | 18,055 | 17,999 | 17,984 | -0,015 | -0,014 | 17,992 | +0,063 | |
| 12 | 12—50 | 18,237 | 18,181 | 18,165 | -0,016 | -0,015 | 18,173 | +0,064 | |
| 13 | 12—55 | 18,469 | 18,413 | 18,399 | -0,014 | -0,015 | 18,406 | +0,063 | |
| 14 | 15—32* | 19,001 | 18,975 | 18,969 | -0,006 | -0,003 | 18,972 | +0,029* | |
| 15 | 16—26** | 18,934 | 18,939 | 18,931 | -0,008 | -0,001 | 18,935 | -0,001 | |
| 16 | 17—15* | 18,962 | 18,961 | 18,935 | -0,026 | -0,019 | 18,948 | +0,014 | |
| 17 | 17—49** | 18,968 | 18,971 | 18,961 | -0,010 | -0,001 | 18,966 | +0,002 | |

* Отсчеты температуры производились без предварительного перемешивания воды в ванне.
** Отсчеты температуры производились после перемешивания воды в ванне 3 мин.

температуры по концам метра продолжали еще в течение нескольких дней. Результаты наблюдений приведены в табл. 5.

Эти наблюдения показали следующее:

1. Наружная температура метра, как правило, не равна его внутренней температуре: наблюдались разности температур от 0,004 до 0,052° С.

2. Наружная температура метра, измеренная с помощью термомпар № 2, 3, 4 и 5, закрепленных на нем, ближе к температуре воды в ванне компаратора, чем его внутренняя температура. Следовательно, на показаниях термомпар сказывается влияние температуры воды. Для исключения влияния окружающей среды закрепленные на мере термомпары должны быть лучше изолированы от этой среды.

3. Наружная температура метра после перемешивания воды в ванне становится ближе к его внутренней температуре и отличается от нее в течение 15—20 мин после перемешивания воды не более чем на 0,003 ÷ 0,010° С.

4. Градиент внутренней температуры метра после перемешивания воды в ванне компаратора не превышает 0,01° С.

5. Если температура воды в ванне компаратора близка к комнатной, изменение температуры меры и воды в ванне в течение 15—20 мин после перемешивания воды не превышает 0,01° С.

При сличении эталонов температура по термомпаре отсчитывается дважды, приблизительно одновременно с отсчетами по микроскопам. Если отсчеты температуры симметричны относительно сличения мер, то изменение температуры воды и меры за период наблюдения не вносит ошибок. При 5-минутном отклонении от этой симметричности может

Таблица 5

| № опыта | Дата | Время отсчета, ч и мин | t_n | $t_{ан}$ | $t_{пар}$ | $\Delta t_{\% 11}$ | $t_n - t_{ан}$ | $t_n - t_{пар}$ | $t_{пар} - t_{ан}$ |
|---------|--------|------------------------|--------|----------|-----------|--------------------|----------------|-----------------|--------------------|
| 1 | 8/III | 9—32 | 19,028 | 19,004 | 19,029 | -0,009 | +0,024 | -0,001 | +0,025 |
| 2 | 8/III | 10—59 | 19,024 | 19,014 | 19,026 | -0,002 | +0,010 | -0,002 | +0,012 |
| 3 | 8/III | 11—52 | 19,038 | 19,029 | 19,039 | -0,002 | +0,009 | -0,001 | +0,010 |
| 4 | 8/III | 12—54 | 19,060 | 19,055 | 19,061 | -0,003 | +0,003 | -0,001 | +0,006 |
| 5 | 8/III | 15—46 | 19,650 | 19,620 | 19,656 | -0,013 | +0,030 | -0,006 | +0,036 |
| 6 | 8/III | 16—48 | 19,624 | 19,618 | 19,622 | -0,003 | +0,006 | +0,002 | +0,004 |
| 7 | 9/III | 9—26 | 19,594 | 19,574 | 19,589 | +0,003 | +0,020 | +0,005 | +0,015 |
| 8 | 11/III | 9—32 | 20,011 | 19,984 | 20,006 | -0,003 | +0,027 | +0,005 | +0,022 |
| 9 | 12/III | 9—47 | 19,703 | 19,671 | 19,693 | -0,005 | +0,032 | +0,010 | +0,022 |
| 10 | 13/III | 9—30 | 17,921 | 17,896 | 17,936 | -0,007 | +0,025 | -0,015 | +0,040 |
| 11 | 13/III | 13—51 | 19,548 | 19,520 | 19,572 | -0,055 | +0,028 | -0,024 | +0,052 |
| 12 | 13/III | 15—33 | 19,492 | 19,482 | 19,491 | +0,003 | +0,010 | +0,001 | +0,009 |

Отсчеты температуры производились:
 № 1 — без предварительного перемешивания воды в ванне;
 № 2 — после перемешивания 10 мин (10 ч 08 мин — 10 ч 18 мин);
 № 3 — сразу после перемешивания 3 мин;
 № 4 — при постоянном перемешивании;
 № 5 — после отстойки 2 ч без перемешивания;
 № 6 — сразу после перемешивания 8 мин;
 № 7—11 — без перемешивания воды после ночного перерыва;
 № 12 — сразу после перемешивания 2 мин.

быть внесена в температуру меры погрешность порядка $0,003^\circ\text{C}$. Тогда из-за неустойчивости температурного режима воды в ванне общая погрешность определения температуры меры будет:

$$\sigma_c = \sqrt{(0,010)^2 + (0,003)^2} = \pm 0,010^\circ\text{C}.$$

Эта погрешность по своей величине — наибольшая из всех погрешностей при измерении температуры.

Для определения тепловой инерции ванны компаратора, наполненной водой, произведено специальное исследование с целью выяснения, как меняется температура воды в ванне в зависимости от изменения температуры воздуха в помещении. В помещении были включены электропечь для подогрева воздуха, два вентилятора для перемешивания воздуха и произведен ряд измерений температуры воздуха, воды в ванне компаратора и внутренней температуры на концах метра. Перед каждым отсчетом по термомпарам воду в течение 3 мин перемешивали.

Из приведенных в табл. 6 результатов наблюдений следует:

1. При нагревании воздуха в помещении со средней скоростью $0,6 \text{ град/ч}$ происходит повышение температуры воды со средней скоростью $0,055 \text{ град/ч}$.

Таблица 6

| № опыта | Время отсчета, ч и мин | $t_{\text{возд}}$ | $t_{\text{в}}$ | $t_{\text{А}}$ | $t_{\text{В}}$ | $\Delta t_{\text{АВ}}$ | $t_{\text{вн}}$ | $t_{\text{в}} - t_{\text{вн}}$ |
|---------|------------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 1 | 11—40 | 19,3 | — | — | — | — | — | — |
| 2 | 12—21 | 20,0 | 19,357 | 19,356 | 19,343 | -0,013 | 19,350 | +0,007 |
| 3 | 12—40 | 20,4 | 19,361 | 19,358 | 19,350 | -0,008 | 19,354 | 0,007 |
| 4 | 13—04 | 21,4 | 19,372 | 19,368 | 19,356 | -0,012 | 19,362 | +0,010 |
| 5 | 13—24 | 21,6 | 19,385 | 19,379 | 19,373 | -0,006 | 19,376 | +0,009 |
| 6 | 13—56 | 21,9 | 19,406 | 19,400 | 19,393 | -0,007 | 19,396 | +0,010 |
| 7 | 14—34 | 22,0 | 19,436 | 19,431 | 19,425 | -0,006 | 19,428 | +0,008 |
| 8 | 14—58 | 22,1 | 19,468 | 19,466 | 19,461 | -0,005 | 19,464 | +0,004 |
| 9 | 15—25 | 22,1 | 19,493 | 19,491 | 19,484 | -0,007 | 19,488 | +0,005 |
| 10 | 15—56 | 22,4 | 19,527 | 19,526 | 19,518 | -0,008 | 19,522 | +0,005 |
| 11 | 16—19 | 22,6 | 19,555 | 19,554 | 19,546 | -0,008 | 19,550 | +0,005 |
| 12 | 16—39 | 22,7 | 19,571 | 19,569 | 19,561 | -0,008 | 19,565 | +0,006 |
| 13 | 17—08 | 23,8 | 19,613 | 19,612 | 19,606 | -0,006 | 19,609 | +0,004 |
| 14 | 17—30 | 23,0 | 19,629 | 19,628 | 19,622 | -0,006 | 19,625 | +0,004 |
| 15 | 17—48 | 23,1 | 19,658 | 19,657 | 19,650 | -0,007 | 19,654 | +0,004 |
| Среднее | | | | | | -0,0076 | — | 0,0063 |

Во время опыта печи и вентиляторы включены.

Таким образом, если температура воздуха в помещении изменится на 1° и далее не будет меняться в течение длительного времени, то только через 18 ч температура воды в ванне компаратора будет равна температуре воздуха. Это может служить характеристикой тепловой инерции ванны компаратора, наполненной водой.

2. При нагревании воды в ванне компаратора со средней скоростью $0,06 \text{ град/ч}$ с такой же примерно скоростью происходит и повышение температуры метра.

3. Температура метра при повышении температуры воды со средней скоростью $0,06 \text{ град/ч}$ отстает от температуры воды примерно на $0,006^{\circ}\text{C}$, что соответствует отставанию по времени примерно 6 мин.

4. Внутренняя температура метра на его концах различается примерно на $0,008^{\circ}\text{C}$.

В результате температурных исследований были определены следующие значения температурных погрешностей ($^{\circ}\text{C}$):

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| а) определения температуры свободных спаев термопар | $\pm 0,001$ |
| б) вызываемая неточностью градуировки термопар | $\pm 0,002$ |
| в) вносимая инерцией термопар | $\pm 0,000$ |
| г) отсчета по шкале гальванометра | $\pm 0,002$ |
| д) вносимая неустойчивостью температурного режима воды в ванне компаратора | $\pm 0,010$ |

Суммарная погрешность определения температуры сличаемых эталонов с помощью дифференциальных термодпар при нестабильном режиме температуры в помещении будет

$$\sigma_c = \sqrt{1^2 + 2^2 + 2^2 + 10^2} \cdot 10^{-3} = \pm 0,010^\circ\text{C}.$$

Результат сличения двух мер определяется как среднее из двух серий наблюдений по 5—8 приемов в каждой серии. Поэтому погрешность определения средней температуры сличаемых эталонов не превышает $\pm 0,005^\circ\text{C}$.

Для дальнейшего повышения точности определения температуры сличаемых эталонов необходимо термостатировать помещение компаратора с постоянством температуры хотя бы в пределах $\pm 0,25^\circ\text{C}$. Это даст возможность снизить наибольшую погрешность, вызываемую температурным режимом, до $0,005^\circ\text{C}$ и тогда суммарная погрешность будет равна $\pm 0,006^\circ\text{C}$, или для средней температуры серии из 8 приемов она будет $\pm 0,002^\circ\text{C}$.

К погрешностям температурного характера можно отнести погрешность, вызываемую неточностью значений температурных коэффициентов удлинения, принимаемых при приведении длин эталонов к температуре 0 или 20°C . Сличения эталонов могут производиться при комнатной температуре, колеблющейся в пределах $17 \div 21^\circ\text{C}$, поэтому эта погрешность будет иметь большую величину, когда мы имеем дело с эталонами, длина которых должна быть отнесена к температуре 0°C .

В настоящее время за нормальную принята температура 20°C , и уравнение для длины большинства эталонов, в том числе и для новых, приводится к этой температуре. Поэтому при расчете погрешностей мы будем принимать наибольшее возможное отличие температуры наблюдения от нормальной температуры 20°C равным $\pm 3^\circ\text{C}$.

Определим возможную величину рассматриваемой погрешности. Результаты наблюдений приводятся к нормальной температуре t_0 по формуле

$$l_0 = l_t - l_t [\alpha + \beta (t - t_0)] (t - t_0), \quad (3)$$

где l_0 — длина меры при нормальной температуре t_0 ;

l_t — длина меры при температуре измерений;

α, β — температурные коэффициенты удлинения, причем значение α должно быть отнесено к температуре t_0 .

Так как определение температурных коэффициентов α и β , как правило, производится по результатам одних и тех же наблюдений и для всей длины метра, то для упрощения расчетов формулу (3) напомним в виде:

$$l_0 = l_t - \bar{\alpha} (t - t_0), \quad (4)$$

где

$$\bar{\alpha} = \alpha + \beta (t - t_0). \quad (5)$$

Приведение измеренной длины l_t к температуре t_0 будет сопровождаться погрешностью

$$\sigma_t = (t - t_0) \sigma_{\bar{\alpha}}.$$

Если мы хотим, чтобы погрешность σ_t не превосходила $\pm 0,02$ мм, должно выполняться неравенство

$$(t - t_0) \sigma_{\bar{\alpha}} \leq 0,02.$$

Возвращаясь к равенству (5), мы можем написать

$$\sqrt{\sigma_a^2 + (t - t_0)^2 \sigma_p^2} < \frac{\pm 0,02}{t - t_0}.$$

При приведении длины эталона к нормальной температуре 20° С или к температуре 0° С должны выполняться соответственно неравенства: при приведении к температуре 20° С

$$\sqrt{\sigma_a^2 + 9\sigma_p^2} < \frac{\pm 0,02}{3} = 0,007;$$

при приведении к температуре 0° С

$$\sqrt{\sigma_a^2 + 400\sigma_p^2} < \frac{\pm 0,02}{20} = 0,001. \quad (6)$$

В настоящее время компараторные измерения при тщательной подготовке и рациональной программе наблюдений могут обеспечить определение значений температурных коэффициентов с погрешностью $\pm 0,01 \cdot 10^{-6}$ для α и $\pm 0,0001 \cdot 10^{-6}$ для β . При неблагоприятных условиях эти погрешности могут соответственно возрасти до $\pm 0,03 \cdot 10^{-6}$ для α и до $\pm 0,001 \cdot 10^{-6}$ для β .

Подставляя значения этих погрешностей в левую часть первого неравенства (6), будем иметь

$$\sigma = \sqrt{(0,01)^2 + 9(0,0001)^2} \cdot 10^{-6} = \pm 0,01 \cdot 10^{-6}.$$

Таким образом, даже в настоящее время, когда длина эталона в большинстве случаев относится к нормальной температуре 20° С, значения температурных коэффициентов должны определяться с большей точностью, чем это имеет место сейчас.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каяк Л. К., Об усовершенствовании методов сличения эталонов длины, Труды ВНИИМ, вып. 20 (80), 1953.
2. Чеботарев А. С., Способ наименьших квадратов с основами теории вероятностей, Геодиздат, 1958.

Поступила в редакцию
19/V 1959 г.

Е. П. АЛЕКСЕЕВА, О. Ю. ШОШИНА
ВНИИМ

СЛИЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ УСТАНОВОК ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

В статье приводятся результаты сличений интерференционных установок институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов.

С целью поддержания единства интерференционных измерений длины в стране ВНИИМ ежегодно проводит сличения интерференционных установок всех институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, на которых производятся измерения длины образцовых концевых мер 1-го разряда до 100 мм абсолютным интерференционным методом. Эти сличения обеспечивают контроль за правильностью интерференционных измерений длины концевых мер.

При сличении интерференционных установок институты Комитета производят измерения плоскопараллельных концевых мер длины на своих измерительных установках, после чего эти результаты сравниваются с результатами измерений этих же мер на интерференционной установке ВНИИМ.

Меры, выделяемые для сличений, должны быть стабильны во времени и иметь притираемость, плоскостность и параллельность измерительных поверхностей, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к образцовым мерам 1-го разряда. С помощью только таких мер можно установить действительное состояние сличаемых интерференционных установок и условий, в которых проводятся измерения.

Интерференционная установка ВНИИМ, на которой производятся измерения плоскопараллельных концевых мер длиной до 100 мм в длинах световых волн, находится в специальном термостатированном помещении. Изменения температуры в этом помещении не превышают $0,1^{\circ}\text{C}$ за 8 ч, что дает возможность в течение длительного времени поддерживать равенство температур меры и прибора.

Установка состоит из интерференционного компаратора системы Кестерса, источника света, чашечного ртутного барометра (точность отсчета 0,1 мм рт. ст.) и термометра к нему (цена деления 1°C), психрометра и дифференциальной термопары медь-константан, применяемой с ртутным термометром (цена деления $0,01^{\circ}\text{C}$) и с зеркальным гальванометром (вольтная чувствительность порядка $2,4 \cdot 10^{-6}$ в и внутреннее

сопротивление порядка 20 ом). В качестве источника света при сличении используются газосветные лампы с естественным криптоном, изготовленные заводом «Эталон». Измерения производятся в четырех спектральных линиях, длины волн которых при $t = 20^\circ \text{C}$, давлении 760 мм рт. ст. и упругости водяного пара 10 мм рт. ст. принимались равными:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 0,64563241 \text{ мк} \\ \lambda_2 &= 0,58709463 \text{ " } \\ \lambda_3 &= 0,56495924 \text{ " } \\ \lambda_4 &= 0,45023790 \text{ " }\end{aligned}$$

Поправку a на показатель преломления вычисляют по формуле Перара

$$a = (-0,361\Delta B + 0,938\Delta t + 0,054\Delta e) \cdot 10^{-3}L,$$

где $\Delta B = B - 760$; $\Delta t = t - 20$; $\Delta e = e - 10$;

L — длина меры в мм.

Термопары предназначены для измерения разности температур концевой меры и термометра. Один спай термопары специальным зажимом прикрепляют к поверхности измеряемой меры, другой спай присоединяют к кольцу из красной меди, свободно охватывающему среднюю часть резервуара термометра, помещенного в сосуд Дьюара, наполненный трансформаторным маслом.

Постоянная термопары в среднем равна $0,0055^\circ \text{C}$. Она определяется периодически проводимой градуировкой с предельной погрешностью $0,0003^\circ \text{C}$ и сохраняет свое значение из года в год в пределах точности ее определения. Поправки термометра определены с погрешностью $\pm 0,001^\circ \text{C}$ в лаборатории средних температур ВНИИМ. Температура меры измеряется с предельной погрешностью $\pm 0,003^\circ \text{C}$.

Институты Комитета имеют почти аналогичные установки, но температурные условия проведения измерений в некоторых из них менее удовлетворительны, чем во ВНИИМ.

До начала сличений проверяется правильность юстировки интерферометров в соответствии с требованиями, установленными инструкцией № 75—50 для поверки плоскопараллельных концевых мер длины 1-го разряда абсолютным интерференционным методом.

В первом сличении, проведенном в 1939—1940 гг., приняли участие лаборатории ВНИИМ, ВНИИК, ХГИМИП и поверочная лаборатория Ленинградского управления.

Программа этого сличения состояла в том, что стальные концевые меры каждого института (всего 16 мер) номинальной длиной 5, 20, 75, 100 мм последовательно измеряли все участники сличения. В каждом институте определяли коэффициенты температурного удлинения всех мер, их оптическую длину и поправки на разнородность измерительных поверхностей концевой меры и вспомогательной пластины, к которой она притерта. Однако такая программа оказалась слишком громоздкой и трудоемкой, поэтому, начиная с 1945 г., сличения интерференционных установок проводили по более простой программе. В них приняли участие ВНИИМ, ВНИИК, ХГИМИП, Свердловский филиал ВНИИМ, поверочная лаборатория Ленинградского управления, а с 1953 г. — и НГИМИП.

Новая программа сличений предусматривала выполнение измерений на интерференционной установке каждого института только одного ком-

плекта принадлежащих ему стальных концевых мер номинальной длиной 100, 50, 20 и 5 мм. Измерения этих мер производили в условиях, предусмотренных инструкцией для поверки плоскопараллельных концевых мер 1-го разряда абсолютным интерференционным методом. В каждом институте Комитета производили два измерения оптической длины меры — по одному измерению при каждом из двух притираний ее к одной и той же вспомогательной пирексовой или кварцевой пластине.

Во ВНИИМ для установления значений оптических длин этих же мер с более высокой точностью, производили их многократные измерения. Кроме того, определяли температурные коэффициенты удлинения всех мер. Значения длин концевых мер, полученные при измерениях во ВНИИМ и в институтах Комитета, приводили к температуре 20° С, пользуясь значениями этих коэффициентов.

Подобные ежегодные сличения позволяли следить за состоянием интерференционных установок институтов Комитета.

В более поздние годы сличения проводились по мерам номинальной длины 100 мм, так как при измерениях мер такой длины можно выявить достаточно полно недостатки условий измерений и состояние интерференционных установок.

При проведении сличений в 1957 и 1959 гг. было решено не только получить и оценить величину расхождений в показаниях интерференционных установок институтов Комитета и ВНИИМ, но также определить величины погрешностей результатов измерений, получаемых на интерференционных установках институтов Комитета, и произвести их сравнительную оценку. Величины погрешностей не могли быть определены по двум измерениям, производимым до сих пор в институтах Комитета, и, кроме того, не могли быть сравнимы и объективно оценены при применении в сличениях разных по качеству мер и пластин. Поэтому было решено провести круговое сличение с многократными измерениями мер и в институтах Комитета.

При круговом сличении изученные в течение ряда лет во ВНИИМ меры номинальной длины 100 и 50 мм, изготовленные заводом «Калибр», и вспомогательные кварцевые пластины к ним поочередно пересылали каждому институту. Измерения меры производили при температуре, близкой к 20° С, по 8—10 раз при каждом из двух притираний меры к кварцевой пластине. На основании этих многократных измерений определяли предельную погрешность результата измерения, которая характеризовала состояние самой установки и условий, в которых производили измерения концевых мер в каждом институте.

Во ВНИИМ меры измеряли дважды: перед отправкой их в институты Комитета и после их возвращения, причем, как и в предыдущие годы, в результате многократных измерений определяли значения оптической длины мер при температуре 20° С, а также значения их температурных коэффициентов удлинения.

Измерение одной и той же меры, притираемой к одной и той же пластине, при применении лампы одной конструкции на всех интерференционных установках поставило все институты в равные условия. Только различие в температурных режимах при измерениях, в состоянии интерферометров и вспомогательных приборов сличаемых установок могло обуславливать различную величину погрешности измерения меры.

В 1958 г. сличения интерференционных установок проводили по прежней программе, когда условия измерений соответствуют обычным условиям поверки концевых мер 1-го разряда.

При проведении проверок сличений интерферометров по этой программе одновременно с проверкой состояния интерференционных установок,

выявлялась точность выполнения институтами Комитета требований инструкции для поверки плоскопараллельных концевых мер длины абсолютным интерференционным методом.

В 1954 г. во ВНИИМ были изготовлены, а в течение последующих лет исследованы меры из плавленного кварца. Они находятся на постоянном оптическом контакте со вспомогательными плоскими пластинами, изготовленными из того же материала, с тем же качеством обработки, что и измерительные поверхности мер. В результате многократных измерений были определены действительные значения их длин. Кроме того, периодически определяли значения их температурных коэффициентов удлинения.

Таблица 1

| Годы сличений | Действительная длина рабочих эталонов из плавленного кварца при $t = 20^\circ \text{C}$ | | | | |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | № 1 | № 2 | № 3 | № 4 | № 5 |
| 1954 | — | — | — | 100 мм + + 1,85 ₈ мк | — |
| 1955 | 100 мм + + 0,84 ₇ мк | 100 мм + + 0,98 ₃ мк | — | + 1,86 ₀ мк | — |
| 1956 | + 0,85 ₇ мк | + 0,97 ₅ мк | 100 мм + + 0,88 ₁ мк | + 1,86 ₁ мк | 100 мм + + 1,92 ₀ мк |
| 1957 | + 0,83 ₅ мк | + 0,97 ₅ мк | + 0,88 ₁ мк | + 1,86 ₁ мк | + 1,93 ₀ мк |
| 1958 | + 0,83 ₆ мк | + 0,93 ₃ мк | + 0,85 ₃ мк | + 1,85 ₃ мк | + 1,91 ₆ мк |
| 1959 | + 0,84 ₄ мк | + 0,97 ₁ мк | + 0,87 ₉ мк | + 1,86 ₀ мк | + 1,92 ₃ мк |

Исследования этих мер (табл. 1) показали, что изменения их длин за 5 лет не превысили предельной погрешности их измерения, т. е. $\pm 0,02$ мк. Высокая стабильность мер из плавленного кварца, малая величина температурного коэффициента их удлинения и постоянный контакт со вспомогательной пластиной обуславливают более высокую точность измерения таких мер по сравнению со стальными. В 1956 г. Ученый совет ВНИИМ утвердил кварцевые меры с номинальной длиной в 100 мм в качестве рабочих эталонов.

Начиная с 1955 г., ВНИИМ предоставляет институтам Комитета для проведения сличения интерференционных установок по одному кварцевому эталону, который многократно измеряется на их установках. Во ВНИИМ кварцевые меры измеряются каждый раз перед посылкой их в институты Комитета и после их возвращения.

Определение значений температурных коэффициентов удлинения концевых мер

При приведении значений длины стальных концевых мер 1-го разряда, измеренных при различных температурных условиях, к значениям при 20°C принято пользоваться температурным коэффициентом, равным $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Таблица 2

| Годы слесечтий | Обозначения | Наименование мер | | | | | | | | | | Меры из плат. катал. | | | | | | | | | |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | Питер (ХИМИП) | Иогансон № 41161 (ВНИИХ) | «Калибр» (Серебряно- ский фонд д.д. ВНИИМ) | Цехов (по- вторная лаборато- рия Ленин- градского гравального управления) | «Калибр» (НГМИИП) | «Калибр» мера № 5 (ВНИИМ) | «Калибр» мера № 51 (ВНИИМ) | «Калибр» мера № 2 (ВНИИМ) | Иогансон (ИНИИП) | «Калибр» (ХИМИП) | Меры из плат. катал. | Меры из плат. катал. | Меры из плат. катал. | Меры из плат. катал. | Меры из плат. катал. | Меры из плат. катал. | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | Стальные меры | Меры из плат. катал. | Меры из плат. катал. | Меры из плат. катал. |
| 1952 | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ $S\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ к, °С п | 12,04 | 11,84 | 12,46 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | | |
| | | 0,01 | 0,06 | 0,08 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | |
| | | 7,7 | 5,8 | 6,6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | |
| 1953 | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ $S\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ к, °С п | — | — | — | 12,7 | 12,7 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | |
| | | — | — | — | 0,25 | 0,10 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | |
| | | — | — | — | 3 | 6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | |
| 1954 | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ $S\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ к, °С п | 12,08 | 11,88 | 12,44 | 12,55 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | |
| | | 0,08 | 0,08 | 0,10 | 0,17 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | |
| | | 6,2 | 6,2 | 6,5 | 6,7 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | |
| 1956 | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ $S\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ к, °С п | 12,06 | 11,85 | 12,31 | 12,51 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | |
| | | 0,06 | 0,13 | 0,09 | 0,09 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | |
| | | 7,7 | 5 | 7,6 | 6,3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | |
| 1957 | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ $S\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ к, °С п | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | |

В действительности значение температурного коэффициента мер может значительно отличаться от указанного, так как ОСТ 85000—39, устанавливающий требования на изготовление концевых мер длины, допускал изменение значения коэффициентов температурного удлинения для материала концевых мер в пределах $10,5 \div 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Такая неточность значения коэффициента при отклонениях $\pm 0,2^\circ$ от нормальной температуры (20°C), допускаемых инструкцией 75—50 при поверке концевых мер 1-го разряда, вызовет погрешность в определении длины меры, равную $\pm 0,2 \cdot 10^{-6} l$. Знание действительного значения температурного коэффициента удлинения с более высокой точностью позволит значительно уменьшить погрешность приведения значения длины меры к $t = 20^\circ \text{C}$. Поэтому во ВНИИМ определяют действительное значение температурного коэффициента удлинения для всех мер, впервые применяемых в сличениях, и периодически для мер, повторно участвующих в сличениях, для выяснения постоянства значения температурного коэффициента удлинения меры и точности метода его определения.

Для определения значения температурного коэффициента α производят многократные ($n = 10 \div 20$) измерения оптической длины l_t меры абсолютным методом на интерференционной установке ВНИИМ при различных температурах, равномерно распределенных в температурном интервале $16,5 \div 23,5^\circ \text{C}$. Каждое измерение производили после выравнивания температуры меры на интерферометре с температурой воздуха в термостате с точностью $\pm 0,02 \div 0,03^\circ \text{C}$.

На всем протяжении времени определения коэффициента температурного удлинения все измерения длины меры производили, не нарушая контакта ее с нижней пластиной для исключения влияния его непостоянства на погрешность измерения. Действительное значение коэффициента температурного удлинения α вычисляли, решая систему уравнений вида $l_t = l_{20} + \alpha (t - 20) l$ (где l — номинальная длина меры) по способу наименьших квадратов.

В табл. 2 приведены значения температурных коэффициентов удлинения мер, применяемых при сличениях интерференционных установок институтов Комитета.

Рассматривая данные табл. 2, следует отметить, что:

1) погрешность S_α определения температурных коэффициентов, вычисленная при доверительной вероятности 0,997, в среднем равна $\pm 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Можно считать, что для получения значений температурных коэффициентов удлинения α с такой погрешностью, следует производить 15 \div 20 измерений в интервале температур k , равном не менее 6°C ;

2) повторные определения коэффициентов у одних и тех же мер в разные годы показывают, что значения коэффициентов мер за ряд лет остаются постоянными в пределах точности их определения.

Знание температурного коэффициента удлинения с точностью $\pm 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ позволяет уменьшить температурную погрешность при сличениях, которую для меры 100 мм при этом условии можно принять равной $\pm 0,005 \text{ мк}$ при допустимом отклонении температуры измерения от нормальной на $\pm 0,5^\circ \text{C}$.

Анализ результатов сличения

В табл. 3 приведены значения разностей между результатами измерений 100-миллиметровых стальных мер, полученными при сличении интерференционных установок институтов Комитета и ВНИИМ в 1952—1959 гг.

Таблица 3

| | | Годы случений | | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------------|---------|-------------------------------------|--------|
| | | 1952 | 1953 | 1954 | 1955 | 1956 | 1957 | 1957, круглогодичное случение | 1958 | 1959, круглогодичное случение | |
| Институты Комитета | | Значения разностей, мк | | | | | | | | | |
| ВНИИМ — ХГИМИП | № интерферометра инст-тута Комитета | 80027 | +0,013 | +0,025 | +0,004 | +0,048 | +0,005 | -0,027 | -0,007 | - | +0,009 |
| | | 36407 | +0,033 | +0,067 | +0,041 | - | +0,036 | - | +0,140* | +0,018 | +0,012 |
| ВНИИМ — ВНИИК | | 83713 | +0,021 | +0,086 | +0,035 | +0,048 | +0,044 | +0,057 | - | - | - |
| | | 80024 | - | - | +0,023 | +0,028 | +0,044 | - | - | - | - |
| | | 91104 | - | - | - | - | - | +0,004 | +0,005 | +0,005 | +0,025 |
| ВНИИМ — Свердловский филиал ВНИИМ | | 36408 | +0,092 | +0,033 | -0,027 | - | - | -0,053 | -0,023 | - | - |
| | | 41559 | +0,063 | +0,040 | -0,063 | +0,037 | +0,043 | -0,016 | -0,022 | +0,040 | -0,010 |
| ВНИИМ — НГИМИП | | 41602 | - | +0,054 | -0,001 | -0,064 | +0,005 | - | - | - | - |
| | | 9182 | - | - | - | - | - | +0,011 | -0,015 | -0,044 | - |
| ВНИИМ — поверочная лаборатория Ленинградского управления | | 34373 | -0,055 | -0,016 | +0,009 | +0,016 | +0,035 | +0,009 | -0,002 | +0,009 | - |

* Измерения проводились при условиях, не соответствующих требованиям инструкции.

До 1953 г. при оценке допустимых расхождений между результатами измерений ВНИИМ и институтов Комитета исходили из значения предельных погрешностей определения средней длины мер 1-го разряда по ОСТ 85000—39. Эти расхождения считались допустимыми, если они не превышали величин предельных погрешностей $\Delta_{пр}$, вычисляемых по формуле

$$\Delta_{доп} = \Delta_{пр} = \pm (0,05 + 0,5 \cdot 10^{-3}L) \text{ мк.} \quad (1)$$

В 1953 г. было решено принять новый, более жесткий критерий, а именно считать величину расхождений допустимой, если она удовлетворяет соотношению

$$\Delta_{доп} = \pm 0,67 \Delta_{пр} = \pm 0,67 (0,05 + 0,5 \cdot 10^{-3}L) \text{ мк.} \quad (2)$$

При этом исходили из того, что при двух измерениях одной и той же величины, полученных на двух разных установках, вероятность превышения доверительной границы E одним из измерений равна 0,50.

Для того чтобы ни одно из измерений не выходило за установленные пределы, целесообразно, чтобы доверительная граница соответствовала несколько большей вероятности. Остановились на вероятности 0,6. По таблице Фишера — Стьюдента* при числе измерений, равном 2, и числе степеней свободы, равном 1, вероятности 0,6 соответствует значение $t = 1,376$. Тогда доверительные границы будут определены значением $E = tS$ или $1,376\sigma$.

Отсюда следует, что допустимое расхождение между измерениями на двух интерференционных установках будет равно

$$\begin{aligned} \Delta_{доп} &= \pm 1,376\sigma \sqrt{2} \approx \pm 2\sigma, \\ \Delta_{доп} &= \pm 0,67 \Delta_{пр}, \end{aligned} \quad (3)$$

что для меры 100 мм составляет величину, равную $\pm 0,067$ мк.

На рис. 1 показаны расхождения между результатами измерений во ВНИИМ и институтах Комитета стальных 100-миллиметровых мер. Пунктирными линиями на рисунке показаны допустимые границы расхождений результатов измерений длин мер во ВНИИМ и в институтах Комитета.

Первая допустимая граница соответствует значению предельной погрешности измерения по ОСТ 85000—39, вторая — соответствует допустимым расхождениям, установленным ВНИИМ для сличений в 1953 г.

Из диаграммы видно, что расхождения в результатах измерений за ряд лет во всех институтах Комитета не превышают предельной погрешности $\pm 0,1$ мк, за исключением одного результата, полученного на интерференционной установке ВНИИК при круговом сличении в 1957 г.

Вторая допустимая граница нарушалась в Свердловском филиале ВНИИМ в 1952 г. и во ВНИИК в 1953 г. из-за непостоянства теплового режима при измерениях в этих институтах.

Расхождения между ВНИИМ и ХГИМИП лежат в значительно более узких границах, чем для других институтов Комитета, что свидетельствует о хорошей постановке измерений в ХГИМИП.

*. Романовский В. И., Основные задачи теории ошибок, Гостехиздат, 1947.

При удовлетворительности результатов сличения ВНИИМ выдает институтам свидетельства о пригодности их интерференционных установок для поверки плоскопараллельных концевых мер 1-го разряда длиной до 100 мм абсолютным методом.

В случае, если расхождения между результатами измерения ВНИИМ и каким-либо институтом превысили допустимую величину, свидетельство не выдается, а институту предлагается в определенный срок привести в должное состояние свою установку, после чего производится повторное сличение.

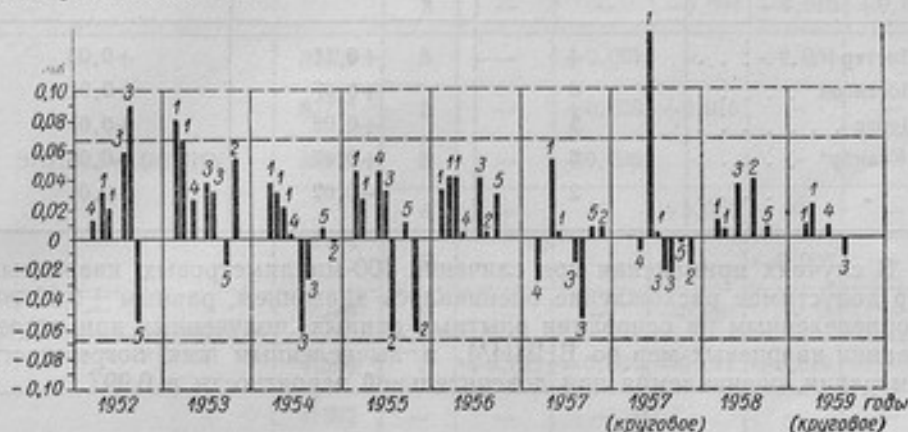


Рис. 1. Разности результатов измерений 100-миллиметровых стальных мер во ВНИИМ и в институтах Комитета.

1 — ВНИИМ; 2 — НГИМИП; 3 — Свердловский филиал ВНИИМ; 4 — ХГИМИП; 5 — поверочная лаборатория Ленинградского управления.

Накопленные при проведении сличений результаты измерений дают возможность произвести оценку погрешностей определения длин концевых мер с целью выяснения возможности установить новые границы для допустимых расхождений. Результаты измерения стальных концевых мер до 100 мм абсолютным интерференционным методом показали, что в условиях сличений, когда сравнивают оптические длины мер, постоянный член в формуле предельной погрешности может быть уменьшен до 0,02 мк. Что касается второго члена этой формулы, зависящего от длины, то и он также может быть несколько уменьшен. В случае, когда известен температурный коэффициент удлинения мер с точностью до $\pm 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, температурная погрешность, как это указывалось выше, не превысит 0,005 мк на 100 мм. Наибольшая величина нестабильности стальных мер номинальной длиной 100 мм за время проведения сличений (3 мес.), как это видно из табл. 4, может быть принята равной 0,02 мк.

Учитывая и другие погрешности измерения, зависящие от длины меры (неточность источника света, поправки на длину волны и т. п.), формулу предельной погрешности в условиях сличения можно представить в виде

$$\Delta_{\text{пр}} = \pm (0,02 + 0,4 \cdot 10^{-3}L) \text{ мк.} \quad (4)$$

Тогда может быть предложена новая величина допустимого расхождения при сличении интерференционных установок, вычисляемая по следующей формуле

$$\Delta_{\text{доп}} = \pm 0,67 (0,02 + 0,4 \cdot 10^{-3}L) \text{ мк.} \quad (5)$$

Для мер номинальной длиной 100 мм эта величина составит $\pm 0,04$ мк, что вполне согласуется с теми расхождениями, которые были получены за последние годы при сличениях интерференционных установок.

Таблица 4

| Завод-изготовитель или фирма | Продолжительность наблюдения, лет | Изменение длины меры за этот период, мк | Среднее изменение длины меры за 1 год, мк |
|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|
| Питтер | 4 | +0,11 | +0,03 |
| Югансон | 6 | +0,07 | +0,01 |
| Цейсс | 5 | +0,08 | +0,01 |
| „Калибр“ | 6 | +0,47 | +0,08 |
| „ | 2 | -0,02 | -0,01 |

В случаях применения при сличении 100-миллиметровых кварцевых мер допустимое расхождение оценивалось значением, равным $\pm 0,02$ мк и определенным на основании опытных данных, полученных при исследовании кварцевых мер во ВНИИМ, и вычисленным как погрешность измерения, оцениваемая при доверительной вероятности в 0,997.

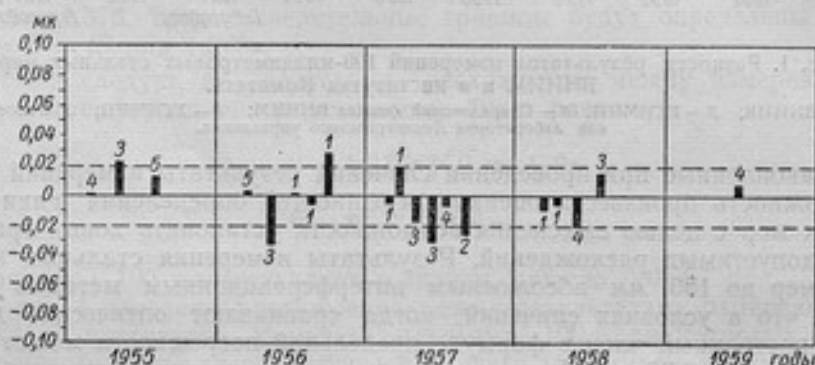


Рис. 2. Разности результатов измерений 100-миллиметровых кварцевых мер во ВНИИМ и в институтах Комитета.
1 — ВНИИМ; 2 — НГИМИП; 3 — Свердловский филиал ВНИИМ; 4 — ХГИМИП; 5 — поверочная лаборатория Ленинградского управления.

Результаты сличений кварцевых мер приведены в табл. 5 и на рис. 2. Из этих данных видно, что расхождения при сличениях интерференционных установок с помощью кварцевых мер для всех институтов Комитета меньше, чем при применении стальных мер, и что они в большинстве случаев не превышают установленные границы.

Систематически наблюдаемый отрицательный знак расхождений на какой-либо интерференционной установке указывает на наличие односторонней погрешности, которая может быть вызвана недостаточно точной юстировкой интерферометра.

При оценке погрешностей измерений по данным многократных измерений значение длины кварцевых и стальных мер вычисляли как среднее арифметическое из результатов двух серий измерений. Разности между средними этих серий не превышали погрешности метода измерения.

Таблица 5

| Институты Комитета | № интерферометра: институт: Комитета | № кварцевых эталонов | Годы сличений | | | | |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 1955 | 1956 | 1957 | 1958 | 1959 |
| | | | Значения разностей, мк | | | | |
| ВНИИМ — ХГИМИП | 80027 | 4 | +0,001 | — | — | — | — |
| | | 3 | — | — | -0,004 | -0,016 | +0,009 |
| ВНИИМ — ВНИИК | 36407 | 5 | — | +0,001 | — | -0,004 | — |
| | | 5 | — | +0,028 | +0,016 | — | — |
| | | 5 | — | -0,006 | — | — | — |
| | | 4 | — | — | +0,001 | — | — |
| | | 5 | — | — | — | -0,009 | — |
| ВНИИМ — Свердловский филиал ВНИИМ | 36408 | 2 | — | — | -0,031 | — | — |
| | | 2 | +0,021 | -0,034 | -0,017 | +0,018 | — |
| ВНИИМ — НГИМИП | 41602 | — | — | — | — | — | — |
| | | 1 | — | — | -0,024 | — | — |
| ВНИИМ — поверочная лаборатория Ленинградского управления | 34373 | 4 | +0,011 | +0,002 | — | — | — |

Погрешность результата измерения E при доверительной вероятности 0,997 вычисляли по формуле

$$E = tS_x,$$

а среднюю квадратичную погрешность S_x — по формуле

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2}{n(n-m)}},$$

где \bar{x} — среднее арифметическое одной серии (в мк);

x_{ij} — отдельные измерения серии (в мк);

n — число измерений в двух сериях;

m — число притираний стальной меры к пластине или количество серий измерений кварцевой меры.

Параметр t вычислялся по таблице Стьюдента — Фишера. Такая оценка погрешности результатов измерений произведена для многократных измерений мер во ВНИИМ, а также для измерений меры кругового сличения в институтах Комитета.

Таблица 6

| Институт Комитета | Номер интерферо- метра | Номер кварцевой меры | Годы сдачи | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|---|-------------|---|---|---|---|---|
| | | | 1955 | | 1956 | | 1957* | | 1958 | | 1959 | | | | | |
| | | | $\pm S_x f$ | n | $\pm S_x f$ | n | $\pm S_x f$ | n | $\pm S_x f$ | n | $\pm S_x f$ | n | | | | |
| ВНИИМ | 41591 | 1 | 0,008 | 20 | 0,008 | 10 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| | | | 0,015 | 18 | 0,008 | 14 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| | | | 0,012 | 18 | 0,008 | 14 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | | 0,011 | 22 | 0,006 | 7 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | | 0,012 | 20 | 0,017 | 10 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| ХГИМИП | 80027 | 3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| | | | — | — | — | — | 0,013 | 10 | — | — | — | — | — | — | — | |
| ВНИИК | 36407 83713 91104 | 5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| | | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| | | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Свердловский филиал ВНИИМ | 36408 41599 | 2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| | | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| НГИМИП | 9182 | 1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| | | | — | — | — | — | 0,017 | 10 | — | — | — | — | — | — | — | |

* В 1957 г. по ВНИИМ не проводились многократных измерений кварцевых мер, так как эти меры находились в институтах Комитета.

** Отмеченная погрешность получена при условиях измерения, отличающихся от требований инструкции, поэтому погрешности этой серии измерений не принимались во внимание при анализе погрешностей измерения.

Таблица 7

| Исследователи Комитета | Номер интерферо- метра | ГОДЫ СЛЮЧЕНИЯ | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|------------------------------|---------------|----|-----------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|-------|-------------|----|-------------|----|-------------|----|
| | | 1952 | | 1953 | | 1954 | | 1955 | | 1956 | | 1957 | | 1958 | | 1959 | |
| | | $\pm S_x f$ | n | $\pm S_x$ | n | $\pm S_x f$ | n | $\pm S_x f$ | n | $\pm S_x f$ | n | $\pm S_x f$ | n | $\pm S_x f$ | n | $\pm S_x f$ | n |
| ВНИИМ | 41591 | 0,037 | 16 | 0,011 | 20 | 0,025 | 21 | 0,009 | 12 | 0,015 | 28 | 0,013 | 14 | — | — | — | — |
| | | 0,016 | 16 | 0,022 | 21 | 0,025 | 20 | 0,012 | 9 | 0,025 | 25 | 0,009 | 14 | — | — | — | — |
| | | 0,013 | 16 | 0,018 | 22 | 0,015 | 19 | 0,029 | 17 | 0,016 | 14 | 0,011 | 14 | 0,011 | 20 | — | — |
| | | — | — | 0,027 | 15 | 0,021 | 20 | 0,009 | 12 | 0,024 | 16 | — | — | 0,008 | 20 | — | — |
| ХГИМИП | 80027 | 0,016 | 15 | 0,028 | 16 | 0,030 | 15 | 0,012 | 5 | 0,023 | 19 | 0,011 | 14 | 0,020 | 20 | — | — |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,008* | 14 | 0,017 | — | 0,010* | 45 |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,012 | 16 | — | — | 0,010 | 20 |
| ВНИИК | 91104 36407 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,020 | 7 | — | — | 0,012 | 20 |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,024 | 15 | — | — | 0,012 | 20 |
| Свердловский филиал ВНИИМ | 36708 41599 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,026 | 8 | — | — | 0,021 | 20 |
| | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,020 | 16 | — | — | — | — |
| НГИМИП | 9182 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,031 | 14 | — | — | — | — | |

* Круговое сечение.

В табл. 6 и 7 приведены погрешности результатов измерений кварцевых (табл. 6) и стальных (табл. 7) 100-миллиметровых концевых мер в 1952—1959 гг. Из табл. 6 видно, что погрешности результатов измерений 100-миллиметровых мер из плавленого кварца во ВНИИМ и институтах Комитета равны $\pm 0,01$ мк; в 5 случаях из 31 они составляют 0,02 мк и в 1 случае превысили это значение. Предельная погрешность результата измерений во ВНИИМ стальных 100-миллиметровых мер равна $\pm 0,02$ мк и только в 8 случаях из 34 (более ранние сличения) она превысила это значение.

Из 13 приведенных значений погрешностей результата измерений меры № 51 во ВНИИМ и институтах Комитета при круговом сличении только в 2 случаях она близка к 0,03 мк.

Анализ результатов измерений по методам математической статистики позволяет выяснить наличие неисключенных систематических погрешностей в результатах и определить точность измерений. Такой анализ был произведен для серий измерений 100-миллиметровых стальных и кварцевых мер во ВНИИМ и институтах Комитета за 1957—1959 гг., когда в институтах также проводили многократные измерения мер. Результаты серий измерений были объединены при их обработке в восемь групп.

В табл. 8 помещены данные, характеризующие каждую группу, а также приведены средние квадратичные отклонения σ и некоторые результаты анализа.

Анализ серий измерений во ВНИИМ всех стальных мер, участвовавших в сличениях, включая и серии измерений меры № 51 (кругового сличения), показал, что распределение остаточных погрешностей в этих сериях подчиняется закону нормального распределения, так как по критерию Пирсона при доверительной вероятности $P = 0,997$, числе степеней свободы $k = 6$ и при $\chi^2 = 9,36$ вероятность $P(\chi^2) = 0,17$.

Наличие в этом распределении асимметрии, коэффициент которой равен $-0,31$, и крутизны, равной $+0,48$, заставило обратиться к критерию Шарлье с целью определения, являются ли такие значения асимметрии и крутизны значительными. Вычисленная по этому способу вероятность оказалась равной 0,43, что позволяет считать это распределение симметричным.

Анализ серий измерений во ВНИИМ меры № 51 кругового сличения показал (графа 3 табл. 8), что и в этом случае остаточные погрешности измерений подчиняются закону нормального распределения — удовлетворяют критерию Пирсона. Оцененное по критерию Шарлье это распределение следует считать симметричным.

На основании проведенного анализа можно считать, что серии измерений стальных мер во ВНИИМ не содержат заметных систематических погрешностей.

Рассматривая серии измерений стальной меры № 51 кругового сличения в институтах Комитета как равноточные, провели их совместную обработку. Анализ показал (графа 4 табл. 8), что распределение оказывается нормальным только согласно критерию Колмогорова (вероятность $P(\lambda) = 0,66$). Согласно оценке по критерию Шарлье можно утверждать, что распределение не является симметричным, так как в этом случае при коэффициенте асимметрии, равном 0,85, и крутизне $+2,8$, вероятность $P = 0$.

Недостаточно строгое соответствие данного распределения нормальному можно объяснить тем, что измерения стальных мер в институтах Комитета нельзя считать равноточными и что при измерениях в некоторых из институтов имели место систематические погрешности. Эти

Таблица 8

| Данные, характеризующие группы измерений | Группы серий измерений 1957—1959 гг. | | | | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|--|--|
| | Стальные меры | | | меры из плавяного кварца | | | | | | |
| | по ВНИИМ (вкладыш и мера РУ № 51 круглого сечения) | по ВНИИМ (только мера № 51 круглого сечения) | в институтах Комитета (только мера № 51 круглого сечения) | по ВНИИМ (серии измерений 1958—1959 гг.) | в институтах Комитета (серии измерений 1957—1958 гг.) | объединенные (серии измерений по ВНИИМ и институтам Комитета в 1957—1959 гг.) | по ВНИИМ (серии измерений 1958 г.) | в институтах Комитета (серии измерений 1958 г.) | | |
| Число: | | | | | | | | | | |
| установок | 1 | 1 | 5 | 1 | 5 | 6 | 1 | 4 | | |
| мер | 5 | 1 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | | |
| измерений | 195 | 79 | 141 | 153 | 125 | 278 | 87 | 68 | | |
| Среднее квадратичное отклонение ряда измерений σ , мк | $\pm 0,012$ | $\pm 0,012$ | $\pm 0,017$ | $\pm 0,007$ | $\pm 0,010$ | $\pm 0,008$ | $\pm 0,008$ | $\pm 0,010$ | | |
| Коэффициент асимметрии | -0,31 | -0,36 | -0,85 | +0,22 | +0,10 | +0,09 | +0,03 | +0,15 | | |
| Крутизна | +0,48 | +0,18 | +2,84 | +0,72 | +2,73 | +2,98 | +0,01 | +3,06 | | |
| Вероятность по критериям: Пирсона $P (\chi^2) > 0,05$ | 0,17 | 0,42 | 0,02 | 0,11 | 0,21 | 0,051 | 0,24 | 0,14 | | |
| Колмогорова $P (\lambda) > 0,05$ | 0,931 | — | 0,66 | — | — | — | — | — | | |

погрешности могли быть вызваны тем, что температурные условия при измерении стальных мер в некоторых институтах не вполне отвечали требованиям инструкции.

При анализе результатов измерения выявилось, что предельная погрешность ряда измерений стальных мер во ВНИИМ в условиях сличения составляет $\pm 0,036$ мк, а для измерений (графа 4) в институтах Комитета $\pm 0,051$ мк.

Эту погрешность нельзя приписывать всем институтам в равной степени, так как погрешности измерений в отдельных институтах, как это видно из табл. 7, значительно различаются между собой.

Полученные предельные погрешности измерений не превышают предельную погрешность измерения (формула 4), принимаемую при вычислении допустимых расхождений между результатами измерения на интерференционных установках ВНИИМ и институтов Комитета для последующих сличений.

При измерении кварцевых мер необходима длительная выдержка их перед проведением измерений в термостатированном помещении и на самом приборе. Вследствие малой теплопроводности кварца меры медленно принимают температуру окружающей среды и выравнивание температуры по всей толще кварца происходит медленно. Когда же температура меры становится одинаковой для всей массы, небольшие и случайные изменения температуры в помещении уже не оказывают влияния на результат измерения из-за большой теплоемкости и малой величины температурного коэффициента кварца.

Анализ результатов измерений кварцевых мер, произведенный для серий измерений, выполненных во ВНИИМ, и для серий измерений, проведенных в институтах Комитета (см. табл. 8), показал, что погрешности измерения этих мер меньше, чем погрешности измерения стальных мер. Предельная погрешность ряда измерений кварцевых мер во ВНИИМ равна $\pm 0,022$ мк, а в институтах Комитета равна $\pm 0,030$ мк.

Погрешности измерений кварцевых мер во ВНИИМ и в институтах Комитета можно признать равнозначными с вероятностью $P(\chi^2) = 0,05$ по критерию Пирсона.

Распределения остаточных погрешностей в сериях измерений как во ВНИИМ, так в институтах Комитета подчиняются закону нормального распределения и симметричны, но в распределении серий измерений институтов Комитета имеет место заметная положительная крутизна.

Таким образом, наш анализ показал, что если результаты измерений стальных мер институтов Комитета и ВНИИМ не являются равнозначными, то серии измерений кварцевых мер можно считать одной совокупностью.

Это позволяет сделать вывод, что по кварцевым мерам можно строже судить о состоянии самой установки, а по стальным мерам лучше выявляются условия измерения в институтах.

Выводы

1. Проводимые ВНИИМ сличения интерференционных установок дают возможность контролировать состояние интерференционных измерений в стране. Результаты этих сличений показали, что единство измерений поддерживается на должном уровне. Подобного рода сличения необходимо продолжать и распространить их на меры длиной до 1000 мм.

2. Разности между результатами измерений стальных мер во ВНИИМ и в институтах Комитета в основном значительно меньше пре-

дельных погрешностей для мер 1-го разряда и меньше допустимых величин расхождений, установленных ВНИИМ для сличений в 1953 г. За последние 3 года при межинститутских сличениях эти разности только в отдельных случаях достигают $\pm 0,05$ мк и, как правило, не превышают $\pm 0,04$ мк.

3. Предельная погрешность измерений стальных мер при сличениях не превышает $\pm 0,04$ мк во ВНИИМ и $\pm 0,05$ мк в институтах Комитета. Предельная погрешность измерения 100-миллиметровых кварцевых мер не превышает $\pm 0,02$ мк во ВНИИМ и $\pm 0,03$ мк в институтах Комитета.

4. На основании анализа погрешностей измерений стальных мер и величин расхождений, полученных за последние годы, в дальнейшем при проведении сличений с помощью стальных мер можно принять новое значение допустимого расхождения, вычисляемое по формуле

$$\Delta_{\text{доп}} = \pm 0,67 (0,02 + 0,40 \cdot 10^{-3} L) \text{ мк.}$$

5. Ежегодные сличения интерференционных установок следует проводить по стальным мерам, так как с их помощью передается единица длины в системе народного хозяйства. Наряду с контролем состояния интерференционных установок они дают возможность выяснить условия измерений в институтах Комитета.

Эти ежегодные сличения следует проводить по методике, требования которой отвечают обычным условиям поверки концевых мер по инструкции для поверки мер 1-го разряда.

6. Применение при сличениях мер из плавленого кварца позволяет контролировать состояние самих интерференционных установок более строго, так как погрешность измерения их меньше, чем стальных мер. Сличение установок с помощью кварцевых мер следует проводить 1 раз в 2—3 года.

Круговые сличения с помощью стальных мер с многократным числом измерений следует проводить в те же сроки с целью оценки погрешности измерений в институтах Комитета и ВНИИМ и условий работы в них.

Поступила в редакцию
27/II 1960 г.

А. З. ПОЛКОВА
Свердловский филиал ВНИИМ

ВЛИЯНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КОНЦЕВЫХ МЕР ДЛИНЫ ВЫСШИХ РАЗРЯДОВ НА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИХ ДЛИНЫ

В статье приведены результаты наблюдения за нестабильностью образцовых концевых мер длиной до 100 мм, находящихся в эксплуатации, а также данные наблюдения за нестабильностью концевых мер, изготовленных иностранными фирмами. Показано влияние нестабильности мер на точность измерения их длины.

Погрешность значения длины концевой меры состоит в основном из погрешности изготовления меры, погрешности измерения ее срединной длины и погрешности, вызываемой систематическим изменением размера ее во времени.

Погрешность изготовления меры определяется величиной отклонения ее действительного размера от номинального и при эксплуатации мер всегда может быть учтена как систематическая погрешность.

Погрешность измерения срединной длины меры случайная и характеризуется предельной погрешностью метода измерений.

Погрешность, вызываемая систематическим изменением длины мер во времени, если она не изучена и не может быть учтена в любой момент времени как систематическая погрешность, будет складываться с погрешностью метода измерения. Эта суммарная погрешность может служить характеристикой точности концевых мер в течение всего срока действия свидетельства.

Формулы точности концевых мер всех разрядов, по которым определяют предельную погрешность данных свидетельства на срок его действия, включают в себя и погрешность, вызываемую изменением длины мер во времени. В ОСТ 85000—39 было принято большое допустимое значение на нестабильность материала концевых мер ($\pm 1,5$ мк на 1 м в год), что вызывало необходимость часто производить поверки концевых мер (не реже чем через 6 мес.). В новом стандарте ГОСТ 9038—59 требования к стабильности концевых мер значительно повышены.

Результаты производившихся в 1947—1952 гг. в Свердловском филиале ВНИИМ измерений образцовых концевых мер 1-го разряда показали, что длина некоторых из них за эти 5 лет увеличилась.

Используя результаты этих измерений, мы определили предельную погрешность измерений, а также степень влияния нестабильности мер на точность значения их длины.

При обработке результатов измерений сравнением эмпирического распределения погрешностей измерения с нормальным распределением по критериям согласия было установлено, что погрешности измерений подчиняются нормальному закону.

Так как погрешности измерений мер зависят от их длины, кривые эмпирического и теоретического распределений были построены как для мер длиной $0,5 \div 10$ мм, так и для мер длиной 10; 10,5; 11...; 30 мм. Следовательно, определив среднее квадратичное отклонение σ , мы можем определить предельную погрешность измерений абсолютным методом, которая при достаточно большом числе измерений равна 3σ с вероятностью $\alpha = 0,997$.

Изменение мер во времени в основном наблюдается у мер длиной более 10 мм. Чтобы из экспериментальных данных выявить влияние этих изменений на точность принимаемого по свидетельству значения длины меры, кроме кривой распределения случайных погрешностей (рис. 1), для мер длиной 10—30 мм была построена кривая распределения погрешностей, вычисленных при условии, что величина изменения мер со временем входит в остаточную погрешность. Поэтому остаточные погрешности для каждого из измерений за 5 лет (1948—1952 гг.) вычислялись как отклонения от результата измерений данной меры, полученного в 1947 г. На этом рисунке кривая распределения случайных погрешностей измерения мер длиной от 10 до 30 мм обозначена цифрой 1, кривая распределения погрешностей измерения, включающая изменения длины мер во времени за 5 лет, — цифрой 2, кривая распределения погрешностей измерения при тех же условиях, что и кривая 2 за 2 года, обозначена цифрой 3. Смещение кривых 2 и 3 по отношению к кривой 1 подтверждает наличие в результатах измерений систематических погрешностей.

Причинами этих систематических погрешностей могут служить износ мер, изменение величины поправки из-за потери фазы на мере и изменение их размера во времени.

Так как большинство мер длиной от 10 до 30 мм в течение 5 лет увеличили свой размер, несмотря на возможный износ*, а изменение величины потери фазы у различных мер (как показали проведенные нами опыты) может вызвать изменения длины различного знака, то мы считаем, что в основном систематические погрешности обусловлены изменением длины мер во времени.

Смещение кривой 2 относительно кривой 1, выраженное отрезком Δa_1 , представляет собой систематическую погрешность, обусловленную изменением длины мер за 5 лет и равную 0,045 мк; смещение Δa_2 , выраженное кривой 3, равно 0,009 мк. Таким образом, погрешность значений длины мер, приведенных в свидетельстве, в течение 5 лет будет складываться из погрешности метода измерений и систематической погрешности, в среднем равной отрезку Δa_1 .

Предельная погрешность метода измерений, полученная нами на основании результатов измерений, равна $3\sigma = 0,045$ мк.

Следовательно, погрешность σ_5 для пятилетнего срока между поверками будет равна

$$3\sigma_5 = 3\sigma + \Delta a_1 = 0,045 + 0,045 = 0,090 \text{ мк.}$$

* Полкова А. З., Износоустойчивость плоскопараллельных концевых мер длины, «Измерительная техника», № 3, 1957.

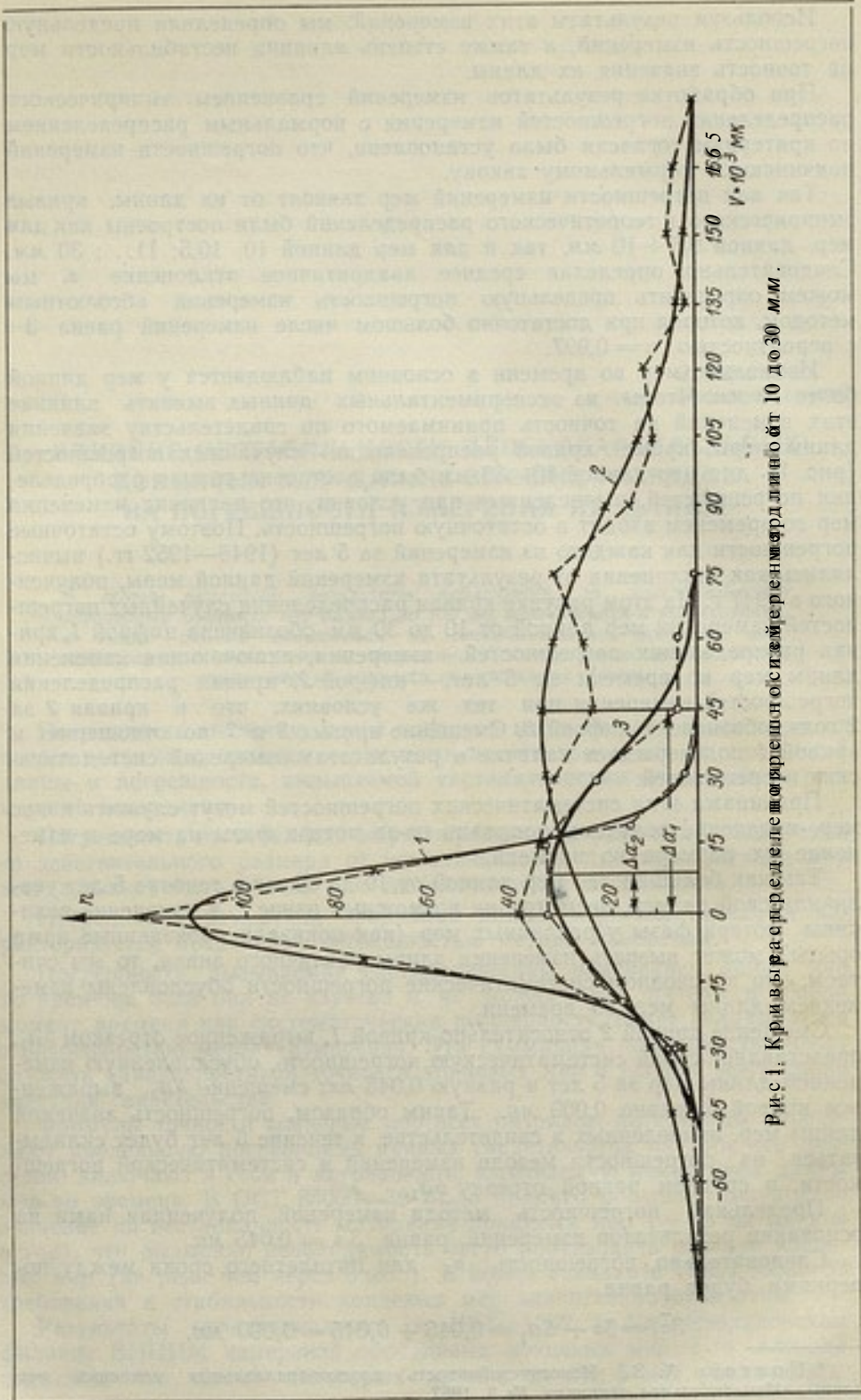


Рис. 1. Кривые распределения по оси средней деформации от 10 до 30 мм.

Полученное значение погрешности превышает 0,06 мк — погрешность, установленную для мер 1-го разряда. Погрешность значения меры в течение двух лет (σ_2) будет равна

$$3\bar{\sigma}_2 = 3\sigma + \Delta a_2 = 0,045 + 0,009 = 0,054 \text{ мк.}$$

В этом случае погрешность не превышает значения, установленного для мер 1-го разряда, а это значит, что величина нестабильности мер с номинальными размерами от 10 до 30 мм позволяет производить поверку их через 2 года при существующей для мер 1-го разряда формуле точности.

Для мер с номинальными размерами выше 30 мм и до 100 мм построена общая кривая распределения погрешностей (рис. 2). Остаточ-

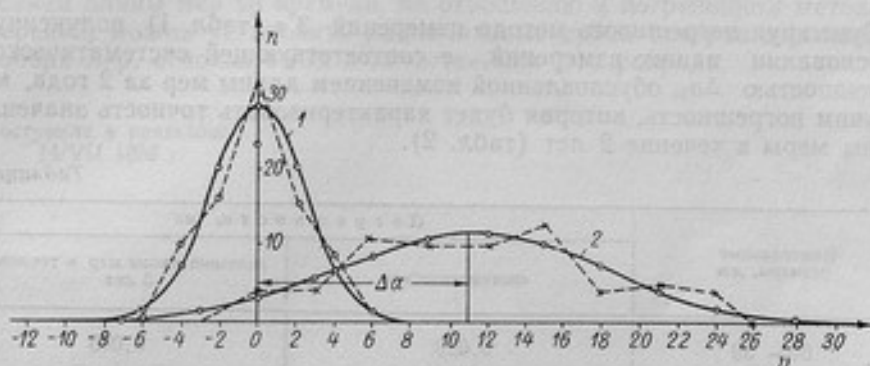


Рис. 2. Кривые распределения погрешностей измерений ($v \cdot 10^2$ мк) мер длиной от 30 до 100 мм.

ные погрешности для каждой меры были приведены к длине 100 мм путем умножения на соответствующие коэффициенты: $k_{40} = 2,5$; $k_{50} = 2$; $k_{60} = 1,67$; $k_{70} = 1,43$; $k_{80} = 1,25$; $k_{90} = 1,11$.

Таким образом была получена кривая 1 распределения случайных погрешностей и кривая 2 распределения погрешностей для тех же мер с условием, что остаточные погрешности включают и систематические погрешности, обусловленные изменением длины мер за 5 лет. Кривая 2 смещена относительно кривой 1 на $\Delta a = 0,11$ мк.

Так как для мер с номинальными размерами 30—50, 50—80 и 80—100 мм установлены различные погрешности измерения в зависимости от их длины, то для каждого из этих интервалов были определены систематические погрешности, обусловленные изменением их длины за 5 лет (путем деления $\Delta a = 0,11$ мк на коэффициенты, соответствующие серединам интервалов).

Предельная погрешность метода измерений, равная 3σ (с вероятностью 0,997), была вычислена по результатам измерения за 5 лет отдельно для мер каждой группы указанных номинальных размеров.

Суммируя погрешность метода измерения 3σ с соответствующей систематической погрешностью Δa , мы получим погрешность, характеризующую точность значения длины мер на протяжении 5 лет (табл. 1).

Вычисленные погрешности значительно превосходят предельные погрешности, определенные по формулам точности для мер 1-го разряда соответствующих размеров.

Как показали наблюдения, изменение длины мер фирмы Г. Верке со временем происходит с медленным затуханием. Полагая эти измене-

ния пропорциональными времени, можно вычислить значения систематической погрешности, вызванной изменением длины мер за 2 года.

Таблица 1

| Номинальные размеры, мм | Погрешности, мк | | |
|-------------------------|-----------------|------------|------------------------------------|
| | систематические | предельные | значения длины мер в течение 5 лет |
| 30—50 | 0,044 | 0,047 | 0,091 |
| 50—80 | 0,071 | 0,056 | 0,127 |
| 80—100 | 0,099 | 0,080 | 0,179 |

Суммируя погрешность метода измерений 3σ (табл. 1), полученную на основании наших измерений, с соответствующей систематической погрешностью Δa_2 , обусловленной изменением длины мер за 2 года, мы получим погрешность, которая будет характеризовать точность значения длины меры в течение 2 лет (табл. 2).

Таблица 2

| Номинальные размеры, мм | Погрешности, мк | |
|-------------------------|-----------------|------------------------------------|
| | систематические | значения длины мер в течение 2 лет |
| 30—50 | 0,018 | 0,065 |
| 50—80 | 0,028 | 0,084 |
| 80—100 | 0,040 | 0,120 |

Погрешности для мер 50—80 и 80—100 мм превышают предельные погрешности, установленные формулами точности для мер 1-го разряда.

Следовательно, для мер исследуемого набора с размерами от 60 до 100 мм мы не можем устанавливать срок между очередными поверками более 1 года, даже несмотря на высокую стабильность мер во времени (в пределах 0,5 мк на 1 м).

Увеличение срока между очередными поверками набора в этом случае возможно при условии либо повышения точности измерений, либо еще большего повышения стабильности концевых мер.

Точность наших измерений (абсолютным интерференционным методом) может быть повышена за счет улучшения термостатирования помещения, в котором производятся измерения. Тогда вместо значений предельных погрешностей, приведенных в табл. 2, необходимо подставить значения погрешностей, установленных инструкцией для абсолютного метода измерений и равных 0,024; 0,040 и 0,060. В этом случае погрешности значения длины меры будут соответственно равны: 0,042; 0,068 и 0,100 мк.

Таким образом, мы установили, что распределение случайных погрешностей измерения при поверке концевых мер 1-го разряда подчиняется нормальному закону распределения. На основании этого мы определили точность наших измерений, пользуясь общей формулой

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

Обработав результаты измерений за 6 лет и за 3 года, мы показали, что измерения содержат систематические погрешности, вызванные изменением длины мер во времени. Величина смещения кривой, полученной для распределения случайных погрешностей и погрешностей за счет изменения длины мер во времени, по отношению к кривой нормального распределения случайных погрешностей представляет собой наибольшую систематическую погрешность за счет изменения длины мер во времени.

Суммируя предельную погрешность метода измерения с наибольшей систематической погрешностью за счет изменения длины мер за 2 или за 5 лет, можно определить необходимую точность аттестации мер на соответствующий срок.

Зная влияние систематических погрешностей, обусловленных изменением длины мер во времени, по отношению к погрешности метода измерений, можно установить рациональные сроки поверки для каждого набора мер, используемых в качестве мер 1-го разряда.

Поступила в редакцию
14/VII 1959 г.

А. Н. КОРОЛЕВА
ВНИИМ

ОБРАЗЦОВЫЕ СТЕКЛЯННЫЕ ШКАЛЫ

В статье приведены результаты исследования образцовых шкал № 18776, № 490541 и № 5103 лаборатории линейных и угловых измерений ВНИИМ и образцовых шкал 1-го разряда институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов за последние несколько лет. Приводятся погрешности определения поправок подразделений шкал. Рассматривается вопрос о нестабильности стеклянных шкал во времени.

В последнее время широкое распространение получили стеклянные шкалы, применяемые в различных измерительных приборах. Эти шкалы поверяются по образцовым шкалам 1-го или 2-го разрядов. Поверку шкал 1-го разряда с предельной погрешностью $\pm 0,3$ мк производит только ВНИИМ. Шкалы 2-го разряда поверяются институтами Комитета стандартов, мер и измерительных приборов.

Во ВНИИМ поверка подразделений и общей длины образцовых шкал 1-го разряда производится на стереокомпараторе сравнением их с длиной соответствующих интервалов исходной шкалы прибора методом продольного компарирования.

На основании исследования стереокомпаратора [1] установлено, что погрешность результатов поверки в сильной степени зависит от ширины штрихов исходной и поверяемой шкал. Поэтому в качестве исходных мер стереокомпаратора служат три шкалы со штрихами разной ширины: это шкалы № 18776 и № 5103, имеющие длину 200 мм, и № 490541 длиной 100 мм.

Исследование стереокомпаратора состоит из определения цены деления шкал левого и правого оптических микрометров и исследования всех трех исходных шкал.

Цена деления шкал оптических микрометров определяется по двум юстировочным шкалам, разность длин которых с высокой степенью точности определяется сравнением с рабочими эталонами длины на универсальном 1-метровом компараторе, измерительной машине или сравнением с концевыми мерами на интерферометрах.

Результаты последнего измерения (1958 г.) разности длин юстировочных шкал № 1 и 2 даны в табл. 1.

Погрешность определения действительного значения разности длин юстировочных шкал составляет $\pm 0,1$ мк.

Средняя цена деления шкал оптических микрометров определяется как среднее взвешенное из результатов, полученных при измерении различных интервалов.

Таблица 1

| Интервалы шкал, мм | Действительное значение разности длин шкал № 1 и 2 в мк, полученное в результате измерения | | | | |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------|
| | на 1-метровом компараторе, 1-я серия | на 1-метровом компараторе, 2-я серия | на измерительной машине | сличение с концевыми мерами | среднее |
| 0—100 | +1,24 | +1,10 | +1,20 | +1,12 | 1,16 |
| 0—200 | +8,96 | +8,80 | +9,00 | +9,01 | 8,94 |

В табл. 2 приводятся результаты двух последних определений цены деления микрометров стереокомпаратора.

Таблица 2

| Оптические микрометры стереокомпаратора | Средняя цена деления, мк | |
|-----------------------------------------|--------------------------|---------------|
| | 1955 г. | 1957—1958 гг. |
| Левый | 0,0965 | 0,0914 |
| Правый | 0,0981 | 0,0950 |

При исследовании исходных шкал производят:

1. Определение действительной длины интервалов 0—100 и 0—200 мм шкалы.
2. Калибровку сантиметровых подразделений участков 0—100 и 100—200 мм.
3. Калибровку миллиметровых подразделений всех сантиметровых интервалов шкалы.

Длина интервалов 0—100 и 0—200 мм шкалы определяется сличением с подразделениями рабочих эталонов длины на измерительной машине и компараторе. Погрешность определения действительной длины интервалов 0—100 и 0—200 мм не превосходит $\pm 0,08$ мк.

Калибровка сантиметровых и миллиметровых подразделений производится на стереокомпараторе принятым в лаборатории методом [1].

Погрешность вычисленных значений поправок подразделений шкал, полученных в результате калибровки на стереокомпараторе с учетом погрешности исходных данных, определяется по эмпирической формуле [2]

$$S = \pm (S_x + bL \cdot 10^{-6}) \text{ мк},$$

где S_x — средняя квадратичная погрешность результатов калибровки;
 b — коэффициент, зависящий от погрешности определения общей длины L вспомогательной шкалы.

Если принять, что погрешность результатов калибровки сантиметровых интервалов в среднем равна 0,04 мк, то

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

Таким образом, средняя квадратичная погрешность результатов определения поправок сантиметровых подразделений в среднем равна $\pm 0,06$ мк.

Поправки миллиметровых подразделений относительно нулевого штриха шкалы вычисляются как сумма двух поправок: поправки соответствующего сантиметрового подразделения относительно нулевого штриха шкалы и поправки миллиметрового подразделения, определенной по данным частной калибровки.

Средняя квадратичная погрешность поправок миллиметровых подразделений, вычисленных относительно нулевого штриха, в среднем равна $\pm 0,07$ мк.

Стомиллиметровая шкала № 490541 обычно служит как главная шкала при калибровке на стереокомпараторе, поэтому поправки ее подразделений определены наиболее точно. Так например, только в 1958 г. с этой шкалой было произведено 6 калибровок сантиметровых (табл. 3) и 20 калибровок миллиметровых подразделений.

Таблица 3

| Интервалы (в мм) и номер шкалы, с которой производилась калибровка | Интервалы шкалы № 490541, мм | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0-10 | 0-20 | 0-30 | 0-40 | 0-50 | 0-60 | 0-70 | 0-80 | 0-90 | 0-100 |
| Поправки интервалов шкалы № 490541, мк | | | | | | | | | | |
| 0-100 } № 5103 | -0,33 | +0,33 | -0,16 | -0,07 | +0,02 | -0,11 | -0,16 | +0,03 | -0,11 | -0,01 |
| 100-200 } № 5103 | -0,37 | -0,13 | -0,50 | -0,35 | -0,31 | -0,31 | -0,47 | -0,33 | -0,51 | -0,40 |
| 0-100 } № 18776 | -0,19 | -0,07 | -0,12 | -0,11 | -0,08 | -0,08 | -0,20 | -0,07 | -0,12 | -0,09 |
| 0-100 } № 18776 | -0,34 | -0,21 | -0,30 | -0,34 | -0,35 | -0,36 | -0,46 | -0,23 | -0,35 | -0,23 |
| 100-200 } № 18776 | -0,06 | -0,31 | -0,38 | -0,20 | -0,24 | -0,39 | -0,39 | -0,25 | -0,42 | -0,29 |
| 100-200 } № 18776 | -0,43 | -0,39 | -0,40 | -0,21 | -0,20 | -0,22 | -0,34 | -0,11 | -0,24 | -0,02 |
| Среднее . . | -0,29 | -0,18 | -0,31 | -0,22 | -0,19 | -0,24 | -0,34 | -0,16 | -0,29 | -0,17 |

Рассматривая результаты, приведенные в табл. 3, как независимые, так как получены они из результатов калибровки шкалы № 490541 с различными шкалами, общая длина каждой из которых определена сличением с подразделениями рабочих эталонов метра, можно вычислить среднюю квадратичную погрешность определения поправок шкалы калибровкой. По своему значению эта погрешность не превосходит $\pm 0,06$ мк.

На рис. 1 приведены поправки шкалы № 490541, полученные в 1958—1959 гг.

Двухсотмиллиметровая шкала № 18776 исследуется ежегодно. На рис. 2 даны поправки этой шкалы по определениям, проведенным в 1958—1959 гг. Как видно из обоих графиков, изменения длины шкал в основном лежат в пределах погрешностей измерений на стереокомпараторе.

Третьей исходной шкалой является шкала № 5103, изготовленная одним из ленинградских заводов в 1951 г. Первое исследование этой шкалы производилось в конце 1952 г., второе — в 1954 г. За это время шкала укоротилась на 2,0 мк. Результаты сличений шкалы в 1954

и 1955 гг. различаются между собой на величины, лежащие в пределах погрешности сличений.

В 1956 г. в связи с тем, что штрихи шкалы приняли серую окраску, был произведен запуск штрихов шкалы на заводе-изготовителе. После запуска штрихов шкала № 5103 была сразу измерена. При повторном (через 6 месяцев) измерении в 1957 г. было установлено, что она зна-

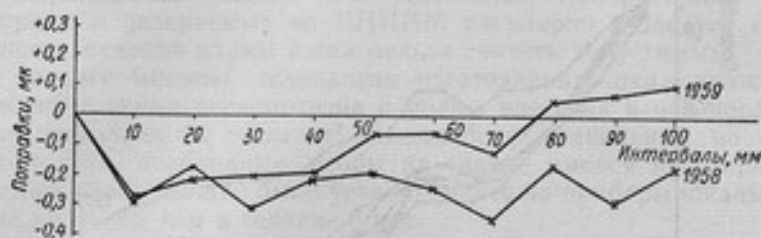


Рис. 1. Результаты измерения шкалы № 490541.

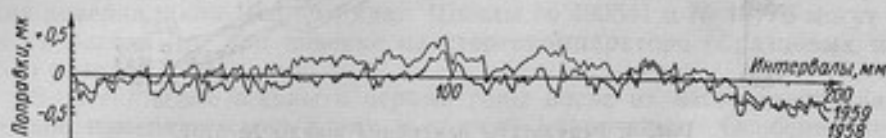


Рис. 2. Результаты измерения шкалы № 18776.

чительно укоротилась. В последующие годы изменение ее длины не выходило за пределы погрешности измерения. Все результаты измерения шкалы № 5103 приводятся на рис. 3 (поправки шкалы — в мк, интервалы — в мм).



Рис. 3. Результаты измерения шкалы № 5103.

Шкалы № 5101, № 5105, № 5107 и № 5110, изготовленные одновременно со шкалой № 5103, являются образцовыми шкалами 1-го разряда институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов. Первое исследование их было произведено сразу после изготовления, т. е. в конце 1952 г. Через год они вновь были измерены и было установлено, что длина всех пяти шкал укоротилась примерно на 2 мк. В дальнейшем эти шкалы измерялись ежегодно, причем длина их изменялась лишь в пределах погрешности измерений. В качестве примера приводятся результаты измерения шкалы № 5101 (рис. 4).

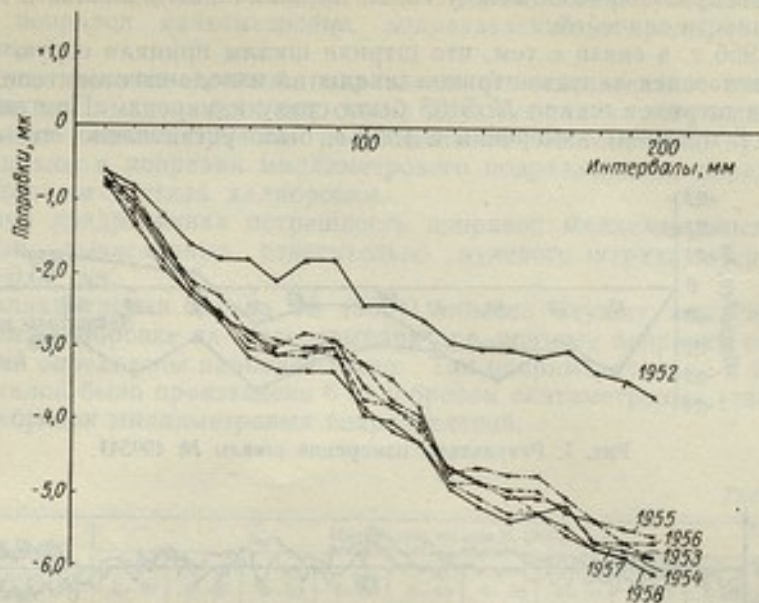


Рис. 4. Результаты измерения шкалы № 5101.

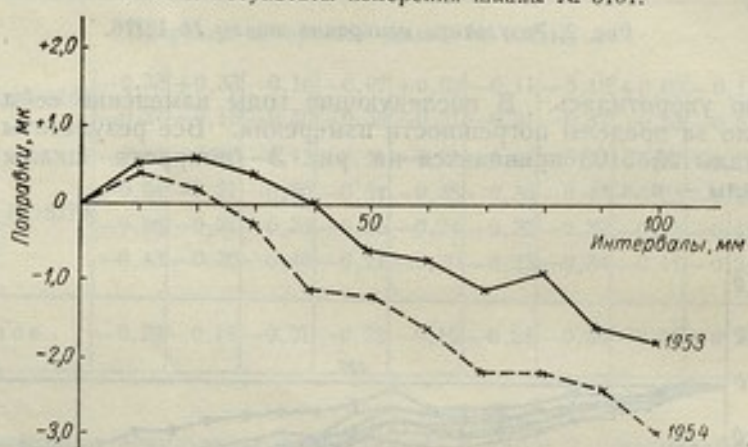


Рис. 5. Результаты измерения шкалы № 530037.

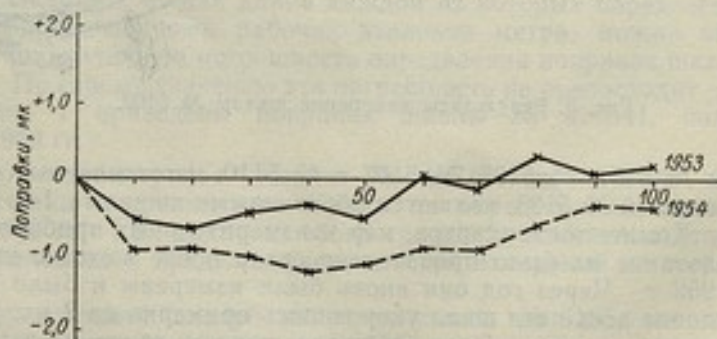


Рис. 6. Результаты измерения шкалы № 530057.

На основании наших наблюдений можно сделать вывод, что стеклянные шкалы из стекла марки Ф8 в первые год — два после их изготовления изменяют свою длину в сторону укорочения, которое в отдельных случаях достигает нескольких микронов. ВНИИМ располагает обширным материалом, который подтверждает сказанное выше. На рис. 5 и 6 приводятся в качестве примера результаты измерения шкал № 530037 и 530057, принадлежащих измерительным лабораториям заводов Ленинграда и поверяемых во ВНИИМ регулярно. Следует отметить, что такое изменение длины шкал нельзя считать допустимым.

По нашему мнению, технология изготовления шкал должна быть в ближайшее время пересмотрена с целью внесения в нее коррективов, которые позволили бы создавать шкалы более стабильные во времени.

Кроме того, необходимо, чтобы на заводе имелся некоторый запас шкал с тем, чтобы можно было устанавливать на приборы шкалы, выдержанные не менее, чем в течение 6 мес.

На основании всего изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Стереоскопический компаратор лаборатории линейных и угловых измерений ВНИИМ находится в удовлетворительном состоянии и может служить для поверки шкал 1-го разряда. Шкалы № 490541 и № 18776 могут служить исходными при поверке на стереоскопическом компараторе образцовых шкал 1-го разряда.

2. Стеклянные шкалы в первые годы после их изготовления значительно изменяют свою длину в сторону укорочения. Особенно интенсивно этот процесс протекает в первые два года существования шкалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каяк Л. К., Королева А. Н., Исследования стереоскопического компаратора СКС-1 № 480002, Труды ВНИИМ, вып. 18(78), 1952.
2. Баринов В. А., Современное состояние эталонов длины и методы точного измерения длины, Л., 1941.

Поступила в редакцию
27/XII 1959 г.

Л. К. КАЯК, С. И. ТОРОПИН
ВНИИМ

ТРИДЦАТИМЕТРОВЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОМПАРАТОР ВНИИМ

В статье описывается 30-метровый интерференционный компаратор ВНИИМ, предназначенный для проверки ленточных и проволочных мер, и приводятся результаты его исследования. Благодаря специальной конструкции компаратора его юстировка значительно упрощена. Наблюдение интерференционной картины в зрительную трубу может производиться одновременно с компарированием проволок. Это дает возможность следить за постоянством длины компаратора во время измерения.

В настоящее время для проверки проволочных и ленточных мер большой длины применяют оптико-механические (жезловые) и интерференционные компараторы. Метод проверки на этих компараторах заключается в измерении разности между длиной поверяемой меры и длиной компаратора. При этом под длиной компаратора понимают расстояние между осями (нуль-пунктами) его крайних микроскопов. Так как измеряемые на компараторе разности длин обычно малы и измеряются они с большой точностью окулярными микрометрами микроскопов, то точность компарирования может быть достаточно высокой. Принципиальное различие между жезловым и интерференционным компараторами заключается в разных методах определения их длины.

Длину оптико-механических компараторов определяют сравнением с длиной образцового 3- или 4-метрового инварного или платинитового жезла, служащего исходной мерой компаратора.

Длину интерференционных компараторов определяют оптическим методом — сравнением с многократно умноженной длиной кварцевого жезла, являющегося исходной мерой длины компараторов этого типа.

Работы по применению интерференционных методов для измерения больших расстояний (порядка нескольких десятков метров и более) были начаты более 30 лет тому назад.

Задача впервые была успешно решена финским ученым Вейселе в 1923 г. [1]. В последующие годы работы в этой области велись в СССР, Японии, Германии и других странах [2, 3], и было разработано несколько типов интерференционных компараторов. В них применяется тот или иной относительный метод измерения, при котором, используя интерференцию, большие длины сравнивают с находящимися с ними в кратных

отношениях малыми длинами путем оптического сложения или умножения расстояний между зеркалами.

Так как пределы кратности умножения исходного расстояния ограничиваются отражательной способностью зеркал, а также и внешними влияниями среды, в которой проходят интерферирующие лучи, то общую длину компаратора измеряют обычно в несколько приемов. Тем не менее путем последовательного увеличения расстояния между зеркалами удавалось измерять расстояния в несколько сот метров.

В СССР по инициативе проф. О. Г. Дитца работы по измерению больших длин интерференционным методом были начаты Г. В. Варлихом и У. О. Шварцем во ВНИИМ и ЦНИИГАиК.

В 1932 г. Г. В. Варлих предложил схему 24-метрового интерференционного компаратора, построенную по принципу Вейселе [4]. В качестве исходной меры этого компаратора служил 3-метровый геодезический жезл. В 1934—1935 гг. схема была успешно испытана во ВНИИМ на 8-метровой модели.

В 1936 г. У. О. Шварц предложил новую и оригинальную дифференциальную схему 24-метрового интерференционного компаратора [5, 6]. Опытный компаратор был изготовлен в 1938 г. и испытан в 1939 г. не только в лабораторных (в Ленинградском политехническом институте), но и в полевых условиях [7—9]. В 1940 г. исследование компаратора продолжили в ЦНИИГАиК проф. В. В. Данилов, А. В. Кондрашков и др. [10].

Вторая, усовершенствованная В. М. Назаровым, модель интерференционного 24-метрового компаратора была изготовлена в ЦНИИГАиК в 1948 г. [11]. При этом методика измерений на компараторе была несколько изменена, в результате чего повысилась точность измерений.

В. М. Назаров в своей работе провел подробный и весьма тщательный анализ погрешностей измерений на интерференционных компараторах различных типов. Этот анализ показал, что наиболее выгодной является дифференциальная схема.

Схема и описание интерференционного компаратора ВНИИМ

Тридцатиметровый интерференционный компаратор ВНИИМ предназначен для проверки ленточных и проволоочных мер длиной до 30 м (рис. 1). На компараторе могут быть измерены и брусковые меры (жезлы, рейки) длиной до 5—6 м.

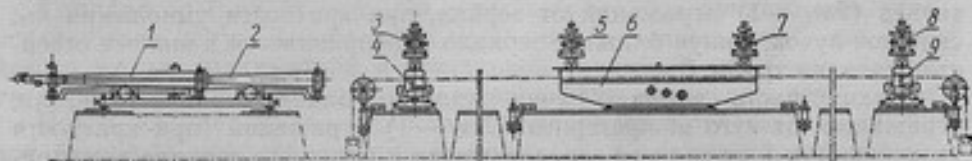


Рис. 1. Схема 30-метрового интерференционного компаратора ВНИИМ.

Основными частями этого компаратора являются коллиматор 2 и зрительная труба 1, исходная концевая мера длины — трубчатый кварцевый жезл диаметром 37 мм с притертыми к нему зеркалами на подставке 6, два зеркала (ближнее 4 и дальнее 9) и отсчетные микроскопы 3, 5, 7 и 8.

Метод измерения на компараторе основан на принципе оптического умножения длины исходной меры по дифференциальной схеме У. О. Шварца. В этом методе последовательно оптически умножают 2 разных расстояния, кратность умножения которых отличается друг от

друга на единицу. Для определения длины компаратора необходимо знать лишь разность исходных расстояний. Эта разность представляется в виде ступенчатой концевой меры — кварцевого жезла.

Применение дифференциального метода позволяет умножить длину исходной меры во много раз при сравнительно небольшой кратности оптических умножений. Определение же общей длины компаратора осуществляется фактически одним приемом измерений.

При проектировании компаратора схема его была несколько изменена и оказалось возможным не только расширить пределы измерений до 30 м, но и, применяя различную кратность оптического умножения, производить поверку мер 14 различных номинальных размеров: 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 12, 15, 16, 20, 24, 25 и 30 м.



Рис. 2. Оптическая схема компаратора.

В компараторе параллельный световой пучок из коллиматора 2 направляется вдоль компаратора под некоторым углом к его оси (рис. 2). Средняя часть светового пучка проходит мимо ближнего зеркала 4 компаратора и через левый вырез заднего зеркала 10 жезла 6 падает на дальнее зеркало 9 компаратора, отражаясь от него, проходит через правый вырез зеркала 10 жезла 6 и направляется в среднее отверстие насадки объектива зрительной трубы 1. Зрительная труба установлена на бесконечность, и световой пучок, отраженный от дальнего зеркала 9, пройдя через объектив трубы, даст в ее фокальной плоскости изображение источника света.

Нижняя часть светового пучка падает на переднее зеркало 11 жезла, отражается от него и попадает на ближнее зеркало 4 компаратора. Претерпев $(2m_1 - 1)$ отражений от зеркал, при кратности умножения m_1 , световой пучок, минуя ближнее зеркало 4, направляется в нижнее отверстие насадки трубы 1.

Верхняя часть светового пучка падает на заднее зеркало 10 жезла, отражается от него и, претерпев $(2m_2 - 1)$ отражений (при кратности умножения m_2) от заднего зеркала жезла и ближнего зеркала компаратора, попадает в верхнее отверстие насадки трубы.

В результате в фокальной плоскости объектива трубы образуются 3 налагающихся друг на друга дифракционных изображения источника света. При равенстве оптических длин ходов световых пучков в фокальной плоскости зрительной трубы можно наблюдать интерференционные полосы. Выделяя соответственные пары световых пучков, наблюдают как верхнюю, так и нижнюю интерференционные картины.

Если обозначить общую длину компаратора (расстояние между отражающими поверхностями его крайних зеркал) через l (рис. 2), расстояние между ближним зеркалом компаратора и передним зеркалом жезла — через l_1 , расстояние между ближним зеркалом компаратора и зад-

ним зеркалом жезла — через l_3 , то при условии, что длины l_1 и l_3 кратны длине l , можно написать

$$l = m_1 l_1 = m_2 l_3,$$

где m_1 и m_2 — кратности умножения длин l_1 и l_3 , причем $m_1 - m_2 = 1$;
 $l_3 - l_1 = L$ — расстояние между отражающими поверхностями зеркал жезла.

Легко можно получить следующие формулы для расстояний между зеркалами компаратора:

$$l_1 = m_2 L; \quad l_3 = m_1 L; \quad l_2 = l_1 + L; \quad l_4 = l_2 + L; \quad l_5 = l - l_3.$$

Таким образом, если установить отсчетные микроскопы не только у крайних зеркал компаратора 3 и 8, но и у зеркал жезла (микроскопы 5 и 7), то при одной и той же кратности умножения на компараторе можно будет измерять, кроме общей длины l , также и длины l_1 , l_2 , l_3 и l_4 . Изменяя же и кратности умножения m_1 и m_2 , можно увеличить число измеряемых длин.

В табл. 1 приведены кратности оптического умножения и номинальные длины, которые можно измерять на компараторе ВНИИМ.

Таблица 1

| Кратности оптического умножения | | | Общая длина компаратора l , м | Расстояние между микроскопами, м | | | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|
| m_1 | $m_2 = m_1 - 1$ | $m_1 \cdot m_2$ | | l_1 | l_2 | l_3 | l_4 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 2 | 1 |
| 3 | 2 | 6 | 6 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| 4 | 3 | 12 | 12 | 3 | 8 | 4 | 9 |
| 5 | 4 | 20 | 20 | 4 | 15 | 5 | 16 |
| 6 | 5 | 30 | 30 | 5 | 24 | 6 | 25 |

При изменении пределов измерений на компараторе стол с кварцевым жезлом всегда остается на месте, только переставляют на соответствующие фундаменты ближнее и дальнее зеркала.

Компаратор (рис. 3) имеет 10 отдельных столбов-фундаментов, установленных на полу. Два больших столба предназначены для стола кварцевого жезла, коллиматора и зрительной трубы; 8 столбов меньшего размера служат для установки подставок ближнего и дальнего зеркал.

Пол в помещении, где установлен компаратор, представляет сплошной бетонный монолит толщиной более 0,5 м, лежащий на толстой щебенчатой подушке. Столбы компаратора сложены из кирпича (в качестве связующего вещества применен цементный раствор) и установлены непосредственно на бетонный монолит. Для лучшего сцепления столбов с монолитом на полу сделаны дополнительные насечки.

В верхней части столбов зацементированы металлические пластины с отверстиями для крепления опорных плит, в гнезда которых устанавливаются подставки зеркал. Все опорные плиты находятся на одном уровне и в створе оси компаратора. Они имеют отверстия для блоков, служащих для натяжения поверяемых на компараторе проволок.

Коллиматор (рис. 4) направляет параллельный пучок белого света на зеркала. Объектив его с фокусным расстоянием около 1000 мм имеет

свободное отверстие диаметром 100 мм и дополнительный автоколлимационный окуляр (12 на рис. 2). Нить лампы типа СЦ79, установленная в горизонтальном положении, при помощи конденсора проектируется на регулируемую щель, находящуюся в фокальной плоскости объектива коллиматора. Благодаря наличию автоколлимационного окуляра коллиматор может служить для установки зеркал компаратора параллельно друг

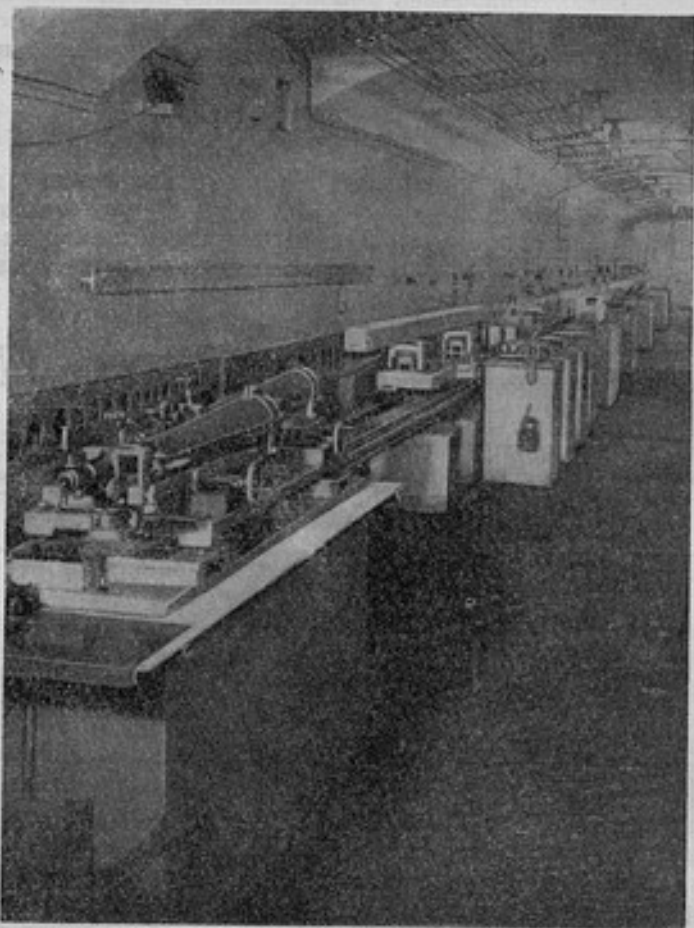


Рис. 3. Общий вид компаратора.

другу методом автоколлимации. Для изменения кратности оптического умножения необходимо изменить угол падения пучка лучей на зеркала. Поэтому коллиматор снабжен специальным поворотным устройством и шкалами для установки его на заданную кратность. Вертикальная ось вращения коллиматора находится в плоскости объектива. Коллиматор имеет устройство для изменения его наклона в вертикальной плоскости, а также специальную насадку с тремя отверстиями, закрепленную на объективе. Наличие указанных приспособлений значительно облегчает юстировку компаратора. Осветитель имеет устройства для регулировки лампы относительно оси коллиматора.

Зрительная труба с объективом, таким, как у коллиматора (рис. 4), и окуляром 25-кратного увеличения служит для наблюдения интерференционной картины. На объективе трубы укреплен специальная насадка

с тремя прямоугольными отверстиями для выделения попарно интерферирующих световых пучков. Насадка имеет подвижную шторку, которая может закрывать любое из 3 отверстий. Управление шторкой находится у окуляра трубы. Труба имеет поворотное устройство. Зрительная труба и коллиматор закреплены на общей раме, установленной на отдельном большом фундаменте.

Кварцевый жезл (рис. 5) изготовлен из плавящего кварца завода им. Ломоносова. Зеркала жезла, также из плавящего кварца, притерты на оптический контакт к кварцевым плоскопараллельным пластинам, приваренным на концах трубки. Расстояние между отражающими поверхностями зеркал составляет 1 м. Отклонение зеркал от плоскопараллельности не превышает $\pm 0,5$ мк.

В жезле просверлены два небольших отверстия, необходимых для уравнивания давления воздуха внутри трубки.

Жезл лежит на двух люнетах — опорах специального стола, имеющего регулировочные устройства. Один люнет связан с серединой стола

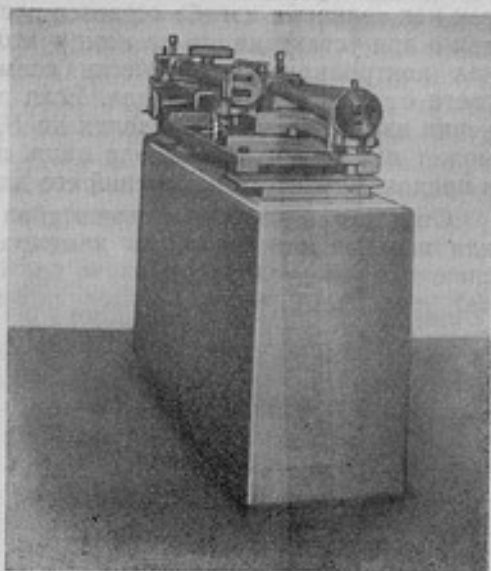


Рис. 4. Коллиматор (справа) и зрительная труба (слева).

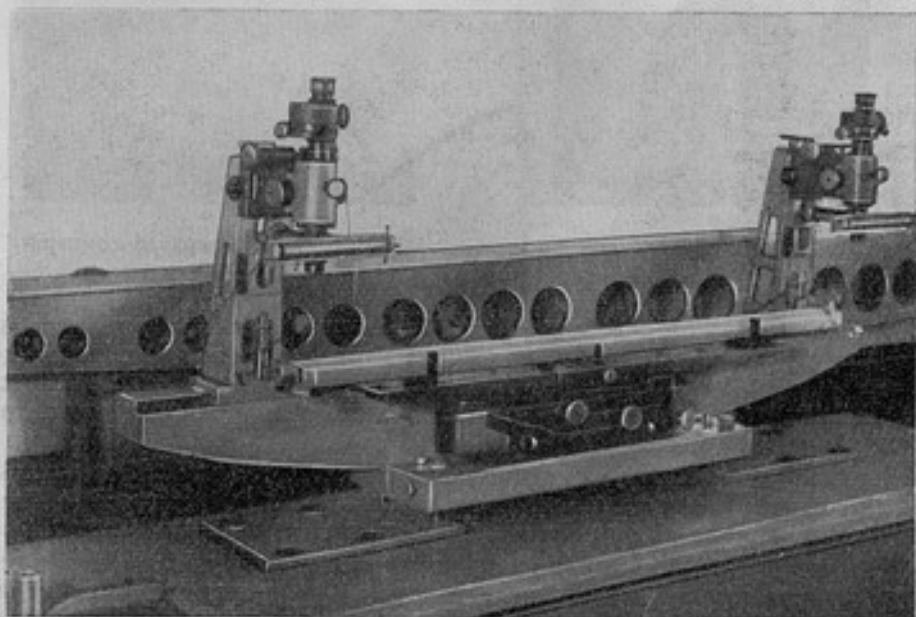


Рис. 5. Кварцевый жезл на подставках.

инварным стержнем, компенсирующим температурное расширение станины стола, а другой — свободно перемещается продольно. Для при-

ведения зеркал во взаимно параллельное положение имеется специальное приспособление с плоскими пружинами для изгиба жезла в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Изгиб не влияет на длину жезла, так как величина изгиба остается постоянной как при измерении жезла, так и при установке его на компараторе, к тому же параллельность зеркал контролируется оптически совмещением изображений источника света от обоих зеркал жезла. Если даже допустить возможность изменения изгиба жезла в пределах до $1'$, то это, как будет показано ниже, может изменить длину жезла лишь на сотые доли микрона, что лежит в пределах точности измерений его длины.

Стол жезла имеет два кронштейна для микроскопов и направляющие для перемещения их вдоль компаратора. Подставка жезла закрыта специальным футляром.

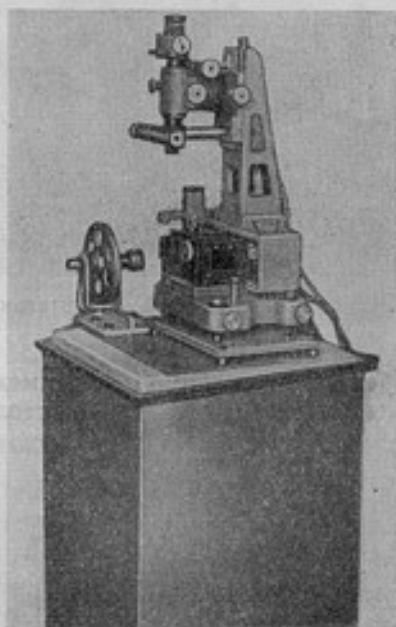


Рис. 6. Ближнее зеркало компаратора.

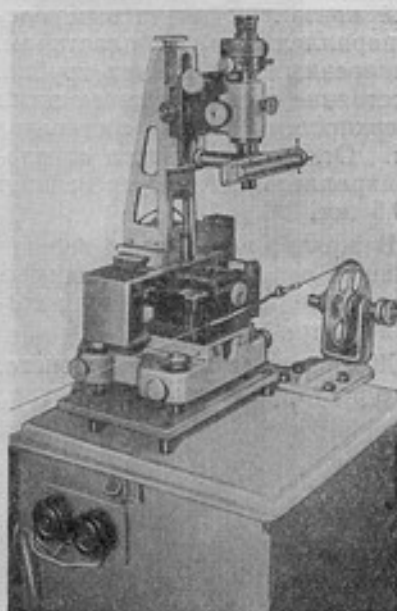


Рис. 7. Дальнее зеркало компаратора.

Ближнее (рис. 6) и дальнее (рис. 7) зеркала компаратора изготовлены из стекла марки «К-8». Отклонения от плоскости у зеркал не превышают $\pm 0,1$ полосы. У ближнего зеркала с той же точностью обеспечена плоскопараллельность, что необходимо для установки его автоколлимационным методом.

Зеркала установлены на специальных подставках, снабженных подъемными винтами для регулирования зеркал по высоте и приспособлениями для наклона их в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Для микрометрического продольного перемещения зеркал вдоль компаратора столики их можно передвигать по направляющим вручную или с помощью моторов Уорена. Пульт управления моторами находится у зрительной трубы, что очень удобно и значительно сокращает время при юстировке компаратора. При каждом обороте барабана по часовой стрелке зеркало, перемещаясь со скоростью приблизительно 45 мк/мин , приближается к коллиматору на 5 мк .

Все зеркала компаратора имеют оптические целики с призмами для проектирования отражающих плоскостей зеркал на шкалу поверяемых проволок или в отсчетный микроскоп. К плоскости зеркал притерты на оптический контакт стеклянные боковички. По линии раздела между плоскостью зеркала и боковичка образуется тонкий штрих, совпадающий с плоскостью зеркала (называемый нами штрихом зеркала). К боковой поверхности зеркала и боковичка притерта прямоугольная призма, имеющая на свободном конце призму-куб, через которую и рассматривают в микроскоп штрих зеркала. Через эту призму в микроскоп рассматриваются и штрихи шкалы проволоки, измеряемой на компараторе. При соответствующей установке осветителей в поле зрения микроскопа можно одновременно наблюдать штрихи шкалы поверяемой проволоки и штрих зеркала. Такое устройство зеркал позволяет компарировать проволоку, не снимая зеркала с подставок и не сдвигая в сторону кварцевый жезл.

Отсчетные микроскопы со спиральными окулярными микрометрами предназначены для измерения расстояния между изображениями штрихов шкалы поверяемой меры и штрихом зеркала. Увеличение микроскопов 15-кратное, предметное расстояние — 153 мм, глубина фокусировки примерно 1,8—2,0 мм. Точность отсчета по микрометрам 0,5 мк. Для установки микроскопа в вертикальное положение и контроля за неизменностью его во время измерений микроскопы имеют уровни с ценой деления около 2".

Кронштейны микроскопов оснащены устройством для фокусировки микроскопа и перемещения его как вдоль компаратора, так и в поперечном направлении, а также и для поворота в вертикальной плоскости, параллельной оси компаратора.

Описанная конструкция интерференционного компаратора, по нашему мнению, может быть применена также для измерения расстояний или мер в вертикальном положении.

Все конструкторские работы при проектировании компаратора были выполнены во ВНИИМ ст. конструкторами В. С. Степановым и Т. Н. Брюсовой. Все узлы компаратора изготовлены на заводе «Эталон». Наибольшее участие в работах принимали оптики Г. С. Ермолинский и П. П. Яковлев и механик И. Г. Роменский.

Юстировка и предварительное исследование компаратора

Юстировка компаратора имеет своей целью установку зеркал и жезла в правильное положение. Вначале кварцевый жезл и зеркала компаратора устанавливают приблизительно на заданном расстоянии друг от друга по образцовой стальной рулетке, а оптические целики всех зеркал и микроскопы — по струне, натянутой между крайними микроскопами. Подставки зеркал ставят так, чтобы плавающий столик, на котором закреплено зеркало, перемещался параллельно оси компаратора — прямой линии, проходящей через середины всех зеркал. Затем, действуя подъемными винтами подставок зеркал и наблюдая в нивелир, перемещают зеркала по высоте так, чтобы их оптические целики находились в одной горизонтальной плоскости. Зрительная труба и коллиматор должны быть отрегулированы на бесконечность, после чего коллиматор устанавливают так, чтобы начальные отсчеты как по поперечной шкале, так и по шкале поворота соответствовали направлению пучка лучей вдоль оси компаратора. Предварительно с помощью нивелира коллиматор устанавливают в такое положение, чтобы выходящий из него свето-

вой пучок был горизонтален. Далее с помощью автоколлимационного окуляра коллиматора все зеркала компаратора устанавливают параллельно друг другу и перпендикулярно оси компаратора. Сначала регулируют положение зеркал кварцевого жезла и дальнего зеркала, сняв ближнее зеркало со столика. Затем, поставив ближнее зеркало на свое место, регулируют его положение. После этого коллиматор и зрительную трубу устанавливают по шкалам в положение, соответствующее задаваемой кратности умножения.

На объектив коллиматора надевают насадку с тремя отверстиями, через которую направляют тройной световой пучок. Если юстировка зеркал была произведена достаточно точно и коллиматор установлен правильно, то лучи, претерпев заданное число отражений от зеркал, дадут в фокальной плоскости зрительной трубы три совмещенных друг с другом изображения источника света. Если же такого совмещения дифракционных изображений нет, то производят дополнительную регулировку зеркал до полного совмещения изображений. Регулировку зеркал жезла производят его изгибом. Если расстояния между зеркалами верны, то в зрительную трубу компаратора можно будет видеть интерференционную картину. Если она не видна, то уравнивают длину ходов интерферирующих лучей соответствующим перемещением сначала ближнего зеркала для получения «ближней» интерференции, а затем дальнего — для получения «дальней» интерференции. Когда расстояние между зеркалами выдержано с погрешностью порядка $\pm 0,1$ мм, интерференционные полосы можно наблюдать только через спектроскоп. Дальнейшим медленным перемещением зеркала вдоль компаратора оптические длины путей, пройденных обоими световыми пучками, уравнивают с точностью до нескольких длин волн.

В этом случае при наблюдении через спектроскоп интерференционные полосы располагаются горизонтально, а в белом свете можно будет видеть белую ахроматическую полосу. На этом юстировка компаратора заканчивается, и на нем можно производить измерения.

Кварцевый жезл является исходной мерой компаратора и погрешности определения его длины при переходе к длине компаратора увеличиваются пропорционально кратности оптического умножения. Поэтому для повышения точности измерений на интерференционном компараторе необходимо определять длину кварцевого жезла с возможно большей точностью. Необходимо также знать и точное значение температурного коэффициента удлинения жезла.

Длина кварцевого жезла L после его сборки была измерена на горизонтальном интерферометре в оптической лаборатории и составляла

$$L_{20^{\circ}} = 1000,00739 \text{ мм.}$$

Температурный коэффициент удлинения жезла определен абсолютным компараторным методом на 4-метровом компараторе сличением с рабочим эталоном — инварным метром 568. Предварительно к торцевым поверхностям жезла были притерты стальные боковички со штрихами. Температура жезла определена специально изготовленными дифференциальными медь-константановыми термопарами с ценой деления в среднем $0,006^{\circ}$. Выполнено было 5 серий по 5 приемов измерений каждая в интервале температур от $+10$ до $+30^{\circ}$ С.

По результатам измерений была составлена система из 23 уравнений. При решении ее по способу наименьших квадратов получены три нормальных уравнения

$$\begin{aligned} 23l + 471,222 \alpha_0 + 10\,227,136 \beta &= -18,370; \\ +10\,227,136 \alpha_0 + 231\,516,080 \beta &= -161,235; \\ +5\,407\,243,175 \beta &= +118,383. \end{aligned}$$

Решение этих уравнений дало следующие значения неизвестных: $\alpha_0 = +0,303$ мк/град; $\beta = +0,00188$ мк/град².

Измерения на компараторе будут производиться при температуре, близкой к $+20^\circ\text{C}$. Поэтому, пользуясь формулой $\alpha_t = \alpha_0 + 2\beta t$, было вычислено значение линейного коэффициента при $t = 20^\circ\text{C}$, а именно:

$$\alpha_{20^\circ} = +0,38 \text{ мк/град.}$$

Таким образом, полное уравнение жезла для вычисления его длины при любой температуре t в интервале от $+10^\circ\text{C}$ до $+30^\circ\text{C}$ будет

$$L_t = 1 \text{ м} + 7,39 \text{ мк} + [0,38 + 0,0019 (t - 20)] (t - 20) \text{ мк.}$$

Исследование кварцевого жезла было произведено непосредственно после его изготовления. В дальнейшем следует производить повторные измерения его общей длины, а также и определение температурных коэффициентов с целью контроля за неизменностью уравнения жезла.

Исследование микроскопов

Среднее значение цены одного деления спиральных окулярных микрометров, равное $4,143$ мк, определено с погрешностью $\pm 0,001$ мк измерением этими микрометрами изученных подразделений образцовой шкалы № 5208.

Экспериментально были определены также погрешность отсчета по шкале окулярного микрометра и погрешности наведения на штрихи зеркал и шкал поверяемых проволок. Средняя квадратичная погрешность ряда измерений при наведении на штрихи зеркал оказалась несколько меньше ± 1 мк, а при наведении на штрихи шкалы проволоки $\pm 1,5$ мк.

Исследование зеркал

По техническим условиям на изготовление и сборку оптических визиров зеркал предусмотрено, что отдельные детали визиров должны быть изготовлены и собраны с зеркалом с высокой точностью. Это должно обеспечить проектирование в поле зрения микроскопов штриха, образованного плоскостями зеркал и притертых к ним боковичков, без каких-либо дополнительных погрешностей. Выполнить это требование из-за технических трудностей не удалось и поэтому проектирование штрихов сопровождается некоторой погрешностью, постоянной для каждого данного зеркала. Значения соответствующих поправок для введения в результаты измерений были определены предварительным исследованием. Для этого была использована вспомогательная стеклянная пластина, к которой поочередно притирали все зеркала. Измерение постоян-

ных поправок зеркал производилось с помощью микроскопов компаратора и они оказались равны: у ближнего зеркала $+1,0$ мк, у дальнего $+2,3$ мк, у переднего $+3,0$ мк и у заднего $+2,5$ мк.

Как уже говорилось, установка зеркал компаратора параллельно друг другу производится автоколлимационным методом, после чего ближнее и дальнее зеркала поочередно перемещают вдоль компаратора для уравнивания оптической длины хода лучей.

Проверка правильности этого перемещения зеркал методом автоколлимации показала, что в пределах ± 3 мм перемещение зеркал вдоль оси компаратора происходит правильно и автоколлимационное изображение нити лампы все время остается совмещенным с изображением самой нити.

Объективы коллиматора и зрительной трубы были проверены в оптической лаборатории на качество изображения и правильность центрировки по коллиматору и мире. Установлено, что качество изображения вполне удовлетворительно, хотя по краям поля зрения и имеет место незначительный хроматизм. Так как при работе используется средняя часть объективов, этот недостаток на результатах измерений не сказывается.

За ось компаратора, которая проходит через середину всех зеркал, выбрано было направление оптической оси коллиматора, когда он установлен в положении, определяемом следующими отсчетами по шкалам: шкала поворота — 5,2, поперечная шкала — 47,0. В этом положении коллиматор обычно устанавливают перед юстировкой зеркал компаратора методом автоколлимации.

Расчетным путем были вычислены перемещения коллиматора по его шкалам для различных кратностей оптического умножения, которые приводятся в табл. 2.

Таблица 2

| Кратности умножения | | Общая длина компаратора $l, \text{ м}$ | Число делений перемещения по шкалам | | Отсчеты по шкалам коллиматора | |
|---------------------|-------|----------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------|
| m_2 | m_1 | | поворота, c | поперечной, d | поворота | поперечной |
| 5 | 6 | 30 | 0,80 | 33,02 | 6,0 | 80,0 |
| 4 | 5 | 20 | 1,27 | 36,90 | 6,5 | 83,9 |
| 3 | 4 | 12 | 2,38 | 52,80 | 7,8 | 99,8 |
| 2 | 3 | 6 | 6,34 | 104,30 | 11,5 | 151,3 |

Для измерения температуры компаратор снабжен специальной установкой, состоящей из термостата Γ с ртутным термометром D (с ценой деления $0,05^\circ \text{ C}$), 12 дифференциальных медь-константановых термопар, гальванометра A типа 167-302 № 121697 фирмы Герца и 2 переключателей ПБ-43 и ПБ-12 (B и B), изготовленных заводом «Эталон». Схема монтажа дифференциальных термопар показана на рис. 8.

Так как термостат и гальванометр установлены не по середине компаратора, то длина проводников у термопар различна, что сказалось и на цене деления шкалы гальванометра для разных термопар. Диаметр сечения медного провода термопар $0,4$ мм, константанового — $0,3$ мм.

Термопары № 11 и 12 служат для измерения температуры кварцевого жезла, а № 3, 4, 5 и 6 — для измерения температуры компарируемых проволок. Остальные термопары используются на стенном жезловом

компараторе. Градуировка термопар производилась по образцовым ртутным термометрам принятым в лаборатории способом.

Температуру воды во вспомогательном сосуде Дьюара, в котором находились рабочие спай термопар во время градуировки, изменяли в пределах $16 \div 25^\circ \text{C}$.

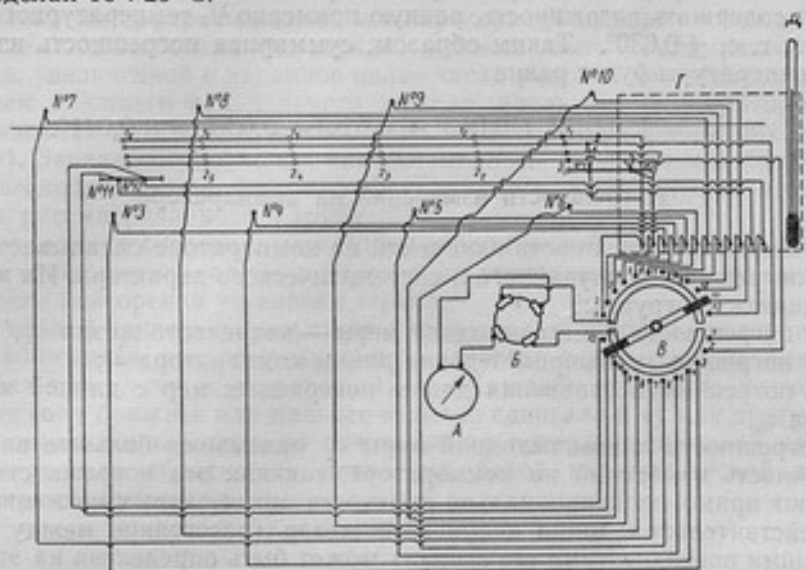


Рис. 8. Схема установки термопар.

Результаты градуировки термопар приведены в табл. 3. Средние значения цены деления термопар определены с погрешностью порядка $\pm 0,0005^\circ \text{C}$.

Таблица 3

| Термопара № | 3 | 4 | 5 | 6 | 11 | 12 |
|------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Цена деления шкалы, град/мм | 0,0474 | 0,0377 | 0,0272 | 0,0187 | 0,0426 | 0,0425 |

Результаты наблюдений, полученные при градуировке термопар, были использованы нами для оценки погрешности измерения температуры этими термопарами.

Принимая среднее из показаний двух термометров за действительное значение температуры во вспомогательном сосуде (судя по разностям двойных измерений, допустимая при этом погрешность не превышает $\pm 0,01^\circ \text{C}$), мы определили остаточные погрешности измерения температуры термопарой и среднюю квадратичную погрешность ряда измерений.

Погрешность измерения температуры в термостате по термометру можно принять равной $\pm 0,013^\circ \text{C}$. Погрешность измерения разности температуры термостата и температуры поверяемой меры термопарой по нашим исследованиям оказалась равной $\pm 0,018^\circ \text{C}$. Так как температуру проволоки измеряют четырьмя термопарами, а температуру жезла — двумя, то погрешность соответственно уменьшится до $\pm 0,009$ и $\pm 0,013^\circ \text{C}$.

Наблюдения показали, что в помещении компаратора по его длине имеется температурный градиент, достигающий иногда $1,5 \div 2^\circ \text{C}$; перемешивание воздуха вентиляторами снижает его примерно до $0,1 \div 0,2^\circ \text{C}$.

Из-за наличия температурного градиента вдоль компаратора и несимметричности крепления термпар на проволоке результат измерения может содержать погрешность, равную примерно $1/3$ температурного градиента, т. е. $\pm 0,030^\circ$. Таким образом, суммарная погрешность измерения температуры будет равна

$$S_t = \sqrt{0,013^2 + 0,013^2 + 0,020^2 + 0,030^2} = \pm 0,041^\circ.$$

Погрешности измерений на компараторе

Суммарная погрешность измерений на компараторе складывается из ряда погрешностей случайного и систематического характера. Их можно объединить в 3 группы:

- а) погрешности длины исходной меры — кварцевого жезла σ_1 ;
- б) погрешности воспроизведения длины компаратора σ_2 ;
- в) погрешности сравнения длины поверяемых мер с длиной компаратора σ_3 .

Погрешности длины исходной меры σ_1 оказывают большое влияние на точность измерений на компараторе, так как эти погрешности возрастают прямо пропорционально кратности оптического умножения.

Действительная длина кварцевого жезла (расстояние между отражающими поверхностями его зеркал) может быть определена на эталонной интерференционной установке с погрешностью не более $\pm 0,1 \text{ мк}$, т. е. с относительной погрешностью порядка $\pm 1 \cdot 10^{-7}$. Температурный коэффициент удлинения кварцевого жезла известен нам с погрешностью $\pm 2 \cdot 10^{-8}$, а температура жезла во время измерений на компараторе измеряется дифференциальными термпарами с погрешностью не более $\pm 0,03^\circ \text{C}$.

Если предположить, что температура измерений в наших условиях может отличаться от нормальной не более чем на 3° , то действительная длина кварцевого жезла в момент измерений на компараторе может быть вычислена с температурной погрешностью

$$\sigma_1 = \sqrt{(0,4 \cdot 0,03^\circ)^2 + (0,02 \cdot 3^\circ)^2} = \pm 0,06 \text{ мк}.$$

Кварцевый жезл лежит на компараторе на двух опорах, установленных в тех же точках, что и при измерении его на интерференционной установке. Зеркала жезла всегда устанавливаются строго параллельно друг другу, что достигается незначительным изгибом жезла специальными пружинами. Изгибы жезла могут вызвать некоторое изменение его длины. Так как при измерении длины жезла на интерференционной установке его зеркала также устанавливаются строго параллельно, то погрешность значений длины жезла при юстировке компаратора за счет изгиба жезла вообще не должна иметь места. Если даже допустить, что при изгибе жезла его стрела прогиба остается постоянной с точностью до $\pm 0,1 \text{ мм}$ (что соответствует непараллельности зеркал около $40''$), то это вызовет изменение длины жезла

$$\delta L = \frac{2h^2}{L}$$

и при $L = 1000 \text{ мм}$ и $h = 0,1 \text{ мм}$

$$\delta L = \pm 0,02 \text{ мк}.$$

Таким образом, можно считать, что в момент измерений действительная длина кварцевого жезла известна с погрешностью

$$\sigma_1 = \sqrt{(0,1)^2 + (0,06)^2 + (0,02)^2} = \pm 0,12 \text{ мк.}$$

Длина интерференционного компаратора (расстояние между отражающими плоскостями его зеркал) должна быть точно равна длине жезла, увеличенной в заданное целое число раз, что достигается перемещением ближнего или дальнего зеркала вдоль оси компаратора (для уравнивания оптической длины хода обоих интерферирующих пучков света). Зеркало перемещают, как указывалось, до появления белой ахроматической полосы в центре дифракционного изображения источника света, рассматриваемого в трубу.

Точность воспроизведения интерференционной картины и погрешности установки зеркал были определены экспериментально путем многократного повторения установки зеркал.

В табл. 4 приведены результаты исследования точности воспроизведения «ближней» интерференционной картины перемещением ближнего зеркала при длине компаратора 12 м. Каждый раз после отсчета по микроскопу ближнее или дальнее зеркало сдвигали в ту или другую сторону вдоль компаратора до исчезновения интерференционной картины и возвращали обратно до появления белой ахроматической полосы в центре изображения.

Таблица 4

| Отсчеты по микроскопу, дел. | Отклонение от среднего \bar{v} , дел. |
|-----------------------------|-----------------------------------------|
| 173,90 | +0,20 |
| 174,20 | +0,50 |
| 173,60 | -0,10 |
| 173,53 | -0,17 |
| 173,13 | -0,57 |
| 174,00 | +0,50 |
| 174,20 | +0,50 |
| 173,73 | -0,03 |
| 173,30 | -0,40 |
| 173,40 | -0,30 |
| Среднее.. 173,70 | |

Таблица 5

| Отсчеты по шкале оптиметра, мк | Отклонение от среднего \bar{v} , мк |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| -30,1 | -0,9 |
| -31,2 | +0,2 |
| -30,9 | -0,1 |
| -31,5 | +0,5 |
| -31,3 | +0,3 |
| -31,0 | 0 |
| -31,0 | 0 |
| -31,3 | +0,3 |
| Среднее.. -31,0 $\sigma = \pm 0,4$ | |

Как видно из табл. 4, средняя квадратичная погрешность установки зеркала равна 0,37 деления, или 1,5 мк.

Для того чтобы при этом исследовании исключить влияние погрешности наведения бисектора микроскопа на штрих зеркала, а также возможные смещения микроскопа, были проведены новые опыты, при которых положение зеркала определялось отсчетами не по микроскопу, а по шкале оптиметра, измерительный наконечник которого упирался в столик зеркала.

В табл. 5 приводятся результаты измерений для ближней интерференции при длине компаратора 12 м.

Как и в предыдущих опытах, после каждого отсчета по оптиметру установку зеркала производили заново.

В табл. 6 приведены результаты 2 серий исследования точности воспроизведения «дальней» интерференционной картины при длине компаратора 30 м.

Таблица 6

| № серии | Отсчеты по оптиметру, мк | Отклонение от среднего \bar{v} , мк | Отсчеты по оптиметру, мк | Отклонение от среднего \bar{v} , мк | |
|---------|--------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|--|
| I | 45,9 | +0,1 | 46,9 | +1,1 | |
| | 47,9 | +2,1 | 46,9 | +1,1 | |
| | 46,2 | +0,4 | 46,5 | +0,7 | |
| | 44,9 | -0,9 | 43,3 | -2,5 | |
| | 45,9 | +0,1 | 46,9 | +1,1 | |
| | 47,0 | +1,2 | 44,3 | +1,5 | |
| | 44,9 | -0,9 | 46,3 | +0,5 | |
| | 45,9 | +0,1 | 45,2 | -0,6 | |
| | 45,5 | -0,3 | 44,9 | -0,9 | |
| | | | Среднее . . . 45,8 $\sigma = \pm 1,1$ | | |
| II | 40,9 | -1,3 | 41,8 | -0,4 | |
| | 41,2 | -1,0 | 41,2 | -1,0 | |
| | 40,4 | -1,8 | 42,8 | +0,6 | |
| | 41,9 | -0,3 | 42,1 | -0,1 | |
| | 43,2 | +1,0 | 43,1 | +0,9 | |
| | 42,9 | +0,7 | 42,1 | -0,1 | |
| | 42,9 | +0,7 | 43,9 | +1,7 | |
| | 41,9 | -0,3 | 43,1 | +0,9 | |
| | 41,6 | -0,6 | 41,4 | -0,8 | |
| | 43,2 | +1,0 | 42,7 | +0,5 | |
| | 41,7 | -0,5 | 42,0 | -0,2 | |
| | 43,9 | +1,7 | 42,9 | +0,7 | |
| | | | Среднее . . . 42,2 $\sigma = \pm 0,5$ | | |

Если в предыдущих опытах производилось перемещение только одного зеркала, то в табл. 7 приведены результаты измерений при пере-

Таблица 7

| Отсчеты по оптиметру, мк | Отклонение от среднего \bar{v} , мк | Отсчеты по оптиметру, мк | Отклонение от среднего \bar{v} , мк |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| 39,9 | -0,7 | 41,7 | +1,1 |
| 40,0 | -0,6 | 41,9 | +1,3 |
| 40,4 | -0,2 | 41,9 | +1,3 |
| 39,8 | -0,8 | 40,0 | -0,6 |
| 36,7 | -3,9 | 41,1 | +0,5 |
| 41,6 | +1,0 | 42,9 | +2,3 |
| 40,7 | +0,1 | 43,2 | +2,6 |
| 43,2 | +2,6 | 37,9 | -2,7 |
| | | 37,0 | -3,6 |
| | | Среднее . . . 40,6 $\sigma = \pm 2$ | |

мещении обоих зеркал компаратора. Перед каждым отсчетом по шкале оптиметра положения дальнего зеркала сначала производилась резу-

лировка ближнего, а потом дальнего зеркала для установления, соответственно, «ближней» и «дальней» интерференции. Поэтому в погрешность определения положения дальнего зеркала входит также погрешность установки ближнего зеркала.

Выполненные опыты дали возможность оценить точность установки зеркал компаратора по интерференционной картине. Для меньших кратностей умножения длины исходной меры погрешность этой установки не превосходит ± 1 мк, а при наибольшей кратности умножения (при длине компаратора 30 м) она достигает ± 2 мк.

Наличие температурного градиента вдоль компаратора может служить источником значительных погрешностей измерений, так как из-за различия показателя преломления воздуха оптическая длина путей интерферирующих лучей будет различна.

Если обозначить через n_1 средний показатель преломления воздуха для среднего пучка лучей, а через n — показатель преломления для лучей, проходящих между ближним зеркалом и зеркалами жезла, то в момент появления интерференции будут иметь место следующие равенства:

$$n_1 l = n m_1 l_2 \quad \text{или} \quad n_1 l = n m_2 l_3.$$

Так как

$$l_2 = m_2 L, \quad \text{а} \quad l_3 = m_1 L,$$

то можно написать

$$l = m_1 m_2 \frac{n_1}{n} L.$$

Зависимость показателя преломления воздуха от температуры выражается формулой

$$n - 1 = \frac{n_0 - 1}{1 + \beta t},$$

где n_0 — показатель преломления воздуха при $t = 0^\circ$ и нормальном давлении,

$$\Delta l = 30 (n_0 - 1) \frac{\beta (t_1 - t)}{(1 + \beta t)^2}.$$

Принимая $L = 1$ м, $\beta = \frac{1}{273}$, $n_0 = 1,000299$ и $t = 20^\circ \text{C}$, будем иметь

$$\Delta l = 28,5 (t_1 - t) \text{ мк}.$$

Таким образом, если градиент вдоль компаратора будет достигать 1° , то в измерениях может войти погрешность около 30 мк.

Перемешивание воздуха вдоль компаратора, как показали опыты, снижает температурный градиент до $0,1 \div 0,2^\circ$, а соответственно и погрешность измерений — до $3 \div 5$ мк.

Полагая, что общая погрешность установления длины компаратора складывается из погрешности воспроизведения интерференционной картины и погрешности, вызываемой температурным градиентом, то на основании проведенных опытов будем иметь

$$\sigma_2 = \sqrt{2^2 + 4^2} = \pm 4,5 \text{ мк}.$$

Погрешность σ_3 перехода от длины интерференционного компаратора к длине поверяемых мер складывается из следующих погрешностей:

1) погрешности $\sigma_{\text{об}}$ — определения постоянных поправок оптических визиров зеркал;

2) погрешности $\sigma_{\text{ш}}$ — измерения окулярными микрометрами микроскопов расстояния между штрихами зеркал и штрихами поверяемых проволок, которая в свою очередь складывается из погрешностей наведения на штрихи, погрешности отсчета, погрешностей в определении цены деления микрометров и погрешностей, вызываемых наклоном осей микроскопов;

3) погрешности σ_T — температурного характера (погрешности измерения температуры и погрешности приведения длины проволоки к нормальной температуре);

4) погрешности $\sigma_{\text{н}}$, вызываемой непостоянством натяжения поверяемых мер (имеет место только при проверке проволок и лент).

Указанные погрешности были оценены при исследовании отдельных узлов компаратора, и мы можем принять их равными:

$$\sigma_{\text{отс}} = \pm 3 \text{ мк};$$

$$\sigma_{\text{ш}} = \sqrt{3^2 + 5^2 + 0,5^2 + 0,2^2 + 0,3^2} = \pm 6 \text{ мк};$$

$$\sigma_T = \sqrt{(24 \cdot 0,05^\circ)^2 + (0,5 \cdot 3)^2} = \pm 2 \text{ мк};$$

(при измерении инварных проволок)

$$\sigma_T = \sqrt{(250 \cdot 0,05^\circ)^2 + (5 \cdot 3)^2} = \pm 20 \text{ мк};$$

(при измерении стальных проволок)

$$\sigma_{\text{н}} = \pm 10 \text{ мк}.$$

В расчете этих погрешностей мы приняли значения температурных коэффициентов удлинения равными для инварных проволок $1 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и для стальных проволок $11 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Погрешности определения этих коэффициентов были приняты равными $\pm 0,02 \cdot 10^{-6}$ и $\pm 0,2 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Возможное отклонение от нормальной температуры принималось равным $\pm 3^\circ$.

Суммируя указанные частные погрешности, получим общую погрешность определения длины инварных проволок

$$\sigma_1 = \sqrt{3^2 + 6^2 + 2^2 + 10^2} = \pm 12 \text{ мк},$$

а при компарировании стальных проволок

$$\sigma_2 = \sqrt{3^2 + 6^2 + 20^2 + 10^2} = \pm 24 \text{ мк}.$$

Погрешность σ_2 может быть определена также по внутренней сходимости результатов отдельных приемов при многократных измерениях. При этом значение погрешности, определенное по опытным данным, должно быть несколько меньше расчетного, так как оно свободно от погрешности определения постоянных поправок зеркал.

Проведя обработку результатов опытных измерений, мы получили, что средняя квадратичная погрешность ряда измерений, вычисленная по внутренней сходимости отдельных измерений, равна ± 3 и ± 6 мк при измерении 4-метрового жезла, ± 10 и ± 23 мк — при измерении инварной ленты и проволоки.

Так как при измерении на компараторе производится не менее четырех приемов, то средняя квадратичная погрешность среднего результата будет $\pm 1,5 \div 12 \text{ мк}$.

На основании произведенных нами расчетов и опытных данных суммарная погрешность измерений на интерференционном компараторе определится как

$$S = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} = \sqrt{(0,12 \cdot 24)^2 + (4,5)^2 + (12)^2} = \pm 13 \text{ мк.}$$

При компарировании стальных проволок погрешность несколько возрастает и будет равна

$$S = \sqrt{(0,12 \cdot 24)^2 + (4,5)^2 + 24^2} = \pm 25 \text{ мк.}$$

Представляют интерес результаты наблюдений за устойчивостью длины интерференционного компаратора в течение одного и нескольких дней измерений.

Таблица 8

| Отсчеты по микроскопу I, мк | Отклонение от среднего σ , мк | Отсчеты по микроскопу IV, мк | Отклонение от среднего σ , мк | Разность отсчетов, мк | Отклонение от среднего σ , мк |
|--------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| 1994,6 | +1,3 | 1003,9 | +1,6 | 990,7 | -0,2 |
| 1994,4 | +1,1 | 1003,4 | +1,1 | 991,0 | +0,1 |
| 1992,5 | -0,8 | 999,1 | -3,2 | 993,4 | +2,5 |
| 1991,3 | -2,0 | 999,9 | -2,4 | 991,4 | +0,5 |
| 1991,7 | -1,6 | 1005,9 | +8,6 | 985,8 | -5,1 |
| 1991,3 | -2,0 | 1004,0 | +1,7 | 987,3 | -3,6 |
| 1992,4 | -0,9 | 998,1 | -4,2 | 994,3 | +3,4 |
| 1992,1 | -1,2 | 995,7 | -6,6 | 996,4 | +5,5 |
| 1992,8 | -0,5 | 1000,1 | -2,2 | 992,7 | +1,8 |
| 1995,3 | +2,0 | 1002,1 | -0,2 | 993,2 | +2,3 |
| 1995,7 | +2,4 | 1004,8 | +2,5 | 990,9 | 0,0 |
| 1994,3 | +1,0 | 1002,9 | +0,6 | 991,4 | +0,5 |
| 1993,8 | +0,5 | 1006,5 | +4,2 | 987,3 | -3,6 |
| 1994,0 | +0,7 | 1001,7 | -0,6 | 992,3 | +1,4 |
| 1994,2 | +0,9 | 1003,2 | +0,9 | 991,0 | +0,1 |
| 1992,0 | -1,3 | 1006,2 | +3,9 | 985,8 | -5,1 |
| Среднее . . . 1993,3 $\sigma = \pm 1,4$ | | 1002,3 $\sigma = \pm 3,1$ | | 990,9 $\sigma = \pm 3$ | |

В табл. 8 и 9 приведены результаты многократных измерений длины компаратора между первым (I) и четвертым (IV) микроскопами (3 и 8 на рис. 1) при $l = 30$ м.

Перед каждым измерением установку зеркал на «ближнюю» и «дальнюю» интерференцию производили заново.

Данные табл. 8 получены при измерениях без перемешивания воздуха в помещении компаратора, а в табл. 9 получены при постоянном перемешивании воздуха во время измерений для устранения температурного градиента вдоль компаратора.

Средняя квадратичная погрешность σ ряда измерений при перемешивании воздуха оказалась меньше, чем при наблюдениях без перемешивания воздуха. Это вполне подтверждает возможность наблюде-

ния интерференционной картины во время перемешивания воздуха. Одновременно изменение средней разности отсчетов по микроскопам почти на 17 мк указывает на то, что во время наблюдений без перемешивания воздуха температурные условия вдоль компаратора были

Таблица 9

| Отсчеты по микроскопу I, мк | Отклонение от среднего σ , мк | Отсчеты по микроскопу IV, мк | Отклонение от среднего σ , мк | Разность отсчетов | Отклонение от среднего σ , мк |
|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 1990,5 | +0,3 | 982,2 | -0,3 | 1008,3 | +0,6 |
| 1989,1 | -1,1 | 981,5 | -1,0 | 1007,6 | -0,1 |
| 1991,6 | +1,4 | 979,8 | -2,7 | 1011,8 | +4,1 |
| 1990,7 | +0,5 | 982,2 | -0,3 | 1008,5 | +0,8 |
| 1990,6 | +0,4 | 982,3 | -0,2 | 1008,3 | +0,6 |
| 1990,2 | 0,0 | 983,0 | +0,5 | 1007,2 | -0,5 |
| 1989,9 | -0,3 | 982,9 | +0,4 | 1007,0 | -0,7 |
| 1990,3 | +0,1 | 985,1 | +2,6 | 1005,2 | +2,5 |
| 1988,5 | -1,7 | 983,4 | +0,9 | 1005,1 | +2,6 |
| Среднее 1990,2 $\sigma = \pm 0,9$ | | 982,5 $\sigma = \pm 1,4$ | | 1007,7 $\sigma = \pm 1,9$ | |

инными, чем когда температурный градиент был уменьшен. Наличие большего температурного градиента в 1-й серии (табл. 8) подтверждали и показания термопар.

Таблица 10

| Дата наблюдения | Отсчеты по микроскопу, дел. | | Разность отсчетов | Примечание |
|-----------------|-----------------------------|--------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | I | IV | | |
| 18/XII | 191,20 | 376,30 | 185,10 | При наличии „ближней“ и „дальней“ интерференции До регулировки зеркал (интерференционные полосы в спектро스코пе видны под малым углом наклона) После регулировки зеркал (для получения „ближней“ и „дальней“ интерференции) |
| 20/XII | 190,23 | 376,43 | 186,20 | |
| 20/XII | 191,53 | 374,07 | 182,54 | |

Постоянство длины интерференционного компаратора зависит от устойчивости фундаментов, на которых установлены зеркала с микроскопами, от изменения температурного градиента вдоль пути интерферирующих лучей, устойчивости зеркал на подставке, а также от устойчивости отсчетных микроскопов.

Для определения устойчивости длины интерференционного компаратора были произведены отсчеты по микроскопам при наведении на

Таблица 11

| Длина компаратора | Отклонение от среднего ν , мк | Длина компаратора | Отклонение от среднего ν , мк |
|------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 24 м + 892,6 мк | -2,2 | 24 м + 896,4 мк | +1,6 |
| +892,4 | -2,4 | +892,4 | -2,4 |
| +901,2 | +6,4 | +893,3 | -1,5 |
| +899,8 | +5,0 | +894,3 | -0,5 |
| +889,7 | -5,1 | +898,2 | +3,4 |
| +900,1 | +5,3 | +892,4 | -2,4 |
| +889,5 | -5,3 | +893,3 | -1,5 |
| +888,7 | -6,1 | +898,7 | +3,9 |
| +895,7 | +0,9 | +895,6 | +0,8 |
| +887,5 | -7,3 | +902,5 | +7,7 |
| Среднее 24 м + 894,8 мк; $\sigma = \pm 4,4$ мк | | | |

Таблица 12

| Мера | $K - 1$, мк | ν , мк | $K - 1$, мк | ν , мк |
|----------------------------------|---------------------|------------|--------------|--------------------|
| Проволока № 79 | -3087,2 | -3,8 | -3078,0 | +5,4 |
| | -3090,8 | -7,4 | -3080,9 | +2,5 |
| | -3079,6 | +3,8 | -3079,4 | +4,0 |
| | -3088,9 | -5,5 | -3076,8 | +6,6 |
| | -3088,5 | -5,1 | -3091,6 | -8,2 |
| | -3081,0 | +2,4 | -3083,7 | -0,3 |
| | -3076,7 | +6,7 | -3085,3 | -1,9 |
| | | | -3082,5 | +0,9 |
| Среднее . . -3083,4 | | | | $\sigma = \pm 5,0$ |
| Проволока № 80 | +3058,9 | +3,9 | +3049,1 | -5,9 |
| | +3051,0 | -4,0 | +3050,0 | -5,0 |
| | +3058,8 | +3,8 | +3060,4 | +5,4 |
| | +3054,0 | -1,0 | +3058,0 | +3,0 |
| | Среднее . . +3055,0 | | | |
| Проволока А8 | -68,0 | -4,9 | -67,8 | -4,7 |
| | -45,0 | +18,1 | -76,6 | -13,5 |
| | -42,1 | +21,0 | -65,4 | -2,3 |
| | -67,8 | -4,7 | -64,0 | -0,9 |
| | -71,4 | -8,3 | | |
| | Среднее . . -63,1 | | | |
| 30-метровая инварная лента | -2170,2 | -15,6 | -2142,6 | +12,0 |
| | -2158,0 | -3,4 | -2136,1 | +18,5 |
| | -2166,0 | -11,4 | | |
| | Среднее . . -2154,6 | | | |

штрихи зеркал при «ближней» и «дальней» интерференции. Через сутки отсчеты были повторены. Затем, отрегулировав зеркала до установления «ближней» и «дальней» интерференционной картины, вновь производили отсчеты. Полученные результаты приведены в табл. 10.

Результаты наблюдений подтверждают хорошее постоянство положения зеркал и микроскопов относительно друг друга. Смещение ближнего зеркала относительно микроскопа равно 0,97 деления, т. е. 4 мк, дальнего — 0,13 деления, т. е. 0,5 мк.

В табл. 11 приведены значения длины интерференционного компаратора (между микроскопами III и IV) в течение 4 дней, когда проводилось компарирование проволок.

Работы по исследованию интерференционного компаратора были закончены измерением трех 24-метровых инварных проволок № 79, 80, А8, а также 30-метровой инварной ленты.

В табл. 12 приведены результаты измерения разности между длиной интерференционного компаратора K и длиной проволоки l , а также даны отклонения v от среднего. Погрешность среднего результата из четырех приемов измерений соответственно равна ± 7 мк, что не превышает значений, установленных расчетным путем.

Одновременно с работами по созданию 30-метрового интерференционного компаратора лаборатория значительно усовершенствовала имевшийся во ВНИИМ стенной компаратор. На стене компаратора были установлены 11 микроскопов с окулярными микрометрами с ценой деления около 1 мк, смонтирован рельсовый путь, а горизонтальный стол компаратора установлен на поворачивающиеся кронштейны. Исходной мерой компаратора служит рабочий эталон — 4-метровая инварная мера М4. Исследование показало, что поверка образцовых 20-метровых стальных рулеток 1-го разряда на усовершенствованном стенном компараторе может производиться с погрешностью, не превышающей $\pm 0,05$ мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Väisälä Y., Die Anwendung der Lichtinterferenz zu Längenmessungen auf grösseren Distanzen. Veröff. Finischen Geodät. Inst., № 2, Helsinki, 1923.
2. Watanabe N., Imaizumi M., On a method of standardization of a 25 m Jäderin wire in terms of wave-length of the cadmium redline. Proc. Imper. Acad., vol. 5, № 6 and 10, Tokyo, 1929.
3. Mühlig F., Der 24-m Interferenzkomparator des Geodätischen Instituts in Potsdam. Veröff. Geodät. Inst. in Potsdam, № 2, 1949.
4. Варлих Г. В., Интерференционный компаратор для эталонирования проволок, «Геодезист», № 9—10, 1932.
5. Шварц У. О., Дифференциальный метод измерения длин при помощи интерференции света и его применение в геодезии, «Оптико-механическая промышленность», № 9 и 10, 1939; № 1 и 2, 1940.
6. Шварц У. О., Теоретические основания и схемы дифференциального метода измерения длин при помощи интерференции света, Труды Ленинградского индустриального института, вып. 1, 1940.
7. Варлих Г. В. и Шварц У. О., Измерение расстояний методом интерференции света, Труды ЦНИИГАиК, вып. 22, 1937.
8. Варлих Г. В. и Шварц У. О., Опытная модель интерференционного компаратора для сравнения 24-метровых проволок в полевых условиях, ЦНИИГАиК, сб. 5, Исследования по геодезии, 1939.
9. Данилов В. В., Исследование полевого интерференционного компаратора, Труды ЦНИИГАиК, вып. 43, 1949.
10. Кондрашков А. В., Интерференция света и ее применение в геодезии, Геодезиздат, 1956.
11. Назаров В. М., Новый полевой интерференционный компаратор ЦНИИГАиК и результаты его испытаний, Труды ЦНИИГАиК, вып. 85, Исследования по геодезии, М., 1951.

Поступила в редакцию
27/III 1959 г.

Н. В. ТРОФИМОВА
ВНИИМ

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ШКАЛ ДО 200 ММ

В статье приводится описание нового интерферометра ВНИИМ для измерения линейных шкал до 200 мм и результаты измерений шкал по интерференционным эталонам Фабри — Перо.

В современной измерительной технике широко применяются высокоточные штриховые меры длины. В связи с предстоящим переходом на новое определение метра в длинах световых волн и необходимостью повышения точности измерения шкал во ВНИИМ разработан и создан интерферометр для измерения шкал длиной до 200 мм.

В приборе применена оптическая схема двухлучевого интерферометра Майкельсона с зеркалами, установленными на подвижных каретках. Для измерения подразделений штриховых мер методом оптического умножения используется многолучевой интерферометр (эталон Фабри — Перо) [1, 2].

Измерение шкал на приборе может также производиться непосредственно в длинах световых волн в монохроматическом свете или сличением с концевыми мерами.

Кинематическая схема прибора выполнена с соблюдением принципа продольного компарирования, что уменьшает до величин второго порядка малости погрешности, вызываемые непрямолинейностью перемещений, и упрощает конструкцию прибора.

Особенностью прибора является также применение оптической системы наблюдения интерференционной картины в качестве отсчетной, что упрощает процесс измерения и повышает его производительность.

Экспериментальное исследование интерференционного метода измерения шкал выполнено на макетной установке, схема которой показана на рис. 1.

Пучок лучей белого света от лампы накаливания 1 конденсором 2 фокусируется на щель 3 коллиматора, расположенную в фокусе объектива 4. Выходящий из коллиматора параллельный пучок лучей зеркалом 5 направляется непосредственно или через эталон Фабри — Перо 6 на разделяющую пластину 7, жестко соединенную в одном блоке с относительным зеркалом 8 интерферометра. Второе зеркало 9 интерферометра установлено в регулируемой оправе на перемещающейся каретке прибора.

При малой разности длины оптического хода в обеих ветвях интерферометра отраженные от зеркал 8 и 9 световые пучки, соединяясь, интерферируют. Интерференционная картина рассматривается в поле зрения наблюдательной системы 10.

Для получения при перемещении каретки с зеркалом ряда дискретных значений, разностей хода лучей в световой пучок вводят эталон Фабри—Перо.

Последний изготовлен в виде трубы из плавяного кварца, к плоскопараллельным торцевым поверхностям которой поставлены на оптический контакт кварцевые пластины клиновидной формы [3]. На рабочих поверхностях пластин эталона нанесен методом катодного распыления слой серебра с коэффициентом отражения, обеспечивающим эталону высокую разрешающую силу.

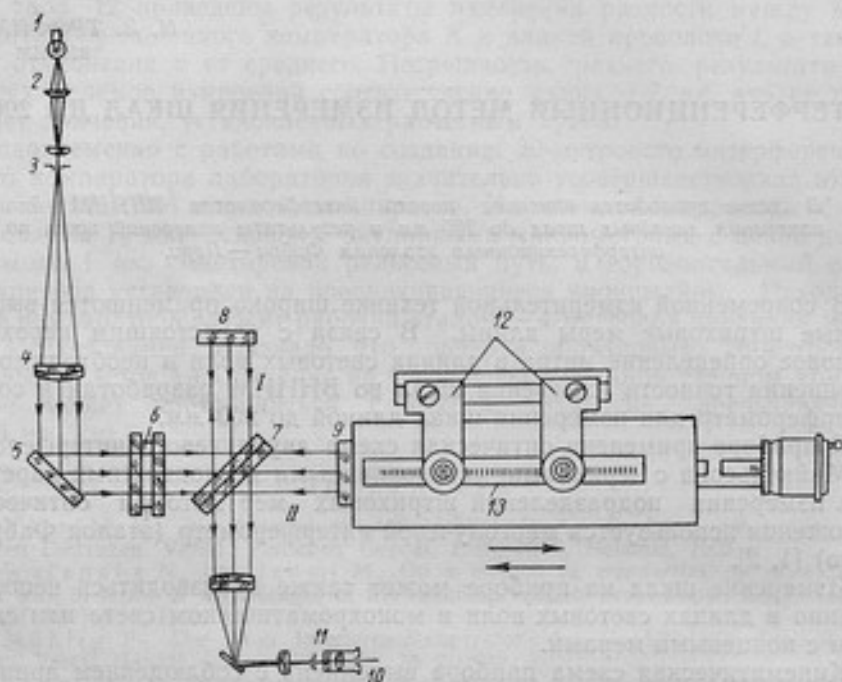


Рис. 1. Схема макета интерферометра.

При последовательном прохождении света через эталон Фабри—Перо и систему двухлучевого интерферометра в приборе можно наблюдать интерференционные полосы переналожения в белом свете. Наблюдение этих полос возможно, когда расстояние между отражающей поверхностью зеркала 9 и мнимым изображением относительного зеркала 8 равно $i\lambda$ (λ —расстояние между отражающими поверхностями эталона, $i = 1, 2, 3, \dots$ —кратность, определяющая порядок полос переналожения).

При перемещении зеркала 9 каретки в одну сторону от относительной плоскости (например, в направлении от разделяющей пластины) наблюдается интерференция совокупности пучков лучей, прошедших в ветвь II, и пучков лучей ветви I, отраженных от относительного зеркала 8 и испытавших в эталоне соответственно на два, четыре и т. д. отражений больше, чем пучки II. При перемещении зеркала 9 в проти-

в противоположную сторону интерферирует совокупность пучков лучей, прошедших в ветвь II с большим числом отражений в эталоне, и пучков ветви I, испытавших в эталоне соответственно меньшее число отражений.

Рассмотренная оптическая схема дает возможность получить точные последовательные перемещения каретки, контролируемые с помощью интерференции, и таким образом измерять интервалы 0—10, 0—20, 0—30 мм и т. д. установленной на каретке шкалы 13 (рис. 1) при $\epsilon = 10$ мм.

Штрихи шкалы наблюдают в один из микроскопов 12; наличие двух микроскопов позволяет одновременно измерять две шкалы длиной по 100 мм.

В случае наличия отдельного отсчетного устройства при перемещении каретки на интервалы, кратные длине эталона, черную ахроматическую полосу интерференции белого света устанавливают на одно и то же деление отсчетной шкалы 11 или перекрестие сетки окуляра наблюдательной системы 10, а несовпадение штрихов поверяемой шкалы с оптической осью микроскопа в этом случае измеряют с помощью отсчетного устройства.

При совмещении отсчетной и наблюдательной систем, примененном в данном приборе, подачу каретки производят по интервалам поверяемой шкалы 13. Штрихи шкалы вводят в бисектор микроскопа микроподачей каретки, а отсчет производят по шкале окуляра наблюдательной системы.

Черная ахроматическая полоса интерференции белого света служит указательным индексом шкалы, цену деления с которой устанавливают в длинах световых волн [4].

Измерения на приборе сводятся к последовательному визированию штрихов при перемещении каретки, а искомая длина поверяемого интервала l_i шкалы вычисляется по формуле

$$l_i = (r_0 - r_i)c + iz,$$

где r_0, r_1, \dots, r_i — отсчеты при визировании начального и последующих штрихов.

При поверке шкал по конечным мерам последние должны устанавливаться вместо относительного зеркала. При этом методика измерений не меняется.

Что касается возможности применения монохроматического света, то в этом случае наиболее перспективным является применение метода счета интерференционных полос с использованием реверсивного счетчика [5], устанавливаемого в наблюдательную систему.

По принципу, проверенному на макетной установке, в КБ ВНИИМ Р. И. Комаровой и В. С. Степановым разработана конструкция интерферометра для измерения шкал до 200 м. Прибор был изготовлен на заводе «Эталон» при участии механика И. С. Кулакевича и оптика П. П. Яковлева. Оптическая схема интерферометра, усовершенствованная по сравнению со схемой макетной установки, представлена на рис. 2.

Относительное зеркало 8 установлено в интерферометре на подвижной каретке и перемещается в пределах 100 мм. В осветительной и наблюдательной системах применены длиннофокусные объективы 4 и 14 ($f = 513$ мм), а также предусмотрены коллимационный 15 и автоколлимационный 16 окуляры для юстировки зеркал и эталона.

В схему введены два дополнительных зеркала 17 и 18, направляющих пучок лучей из разделяющей пластины в наблюдательную систему. Зеркало 18 съемное и устанавливается перед эталоном при измерении последнего в монохроматическом свете непосредственно в приборе.

Разделяющий блок 7 составлен из двух плоскопараллельных пластин; на поверхности одной из них нанесен светоделительный слой для полу-

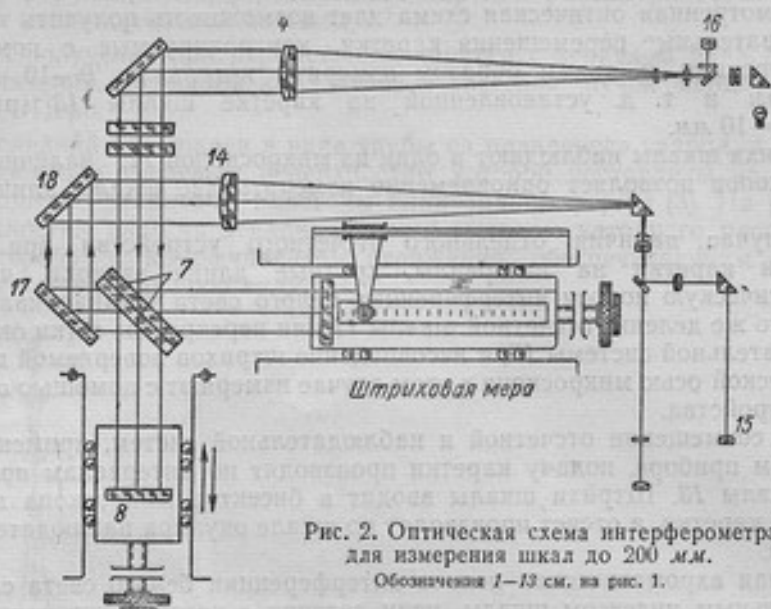


Рис. 2. Оптическая схема интерферометра для измерения шкал до 200 м.м.
Обозначения 1—12 см. на рис. 1.

чения равных интенсивностей пучков в ветвях интерферометра, а вторая пластина является компенсатором оптического хода лучей в стекле.

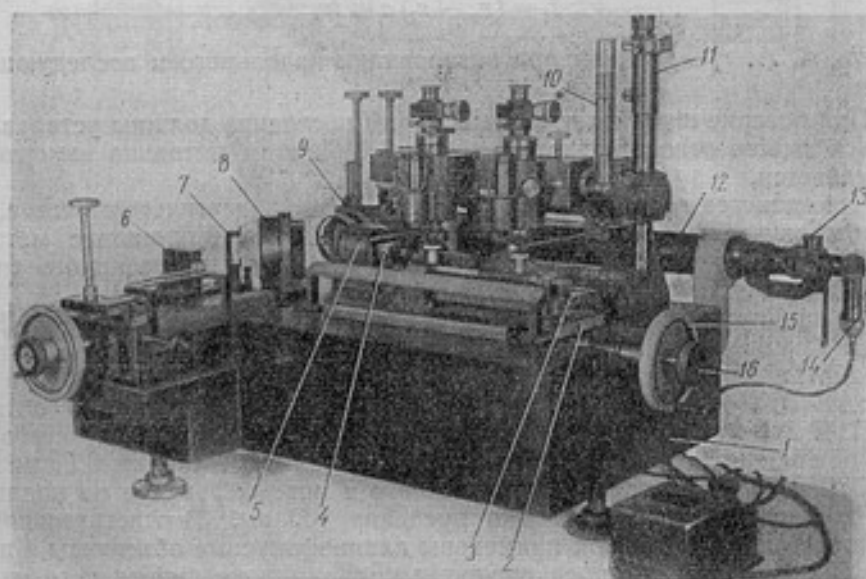


Рис. 3. Общий вид интерферометра.

На рис. 3 показан общий вид интерферометра без футляра. На верхней плоскости массивного основания — станины 1 смонтированы механи-

ческие и оптические узлы прибора: основная каретка 2 с платформой 3 для установки измеряемой шкалы и зеркалом 4, оправа объектива 5 коллиматора наблюдательной системы, каретка с относительным зеркалом 6, вспомогательные зеркала 7, оправа с разделяющей пластиной 8 и стол 9 с люнетом.

На этом же основании, параллельно ходу основной каретки, установлена балка с направляющими, на которых закреплены два микроскопа с 80- и 100-кратным увеличением. Микроскопы имеют как грубое, так и тонкое перемещение вдоль оси штриховой меры. Для фокусировки на штрихи меры предусмотрено вертикальное перемещение тубусов микроскопов. Применение фотозлектрического микроскопа, конструкция которого уже разработана во ВНИИМ, значительно повысит точность визирования и ускорит процесс измерений.

С правой стороны балки 13 смонтирован кронштейн, в корпусе которого укрепляется зрительная труба с коллимационным 10 и отсчетным 11 окулярами. Коллиматор 12 с источником света 14 укреплен в кронштейне на задней стенке основания вне термозащитного футляра прибора.

Для точного перемещения кареток с зеркалами применены направляющие шарикового типа, выполненные по специальной технологии и обеспечивающие высокую прямолинейность цилиндрического паза.

Подвижная пластина-ползуна 2 каретки имеет такие же цилиндрические пазы и соединяется с неподвижными направляющими с помощью шариков, имеющих свободное качение вдоль желобков. Люфт между шариками и направляющими пазами легко устраняется при сборке перемещением одной из боковых пластин.

При движении ползуна 2 шарики удерживаются на определенном расстоянии друг от друга плоскими сепараторами. Прецизионные шарики диаметром 12,6 мм подобраны в группы с разницей в диаметрах не более 0,3 мк.

При точном изготовлении и правильной сборке направляющих достигается легкое и плавное движение каретки, необходимое при интерференционных измерениях.

Механизм для грубого и тонкого перемещения кареток с зеркалами конструктивно выполнен в одном узле. Грубое перемещение каретки осуществляется от штурвала 15 ходовым винтом через маточную гайку, которая соединяется с ползуном. Тонкое перемещение каретки производится от микровинта 16 через шаровую поверхность; при этом ходовой винт с гайкой получают поступательное перемещение в направлении оси винта; обратное движение система получает от винтовой пружины.

Каретка 6 имеет устройство для поворота в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях, что дает возможность устанавливать плоскость относительного зеркала 6 в требуемое положение. Поворот осуществляется при помощи двух винтов. На верхней плоскости ползуна каретки относительного зеркала имеются направляющие типа ласточкина хвоста для установки оправы относительного зеркала. На этих же направляющих находятся люнеты для концевых мер, сличением с которыми можно также поверять шкалы.

На ползуне основной каретки, кроме регулируемой в двух плоскостях оправы зеркала, смонтированы стойка для оси поворота платформы 3 и вогнутое зеркало.

Штриховую меру устанавливают на платформе стола в люнетах, укрепленных в продольном пазу. Регулируют меру в горизонтальной плоскости «по азимуту» винтами люнетов, а в вертикальной плоскости — изменением наклона платформы стола.

Для удобства нахождения интерференции прибор имеет ориентировочные шкалы с пониусами.

Осветительная система предусматривает возможность измерения шкал в проходящем и отраженном свете. Для освещения стеклянных шкал применяют лампу дневного света, вынесенную на заднюю стенку наружной части корпуса интерферометра. Системой зеркал свет от этой лампы направляется на шкалу через прорезы в корпусе прибора и в платформе стола. При поверке в отраженном свете шкалы освещаются через иллюминаторы, ввинчиваемые в тубусы микроскопа.

Винты подачи и регулирования кареток, стола эталона и рычаг переключения коллимационного окуляра выведены наружу.

Интерферометр имеет термостатированный футляр из листового алюминия с теплоизоляционной прокладкой.

Как уже указывалось ранее, относительное зеркало в приборе установлено на подвижной каретке, которая в пределах 100 мм имеет поступательное перемещение по направлению хода лучей. Это перемещение дает возможность перехода на нулевой порядок интерференции полос переналожения путем смещения относительной плоскости.

Появление интерференционной картины i -го порядка соответствует такому соотношению длин плеч в интерферометре, при котором плоскость зеркала основной каретки находится на расстоянии $i\lambda$ от относительной плоскости.

Поступательное перемещение относительного зеркала на $i\lambda$ приводит к уравниванию длин плеч двухлучевого интерферометра и появлению интерференционной картины, образованной совокупностью пучков лучей с нулевой разностью хода в эталоне. Последние претерпевают в нем равное число отражений и, в случае сохранения равных интенсивностей при разделении в двухлучевом интерферометре, дают картины наибольшей контрастности.

Перемещение относительной плоскости может также применяться и при измерении в монохроматическом свете для увеличения пределов измерений и сохранения контрастности интерференционной картины.

В случае непрямолинейности перемещения малой каретки первоначальный угол клина между зеркалами восстанавливают, наклоняя относительное зеркало в двух плоскостях, а отсчет по шкале наблюдательной системы восстанавливают микроподачей малой каретки.

Согласно литературным данным [6] и нашим исследованиям наведение интерференционной полосы на нить или деление шкалы может осуществляться с погрешностью не более 0,1 полосы.

Совмещение определенного числа полос с определенным числом делений шкалы при восстановлении угла клина производится с погрешностью $0,1 \frac{\lambda}{2} \sqrt{2}$, что соответствует линейному смещению относительного зеркала $\delta_{\text{кор}} d$ (где d — диаметр светового пучка, равный 40 мм) и углу наклона относительного зеркала, характеризующему погрешность коррекции

$$\delta_{\text{кор}} = \frac{0,1\lambda\sqrt{2}}{2d} \approx 0,2''.$$

При юстировке интерферометра достигалась перпендикулярность пучка лучей плоскости зеркала θ и параллельность пучка перемещению основной каретки.

Перпендикулярность обеспечивается методом автоколлимации с погрешностью ψ , зависящей от неточности совмещения щели коллиматора и ее автоколлимационного изображения. Эта погрешность, опреде-

ленная экспериментально с помощью точного уровня, не превышает $15''$. Отсюда погрешность измерения длины шкалы 200 мм будет не более

$$\delta L_{\psi} = \frac{L\psi^2}{2} \approx 6 \cdot 10^{-4} \text{ мк.}$$

Установка плоскости зеркала перпендикулярно ходу каретки производилась по угольнику на просвет; в качестве базы использовалась лекальная линейка, предварительно установленная параллельно ходу каретки. При неточности установки зеркала в 10 мк и размерах его 40 мм отклонение от перпендикулярности составит $\varphi \approx 50''$, что может вызвать погрешность при измерении

$$\delta L_{\varphi} = \frac{L\varphi^2}{2} \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ мк.}$$

В действительности установка зеркала по щели может быть произведена точнее, но, вследствие использования дополнительных промежуточных баз, эта погрешность принята нами заведомо большей.

Совокупное действие погрешностей δL_{ψ} и δL_{φ} при юстировке в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях определяет погрешность

$$\delta L_{\Sigma} = \sqrt{2(\delta L_{\psi}^2 + \delta L_{\varphi}^2)} \approx \pm 0,009 \text{ мк.}$$

После сборки и юстировки интерферометра была исследована непрямолинейность перемещений кареток автоколлимационным (по коллиматору ПКГ-2 с ценой деления $0,26''$) и интерференционным методами. В последнем случае наблюдалось изменение ширины полос переналожения в монохроматическом фильтре $\lambda = 0,556 \text{ мк}$. Результаты обоих методов согласуются между собой: непрямолинейность хода основной каретки не превышала $1,0''$ в горизонтальной плоскости и $1,5''$ — в вертикальной.

Каретка с относительным зеркалом в процессе измерения обычно остается неподвижной. При измерении шаговым методом перекосы относительного зеркала можно корректировать по интерференционной картине или по автоколлимации, поэтому требования к прямолинейности перемещения каретки снижаются (непрямолинейность хода малой каретки не превосходит $10''$).

Рассмотрим погрешности измерения разностей по шкале наблюдательной системы.

Цена деления отсчетного устройства в нашем случае определяется углом клина между основными зеркалами двухлучевого интерферометра. Градуировка отсчетной шкалы состоит в установке угла клина, при котором k монохроматических полос известной длины волны λ совмещается с n делениями шкалы [4]. При этом погрешность градуировки составляет

$$\delta c_r = \sqrt{\left(\frac{\lambda \Delta k}{2n}\right)^2 + \left(\frac{k \Delta \lambda}{2n}\right)^2},$$

где Δk — погрешность совмещения интерференционных полос с делениями шкалы;

$\Delta \lambda$ — погрешность определения длины волны монохроматического фильтра; по аттестату $\Delta \lambda = 0,002 \text{ мк}$.

Например, погрешность установки цены деления $0,2 \text{ мк}$ при совмещении 20 полос с 28,5 деления, если принять погрешность совмещения равной $0,1$ полосы, будет равна $16 \cdot 10^{-4} \text{ мк}$.

При оценке погрешности отсчетного устройства необходимо учесть возможные изменения цены деления шкалы в результате непрямолинейности хода каретки по направляющим

$$\delta c_a = \frac{dc}{d\alpha_0} \Delta\alpha_0,$$

где α_0 — начальный угол клина, образуемый плоскостью одного из зеркал и мнимым изображением другого;

$\Delta\alpha_0$ — изменение угла клина в результате непрямолинейности хода каретки.

При данном увеличении наблюдательной системы интерферометра установка цены деления шкалы 0,2 мк соответствует углу интерференционного клина

$$\alpha_0 = \frac{\Delta h}{d} = 100'',$$

где Δh — приращение высоты клина, соответствующее 100 делениям шкалы.

Высокоточные шкалы имеют малое отклонение от номинала, поэтому данное отсчетное устройство, совмещенное с наблюдательной системой, предназначено для измерения малых разностей.

Погрешность измерения разности 2,0 мк при учете погрешности градуировки δc_c и погрешности от влияния непрямолинейности направляющих δc_a будет $\delta L_c = \pm 0,025$ мк.

При наличии отдельного отсчетного устройства, помимо погрешности измерения разности, имеет место погрешность двойной установки черной ахроматической полосы на перекрестие или деление окуляра наблюдательной системы

$$\delta c_0 = 0,1 \cdot \frac{\lambda}{2} \sqrt{2} = \pm 0,045 \text{ мк.}$$

Таким образом, погрешности, связанные с использованием системы для наблюдения интерференционной картины в качестве отсчетной, приблизительно того же порядка, что и при наличии отдельного отсчетного устройства.

При больших отклонениях хода каретки от прямолинейности целесообразно сохранить наблюдательную систему в качестве отсчетной для измерения миллиметровых интервалов на участках направляющих, для которых соблюдается условие $\Delta\alpha_0 \ll \alpha_0$.

Постоянство цены деления может быть получено также применением вместо основных зеркал двухлучевого интерферометра призм-триэдров, обеспечивающих параллельность падающего и отраженного пучков лучей. Кроме того, погрешности от влияния непрямолинейности хода каретки на стабильность цены деления шкалы могут быть исключены изменением угла интерференционного клина на обратный.

Интерференционная картина двухзначно определяется взаимным положением основных зеркал интерферометра в пространстве.

На рис. 4 представлены образуемые зеркалом каретки P и мнимым изображением относительного зеркала S в разделяющей пластине углы клина POS_1 и POS_2 , соответствующие одинаковым интерференционным картинам (по ширине и наклону полос), но с противоположным направлением перемещения полос при движении каретки с зеркалом.

Условимся считать, что при определенном положении шкалы окуляра перемещение ахроматической полосы в сторону положительных отсчетов при подаче каретки вперед (к разделяющей пластине) соответствует положительному углу клина, а перемещение в сторону «минус» — отрицательному углу клина.

При идеальной прямолинейности хода каретки положение плоскости зеркала PP по отношению плоскости относительного зеркала остается неизменным

$$\angle POS_1 = \angle POS_2 = \alpha_0 = \text{const.}$$

Допустим, что при непрямолинейности перемещения каретки плоскость зеркала PP получает дополнительный наклон на угол $\gamma = \angle POP_1$; и цена деления будет определяться углом клина P_1OS_1

$$\angle P_1OS_1 = \alpha_0 - \gamma.$$

При отрицательном угле клина цена деления определяется углом P_1OS_2

$$\angle P_1OS_2 = \alpha_0 + \gamma.$$

Усреднение наблюдаемых при двух противоположных углах клина отсчетов исключает систематическую погрешность непостоянства цены деления.

При измерении на приборе использовались кварцевые эталоны Фабри — Перо Э20-1, Э10-1 и Э1-1 длиной 20, 10 и 1 мм соответственно. Применение одного из сантиметровых и миллиметрового эталона дает возможность произвести аттестацию шкалы длиной 200 мм через 1 мм. Определение длины эталонов Фабри — Перо производится по методу интерференции полос равного наклона.

В табл. 1 приведены результаты измерений длины эталона Э10-1 в излучении естественного Cd (лампа с накаливаемыми электродами) на спектрометрической установке.

Обработка приведенных в табл. 1 измеренных поправок длины эталона по способу наименьших квадратов дает значение поправки длины эталона при 20°C $\delta_{\lambda_{20^\circ}} = 0,722 \text{ мк}$ со средней квадратичной погрешностью ряда условных уравнений

$$\sigma_{\lambda} = \pm 0,005 \text{ мк},$$

откуда длина эталона $(\text{Э10-1})_{20^\circ} = 10 \text{ мм} + 0,722 \text{ мк}$.

Надежность указанной точности определения длины эталона в предположении, что ряд измерений подчиняется нормальному закону, может быть вычислена следующим образом.

При доверительных границах $\eta = 0,001 \text{ мк}$ и числе связей $k = 10$ критерий Пирсона

$$\chi_1^2 = \frac{(n-1)\sigma^2}{(\sigma + \eta)^2} = 6,94; \quad \chi_2^2 = \frac{(n-1)\sigma^2}{(\sigma - \eta)^2} = 15,63;$$

$$P(\chi_1^2) = 0,82; \quad P(\chi_2^2) = 0,11,$$

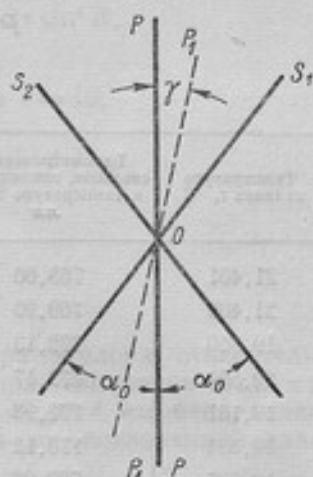


Рис. 4. Углы интерференционного клина.

откуда вероятность того, что полученное значение σ_s находится в доверительных границах $0,004 < \sigma_s < 0,006$, равна

$$P = P(\chi_1^2) - P(\chi_2^2) \approx 0,7.$$

Таблица 1

| Температура эталона $t, ^\circ\text{C}$ | Барометрическое давление, приведенное к температуре 20°C , мм | Влажность воздуха, мм | Измеренные поправки длины эталона (мк) при температуре $t, ^\circ\text{C}$ | Приведенные поправки (мк) при температуре 20°C |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 21,431 | 765,66 | 7,5 | 0,732 | 0,728 |
| 21,408 | 769,95 | 5,4 | 0,728 | 0,724 |
| 19,960 | 772,13 | 5,9 | 0,715 | 0,715 |
| 20,554 | 772,17 | 5,9 | 0,716 | 0,714 |
| 19,181 | 773,98 | 6,3 | 0,725 | 0,727 |
| 19,534 | 773,12 | 5,3 | 0,722 | 0,723 |
| 19,397 | 769,07 | 4,6 | 0,716 | 0,718 |
| 18,872 | 765,67 | 5,8 | 0,711 | 0,714 |
| 18,151 | 759,81 | 7,3 | 0,717 | 0,722 |
| 19,058 | 757,41 | 7,4 | 0,724 | 0,727 |
| 18,144 | 758,61 | 7,2 | 0,714 | 0,719 |

Эталон Э20-1 был измерен в оптической лаборатории дважды: в излучении Cd^{114} и Kr^{86} ; при этом получен следующий результат:

$$(\text{Э}20-1)_{20^\circ} = 20 \text{ мм} - 0,139 \text{ мк}.$$

Длина эталона 1 мм предварительно определена из измерений на интерферометре Кестерса

$$(\text{Э}1-1)_{20^\circ} = 1 \text{ мм} - 0,007 \text{ мк}.$$

Воспроизведение исходной длины с помощью эталона Фабри — Перо осуществляется в интерферометре с некоторой погрешностью $\delta L'_\phi$, обусловленной перекосом оси эталона относительно пучка лучей коллиматора, и погрешностями δL_π и δL_θ , обусловленными непараллельностью зеркал эталона.

Установка трубчатого эталона в приборе по автоколлимации в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях осуществляется с погрешностью $\phi\sqrt{2}$, вследствие чего погрешность измерения длины 200 мм (см. стр. 119) равна

$$\delta L'_\phi = 8 \cdot 10^{-4} \text{ мк}.$$

При непараллельности эталона, равной $0,1 \frac{\lambda}{2}$, и диаметре пластин $D = 80 \text{ мм}$ угол θ между отражающими поверхностями его равен $0,1''$.

Пучок лучей, получивший в эталоне разность хода $2i\epsilon$, после $2i$ отражений отклонится на угол

$$\tau = 4i\theta = 4''.$$

Таким образом, наибольшая разность хода пучка лучей при измерении длины 200 мм будет иметь погрешность

$$\delta L_n = 2 \sum_1^{10} \varepsilon (1 - \cos 2i\theta) = 2 \sum_1^{10} 2\varepsilon \sin^2 i\theta,$$

или, ввиду малости углов $\theta, 2\theta, \dots, 20\theta$ и при $i = 10$,

$$\delta L_n = 4\varepsilon\theta^2 \sum_{n=1}^{10} i^2 = 4\varepsilon\theta^2 \frac{n(n+1)(2n+1)}{6};$$

окончательно

$$\delta L_n = 6 \cdot 10^{-5} \text{ мм.}$$

В результате неточности установки центра эталона относительно ребра клина, а также в связи с тем, что при измерении разностей используется площадь его пластин радиусом $\Delta r_0 = 4$ мм, непараллельность эталона может обусловить погрешность воспроизводимой длины

$$\delta L_0 = i \frac{\partial L}{\partial r_0} \Delta r_0 \cos \nu,$$

где r_0 — радиус, по которому градиент длины эталона наибольший;

ν — угол между направлением наибольшего градиента длины эталона и направлением ребра клина.

Погрешность δL_0 при наибольшем значении $\cos \nu = 1$ и десятикратном умножении длины эталона будет равна

$$\delta L_0 = 16 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Таким образом, погрешность, связанная с воспроизведением длины с помощью эталона, будет равна

$$\delta L_\varepsilon = \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + (\delta L_\nu)^2 + (\delta L_n)^2 + (\delta L_0)^2} = \pm 0,0055i.$$

При измерении длины 200 мм

$$\delta L_\varepsilon \approx \pm 0,06 \text{ мм.}$$

При исследовании метода были произведены измерения шкал по эталонам Фабри — Перо.

Образцовая стеклянная шкала стереокомпаратора № 5103 была измерена на макетной установке и приборе по эталонам Э1-1, Э10-1 и Э20-1 (табл. 2).

Поправки сантиметровых интервалов шкалы № 18772 определены по Э10-1 двумя методами: непосредственно измерением и калибровкой по методу Перара.

Последнее оказалось возможным благодаря оптическому умножению исходной длины эталона в различных сочетаниях. При калибровке пользовались условными уравнениями вида

$$x_i - x_{i+1} + i\delta\varepsilon = \Delta_i,$$

свободные члены которых Δ_i являлись результатами непосредственных измерений, $(x_{i+1} - x_i)$, $\delta\varepsilon$ — поправками длины i -го интервала и длины эталона соответственно.

Таблица 2

| Интервалы, мм | Поправки интервалов (мк) шкалы № 5103, полученные | | Интервалы, мм | Поправки интервалов (мк) шкалы № 5103, полученные | |
|------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| | на макете прибора при измерении по 310-1 | на приборе при измерении по 320-1 и 31-1 | | на макете прибора при измерении по 310-1 | на приборе при измерении по 320-1 и 31-1 |
| 0—1 | — | —0,07 | 0—60 | —0,78 | —0,74 |
| 0—2 | — | —0,26 | 0—70 | —0,92 | — |
| 0—3 | — | —0,29 | 0—80 | —0,87 | —0,99 |
| 0—4 | — | —0,38 | 0—90 | —0,79 | — |
| 0—5 | — | —0,30 | 0—100 | —1,04 | —1,06 |
| 0—6 | — | —0,37 | 0—110 | —1,21 | — |
| 0—7 | — | —0,26 | 0—120 | —1,43 | —1,30 |
| 0—8 | — | —0,19 | 0—130 | —1,68 | — |
| 0—9 | —0 | —0,06 | 0—140 | —1,88 | —1,85 |
| 0—10 | +0,07 | +0,02 | 0—150 | —2,18 | — |
| 0—20 | —0,25 | —0,17 | 0—160 | —2,20 | —2,23 |
| 0—30 | —0,47 | — | 0—170 | —2,59 | — |
| 0—40 | —0,51 | —0,45 | 0—180 | —2,97 | —2,98 |
| 0—50 | —0,68 | — | 0—190 | —2,82 | — |
| | | | 0—200 | —2,80 | —2,72 |

Решение условных уравнений по методу наименьших квадратов дают значения неизвестных поправок интервалов шкалы со средней квадратичной погрешностью определения неизвестных методом калибровки

$$\sigma_{x_i} = 0,390 \sqrt{\frac{2\sum v_i^2}{(n-1)(n-2)}} = \pm 0,05 \text{ мк},$$

где n — число калибруемых интервалов.

Средняя квадратичная погрешность определения поправок шкалы с учетом погрешности определения общей длины шкалы по экспериментальной формуле В. А. Баринова [7]

$$\sigma_{l_i} = \pm (0,05 + 0,005l \cdot 10^{-6}) \text{ мк},$$

где 0,005 — коэффициент, учитывающий погрешность определения общей длины.

Результаты калибровки и непосредственного измерения шкалы по эталону Фабри — Перо представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, среднее расхождение результатов непосредственных измерений шкалы и калибровки по эталону Фабри — Перо составляет 0,03 мк при наибольшем расхождении 0,10 мк, что свидетельствует о достаточно высокой точности результатов непосредственных измерений методом оптического умножения.

При калибровке с помощью интерференционного эталона оптическим умножением исходной длины воспроизводится вспомогательная «идеальная» шкала, поправки интервалов которой прогрессивно возрастают

Таблица 3

| Интервалы шкалы, мм | Поправки интервалов шкалы № 18772, определенные по Э10-1, мк | | Интервалы шкалы, мм | Поправки интервалов шкалы № 18772, определенные по Э10-1, мк | |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------|
| | непосредственное измерение | калибровка | | непосредственное измерение | калибровка |
| 0—10 | -0,27 | -0,22 | 0—110 | +0,27 | +0,24 |
| 0—20 | -0,10 | -0,08 | 0—120 | +0,54 | +0,54 |
| 0—30 | -0,36 | -0,38 | 0—130 | +0,63 | +0,63 |
| 0—40 | -0,25 | -0,26 | 0—140 | +1,00 | +1,02 |
| 0—50 | -0,26 | -0,28 | 0—150 | +1,11 | +1,17 |
| 0—60 | -0,09 | -0,06 | 0—160 | +1,23 | +1,26 |
| 0—70 | +0,02 | +0,05 | 0—170 | +1,09 | +1,14 |
| 0—80 | +0,18 | +0,14 | 0—180 | +0,67 | +0,74 |
| 0—90 | +0,09 | +0,10 | 0—190 | +1,06 | +1,16 |
| 0—100 | +0,22 | +0,21 | 0—200 | +1,00 | +1,06 |

с кратностью умножения длины. В результате калибровки по методу Перара определяются поправки как аттестуемой, так и вспомогательной шкалы.

В табл. 4 определенные таким образом поправки интервалов вспомогательной шкалы сопоставлены с поправками, вычисленными по результатам измерений длины эталона интерференционным методом.

Таблица 4

| Кратность умножения длины эталона | Поправки длины эталона различной кратности (мк), вычисленные по результатам | | | |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------|---------|
| | интерференционных измерений | калибровки шкалы № 18772 | | |
| | | интервал 0—100 | интервал 100—200 | среднее |
| 1 | 0,72 | 0,76 | 0,66 | 0,71 |
| 2 | 1,44 | 1,50 | 1,36 | 1,43 |
| 3 | 2,16 | 2,20 | 2,22 | 2,21 |
| 4 | 2,88 | 2,93 | 2,88 | 2,90 |
| 5 | 3,60 | 3,59 | 3,45 | 3,52 |
| 6 | 4,32 | 4,34 | 4,23 | 4,28 |
| 7 | 5,04 | 5,05 | 5,14 | 5,09 |
| 8 | 5,76 | 5,74 | 5,72 | 5,73 |
| 9 | 6,48 | 6,51 | 6,48 | 6,50 |

Среднее расхождение поправок шкалы, определенных по результатам интерференционных измерений и по результатам калибровки, составляет 0,02 мк при наибольшем расхождении 0,08 мк.

Таблица 5

В табл. 5 приведено сопоставление результатов измерения вспомогательных шкал рабочих эталонов дециметров Д-29, Д-36, Д-40 и Д-76 интерференционным (по Э1-1 на интерференционном приборе для измерения линейных шкал) и контактным (по концевым мерам на штрихоконцевом контактном компараторе [8]).

| Штриховые меры | Поправки интервалов (мк), полученные методами | |
|-------------------|--------------------------------------------------|------------|
| | интерференцион- ным | контактным |
| Д-29 | -0,53 | -0,46 |
| Д-36 | +0,24 | +0,21 |
| Д-40 | -0,21 | -0,31 |
| Д-76 | -0,86 | -0,91 |

Шкала стереокомпаратора № 490541 измерена на интерферометре через 1 мм по эталонам Э1-1, Э10-1 и Э20-1. При этом поправки мил-

лиметровых подразделений получены суммированием поправок соответствующего сантиметрового и миллиметрового интервалов.

Поправка общей длины шкалы была определена по эталону Э20-1; эта же поправка может быть вычислена также и по результатам измерений шкалы по эталону Э1-1 суммированием поправок сантиметровых интервалов. Несмотря на то, что в последнем случае происходило накопление погрешностей, результаты определения по эталонам Э20-1 и Э1-1 разошлись только на 0,01 мк.

Анализ рассеяния результатов совокупности измерений на макетной установке и на приборе показал, что в обоих случаях характер распределения соответствует нормальному закону [9]. При этом для критериев согласия Пирсона и Романовского получено

$P(\chi^2) = 0,42$ и $R = 0,63$ — для результатов измерения на приборе и

$P(\chi^2) = 0,07$ и $R = 1,40$ — для результатов измерения на макете.

Коэффициенты асимметрии и эксцесса в обоих случаях незначительны.

Внутренняя сходимость ряда измерений на интерферометре характеризуется величиной $\sigma = 0,06$ мк, что в два раза выше, чем на макете, где $\sigma = 0,13$ мк.

На основании полученных значений средней квадратичной погрешности измерений, погрешности аттестации исходной длины эталонов и учета возможных инструментальных погрешностей прибора можно заключить, что интерференционный метод дает возможность обеспечить измерение шкал с погрешностью не более 0,1 мк.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романова М. Ф., Карташев А. И., Исследование интерференционной установки для воспроизведения метра в длинах световых волн, Труды ВНИИМ, вып. 7 (67), 1949.
2. Бржезинский М. Л., Универсальный интерференционный компаратор, Труды ВНИИМ, вып. 26 (86), 1955.
3. Батарчукова Н. Р., Владимиров И. П., Опыт по изготовлению интерференционных эталонов типа Фабри—Перо, Труды ВНИИМ, вып. 26 (86), 1955.
4. Уверский И. Т., Контактный интерференционный метод измерения длины на приборах ПИУ-2, «Измерительная техника», № 5, 1955.
5. Ko Hara and Smith D. S., Length measurement by Fringe Coating, The review of scientific instruments, № 30, vol. 8, 1959.
6. Захарьевский А. П., Интерферометры, Оборонгиз, 1951.
7. Баринов В. А., Современное состояние эталонов длины и методы точного измерения длины, Л., 1941.
8. Трофимова Н. В., Контактный метод сравнения штриховых мер с концевыми, Труды ВНИИМ, вып. 37 (97), 1959.
9. Романовский В. И., Применение математической статистики в опытном деле, Гостехиздат, 1947.

Поступила в редакцию
3/1 1960 г.

М. Ф. ГРЕЧКО, Л. И. СМИРНОВА,
Г. И. СТРАКУН, Е. Е. ШАРОВА
ВНИИМ

ЭТАЛОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ

В статье приводится описание и результаты исследования созданной во ВНИИМ эталонной установки для измерений углов, а также методика и результаты калибровки 36-гранных кварцевых призм. Кроме того, дана обработка результатов измерений.

Наиболее существенным в проблеме измерения углов в машиностроении и приборостроении является вопрос об единстве этих измерений и, соответственно, о методах и средствах, с помощью которых может быть обеспечена высокая точность воспроизведения и передачи значения заданного угла.

До недавнего времени самым распространенным был гониометрический метод измерения углов. Наиболее точными приборами, с помощью которых осуществляют этот метод, являются односекундные гониометры. Однако эти приборы, как показала практика последних лет, не всегда удовлетворяют промышленность, требующую нередко измерений с погрешностью, не превышающей $1''$, в то время как предельная погрешность измерений на односекундных гониометрах составляет большей частью около $2''$. Это обстоятельство, а также потребность в более рациональной методике поверки ряда угломерных приборов с круговыми шкалами вызвали необходимость разработки более точных методов измерения и передачи угловых размеров.

Ознакомление с состоянием вопроса в области точного измерения углов показало, что к уже известным интерференционным и геодезическим методам прибавился еще один метод, существенно отличающийся от предыдущих тем, что исходной мерой является правильная многогранная измерительная призма, углы которой определяют (калибруют) с помощью двух не связанных между собою автоколлиматоров [1, 2]. Измерение углов других призм может быть выполнено путем сравнения их с углами калиброванной призмы, для чего пользуются одним автоколлиматором.

Многолетний опыт по изготовлению и применению технических измерительных призм в отечественной промышленности, а также опыт ВНИИМ по аттестации различных многогранных призм гониометрическим методом показали, что точные измерительные многогранные призмы и автоколлиматоры можно применить не только в исходном методе, но

и для аттестации других многогранников, блоков из угловых мер и различных призм, имеющих углы, равные или кратные углам между смежными гранями предварительно откалиброванных призм. Кроме того, по известным многогранникам легко могут быть поверены круговые шкалы таких широко применяемых в промышленности угломерных приборов, как гониометры, оптические делительные головки (ОДГ) и оптические делительные столы (ОДС).

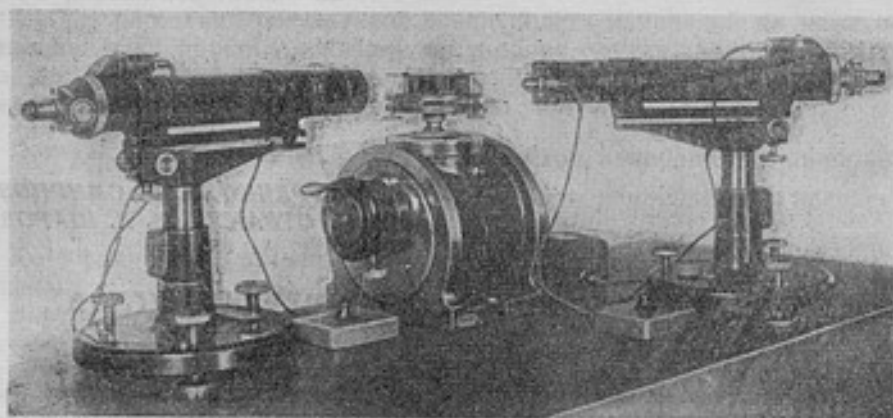


Рис. 1. Эталонная установка ВНИИМ для измерений углов.

Возможность осуществления угловых мер в виде точных многогранных призм, высокая точность автоколлимационного метода измерения углов и вместе с тем простота способов дальнейшей передачи угловых размеров обусловили применение этого метода при создании эталонной установки ВНИИМ для измерений углов.

Установка состоит из двух автоколлиматоров и поворотного устройства со столом для многогранников, смонтированных на массивной чугунной плите (рис. 1).

Исходными мерами при измерении на установке служат точные многогранные призмы.

Метод измерения заключается в калибровке многогранных призм с помощью двух автоколлиматоров, расположенных таким образом, что их оптические оси перпендикулярны к отражающим граням призм, а угол между осями равен номинальному значению центрального угла между перпендикулярами к этим граням.

Работа по созданию эталонной установки состояла в конструировании и изготовлении точных автоколлиматоров и в создании таких измерительных призм, которые удовлетворяли бы весьма строгим техническим условиям.

Автоколлиматоры и их исследование

Конструкция автоколлиматоров (рис. 2) обеспечивает не только необходимую точность, но и удобство в эксплуатации, так как вместо обычных длиннофокусных объективов были применены линзовые телеобъективы, дающие возможность получить приборы, в которых небольшая длина трубы сочетается со значительным фокусным расстоянием, что способствует повышению точности визирования и отсчета. Расстояние от первой поверхности объективов автоколлиматоров до их задней

фокальной плоскости составляет всего 490 мм при фокусном расстоянии $f' = 1000$ мм. Конструктивное оформление автоколлиматоров выполнено по типу серийных автоколлиматоров ПКГ-1 конструктором Е. И. Финкельштейном [3].

Длина трубы автоколлиматора, включая винтовые окулярные микрометры астрономического типа, не превышает 600 мм. Для светового диаметра первой линзы $D = 56$ мм первого компонента 7 объектив хорошо исправлен в отношении сферической ($\Delta S_D = -0,27$ мм для края отверстия и $\Delta S_D' = -0,22$ мм на зоне) и полевых aberrаций. Влияние хроматизма, неизбежного в линзовых системах, уменьшено применением зеленого светофильтра 3.

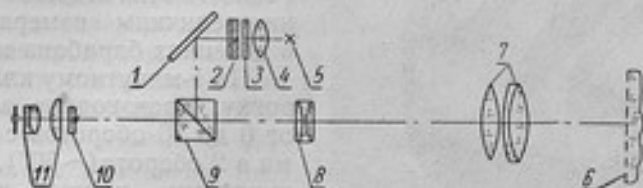


Рис. 2. Автоколлиматор.

Фокусное расстояние объектива $f' = 1000$ мм; относительное отверстие 1:18; поле зрения $2\theta = 0^\circ 48'$; общее увеличение трубы: $\Gamma = 67\times$ (с 17-кратным окуляром), $\Gamma = 46,4\times$ (с 11,5-кратным окуляром), $\Gamma = 36,4\times$ (с 9-кратным окуляром).

Некоторой особенностью приборов является также возможность заменять в процессе работы одни автоколлимационные сетки 2 другими, выбирая наиболее выгодный для данных условий вариант. Приборы снабжены сетками, представляющими собой перекрестия, нанесенные на посеребренную поверхность стеклянной пластины, и обычными сетками с двумя параллельными штрихами (бисекторные марки).

Если одну из таких автоколлимационных сеток установить в задней фокальной плоскости объектива и осветить ее источником света 5 (через конденсор 4 и светофильтр 3), то исходящие из нее лучи после отражения от зеркала 1 и от полупосеребренной поверхности призмы-куба 9 выйдут из объектива 7—8 параллельным пучком. После отражения от зеркальной поверхности 6, установленной перед объективом перпендикулярно его оси, лучи возвратятся в объектив и часть их, прошедшая сквозь призму 9, образует автоколлимационное изображение перекрестия в задней фокальной плоскости объектива. Это изображение рассматривают в окуляр 11, снабженный перекрестием 10, которое перемещают с помощью микрометрического винта. Поворот зеркальной поверхности на некоторый угол вызовет удвоенное отклонение отраженного пучка лучей. Возникающее при этом смещение изображения измеряют и отсчитывают по барабану окулярного микрометра, градуировка которого выполнена в угловых единицах. В автоколлиматорах могут быть применены также оптические микрометры. Исследование автоколлиматоров имело целью определить влияние случайных и систематических погрешностей на результаты измерений на установке.

Основным источником систематических погрешностей является неточность изготовления окулярных микрометров автоколлиматоров (ошибки микрометрических винтов и отсчетных барабанов). К числу случайных погрешностей относится погрешность, происходящая от неточности наводки и отсчета и от перестановки автоколлиматоров при переходе от серии к серии.

Для градуировки и исследования окулярных микрометров было изготовлено приспособление, состоящее из трех клиньев ($1''$, $10''$ и $1'$) из пирекса, посаженных на оптический контакт на плоскую пластину (рис. 3). Углы клиньев были измерены на двух интерферометрах Кестерса.

При градуировке отсчетных устройств автоколлиматоров градуировочные клинья, укрепленные на стойке, устанавливали перед автоколлиматором.

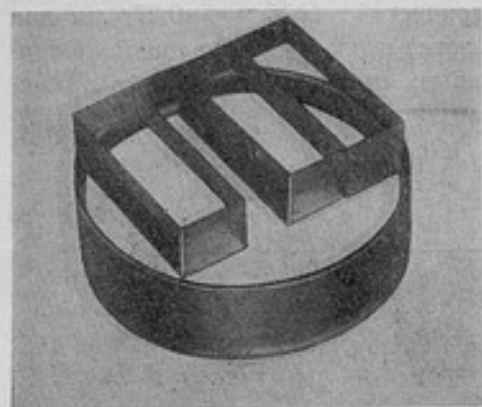


Рис. 3. Приспособление для градуировки и исследования окулярных микрометров.

Получив автоколлимационные изображения светового перекрестия от поверхности пластины и клина, по окулярному микрометру производили отсчеты. Разность этих отсчетов дает значенные величины измеряемого угла в делениях барабана микрометра.

По 1-минутному клину градуировку производили в диапазоне от 0 до 20 оборотов с интервалами в 2 оборота ($\sim 50''$), а по 10-секундному клину — в пределах двух рабочих оборотов с интервалами, равными 0,1 оборота ($\sim 2,5''$).

В результате градуировки цена наименьшего деления получилась равной $0,26''$. Средняя квадратичная погрешность определения средней цены деления барабанов окулярных микрометров составила $0,004''$. Изучение винтов микрометров производили по оптическим клиньям и с помощью контактного интерферометра ПИУ с расширенным пределом измерений [4]. Суммарные ошибки винтов окулярных микрометров № 0002 и 0004 в пределах одного оборота не превысили соответственно 0,6 и 1,2 мк, что при фокусном расстоянии объективов $f = 1000$ мм составляет в плоскости изображения $0,05-0,1''$.

Точность наводки и отсчета автоколлиматоров определяли при разных автоколлимационных марках и окулярах с 9-, 11,5- и 17-кратным увеличением. Погрешности от неточности наведения и отсчета $\sigma_{н.о.}$ определяли из многократных ($n = 50$) наведений перекрестия винтового окулярного микрометра на автоколлимационное изображение марки. Наименьшая средняя квадратичная погрешность $\sigma_{н.о.} = 0,16''$ получилась при работе с окуляром $11,5\times$. Общее увеличение оптической системы автоколлиматоров составляет в этом случае $\Gamma = 46,4\times$.

Многогранные призмы и их исследование

Большинство призм, применяемых в качестве угловых мер в технической и измерительной практике, представляет собой стальные или стеклянные диски с гранями, нанесенными на цилиндрической поверхности. Такие же призмы применяются и при наиболее точных измерениях, например в Национальной физической лаборатории Англии (НФЛ) применяют стальные монолитные многогранники. Исходная мера Национального бюро стандартов США (НБС) выполнена в соответствии с допусками: отступление поверхностей отражающих граней от плоскости не должно превышать $0,05$ мк; чистота поверхности граней должна соот-

ветствовать 13—14 классу; пирамидальность граней должна быть менее 15"; максимальное отклонение углов между двумя любыми смежными гранями не должно превышать 10".

Данные допуски считались весьма трудно выполнимыми при изготовлении монолитной конструкции, поэтому в НБС предпочли изготовить сборную конструкцию из тщательно доведенных плиток Иогансона [2, 5]. Отклонения углов сборного многогранника НБС фактически достигали 8".

К точности изготовления призм ВНИИМ были предъявлены следующие требования:

- а) отступление измерительных поверхностей от плоскости — не более 0,2 интерференционной полосы (менее 0,06 мк);
- б) чистота поверхностей граней 13—14 класса;
- в) пирамидальность граней — в пределах 5";
- г) погрешность изготовления угла между любыми двумя смежными гранями — в пределах $\pm 3-4''$.

Наряду с выполнением этих условий, связанных со значительной затратой труда и времени, было необходимо обеспечить неизменность углов между гранями с течением времени и минимальную зависимость призмы от изменений температуры. Оценивая с такой позиции сборные металлические конструкции, следует отметить, что их изготовление и последующая калибровка требуют значительной затраты труда. В то же время такие конструкции обладают рядом недостатков, отсутствующих у призм, изготовленных из целого диска. Эти недостатки значительно усложняют работу и вызывают необходимость соблюдения строго температурного режима в помещении, где находится установка [2], или местного термостатирования ее.

Если учесть, что калибровка многогранных призм — процесс весьма трудоемкий, а применение их рассчитано на длительное время, то целесообразность изготовления монолитных мер становится очевидной.

Исходя из указанных соображений, было решено создать монолитные многогранники и для получения большей стабильности изготовить их из плавленого кварца. При этом оказалось необходимым выполнение следующих дополнительных требований:

- а) опорные плоскости должны быть изготовлены с точностью до 0,5 интерференционной полосы;
- б) параллельность опорных плоскостей должна быть в пределах ± 1 мк.

Жесткие допуски на изготовление призм потребовали такой технологии, при которой накопление ошибок изготовления углов между смежными гранями было бы минимальным. По разработанной нами технологии процесс последовательного нанесения граней разбит на несколько взаимно контролируемых операций. Промежуточный контроль углов между отдельными операциями производили с помощью автоколлиматора со шкалой в поле зрения окуляра ($f_{06} = 500$ мм) и гониометрического приспособления с ценой деления отсчетного устройства 1". Таким путем были изготовлены три 36-гранные и две 24-гранные призмы (рис. 4) и затем грани призм были алюминированы. Все призмы изготовлены оптиком Е. С. Грушко.

Три призмы, являющиеся (согласно утвержденной поверочной схеме) рабочими эталонами, были тщательно исследованы; их центральные углы определены методом калибровки.

Для этого калибруемый многогранник был установлен на столик поворотного устройства. Плоскость столика предварительно приводили в горизонтальное положение по уровню. Затем двумя юстировочными

винтами столика и подъемным винтом трубы первого автоколлиматора многогранник и автоколлиматор устанавливали в такое положение, когда грани призмы располагались перпендикулярно оптической оси автоколлиматора. По установленному многограннику производили выверку положения второго (подвижного) автоколлиматора, причем для первой серии измерений его устанавливали так, чтобы угол $A = 60^\circ$

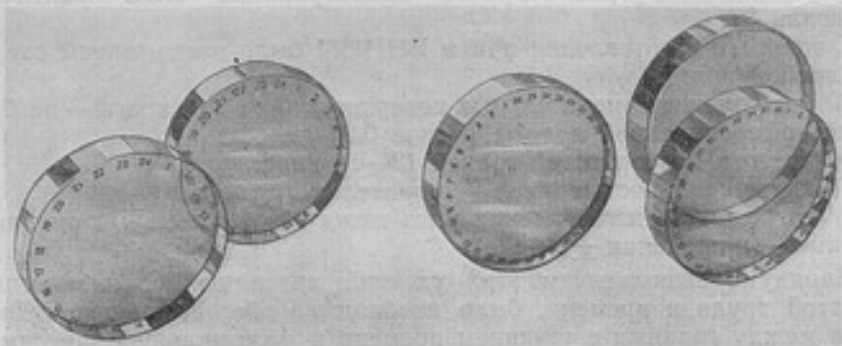


Рис. 4. Кварцевые многогранные призмы — рабочие эталоны.

между осями труб неподвижного и подвижного автоколлиматоров был равен центральному углу между смежными гранями многогранников, как показано на рис. 5, где для простоты изображен шестиугольный многогранник с внешними углами a_1, \dots, a_6 .

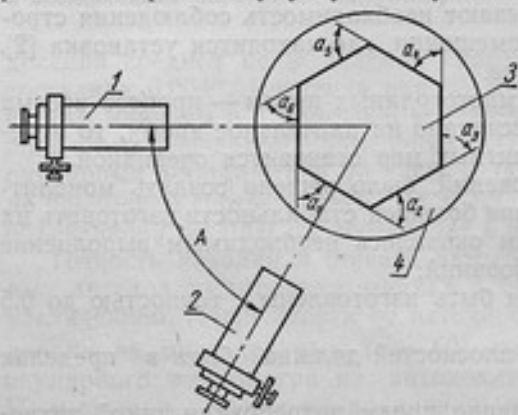


Рис. 5. Расположение автоколлиматоров при калибровке призмы.

1 и 2 — автоколлиматоры; 3 — многогранник; 4 — вращающийся стол.

Произведя отсчеты по окулярным микрометрам, соответствующие положениям автоколлимационных изображений, возникших при отражениях световых пучков от первой пары граней, поворачивали столик 4 с многогранником так, чтобы в автоколлиматоры можно было наблюдать следующую пару граней. После соответствующих отсчетов опять поворачивали столик и т. д. до тех пор, пока не был завершен полный оборот.

Разность d_1 между отсчетами по окуляр-микрометрам, полученная при наведении на две первые грани, представляет измеренную разность между внешним углом a_1 этих граней и углом A между автоколлиматорами.

Таким образом, в результате измерений можно получить следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} a_1 - A &= d_1 \\ a_2 - A &= d_2 \\ a_3 - A &= d_3 \\ \dots &\dots \\ a_n - A &= d_n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Суммируя эти уравнения, получим:

$$2\pi - nA = \sum_1^n d_i,$$

откуда

$$A = \frac{2\pi}{n} - \frac{1}{n} \sum_1^n d_i. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получаем:

$$a_n = \frac{2\pi}{n} - \frac{1}{n} \sum_1^n d_i + d_n. \quad (3)$$

Отсюда находим значения любого угла.

Можно уравнения (1) представить не в значениях углов, а в отклонениях их действительных значений от номинальных. Так как угол между автоколлиматорами только приближенно равен номинальному значению угла многогранника, то разность d_i будет заключать в себе отклонение угла между смежными гранями многогранника от его номинального значения γ_i и постоянную погрешность угла между оптическими осями автоколлиматоров Δ . Таким образом,

$$d_i = \gamma_i + \Delta.$$

Для замкнутого цикла

$$\sum_{i=1}^n d_i = \sum_{i=1}^n \gamma_i + n\Delta,$$

где n — число граней многогранника.

Но так как для полного цикла

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i = 0,$$

то

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i. \quad (4)$$

Следовательно,

$$\gamma_i = d_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i,$$

и отсюда получаем значения отклонений для каждого угла многогранника.

Для повышения точности измерения углов многогранника производят несколько серий измерений, изменяя угол A между автоколлиматорами.

Калибровка одной из 36-гранных призм была произведена: 1) по методу разностей и 2) по методу Перара.

По методу разностей было выполнено 18 серий наблюдений, в которых угол между автоколлиматорами изменяли от 10 до 180°. Каждая серия состояла из 10 приемов, причем на каждую грань производили по три наведения с отсчетами по окулярным микрометрам и вычисляли среднее арифметическое.

Первое значение центрального угла $a_1 = 10^\circ$ получается непосредственно из 1-й серии, когда угол между автоколлиматорами равен A (рис. 5).

В последующие серии угол $a_1 = 10^\circ$ входит как часть измеряемого угла и значение его определяют из разностей.

Для 2-й серии, когда угол между автоколлиматорами $A_2 = 20^\circ$, имеем:

$$\left. \begin{aligned} a_{1-2}^{20^\circ} &= \frac{1}{2} [(a_{1-3} - a_{2-3}) + (a_{36-2} - a_{36-1})] \\ a_{2-3}^{20^\circ} &= \frac{1}{2} [(a_{2-4} - a_{3-4}) + (a_{1-3} - a_{1-2})] \\ &\dots \dots \dots \\ a_{36-1}^{20^\circ} &= \frac{1}{2} [(a_{36-2} - a_{1-2}) + (a_{35-1} - a_{35-36})] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где индекс 20° при a указывает угол между автоколлиматорами A_i .

Соответственно для следующей (3-й) серии, когда $A_3 = 30^\circ$:

$$\left. \begin{aligned} a_{1-2}^{30^\circ} &= \frac{1}{2} [(a_{1-4} - a_{2-4}) + (a_{35-2} - a_{35-1})] \\ a_{2-3}^{30^\circ} &= \frac{1}{2} [(a_{2-5} - a_{3-5}) + (a_{36-3} - a_{36-2})] \\ &\dots \dots \dots \\ a_{36-1}^{30^\circ} &= \frac{1}{2} [(a_{36-3} - a_{1-3}) + (a_{34-1} - a_{34-36})] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Но так как в процессе калибровки мы измеряем не значения углов, а отклонения их действительных значений от номинальных, то уравнения (5) и (6) для угла a_{1-2} будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{1-2}^{20^\circ} &= \frac{1}{2} [(\gamma_{1-3} - \gamma_{2-3}) + (\gamma_{36-2} - \gamma_{36-1})], \\ \gamma_{1-2}^{30^\circ} &= \frac{1}{2} [(\gamma_{1-4} - \gamma_{2-4}) + (\gamma_{35-2} - \gamma_{35-1})], \\ &\dots \dots \dots \\ \gamma_{1-2}^{180^\circ} &= \frac{1}{2} [(\gamma_{1-19} - \gamma_{2-19}) + (\gamma_{20-2} - \gamma_{20-1})], \end{aligned} \right\}$$

и окончательное значение отклонения центрального угла находят как среднее арифметическое

$$\bar{\gamma}_{1-2} = \frac{\sum \gamma_{1-2}}{k},$$

где k — число серий.

Таблица

| Угол между гранями | Отклонение τ_i действительного значения угла от его номинального значения ($10''$) | | |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------|
| | по методу разностей | по методу Перара | расхождение между методами |
| 1-2 | +1,69 | +1,72 | -0,03 |
| 2-3 | -0,08 | -0,06 | -0,02 |
| 3-4 | -1,91 | -1,88 | -0,03 |
| 4-5 | +0,09 | +0,07 | +0,02 |
| 5-6 | +1,50 | +1,36 | +0,14 |
| 6-7 | -1,00 | -0,86 | -0,14 |
| 7-8 | +3,40 | +3,36 | +0,04 |
| 8-9 | -0,99 | -1,00 | +0,01 |
| 9-10 | -0,07 | -0,08 | +0,01 |
| 10-11 | +3,04 | +2,98 | +0,06 |
| 11-12 | -1,93 | -1,88 | -0,05 |
| 12-13 | -0,07 | -0,04 | -0,03 |
| 13-14 | -0,42 | -0,47 | +0,05 |
| 14-15 | +0,74 | +0,77 | -0,03 |
| 15-16 | -2,58 | -2,55 | -0,03 |
| 16-17 | -3,33 | -3,37 | +0,04 |
| 17-18 | -0,54 | -0,50 | -0,04 |
| 18-19 | +2,60 | +2,58 | +0,02 |
| 19-20 | +0,16 | +0,17 | -0,01 |
| 20-21 | +3,21 | +3,22 | -0,01 |
| 21-22 | -1,02 | -1,02 | 0,00 |
| 22-23 | -2,31 | -2,33 | +0,02 |
| 23-24 | -1,14 | -1,12 | -0,02 |
| 24-25 | +0,79 | +0,81 | -0,02 |
| 25-26 | +1,75 | +1,74 | +0,01 |
| 26-27 | +0,73 | +0,76 | -0,03 |
| 27-28 | -1,57 | -1,63 | +0,06 |
| 28-29 | -0,09 | -0,04 | -0,05 |
| 29-30 | -0,63 | -0,61 | -0,02 |
| 30-31 | -0,19 | -0,25 | +0,06 |
| 31-32 | +0,35 | +0,43 | -0,08 |
| 32-33 | +2,00 | +1,98 | +0,02 |
| 33-34 | -3,55 | -3,55 | 0,00 |
| 34-35 | -1,86 | -1,94 | +0,08 |
| 35-36 | +0,80 | +0,88 | -0,08 |
| 36-1 | +2,35 | +2,31 | +0,04 |
| Невязка | -0,08 | -0,04 | |
| $\sigma_{\text{ср}}$ | 0,14'' | 0,19'' | |

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений составляет $\pm 0,14''$, а средняя квадратичная погрешность результата измерений составляет $\pm 0,04''$.

По методу Перара было произведено 35 серий наблюдений в соответствии со схемой данного метода [6]. Каждая серия состояла из 10 приемов.

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений составляет $\pm 0,19''$.

Результаты измерений 36-гранной призмы № 1, полученные обоими методами, представлены в табл. 1.

Сравнив между собой оба метода, мы выбрали метод калибровки по разностям, так как число измерений в обоих методах примерно одинаково, а обработка результатов наблюдений по методу разностей значительно проще и время, затрачиваемое на нее, в три раза меньше. Расхождение же между средними квадратичными погрешностями, полученными по методу разностей и методу Перара, является несущественным. Это может быть проверено по величине отношения квадратов средних квадратичных погрешностей $s_{1,2}$ [7]:

$$\omega^2 = \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^2, \quad s_1 > s_2,$$

$$\omega^2 = \frac{0,19^2}{0,14^2} = 1,84.$$

Число степеней свободы для

$$f_1 = n_1 - 1 = 35 - 1 = 34; \quad f_2 = n_2 - 1 = 18 - 1 = 17.$$

При доверительной вероятности 5% значение $\omega^2 = 1,96$ (табл. V). Таким образом, разница между s_1 и s_2 незначительна и, следовательно, нет оснований считать, что оба метода обладают различной точностью; подобное расхождение может быть объяснено только различными методами обработки.

Из табл. 1 видно, что 17 углов 36-гранной призмы № 1 имеют отступления от номинального значения, не превышающие $1''$, и только 5 углов имеют отступления от 3 до $4''$.

Для того чтобы подтвердить отсутствие систематических ошибок при перестановке подвижного автоколлиматора, мы произвели дополнительную обработку результатов измерения угла между гранями 1—2, пользуясь дисперсионным анализом.

В табл. 2 приведены результаты измерений угла между гранями 1—2 при разных установках автоколлиматоров, начиная с 20° до 180° , что составляет 17 серий наблюдений; каждая серия состоит из 10 приемов.

Первая серия измерений (угол между автоколлиматорами 10°) не включена в расчет дисперсий, так как она получена из непосредственных измерений. Углы остальных серий получены косвенным путем из расчетов по разностям.

Для вычисления дисперсий пользовались известными соотношениями [8], заменив в них наблюдаемые значения x на γ .

Введем следующие обозначения:

- q — число измерений в серии;
- p — количество серий;
- $n = pq$ — число значений измеряемой величины γ ;
- $\bar{\gamma}$ — общая средняя всех наблюдаемых значений γ .

| Серия | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° | 100° | 110° | 120° | 130° | 140° | 150° | 160° | 170° | 180° |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\bar{\gamma}_i$ | 1,82 | 1,62 | 1,46 | 2,02 | 1,89 | 2,44 | 2,06 | 1,70 | 2,01 | 1,67 | 0,89 | 1,79 | 2,24 | 1,70 | 1,43 | 1,82 | 1,82 |
| | 1,78 | 1,68 | 1,12 | 1,48 | 1,44 | 1,53 | 1,93 | 1,05 | 2,40 | 1,45 | 1,80 | 1,30 | 2,11 | 1,55 | 2,09 | 1,60 | 1,76 |
| | 2,39 | 1,67 | 0,88 | 2,04 | 1,56 | 1,88 | 1,62 | 1,58 | 1,96 | 1,74 | 1,70 | 1,96 | 2,00 | 1,00 | 1,61 | 1,72 | 2,08 |
| | 1,11 | 1,90 | 1,40 | 1,72 | 1,00 | 2,10 | 2,06 | 1,15 | 1,77 | 1,52 | 1,59 | 2,12 | 1,82 | 1,07 | 1,42 | 1,38 | 1,76 |
| | 1,24 | 1,12 | 1,54 | 1,45 | 1,06 | 1,68 | 1,73 | 2,01 | 2,18 | 2,29 | 2,05 | 1,86 | 1,73 | 1,58 | 1,88 | 1,98 | 1,52 |
| | 2,14 | 1,92 | 1,55 | 1,68 | 1,04 | 1,90 | 1,76 | 2,06 | 1,40 | 1,46 | 1,71 | 1,66 | 1,68 | 1,38 | 1,68 | 1,36 | 1,51 |
| | 1,78 | 1,68 | 1,53 | 2,82 | 1,20 | 1,18 | 1,84 | 1,72 | 1,96 | 1,47 | 1,29 | 2,36 | 2,01 | 1,86 | 2,02 | 1,48 | 1,15 |
| | 1,36 | 1,46 | 1,28 | 1,22 | 1,30 | 1,25 | 1,35 | 1,09 | 1,94 | 1,08 | 0,92 | 1,83 | 1,28 | 1,66 | 2,27 | 1,64 | 1,29 |
| | 1,65 | 1,22 | 1,85 | 1,70 | 1,16 | 1,50 | 1,98 | 1,31 | 1,56 | 1,80 | 1,23 | 1,70 | 2,23 | 1,27 | 2,02 | 1,96 | 1,70 |
| | 0,96 | 1,28 | 1,55 | 1,63 | 1,26 | 1,66 | 1,95 | 1,74 | 1,71 | 1,70 | 1,52 | 1,57 | 1,34 | 1,44 | 1,98 | 1,68 | 1,92 |
| a_f | 1,62 | 1,56 | 1,41 | 1,78 | 1,24 | 1,71 | 1,83 | 1,54 | 1,88 | 1,52 | 1,47 | 1,82 | 1,84 | 1,45 | 1,84 | 1,66 | 1,65 |

Вычислим средние значения $\bar{\gamma}$ по сериям, обозначив их через a_1, a_2, \dots, a_p .

Общая сумма квадратов отклонений

$$S = \sum (\gamma_i - \bar{\gamma})^2 = \sum \gamma_i^2 - \frac{1}{n} (\sum \gamma_i)^2 =$$

$$= 1,82^2 + \dots + 1,92^2 - \frac{1}{170} \cdot 278,18^2 = 57,06.$$

Сумма квадратов отклонений по сериям будет:

$$S_f = q \sum (a_i - \bar{\gamma})^2 = q \left[\sum a_i^2 - \frac{1}{p} (\sum a_i)^2 \right] =$$

$$= 10 [(1,62^2 + \dots + 1,65^2) - \frac{1}{17} (1,62 + \dots + 1,65)^2] = 5,40.$$

Остаточную сумму квадратов отклонений находим из равенства

$$S_e = S - S_f = 57,06 - 5,40 = 51,66.$$

Вычисляем дисперсии s_f^2 и s_e^2 .

$$s_f^2 = \frac{S_f}{p-1} = \frac{5,40}{17-1} = 0,3375,$$

$$s_e^2 = \frac{S_e}{p(q-1)} = \frac{51,66}{17 \cdot 9} = 0,3376.$$

Далее вычисляем по равенству критерий T_n

$$T_n = \frac{s_e^2}{s_f^2} = \frac{0,3376}{0,3375} = 1,00.$$

В нашем случае

$$k_1 = p - 1 = 16,$$

$$k_2 = p(q - 1) = 153.$$

Этим значениям отвечает $T = 1,74$ (для доверительной вероятности 0,05) и значение $T = 2,19$ (для доверительной вероятности 0,01) ([8], табл. VI и VII).

Предположив, что перестановка автоколлиматоров не оказывает существенного влияния на величину γ , мы должны получить с большой вероятностью только несущественные расхождения между всеми дисперсиями s^2 , s_j^2 и s_e^2 .

В произведенных вычислениях наблюдаемое значение $T_n = 1$ менее табличного $T_n = 2,19$, следовательно, нет оснований считать, что при измерении имели место систематические погрешности.

Отсюда следует, что расхождений между s_j^2 и s_e^2 , одинаковых или больших, чем наблюдаемое, можно ожидать лишь с вероятностью 0,01, поэтому эти расхождения мы можем считать только случайными.

Исследование установки и калибровка 36-гранных кварцевых призм показали, что средняя квадратичная погрешность ряда измерений углов на установке не превышает 0,15".

С целью исследования точности, с которой может быть передано значение угла от образцового многогранника к поверяемому, было произведено сличение двух 36-гранных призм с помощью одного автоколлиматора. Средняя квадратичная погрешность измерений в этом случае составляет

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{обр}}^2 + \sigma_{\text{сл}}^2} = \sqrt{0,15^2 + 0,25^2} = \pm 0,29'',$$

где $\sigma_{\text{обр}}$ — средняя квадратичная погрешность ряда измерений для многогранника, принятого за образцовый;

$\sigma_{\text{сл}}$ — средняя квадратичная погрешность сличения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Taylorson C. O., Testing Circular Division with Precision Polygons, Machinery, v. 71, 1947, p. 1821.
2. Haven C. E. and Strang A. G., Assembled Polygon for the Calibration of Angle Blocks, Journal of Research of the NBS, т. 50, № 1, January, 1953.
3. Финкельштейн Е. И., Автоколлиматор ПКГ-1, «Измерительная техника», № 4, 1958.
4. Бюллетень изобретений № 8 за 1958 г., авторское свидетельство № 114698 от 14 сентября 1957 г.
5. A Precise Angular Standard, «Mechanical World», September 1954, p. 394.
6. Баринов В. А., Исследование круговой машины, «Геодезист», № 5—6, 1933.
7. Арлей Н. и Бух К., Введение в теорию вероятностей и математическую статистику, ИЛ, 1951.
8. Романовский В. И., Применение математической статистики в опытно-деле, Гостехиздат, 1947, стр. 240—245.

Поступила в редакцию
27/XI 1958 г.

Л. Н. ЛОГАЧЕВА, В. Я. ЭЙДИНОВ

ВНИИК

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ

В статье изложены результаты разработки и осуществления интерференционного метода измерения углов во ВНИИК посредством применения интерферометра Кестерса; приведены методики измерений малых углов (до $2'$) и калибровки углов многогранных призм с долесекундной точностью; описаны дополнительные устройства к интерферометру и установка, служащая для этих измерений; дан обзор интерференционных методов измерения углов, применяемых за границей.

Известно, что малые углы, образованные плоскостями, можно измерять с высокой точностью, применяя метод оптической интерференции [1].

Сущность метода заключается в том, что малый измеряемый угол определяется из прямоугольного треугольника, меньший катет которого измеряется в длинах световых волн. Причем, если задаться условием равного влияния погрешностей измерения обоих катетов на точность измерения угла, то, поскольку при интерференционном методе величина измеряемого угла β не превышает $2'$, погрешность измерения большого катета может быть больше погрешности измерения малого катета в 1700 раз.

Широко применяемый способ измерения параллельности рабочих поверхностей микрометров с помощью плоскопараллельной стеклянной пластины есть не что иное, как измерение угла между этими поверхностями интерференционным методом. Большой катет в этом случае равен диаметру измерительной поверхности микрометра; малый катет измеряется числом полос на обеих поверхностях.

В последнее время за границей были осуществлены специальные установки для интерференционных измерений углов. Установка Национальной физической лаборатории (Англия) [2] основана на применении интерферометра Физо (рис. 1, а). При установке угловой меры на столе прибора в поле зрения наблюдаются две системы интерференционных полос равной толщины (рис. 1, б) в клиньях, образованных референтной плоскостью как с верхней поверхностью меры, так и с поверхностью пластины, к которой притерта мера. Величина измеряемого угла вычисляется по формуле

$$\beta = \frac{\lambda}{2L} (n_2 - n_1),$$

где λ — длина световой волны;
 L — расстояние между штрихами, нанесенными на референтном зеркале;
 n_1 и n_2 — количество полос на мере и на пластине, укладываемых в отрезке L .

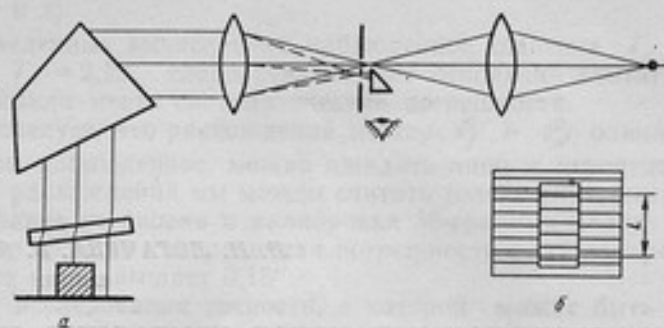


Рис. 1. Схема интерферометра Физо, применяемая для измерения углов.

Расстояние между штрихами зеркала известно с точностью 0,025 мм. Количество полос на мере и на пластине и их дробные части определяются визуально. Предел измерения углов на описанной установке равен $1'$.

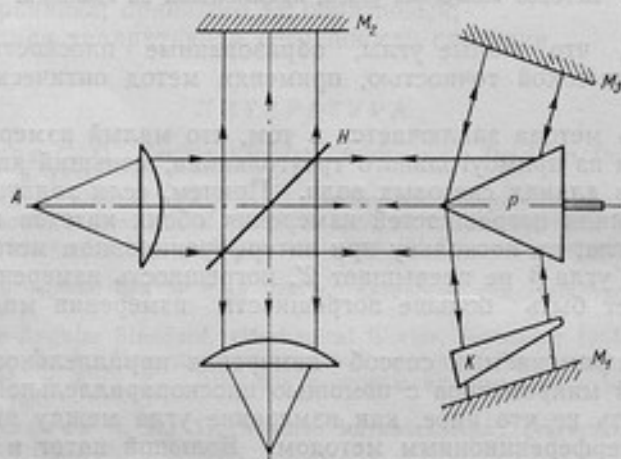


Рис. 2. Схема интерференционного гониометра «Перфект» (Англия).

Интерференционный гониометр (рис. 2) (прибор «Перфект», Англия) предназначен для сравнительных измерений углов призм одинакового номинального размера [3].

Параллельный пучок света от точечного источника A разделяется полупросеребрянной пластиной H на две части. Одна часть направляется на референтное зеркало M_2 , а другая — на образцовую призму P , которая устанавливается между зеркалами M_1 и M_3 таким образом, чтобы видимые интерференционные полосы от обеих граней призмы были симметричны и располагались вдоль ее рабочих граней (рис. 3, а).

При замене образцовой призмы поверяемой последнюю устанавливают таким образом, чтобы полосы в пучке, отраженном от зеркала M_3 (рис. 2), были расположены горизонтально (так же, как при установке образцовой призмы). Если имеется неравенство в углах призмы, то полосы в пучке, отраженном от зеркала M_1 , будут наклонены по отношению к горизонтальной нити (рис. 3, б). Изменением давления воздуха в полой призме компенсатора K (рис. 2) полосы в пучке, отраженном от M_1 , выравнивают до тех пор, пока они не будут расположены так же, как полосы, полученные от первой грани. Призма компенсатора соединена с манометром, шкала которого градуирована в угловых единицах.

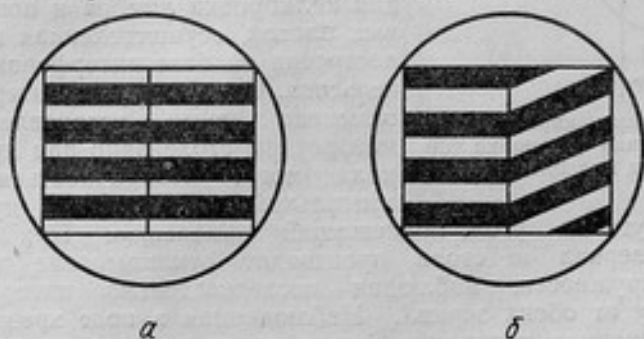


Рис. 3. Интерференционная картина, видимая в поле зрения интерференционного гониометра.

Разность отсчетов по шкале компенсатора при наблюдении образцовой и поверяемой призм соответствует разности между углами этих призм.

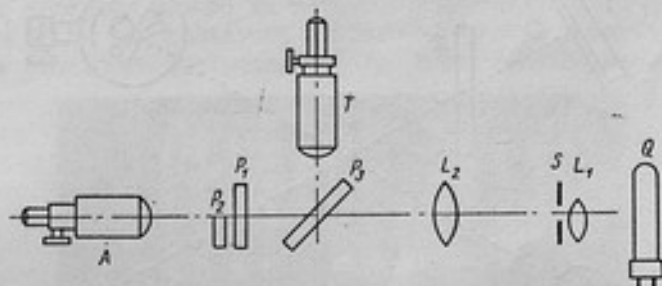


Рис. 4. Схема интерференционной установки для градуировки коллиматоров (Япония).

В Японском центральном институте мер и весов [4] разработана интерференционная установка для градуировки отсчетных устройств автоколлиматоров (рис. 4). Лучи света от натриевой лампы Q направляются собирающей линзой L_1 через диафрагму S в коллиматор L_2 , откуда параллельным пучком падают на разделительную полупосеребренную пластину P_3 , от которой одна часть пучка направляется в зрительную трубу T , снабженную окулярным микрометром, а другая — на клин, образованный полупосеребренной пластиной P_1 и зеркалом P_2 . Угол клина может изменяться путем поворота зеркала P_2 . В поле зрения зрительной трубы (рис. 5) наблюдаются интерференционные полосы равной толщины. Из отношения количества полос n к длине l , на которой они укладываются, можно определить величину угла α клина

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

где k — коэффициент увеличения оптической системы.

Длина l измеряется с помощью окулярного микрометра. Видимая в поле зрения шкала нанесена на поверхности пластины и предназначена для определения увеличения оптической системы.

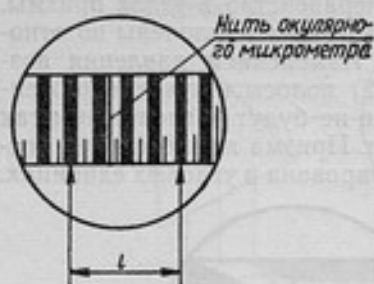


Рис. 5. Интерференционная картина в поле зрения установки для градуировки коллиматоров.

Градулируемый автоколлиматор A (рис. 4) располагается по оптической оси системы перед пластиной P_1 и зеркалом P_2 и на нем производят измерения изменений угла между этими пластинами.

Интерференционная установка (рис. 6) для калибровки лимбов и проверки угловых плиток, осуществленная в США [5], построена на базе интерферометра Майкельсона. Одно из зеркал интерферометра заменено двумя, установленными на поворотном столе одно над другим. Зеркала могут поворачиваться в горизонтальной плоскости друг относительно друга на угол, подлежащий измерению. При измерении поворотом зеркал и стола производят откладывание этого угла по всей окружности, наблюдая последовательно интерференционную картину от обоих зеркал. Наблюдаемая в поле зрения прибора интерференционная картина в форме колец равного наклона служит

указателем правильности положения зеркал или стола, а также является шкалой, по которой отсчитываются отклонения зеркала (по количеству полос).

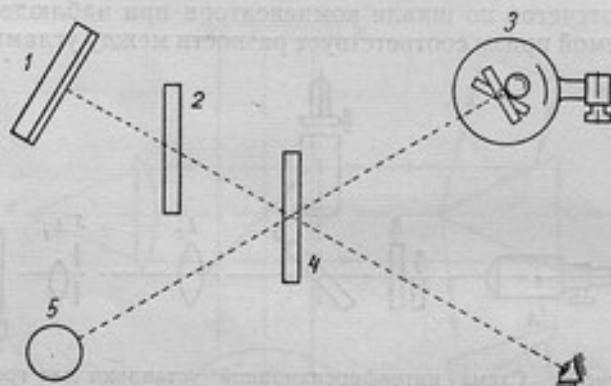


Рис. 6. Схема интерференционной установки для калибровки лимбов и проверки угловых плиток (США).
1 — зеркало; 2 — компенсатор; 3 — поворотный стол; 4 — разделяющая пластина; 5 — источник света.

указателем правильности положения зеркал или стола, а также является шкалой, по которой отсчитываются отклонения зеркала (по количеству полос).

В 1958 г. во ВНИИК была создана интерференционная установка (рис. 7) для измерения малых (до $2'$) углов, в которой был использован интерферометр Кестерса [6].

Интерференционная головка прибора Кестерса укреплена в верхней части полого Г-образного кронштейна, с одной стороны закрепленного на вертикальной стойке, а с другой — поддерживаемого стальной планкой.

Направляющая для линзы конденсора и источника света интерферометра была повернута на 90° вокруг оси коллиматора. На изолированной от прибора стойке, на шарнирном рычаге закреплен окулярный микрометр.

Измеряемые многогранные призмы устанавливаются против входной части интерференционной головки на столике гониометра ГС-30,

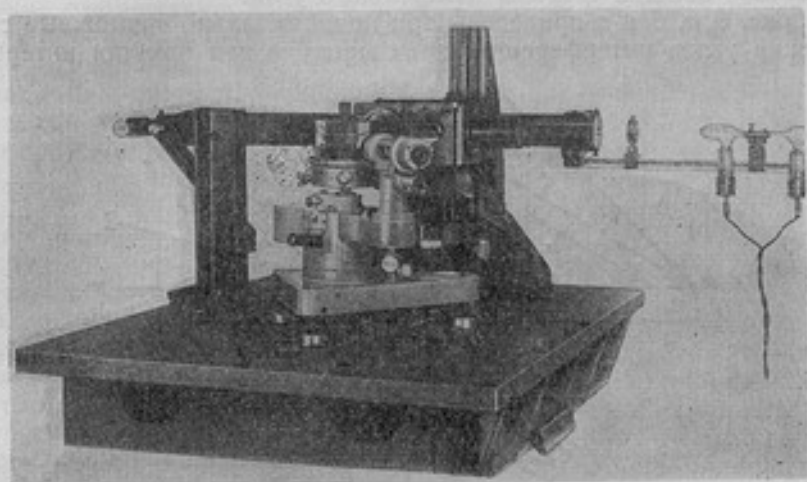


Рис. 7. Интерференционная установка ВНИИК для измерения малых углов (до $2'$).

с помощью которого можно не только осуществить необходимый поворот угловой меры, но, пользуясь зрительной трубой и винтами столика, установить плоскость двугранного угла меры строго перпендикулярно

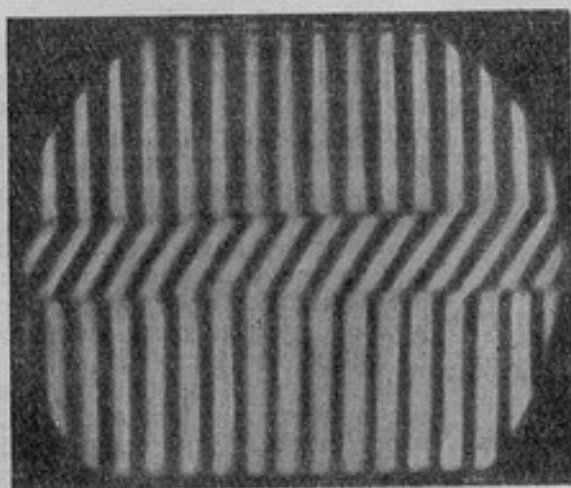


Рис. 8. Интерференционная картина, видимая в поле зрения установки ВНИИК.

оси поворота; при посредстве опорных винтов гониометра эта плоскость правильно устанавливается относительно референтной плоскости интерферометра.

Для уменьшения влияния внешних вибраций все части установки смонтированы на массивной поверочной плите размером 750×1000 мм,

закрепленной на фундаменте. Источник монохроматического света, а также электроагрегат к нему применяются те же, что и для измерения концевых мер.

При установке на столике интерферометра измеряемого клина, притертого к плоской пластине, наблюдается интерференционная картина (рис. 8). Измерение угла основано на определении числа полос на данном отрезке каждой стороны измеряемого угла.

На рис. 9, а, б и в приведены три принципиально возможные схемы измерения углов интерференционным методом при помощи интерферо-

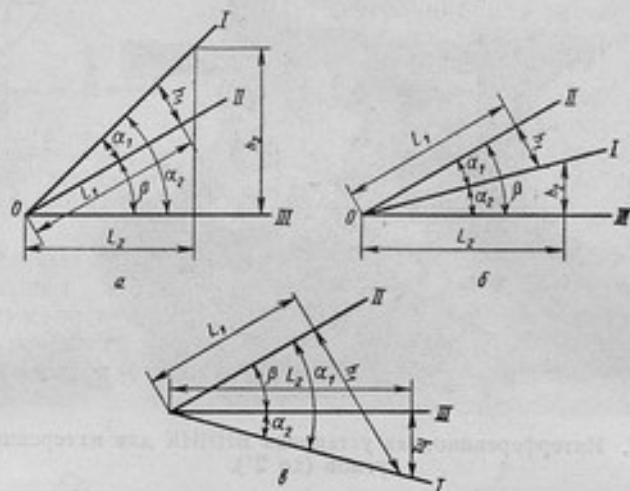


Рис. 9. Принципиальные схемы измерения углов с помощью интерферометра Кестерса.

метра Кестерса. На всех схемах цифрой I обозначена референтная плоскость, условно перенесенная параллельно (по ходу лучей) в точку O — вершину измеряемого угла; цифрами II и III — плоскости, между которыми предстоит определить угол; L_1 и L_2 — линейные отрезки на этих плоскостях, выделяемые для счета полос; h_1 и h_2 — расстояния от измеряемых поверхностей до плоскости I, соответствующие количеству полос, расположенных в пределах отрезков L_1 и L_2 .

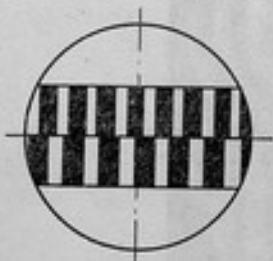


Рис. 10. Интерференционная картина в поле зрения интерферометра Кестерса, наблюдаемая при измерении углов.

Интерференционная картина, изображенная на рис. 10, в равной мере может быть отнесена ко всем трем схемам, отличающимся друг от друга положениями плоскости I относительно плоскостей II и III. Для схемы, приведенной на рис. 9, а, верхняя система полос соответствует плоскости III, а нижняя — плоскости II. Для схемы, изображенной на рис. 9, в, наоборот, верхняя система относится к плоскости II, а нижняя — к плоскости III. При схеме, приведенной на рис. 9, б, могут иметь место оба варианта, причем в том слу-

чае, когда плоскость I делит измеряемый угол пополам, частота полос в обеих системах будет одинаковой.

Поворачивая по часовой стрелке плоскость I вокруг оси, параллельной вершине измеряемого двугранного угла или совпадающей с ней, можно наблюдать интерференционную картину, у которой оба ряда

полос будут двигаться в одном направлении от точки O (рис. 9, а). Полосы при этом становятся все шире до тех пор, пока вовсе не исчезнут с плоскости II (точнее, до тех пор, пока одна полоса не окажется размыта по всему видимому участку плоскости II). При дальнейшем повороте плоскости I полосы на плоскости III все еще будут двигаться в том же направлении и расширяться. На плоскости II снова появятся полосы, движущиеся в обратном направлении и сужающиеся. Такое положение соответствует схеме, изображенной на рис. 9, б.

Когда плоскость I станет параллельна плоскости III, полосы на ней исчезнут. Поворачивая плоскость I далее в этом же направлении, получим положение, соответствующее схеме, изображенной на рис. 9, в. При повороте плоскости I полосы будут перемещаться в одном направлении, но противоположном направлению, имевшем место в первом случае (рис. 9, а), и при этом они будут сужаться на обеих измеряемых плоскостях.

Таким образом, метод дает возможность не только оценить угол между двумя плоскостями в абсолютном значении, но и по направлению перемещения полос определить, какой из углов изделий, свободные стороны которых являются плоскостями II и III, больше другого, т. е. определить знак измеренного угла.

Изменение положения плоскости I может быть произведено либо поворотом самой референтной плоскости (в пределах упругой деформации тубуса зрительной трубы интерферометра, осуществленной легким нажимом на нее), либо путем поворота опорной плоскости, на которой установлены объекты.

Угол β между плоскостями II и III легко определяется из тригонометрических соотношений углов и линейных отрезков, изображенных на схемах. Размеры отрезков h_1 и h_2 получаются путем умножения числа полос, отсчитанных на отрезках L_1 и L_2 , на половину длины световой волны $\frac{\lambda}{2}$ монохроматического источника света. Для всех трех схем

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{h_1}{L_1} = \frac{\lambda n_1}{2L_1}; \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{h_2}{L_2} = \frac{\lambda n_2}{2L_2}. \quad (1)$$

Так как углы α_1 и α_2 малы, то их тангенсы могут быть заменены самими углами с погрешностью, меньшей чем $5 \cdot 10^{-8}$.

Угол β для первой, второй и третьей схем соответственно равен

$$\left. \begin{aligned} \beta_{(a)} &= \alpha_2 - \alpha_1 \\ \beta_{(b)} &= \alpha_2 + \alpha_1 \\ \beta_{(v)} &= \alpha_1 - \alpha_2 \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) получаем

$$\beta_{(a)} = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{n_2}{L_2} - \frac{n_1}{L_1} \right); \quad (3)$$

$$\beta_{(b)} = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{n_2}{L_2} + \frac{n_1}{L_1} \right); \quad (4)$$

$$\beta_{(v)} = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{n_1}{L_1} - \frac{n_2}{L_2} \right). \quad (5)$$

Следовательно, при прочих равных условиях наибольший угол может быть измерен по схеме, приведенной на рис. 9, б.

Для измерений линейных отрезков L был применен обычный окулярный микрометр типа МОВ (АМ9-2), укрепленный на отдельном штативе.

Интерференционные полосы в приборе Кестерса при обычном его применении наблюдаются в выходной щели, расположенной в фокусе

объектива. Для того чтобы совместить изображения этих полос с изображением сетки окулярного микрометра, расположенного на некотором расстоянии от щели, за ней установлена дополнительная линза ($f = 30$ мм). При этом действительное изображение полос (до окуляра микрометра) получается уменьшенным примерно в 10 раз.

Действительная цена деления барабана окулярного микрометра определена при помощи объект-микрометра. Продольные штрихи сетки

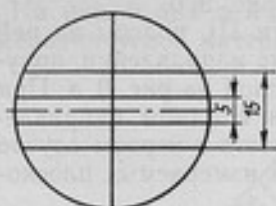


Рис. 11. Сетка окулярного микрометра установки ВНИИК.

окулярного микрометра (рис. 11) нанесены с учетом масштаба оптической схемы интерферометра и дополнительной линзы с таким расчетом, что при ширине рабочих поверхностей измеряемого объекта 5, 10 и 15 мм соответствующие продольные линии будут проходить по середине систем интерференционных полос, расположенных рядом.

Эти линии необходимы для тех случаев, когда вследствие различных отклонений по пирамидальности, направления полос обеих систем не будут параллельными (рис. 8). Тогда отсчет полос производится по точкам их пересечения с продольными линиями сетки. Поперечная линия требуется для наводки на крайние полосы выбранного участка.

Таким образом, для измерения угла необходимо получить интерференционную картину от обеих плоскостей, составляющих стороны измеряемого угла, с помощью окулярного микрометра произвести измерение линейных участков на обеих поверхностях и сосчитать число полос, расположенных на этих участках. Имея эти данные, а также зная длину волны λ , по соответствующей формуле (3) можно вычислять значение измеренного угла.

Для того чтобы определить, которое из уравнений, (3), (4) или (5), надо применить, следует нажимом на тубус интерферометра изменить положение референтной плоскости и проследить за движением полос. Если на обеих поверхностях движение полос одностороннее, то вычисляют по уравнениям (3) или (5), если же разностороннее, — то по уравнению (4).

При измерении может быть выбрана любая из трех интерференционных схем, приведенных на рис. 9, и соответственно формул (3), (4) и (5). При этом следует стремиться, чтобы полосы на обеих поверхностях были бы примерно одинаковой четкости. Поэтому схемы, приведенные на рис. 9, а и 9, в применимы при измерении углов до $30''$, когда разница в ширине полос невелика. При больших углах следует применять схему, изображенную на рис. 9, б, когда можно добиться полного равенства ширины полос на обеих поверхностях.

На точность измерения угла будут оказывать влияние случайные погрешности измерения отрезков L_1 и L_2 , состоящие из случайных погрешностей наводки, отсчета и перемещения сетки, а также систематических погрешностей наводки и отсчета цены деления окулярного микрометра. Как показал расчет, величина этих систематических погрешностей пренебрежимо мала. Есть основания оценить случайные погрешности предельной суммарной величиной $\delta L = \pm 5$ мк. Если считать, что размеры отрезков L не менее 20 мм, то погрешность измерения наибольшего угла $\beta = 2'$ для принятой в данной установке оптической системы

$$\delta\beta'' = \frac{10\beta}{L} \delta L = \pm 0,3''.$$

Чтобы обеспечить такую же точность измерения угла при меньших размерах L , предельный измеряемый угол должен быть соответственно меньшим.

Для использования интерференции при измерении больших углов была разработана методика калибровки многогранных призм, названная методом двух многогранников. Этот метод заключается в том, что каждый угол одного многогранника последовательно сравнивается с углами другого, имеющего одинаковое с первым число граней. Так, угол aob_1 многогранника I (рис. 12) сравнивается последовательно с углами aob_{II} , boc_{II} , cod_{II} , ..., foa_{II} .

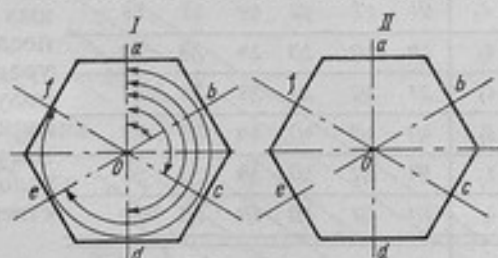


Рис. 12. Схема калибровки многогранных призм методом двух многогранников.

Поскольку номинальные значения всех этих углов одинаковы, то без учета погрешности определения отклонений можно записать следующие уравнения

$$\left. \begin{aligned} \delta\varphi_1^I - \delta\varphi_1^{II} &= \Delta\varphi_1^{(1)} \\ \delta\varphi_1^I - \delta\varphi_2^{II} &= \Delta\varphi_2^{(1)} \\ \dots &\dots \\ \delta\varphi_1^I - \delta\varphi_n^{II} &= \Delta\varphi_n^{(1)} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где $\delta\varphi_1^I$ и $\delta\varphi_1^{II}$ — искомые погрешности значений углов aob_1 , aob_{II} , boc_{II} и т. д.;

$\Delta\varphi_i^{(1)}$ — измеренные отклонения угла $aob_1 = \varphi_1^I$ от углов $aob_{II} = \varphi_1^{II}$, $boc_{II} = \varphi_2^{II}$ и т. д., которые вычисляются как алгебраические суммы двух измеренных величин $\delta_1\varphi_i$ и $\delta_2\varphi_i$ (рис. 13) с обеих сторон измеряемого угла.

Почленное суммирование этих уравнений дает

$$n\delta\varphi_1^I - 0 = \sum \Delta\varphi_i^{(1)},$$

или

$$\delta\varphi_1^I = \frac{\sum \Delta\varphi_i^{(1)}}{n}. \quad (7)$$

Также измеряются отклонения $\delta\varphi_2^I$, $\delta\varphi_3^I$, ..., $\delta\varphi_n^I$, после чего составляются уравнения вида (6).

Эти величины, так же как и $\delta\varphi_1^I$, будут найдены по формулам

$$\delta\varphi_2^I = \frac{\sum \Delta\varphi_i^{(2)}}{n}$$

$$\dots$$

$$\delta\varphi_n^I = \frac{\sum \Delta\varphi_i^{(n)}}{n}$$

Таким образом, необходимо провести n^2 измерений величин $\Delta\varphi_i$, по результатам которых могут быть составлены n^2 уравнений вида (6) и n уравнений вида (7), служащих для определения отклонений измеряемых углов φ_i^I многогранника I.

| | | | | | | |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| A_I | 1/1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/6 |
| B_I | 2/1 | 2/2 | 2/3 | 2/4 | 2/5 | 2/6 |
| C_I | 3/1 | 3/2 | 3/3 | 3/4 | 3/5 | 3/6 |
| D_I | 4/1 | 4/2 | 4/3 | 4/4 | 4/5 | 4/6 |
| E_I | 5/1 | 5/2 | 5/3 | 5/4 | 5/5 | 5/6 |
| F_I | 6/1 | 6/2 | 6/3 | 6/4 | 6/5 | 6/6 |
| <hr/> | | | | | | |
| A_{II} | 1/1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/6 |
| B_{II} | 2/1 | 2/2 | 2/3 | 2/4 | 2/5 | 2/6 |
| C_{II} | 3/1 | 3/2 | 3/3 | 3/4 | 3/5 | 3/6 |
| D_{II} | 4/1 | 4/2 | 4/3 | 4/4 | 4/5 | 4/6 |
| E_{II} | 5/1 | 5/2 | 5/3 | 5/4 | 5/5 | 5/6 |
| F_{II} | 6/1 | 6/2 | 6/3 | 6/4 | 6/5 | 6/6 |

Рис. 13. Схема обработки результатов наблюдений при калибровке двух многогранников.

многогранников, а так как этих углов n , то всего потребуется n^2 перестановок. Поскольку же измеренное отклонение $\Delta\varphi_i$ получается как алгебраическая сумма двух измеренных величин $\delta\varphi_i$ и $\delta_2\varphi_i$, то всего требуется произвести $2n^2$ измерений, что, конечно, весьма затруднительно.

Работа существенно упрощается, если определять отклонения не углов $aob = \varphi_1$, $boc = \varphi_2, \dots, foa = \varphi_6$, а $aob = \varphi_1$, $aoc = \varphi_1 + \varphi_2, \dots, aof = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_6$, так как в этом случае суммарные углы будут получены равновесными.

Для определения суммарных углов будет всего n перестановок и n^2 измерений. При каждом измерении, после которого следует перестановка одного из многогранников, измеряются величины $\delta_1\varphi_i$. После того как измерение завершено, один из многогранников переставляется на угловой шаг φ_1 и измерения повторяются. Легко показать, что отклонения суммарных углов будут равны среднему арифметическому из измеренных разностей этих углов одного многогранника со всеми соответствующими углами другого многогранника, взятыми последовательно через интервал φ .

Действительно, если $k < n$, то

$$\sum_1^n \varphi_k^{(i)} = 2k\pi.$$

Если угол φ_k , состоящий из k углов φ одного многогранника, сравнивать со всеми такими же углами другого многогранника через

Если из уравнений, составленных для каждого цикла, выписать последовательно сначала первые уравнения, затем вторые и т. д., то получим системы уравнений, аналогичные уравнениям (6), из которых могут быть вычислены значения углов многогранника II, соответственно равные

$$\left. \begin{aligned} \delta\varphi_1^{II} &= -\frac{\sum \Delta\varphi_1^{(i)}}{n} \\ \delta\varphi_2^{II} &= -\frac{\sum \Delta\varphi_2^{(i)}}{n} \\ &\dots \\ \delta\varphi_n^{II} &= -\frac{\sum \Delta\varphi_n^{(i)}}{n} \end{aligned} \right\} (8)$$

Согласно этой методике для определения одного угла потребуется произвести n перестановок одного из

интервал φ , то после измерений можно составить следующие уравнения

$$\begin{aligned} \varphi_k^I - \varphi_k^{(1)II} &= \Delta\varphi_{k_1}; \\ \varphi_k^I - \varphi_k^{(2)II} &= \Delta\varphi_{k_2}; \\ &\dots \dots \dots \\ \varphi_k^I - \varphi_k^{(n)II} &= \Delta\varphi_{k_n}. \end{aligned}$$

Сумма этих уравнений будет равна

$$n\varphi_k^I - \sum_1^n \varphi_k^{(i)II} = \sum_1^n \Delta\varphi_{k_i}$$

или

$$n\varphi_k^I - 2k\pi = \sum_1^n \Delta\varphi_{k_i}$$

отсюда

$$\varphi_k^I - \frac{2k\pi}{n} = \frac{\sum_1^n \Delta\varphi_{k_i}}{n}$$

Поскольку $\frac{2k\pi}{n}$ есть номинальное значение угла φ_k , то левая часть последнего уравнения представляет собой отклонение измеряемого угла от номинального значения, равное

$$\delta\varphi_k^I = \frac{\sum_1^n \Delta\varphi_{k_i}}{n}$$

Аналогичные уравнения могут быть составлены для погрешностей углов второго многогранника. После проведения n измерений величины $\delta_1\varphi_i$ в каждом из n измерений имеются данные, из которых могут быть составлены величины $\Delta\varphi_{k_i}$. Задача легко решается, если обработка результатов наблюдений производится по следующей схеме (рис. 13) (в этой схеме ограничимся шестью углами, но она может быть распространена на любое число углов).

Для краткости записей измеренные углы при данном измерении (значения $\delta_1\varphi_i$) последовательно обозначены цифрами: 1, 2, 3, ... 6. Сами же приемы, также последовательно, обозначены цифрами 1, 2, 3, ... 6, но написаны в знаменателе. Например, углы между гранями $a_1 - a_{II}$, $b_1 - b_{II}$, ..., $a_1 - b_{II}$, $b_1 - c_{II}$, ..., $f_1 - a_{II}$, ... и т. д. обозначены соответственно 1/1, 2/1 ..., 1/2, 2/2 ..., 6/5 и т. д.

В этой схеме A_I, B_I, \dots, F_I — суммы измеренных величин $\delta^I\varphi_i$, сложенных построчно; $A_{II}, B_{II}, \dots, F_{II}$ — суммы измеренных величин $\delta^{II}\varphi_i$, сложенных по диагоналям, как показано на схеме. Искомые погрешности суммарных углов обоих многогранников соответственно будут равны

$$\left. \begin{aligned} \delta_{aob}^I &= \frac{A_I + B_I}{6}; & \delta_{aob}^{II} &= \frac{A_{II} + B_{II}}{6} \\ \delta_{aoc}^I &= \frac{A_I + C_I}{6}; & \delta_{aoc}^{II} &= \frac{A_{II} + C_{II}}{6} \\ &\dots \dots \dots & & \\ \delta_{aof}^I &= \frac{A_I + F_I}{6}; & \delta_{aof}^{II} &= \frac{A_{II} + F_{II}}{6} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Измеренные значения $\delta_i \varphi_i$ при каждом измерении, начиная с первого, записываются столбиками. После перестановки многогранника на угловой шаг вновь записывают данные в соседней графе, и т. д. После того как измерения все завершены и записаны, под произведенными записями вновь повторяется записанное (часть записей, находящаяся ниже ступенчатой линии, не используется и поэтому ее можно не вносить в схему). Далее, по формулам (9) вычисляются погрешности углов обоих многогранников.

Если считать, что погрешность положения грани a каждого многогранника нулевая, то погрешности, вычисленные по формулам (7), представляют собой не что иное, как погрешности положений остальных граней b, c, d, \dots, f , аналогичные погрешностям положений штрихов лимбов.

Если полагать, что систематические погрешности при измерениях практически исключены, то, согласно формулам (9), погрешности определения угла будут определяться случайными погрешностями обоих слагаемых. Учитывая, что каждое слагаемое есть алгебраическая сумма из n результатов измерений, произведенных при одинаковых условиях, и обоснованно полагая равенство их предельных погрешностей, получим предельное значение результата измерения каждого угла

$$\Delta = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{n}}{n} \delta \varphi = \pm 1,4 \frac{\delta \varphi}{\sqrt{n}}$$

Принимаем округленно для всех многогранников с длиной грани не менее 20 мм предельную погрешность измерения углов при калибровке, равной $\pm 0,2''$. Для сравнительных измерений эта погрешность будет равна $\pm 0,4''$. Приведенные погрешности подтверждены результатами опытов. При осуществлении изложенной выше методики измерения производятся в горизонтальной плоскости.

Измерения углов достаточно производить при какой-либо одной длине волны и только с целью контроля в сомнительных случаях могут быть проведены повторные измерения при другом значении длины волны. Как было отмечено, экспериментальные исследования установки показали сходимость действительных предельных погрешностей измерения с предполагаемыми. Установка используется для калибровки абсолютным методом многогранных призм первого разряда, а также для их измерения сравнительным методом по многогранным призмам, аттестованным эталонным методом по ВНИИМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романова М. Ф. Интерференция света и его применение, ОНТИ, 1937.
2. Bryce and Gunningham, Measurement of Angle by interferometry, Australian I. Appl. Sci № 1, 1950, p. 243.
3. Candler C., Modern interferometers, London, 1951.
4. Omi Endo, Noami Hochino, Masaji Sowabe, Studies on the calibration of a micrometer of auto-collimating telescope, Repl. Centr. Inspekt. Inst. Weights and Measures, Tokyo, 1956.
5. Sugg R. E., An Improved Angle Interferometer, Metrology of Gage Blocks, Proceedings of a Symposium on Gage Blocks held at, N. B. S., 1957.
6. Логачева Л. Н., Интерференционный метод измерения углов многогранников, «Измерительная техника», № 1, 1958.

Поступила в редакцию

3/VIII 1959 г.

Л. Л. МЕДЯНЦЕВА

Свердловский филиал
ВНИИМ

О ВЛИЯНИИ КРИВИЗНЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ УГЛОВЫХ МЕР НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ИХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

В статье помещены эмпирические формулы, устанавливающие зависимость между точностью измерения угловых мер и кривизной их измерительных поверхностей, полученные на основании экспериментальных исследований. Приведены допустимые отклонения от плоскостности измерительных поверхностей угловых мер 1-го и 2-го классов, при которых обеспечивается требуемая точность их поверки.

Определение точности различных методов поверки угловых мер показало, что предельные погрешности измерений для отдельных мер колеблются в весьма широких пределах. Так, при поверке мер на односекундном гониометре предельная погрешность измерений менялась от 2 до 5", на автоколлимационном приборе АПУ-2 — от 2,5 до 5", а при поверке мер на оптиметре — от 6 до 9".

Такие большие колебания предельных погрешностей измерений угловых мер при одном и том же методе поверки могут быть объяснены влиянием кривизны измерительных поверхностей мер и чистоты их обработки.

Проведенные в Свердловском филиале ВНИИМ экспериментальные исследования показали, что чистота обработки измерительных поверхностей угловых мер находится в пределах класса $[\nabla 13]$ и не оказывает существенного влияния на точность измерений. Следовательно, основной причиной увеличения погрешности измерения является кривизна измерительных поверхностей угловых мер.

Теоретически измерительные поверхности угловых мер должны представлять собой оптические плоскости, в действительности же очень часто форма поверхностей бывает различной для каждой меры и само понятие угла становится неопределенным вследствие неопределенности его очертаний.

Если допустить, что измерительные поверхности угловых мер имеют сферическую форму с определенным радиусом кривизны, то при измерении угла в двух точках изменение величины его в зависимости от кривизны поверхности определяется центральным углом, образованным радиусами кривизны в поверяемых точках.

Зависимость между центральным углом α , высотой сегмента h и хордой a , как известно, выражается формулой

$$h = \frac{a}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4} \quad (1)$$

(в нашем случае h — отклонение от плоскостности, a — длина измерительной поверхности меры, α — изменение размера угла за счет неплоскостности измерительных поверхностей).

Так как угол α чрезвычайно мал, то можно написать

$$\alpha = \frac{8h}{a} \quad (2)$$

Допустимое отклонение от плоскостности для угловых мер согласно ГОСТ 2875—45 установлено равным 0,0003 мм (1 интерференционная полоса) на каждую измерительную поверхность при длине измерительных поверхностей 70 мм. Следовательно, изменение размера угла может достигать величины порядка 7".

Поскольку при измерении угла меры участвуют две измерительные поверхности, а их отклонения от плоскостности сочетаются случайно, общее изменение угла может достигнуть 10".

При такой неопределенности размера угла допуск $\pm 10''$, установленный ГОСТ на изготовление угловых мер 1-го класса, теряет реальный смысл. Тем более не имеет смысла производить поверку таких мер с точностью 3", как это необходимо для мер 1-го класса.

Вышеприведенные расчеты сделаны при условии, что кривизна измерительных поверхностей угловых мер имеет сферический характер, а это далеко не всегда соответствует действительности, особенно для мер, находившихся в ремонте. Вот почему эти расчеты не могут служить основанием для установления допустимых отклонений от плоскостности поверхностей мер.

Было проведено экспериментальное исследование по определению влияния кривизны измерительных поверхностей угловых мер на точность их измерения на односекундном гониометре, на автоколлимационном приборе АПУ-2 и на оптиметре.

Для каждой угловой меры были определены отклонения от плоскостности ее измерительных поверхностей и на основании многократных измерений вычислена наибольшая погрешность.

Из рассмотрения графиков, приведенных на рис. 1, 2, 3, видно, что для всех трех методов поверки между предельной погрешностью измерений угловых мер и отклонением от плоскостности существует прямо пропорциональная зависимость, выраженная уравнением

$$\delta_{\text{пр}} = a + bh, \quad (3)$$

где $\delta_{\text{пр}}$ — предельная погрешность измерения или сличения на данном приборе (в сек).

Суммарное отклонение от плоскостности h (в полосах) для методов измерения на гониометре вычислялось как сумма абсолютных значений отклонений для обеих измерительных поверхностей меры, а для сравнительных методов измерения (на приборе АПУ-2 и оптиметре) как сумма абсолютных значений суммарных отклонений для поверяемой и образцовой мер.

Постоянные коэффициенты a и b в уравнении (3) определены для каждого метода обработкой результатов измерений по способу наименьших квадратов.

В результате исследования были получены следующие эмпирические формулы зависимости предельной погрешности измерений от плоскостности измерительных поверхностей:

для одnoseкундного гониометра

$$\delta_{пр} = -2,3 + 6,8h; \quad (4)$$

для прибора АПУ-2

$$\delta_{пр} = +2,3 + 0,6h; \quad (5)$$

для оптиметра

$$\delta_{пр} = +6,0 + 0,7h. \quad (6)$$

При идеальной плоскостности измерительных поверхностей предельная погрешность измерений угловых мер равна коэффициенту a . Величина его соответствует предельной погрешности измерений, определенной при исследовании данных приборов, с точностью до $0,1''$, что может служить подтверждением правильности полученных нами формул.

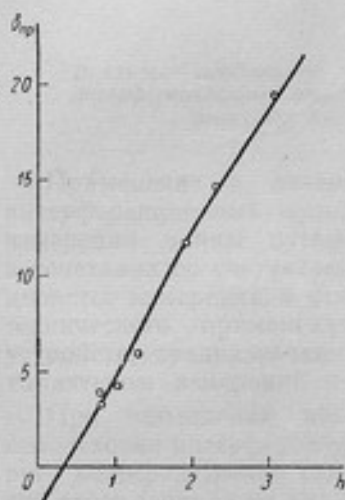


Рис. 1. Кривая зависимости предельной погрешности измерений угловых мер на одnoseкундном гониометре от кривизны измерительных поверхностей.

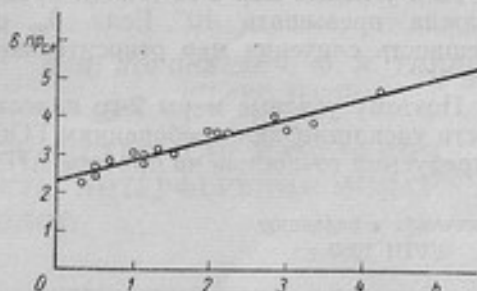


Рис. 2. Кривая зависимости предельной погрешности сличения угловых мер на приборе АПУ-2 от кривизны измерительных поверхностей.

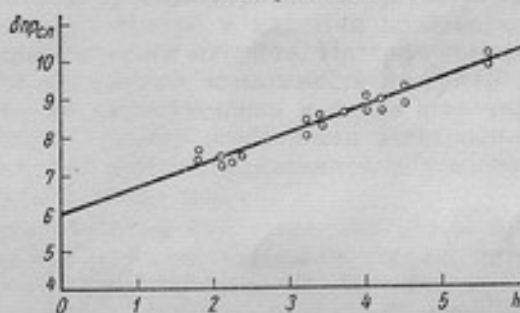


Рис. 3. Кривая зависимости предельной погрешности сличения угловых мер на оптиметре от кривизны измерительных поверхностей.

При сравнительных методах измерения кривизна измерительных поверхностей оказывает на погрешность измерений меньшее влияние, чем при измерениях на гониометре. Действительно, коэффициент переменного члена в формулах (5) и (6) почти в 10 раз меньше, чем в формуле (4). Очевидно, это происходит потому, что при этих измерениях используются малые участки измерительных поверхностей.

При установленном ГОСТ 2875—45 допустимом отклонении от плоскостности в $0,3 \text{ мк}$ предельная погрешность измерений на одnoseкундном гониометре, вычисленная по формуле (4), достигает $11''$, что совершенно недопустимо для мер 1-го класса.

Для обеспечения необходимой точности измерений угловых мер 1-го класса, равной $3''$, необходимо установить допуск на отклонение от плоскостности измерительных поверхностей угловых мер, равный одной интерференционной полосе на обе измерительные поверхности.

При таком допуске поверку угловых мер 1-го класса практически можно будет производить не только на односекундном гониометре, но и, как следует из формулы (5), с помощью автоколлимационного прибора АПУ-2.

Измерение методом блоков на оптиметре, как видно из формулы (6), позволяет производить аттестацию угловых мер только 2-го класса, так как даже при условии идеальной плоскостности образцовой и поверяемой мер ($h=0$) погрешность сличения будет $6''$.

Для угловых мер 2-го класса предельная погрешность измерений не должна превышать $10''$. Если $\delta_{\text{пр}}$ образцовой меры равна $3''$, то погрешность сличения мер относительным методом не должна быть более $9''$.

Поэтому угловые меры 2-го класса, если их измерительные поверхности удовлетворяют требованиям ГОСТ 2875—45, могут быть поверены с требуемой точностью на приборе АПУ-2 или оптиметре.

Поступила в редакцию

3/VIII 1959 г.

В. П. КОРОНКЕВИЧ, Ю. И. ТРУЛЕВ
НГМИИП, ВНИИМ

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ С ПОМОЩЬЮ СЧЕТА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС

В статье предложена электронная схема, позволяющая при счете интерференционных полос регистрировать 0,5 порядка интерференции, что позволяет уменьшить погрешность измерений длины.

Применение в интерферометрах фотоэлектрической регистрации интерференционных полос позволяет быстро и надежно производить измерения длины путем непосредственного их счета. Интерферометры в сочетании со счетчиками полос расширяют возможности интерференционных измерений в отношении их автоматизации и более широкого технического применения. Конструктивные особенности электронных устройств, предназначенных для этой цели, определяются в основном характером измерений и требуемой точностью.

При проведении наших исследований для измерения длины был использован интерферометр типа Майкельсона, подвижное зеркало которого непосредственно связано с измеряемым объектом. При перемещении этого зеркала на выходе интерферометра появляются периодические изменения интенсивности света в том случае, если выходная щель прибора вырезает из интерференционной картины не более одной полосы. При регистрации этих изменений фотоэлементом частота переменной составляющей фототока определяется скоростью движения зеркала. Если зеркало интерферометра перемещается в пределах измеряемого диапазона, то частота переменной составляющей фототока (или скорость счета) меняется от нуля до некоторого значения, а затем снова до нуля. Для точного измерения длины необходимо, чтобы все колебания интенсивности света на выходе интерферометра во время движения зеркала были подсчитаны.

Так как контраст интерференционной картины ухудшается с увеличением разности хода интерферирующих лучей, то для устранения возможных просчетов желательно из колебаний фототока формировать импульсы одинаковой амплитуды и формы. При использовании стандартной пересчетной схемы, крутизна фронта импульса обусловлена временем нарастания сигнала, необходимым для ее запуска.

Таким образом, к электронной схеме, предназначенной для счета полос, можно предъявить следующие требования.

1. Частотная характеристика устройства должна быть равномерна от нуля до такой скорости счета, при которой все импульсы, поступающие на вход пересчетной схемы, будут подсчитаны.

2. Из колебаний фототока должны быть сформированы импульсы, крутизна фронта которых не зависела бы от скорости изменения фототока при перемещении зеркала интерферометра.

Этим требованиям удовлетворяет спусковое устройство с катодной связью (триггер Шмитта) [1] в сочетании с усилителем с непосредственной связью. Спусковое устройство такого типа имеет два устойчивых состояния и может находиться в любом из них в зависимости от потенциала сетки первого триода. Работу электронной схемы можно уяснить с помощью рис. 1. Переход из одного состояния в другое происходит при определенных значениях этого потенциала (рис. 1, а) — U_1 и U_2 . Разность этих потенциалов носит название напряжения гистерезиса спускового устройства; его величина зависит от параметров схемы. Если коэф-

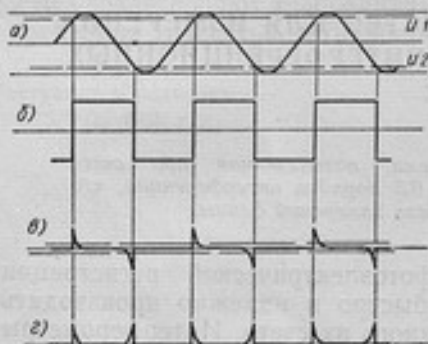


Рис. 1.

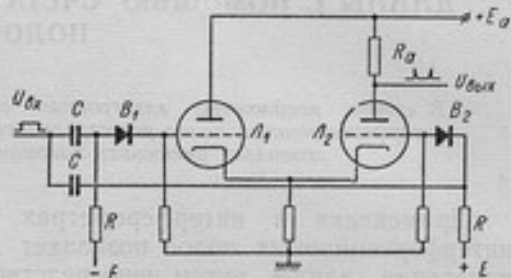


Рис. 2.

фициент усиления усилителя выбран так, что пиковые значения напряжения на входе триггера немного больше напряжения гистерезиса, то это позволит даже при не очень высоких отношениях сигнала к шуму избежать просчетов из-за шумов и тряски (если амплитуда колебаний зеркала при тряске составляет не более 0,5 полосы).

Следовательно, применением спускового устройства с катодной связью достигается:

а) разделение переменной и постоянной составляющих фотоэлектрического сигнала и одновременное формирование импульсов из колебаний фототока;

б) возможность работы со сравнительно невысоким отношением сигнала к шуму (порядка 3—5);

в) возможность счета экстремальных значений фототока, что позволяет регистрировать порядок интерференции с точностью до 0,5 полосы.

Так как переход триггера из одного устойчивого состояния происходит при значениях входного напряжения, близких к экстремальным (рис. 1, а и б), то для регистрации порядков интерференции с точностью до 0,5 полосы необходимо подсчитать общее количество переходов триггера. Это можно осуществить с помощью схемы, представленной на рис. 2.

Прямоугольные импульсы дифференцируются RC -цепями (рис. 1, в). Положительные импульсы, полученные в результате дифференцирова-

ния, открывают диод B_1 и через катодный повторитель L_1 подаются на катод лампы L_2 . На сетку этой же лампы через диод B_2 поступают отрицательные импульсы. Таким образом, на анодной нагрузке R_a лампы L_2 суммируются две серии импульсов, причем одна из них меняет полярность (рис. 1, з). После этого общее количество импульсов подсчитывается пересчетной схемой.

Принципиальная схема устройства для измерения длины путем счета порядков интерференции с точностью до 0,5 полосы дана на рис. 3. Колебания фототока фотоумножителя ФЭУ-19М усиливаются усилителем с непосредственной связью L_1 . С помощью спускового устройства с катодной связью из них формируются прямоугольные импульсы. После дифференцирования этих импульсов положительные и отрицательные

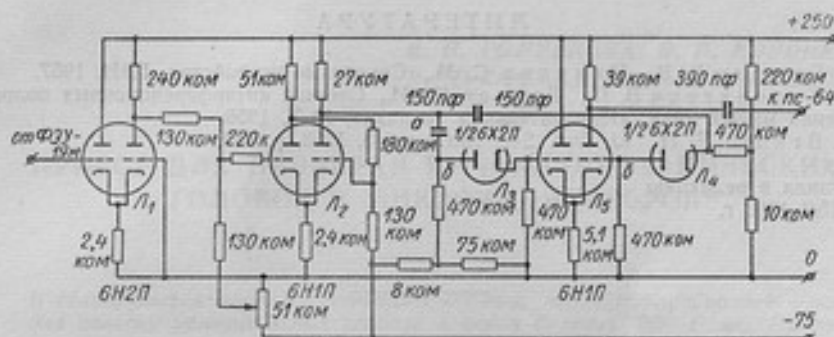


Рис. 3.

выбросы напряжения разделяются диодами L_3 и L_4 . Полярность отрицательных выбросов меняется, обе серии импульсов суммируются (L_5) и количество импульсов подсчитывается пересчетной схемой ПС-64.

Устройство было испытано на контактном интерферометре ПИУ-1, приспособленном для проверки микронных индикаторов [2]. Измеряемый диапазон был задан по шкале индикатора. Смещению зеркала интерферометра на $\lambda/4$ соответствует один импульс на входе пересчетной схемы. Измеряемая длина L в этом случае равна

$$L = \frac{\lambda}{4} N,$$

где N — число импульсов;

λ — длина волны света.

Анализ погрешностей таких измерений приведен в работе [2]. На основании этого анализа при $\lambda = 0,5461$ мк средняя квадратичная погрешность измерений должна быть равна 0,08 мк. При проверке работы устройства 10 диапазонов длины были измерены 11 раз каждый. Средняя квадратичная погрешность этих измерений лежит в пределах 0,1–0,16 мк, что оказалось несколько хуже ожидавшегося результата. Это увеличение погрешности можно объяснить неточностью наведения стрелки на штрих шкалы индикатора.

Результаты измерений с помощью приведенной схемы совпадают в пределах погрешности с результатами, полученными на счетчике полос, регистрировавшем целые порядки интерференции [2].

Выводы

1. С помощью предложенного устройства измеряемый интервал длины определяется последовательностью электрических импульсов. Один импульс соответствует смещению зеркала на $\lambda/4$ (т. е. при $\lambda = 0,5461$ оно будет $0,138 \text{ мк}$).
2. Для уменьшения погрешностей измерений необходим более точный способ задания измеряемого диапазона.
3. Приведенная электронная схема с небольшими усложнениями применима в реверсивных счетчиках полос [3].
4. Погрешность измерений уменьшена почти в два раза по сравнению со счетчиками целых порядков интерференции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Енютин В. В., Никулин С. М., Спусковые устройства, ГЭИ, 1957.
2. Коронкевич В. П., Трулев Ю. И., Счетчик интерференционных полос для измерения малых длин, «Измерительная техника», № 8, 1959.
3. Vranin F. H., «J. Opt. Soc. Am.», т. 43, 1953, p. 839.

Поступила в редакцию
15/1 1960 г.

В. П. ГОЛУБКОВА, В. П. КОРОНКЕВИЧ,
О. Р. ПРЕЙСМАН, Е. И. ФИНКЕЛЬШТЕЙН
ИГИМИП

ПРИБОР ДЛЯ ПРОВЕРКИ РЫЧАЖНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ГОЛОВОК И МИКРОИНДИКАТОРОВ

В статье дается описание опытного образца прибора, предназначенного для проверки измерительных головок с ценой деления 0,2—1 мк. Приводятся результаты испытаний.

Рычажно-механические головки для линейных измерений широко применяются в промышленности. Их значение будет возрастать по мере повышения точности обработки и внедрения новых методов контроля. Конструкции и характеристики этих приборов по точности весьма разнообразны. Если прежде изготавливали индикаторы с механизмами часового типа с ценой деления 0,01 мм, рычажные и рычажно-зубчатые головки с ценой деления 0,002 и 0,001 мм, то в последнее время созданы пружинные измерительные головки, у которых перемещение измерительного наконечника вызывает изменение угла скручивания ленточной пружины и поворот связанного с ней указателя. Очень простой и чувствительный механизм позволяет достигать точности, которая, по-видимому, является предельной для приборов, основанных на механическом принципе действия.

Приборы этого типа — микрокаторы, микаторы и оптикаторы — изготавливаются с ценой деления 0,1; 0,2; 0,5 и 1 мк. Пределы измерения микрокаторов составляют ± 30 дел., а оптикаторов, у которых стрелка заменена световым указателем, ± 125 дел.

Средства проверки индикаторов часового типа и микроиндикаторов не могут быть применены для проверки пружинных измерительных головок, так как их точность мала. Поэтому определение погрешности точных контактных приборов стали производить по концевым мерам парным методом. Подобным образом в настоящее время проверяют доломикронные измерительные головки, трубки оптиметров и даже контактные интерферометры [1 и 2].

Однако парному методу присущи и некоторые отрицательные стороны, такие, как:

- 1) невозможность выявления ошибок обратного хода;

2) необходимость вести поверку при вертикальном расположении оси измерительного стержня поверяемого прибора, в то время как при работе они могут занимать любое положение;

3) ограниченность количества поверяемых точек шкалы в зависимости от подбора концевых мер;

4) малая производительность метода.

Известны приборы [3 и 4] для поверки рычажно-механических головок, основанные на принципе горизонтального перемещения наклонной

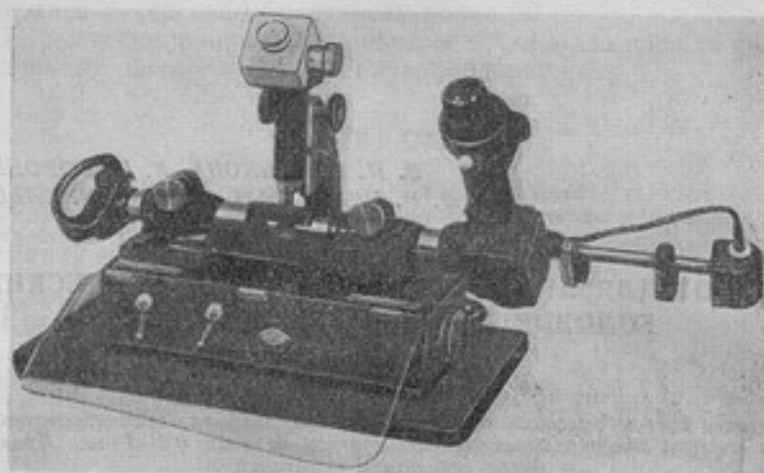


Рис. 1. Общий вид прибора ПКМ.

плоскости. Погрешности таких приборов складываются из значительного числа элементов, причем основное влияние оказывают неплоскостность

контактной поверхности, непрямолинейность направляющих и ошибки определения угла наклона плоскости. Подробное рассмотрение этих элементов приводит к выводу, что даже при самом высоком качестве изготовления эти приборы нельзя применять для поверки рычажно-механических головок с ценой деления менее 0,5 мк.

Для создания образцового универсального прибора с погрешностью менее 0,1 мк мы применили интерференционные методы, где единицей измерения является одна из естественных констант — длина световой волны, — а точность легко может быть доведена до 0,04—0,06 мк.

Прибор для поверки рычажно-механических головок ПКМ (рис. 1) построен по схеме, представленной на рис. 2. На основании 1 укреплены два гнезда, в одном из которых помещается поверяемая головка 2, а в другом — трубка 5 контактного интерферометра ИКПВ. Оба прибора располагаются строго по одной оси, а их контактные наконечники

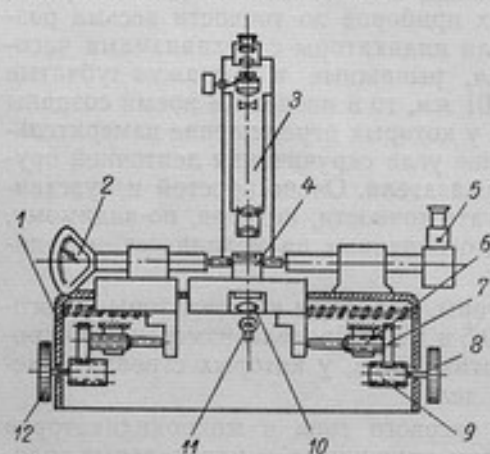


Рис. 2. Схема прибора ПКМ.

упираются во взаимно параллельные рабочие плоскости измерительного упора 4. Перемещение последнего вызывает одновременный сдвиг обоих измерительных наконечников. Величину перемещения определяют по шкалам интерферометра и поверяемой головки.

Плавное движение упора осуществляется с помощью микропары 6, приводимой во вращение зубчатой парой 7—9 и маховиком 8. Маховик 12 с таким же механизмом позволяет установить поверяемый прибор в начале измерения в нулевое положение.

Пределы измерения контактного интерферометра ИКПВ достаточны для проверки микрокатетов с ценой деления 0,2 и 0,5 мк. Для проверки оптикаторов пределы измерения были расширены путем введения в схему интерферометра эталона Фабри — Перо. В этом случае при движении измерительного наконечника в поле зрения трубки проходит ряд интерференционных картин полос переналожения в белом свете.

Проверка микроиндикаторов на приборе ПКМ осуществляется сравнением показаний их со штриховой шкалой. Для этой цели внутри подвижного измерительного упора 4 помещена шкала с двумя штрихами на расстоянии 1 мм. Освещает шкалу лампа накаливания 11 через конденсор 10. К основанию прикреплен измерительный микроскоп 3 со 100-кратным увеличением и оптическим микрометром специальной конструкции [5]. Последний имеет две шкалы — неподвижную с ценой деления 0,05 мм и подвижную с ценой деления 0,0005 мм.

Для проверки измерительных головок с ценой деления 1 и 2 мк в качестве образцового прибора может быть применена также трубка оптиметра или оптикатор.

Для определения погрешности самого прибора ПКМ вместо поверяемой головки устанавливали вторую трубку интерферометра и производили измерения счетом интерференционных полос в монохроматическом свете. Освещение интерферометров осуществлялось от одной ртутной лампы ($\lambda = 0,5461$ мк). Счет полос вели одновременно два наблюдателя.

Разность температур интерферометров и корпуса прибора в процессе измерения определялась по показаниям дифференциальных термпар и не превышала $0,03^\circ\text{C}$. Результаты проверки прибора ПКМ приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что погрешность прибора не превышает 0,02 мк. Однако следует учесть, что при такой проверке в результаты не вошла погрешность градуировки шкалы и определения длины волны света, пропускаемого светофильтром. Поэтому в суммарное значение погрешности нужно добавить величину δ , вычисленную по формуле

$$\delta = 1,5 \cdot n \cdot i \frac{\Delta\lambda}{\lambda},$$

где n — число делений шкалы интерферометра;

i — цена деления;

λ — длина волны света;

$\Delta\lambda$ — погрешность определения длины волны.

Суммарная погрешность прибора ПКМ при цене деления 0,05; 0,1 и 0,2 мк будет равна 0,04; 0,06 и 0,08 мк соответственно.

Погрешность прибора при работе с эталоном Фабри — Перо определяется в основном погрешностью аттестации эталона и погрешностью передачи размеров от образцового прибора к поверяемому. Эти погрешности были определены по двум встречным трубкам интерферометра, в одной из которых был установлен эталон Фабри — Перо. Задавая

Таблица 1

| Отсчет по шкале, в полосах | | | | | | | | Среднее значение отсчетов по шкале 2-й трубки, в полосах | Разность отсчетов по двум трубкам, мк | σ , мк ± |
|----------------------------|------------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| 1-я трубка | 2-я трубка | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | — |
| 10 | 10,05 | 9,85 | 10,1 | 10,0 | 10,0 | 9,95 | 10,05 | 10,0 | 0,0 | 0,02 |
| 20 | 20,05 | 19,85 | 20,05 | 20,0 | 20,05 | 19,95 | 20,05 | 20,0 | 0,0 | 0,02 |
| 30 | 30,05 | 29,90 | 30,05 | 29,85 | 30,0 | 29,95 | 30,05 | 29,98 | -0,005 | 0,02 |
| 40 | 40,1 | 39,85 | 40,1 | 39,95 | 40,1 | 40,0 | 40,05 | 40,02 | +0,005 | 0,02 |
| 50 | 50,1 | 49,95 | 50,1 | 50,0 | 50,1 | 50,05 | 50,05 | 50,05 | +0,013 | 0,02 |
| 60 | 60,1 | 60,05 | 60,1 | 59,95 | 60,1 | 59,95 | 60,1 | 60,05 | +0,013 | 0,02 |
| 70 | 70,1 | 70,15 | 70,15 | 69,95 | 70,05 | 70,0 | 70,05 | 70,07 | +0,019 | 0,02 |
| 80 | 80,1 | 80,15 | 80,0 | 80,0 | 80,05 | 80,0 | 80,10 | 80,06 | +0,016 | 0,02 |
| 90 | 90,1 | 90,15 | 89,95 | 90,0 | 90,1 | 89,95 | 90,05 | 90,04 | +0,011 | 0,02 |
| 100 | 100,1 | 100,2 | 99,90 | 100,1 | 100,15 | 99,95 | 100,05 | 100,06 | +0,016 | 0,03 |

* σ — средняя квадратичная погрешность ряда измерений по второй трубке.

перемещение упора по трубке с эталоном, равным четырем его длинам, мы измеряли величину перемещения счетом полос по второй трубке. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2

| Отсчеты, в полосах ($\lambda = 0,5461$ мк) | 74,3 | 74,4 | 74,2 | 74,5 | 74,3 | 74,5 | 74,6 | 74,4 | Среднее 74,4 |
|---------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------|
| Отклонение от среднего | -0,1 | 0 | -0,2 | +0,1 | -0,1 | +0,1 | +0,2 | 0 | $\sigma = \pm 0,04$ мк |

Погрешность прибора при работе с отсчетным микроскопом определяли по аттестованной трубке оптиметра шаговым методом. Погрешность на длине 0,2 мм оказалась равной 0,5 мк, на длине 1 мм — 1 мк.

Для оценки эксплуатационных качеств прибора ПКМ было произведено исследование нескольких рычажно-механических головок производства Ленинградского инструментального завода. Предварительно все приборы были поверены парным методом по концевым мерам 1-го и 2-го разрядов.

Хотя прибор ПКМ предназначен для работы в горизонтальном положении, он был прикреплен к специальной стойке, и дополнительно были проведены измерения при вертикальном и наклонном положениях прибора. При поверке на приборе ПКМ производилось 6 измерений, а по концевым мерам — 3 приема по трем парам плиток.

Результаты всех измерений приведены в виде графиков на рис. 3—8 и в сравнительной табл. 3.

Таблица 3

| Прибор | № | Цена деления, мк | Знак во- звешенной части шкалы | Погреш- ность по конечным мерам, мк | Погрешности поверочных приборов (мк) при поверке на ПКМ в положениях | | | | Разность по- казаний по ПКМ в верти- кальном и го- ризон- тальном по- ложениях, мк | Разность показаний (мк) по конечным мерам и по ПКМ в положениях | | | |
|----------------|-------|------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|----------------|
| | | | | | вертикаль- ном | вертикаль- ном | горизон- тальном | горизон- тальном | | вертикаль- ном | горизон- тальном | | |
| Микрокалор ЛМЗ | 937 | 0,2 | + | +0,04 -0,14 | | +0,05 -0,18 | | +0,07 -0,18 | | | -0,02 -0,00 | -0,01 +0,04 | -0,03 +0,04 |
| | 912 | 0,2 | + | 0,00 -0,04 | | +0,12 -0,16 | | +0,14 -0,16 | | | -0,02 0,00 | -0,12 +0,12 | -0,14 +0,12 |
| | 846 | 0,2 | + | +0,15 -0,17 | | +0,09 -0,10 | | +0,04 -0,05 | | | +0,05 -0,05 | +0,05 -0,07 | +0,11 -0,12 |
| | 745 | 0,5 | + | -0,14 +0,20 | | +0,20 +0,20 | +0,04 -0,03 | +0,18 -0,10 | | | -0,38 +0,30 | +0,05 *0,00 | -0,32 +0,30 |
| | 755 | 0,5 | + | +0,20 -0,25 | | +0,30 -0,32 | +0,36 -0,44 | +0,36 -0,44 | | | -0,06 +0,12 | -0,10 +0,07 | -0,16 +0,19 |
| Опникатор ЛМЗ | 71217 | 1 | + | -0,02 -0,04 | | 0,00 -0,06 | +0,60 -0,75 | +0,75 -1,00 | | | -0,75 +0,94 | -0,02 +0,02 | -0,77 +0,96 |
| | 942 | 0,2 | + | +0,01 +0,01 | | +0,16 -0,24 | | +0,48 -0,54 | | | +0,16 -0,30 | -0,15 +0,25 | -0,47 +0,55 |
| Опникатор ЛМЗ | 94 | 0,2 | + | +0,10 -0,10 | | +0,30 -0,38 | | +0,73 -0,75 | | | +0,42 -0,38 | -0,20 +0,28 | -0,63 +0,65 |
| | - | 1 | + | +0,01 -0,01 | | | | | | | +0,01 -0,02 | 0,00 +0,01 | - |

* Эта разность при поверке по эталону Фабри - Перо равна: -0,44 мк и +0,46 мк соответственно.

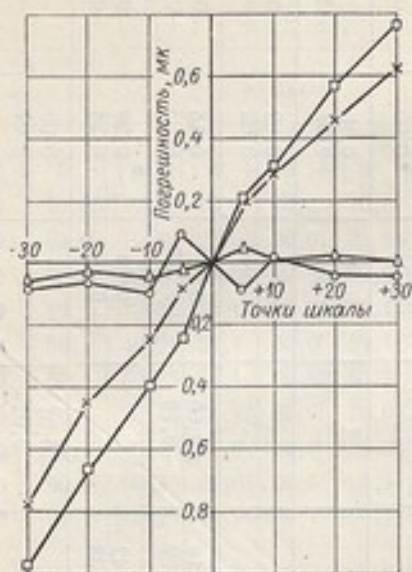


Рис. 3. Кривые погрешностей показаний микрокатора № 71217 при поверке по концевым мерам и на приборе ПКМ:

○ — по концевым мерам; △ — в вертикальном положении; □ — в горизонтальном положении; × — в наклонном положении.

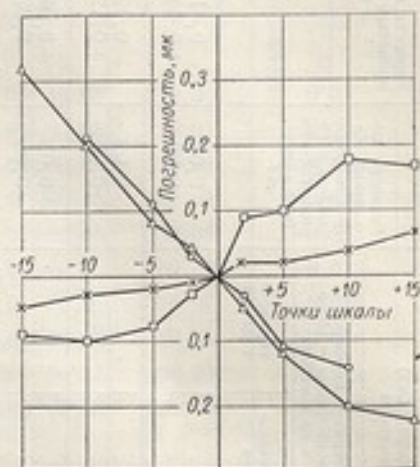


Рис. 4. Кривые погрешностей показаний микрокатора № 745 при поверке по концевым мерам и на приборе ПКМ:

○ — по концевым мерам; △ — в вертикальном положении; □ — в горизонтальном положении; × — в наклонном положении.



Рис. 5. Кривые погрешностей показаний микрокатора № 846 при поверке по концевым мерам и на приборе ПКМ:

○ — по концевым мерам; △ — в вертикальном положении; □ — в горизонтальном положении.

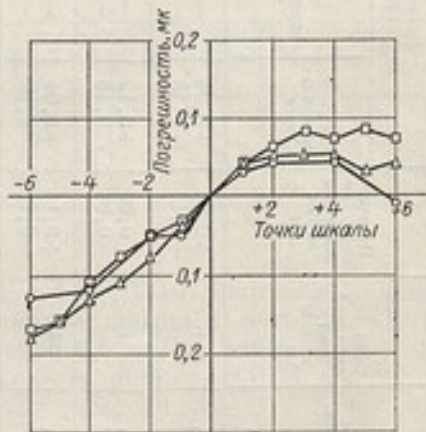


Рис. 6. Кривые погрешностей показаний микрокатора № 937 при поверке по концевым мерам и на приборе ПКМ:

○ — по концевым мерам; △ — в вертикальном положении; □ — в горизонтальном положении.

Было обнаружено, что погрешности показаний микрокаторов № 71217 и № 745 (рис. 3 и 4) зависят от положения оси измерительного стержня. При горизонтальном положении микрокатора с ценой деления 1 мк погрешность превысила допустимую. При наклонном положении (под углом 30°) показания приборов дали промежуточные значения между значениями при горизонтальном и вертикальном положениях.

Микрокаторы с ценой деления 0,2 мк, изготовленные в 1958 и 1959 гг. (рис. 5 и 6), имеют погрешность показаний, находящуюся в пределах допустимой, при поверке любым методом и в любом положении прибора.

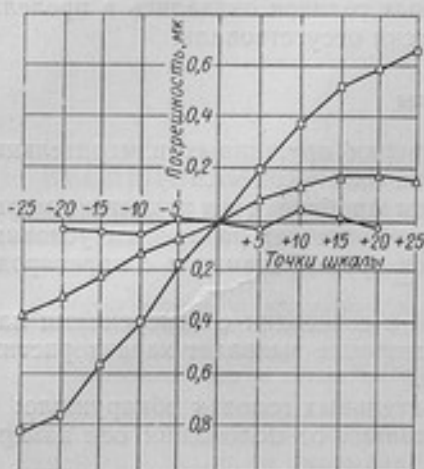


Рис. 7. Кривые погрешностей оптического микрокатора № 942 при поверке по концевым мерам и на приборе ПКМ по эталону Фабри — Перо:

○ — по концевым мерам; △ — в вертикальном положении; □ — в горизонтальном положении.

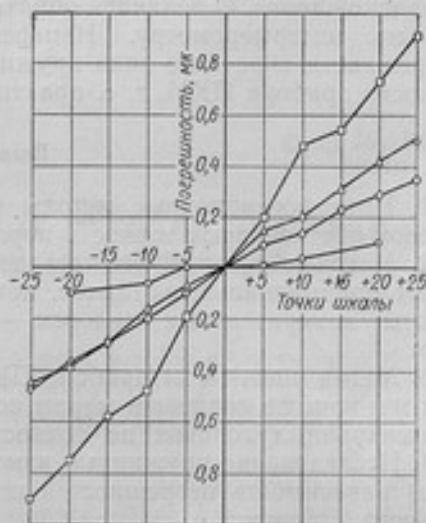


Рис. 8. Кривые погрешностей оптического микрокатора № 94 при поверке по концевым мерам, по эталону Фабри — Перо и счетом интерференционных полос:

○ — по концевым мерам; △ — в вертикальном и □ — в горизонтальном положениях по эталону Фабри — Перо; ◊ — в вертикальном положении счетом интерференционных полос.

Поверка оптических микрокаторов № 942 и № 94 выпуска 1959 г. (рис. 7 и 8) осуществлялась на приборе ПКМ по эталону Фабри — Перо и счетом интерференционных полос. Разность показаний в горизонтальном и вертикальном положениях особенно велика у оптических микрокаторов.

Результаты исследования обнаружили наличие разности показаний на приборе ПКМ и по концевым мерам. При поверке микрокаторов с ценой деления 0,2; 0,5 и 1 мк расхождения показаний колеблются от 0 до 0,12 мк. При поверке двух оптических микрокаторов эти расхождения несколько больше и достигают 0,28 мк. Последнее объясняется, с одной стороны, наличием определенной погрешности у каждого метода измерений и, с другой стороны, тем, что имеется принципиальное отличие в методах измерения по концевым мерам и на приборе ПКМ. В то время как при измерении по концевым мерам каждый раз вводится динамическое измерительное усилие, зависящее от величины свободного хода измерительного наконечника, при измерении на ПКМ имеется постоянное, статическое измерительное усилие.

Необходимо отметить, что пружинные измерительные головки могут быть использованы в различных условиях. Например, при поверке формы деталей головки работают без арретирования и в этом случае

в основном сказываются погрешности, которые и могут быть определены на приборе ПКМ. При работе с арретированием (контроль размеров деталей) сказываются погрешности, определяемые при поверке по концевым мерам. Отсюда следует, что для полной точностной характеристики пружинных головок целесообразно производить поверку как по концевым мерам, так и на приборе ПКМ.

На приборе ПКМ были исследованы также погрешности обратного хода долемикронных головок. Для этой цели по поверяемому прибору задавали перемещение на весь предел шкалы, а затем возвращались к исходной точке. О величине обратного хода судили по разности отсчетов по интерферометру. Измерения производились десятикратно. Погрешности обратного хода пружинных головок оказались в пределах точности прибора ПКМ, т. е. практически отсутствовали.

Выводы

1. Интерференционные методы поверки пружинных измерительных головок обеспечивают точность порядка 0,04—0,08 мк.

2. Методы поверки на созданном приборе и по концевым мерам имеют принципиальное отличие, которое отвечает различным условиям работы измерительных головок — без арретирования и с арретированием.

3. Метод поверки на приборе ПКМ в сочетании с измерениями парным методом по концевым мерам всесторонне выявляет характеристики долемикронных головок по точности.

4. Исследование пружинных измерительных головок обнаружило:

а) зависимость погрешностей показаний от положения оси измерительного стержня;

б) практическое отсутствие погрешностей обратного хода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция 102—58 по поверке контактных интерферометров с переменной ценой деления от 0,05 до 0,2 мк.
2. Инструкция 108—55 по поверке вертикальных и горизонтальных оптиметров.
3. Feingerätetechnik, № 5 и 6, 1958, № 1, 1959.
4. Сборник материалов и инструкций по средствам измерения размеров в машиностроении, Коммерприбор, 1948, стр. 419.
5. Финкельштейн Е. И., Автоколлиматор ПКГ-1, «Измерительная техника», № 4, 1958.

Поступила в редакцию
21/1 1960 г.

Е. Е. ШАРОВА
ВНИИМ

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ МЕТОДОВ ПРОВЕРКИ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ НАПРАВЛЯЮЩИХ СТАНИН

В статье приведены результаты исследования методов проверки направляющих станин: по уровню, по струне с микроскопом, автоколлимационного с применением ртутного зеркала и метода визирования при помощи зрительной трубы. Даны краткие характеристики других методов.

Известно, что большое влияние на точность работы станка или другой какой-либо машины оказывает прямолинейность и точность направляющих плоскостей станины, а также точность их взаимного расположения.

В практике машиностроения требуется определять как форму отдельных направляющих (длина которых достигает иногда нескольких десятков метров), так и углы поворота бабки или каретки, перемещающихся по станине, или траекторию движения заданной точки.

Необходимо отметить, что требования к точности проверки направляющих и плоскостей все время растут.

Существует много методов и средств для измерения прямолинейности и плоскостности, но они очень часто не удовлетворяют современным требованиям по ряду причин.

Для проверки формы отдельных направляющих могут быть использованы следующие методы: интерференционные (метод Линника и метод, основанный на опыте Юнга), с уровнем, автоколлимационный и коллимационный, автоколлимационный с применением ртутного зеркала, метод визирования при помощи зрительных труб, метод струны с микроскопом, метод проверки по оптической линейке, электронные (оптический и емкостный) и гидростатические.

С целью выбора наиболее рационального метода проверки прямолинейности станин больших размеров в 1953—1954 гг. во ВНИИМ были исследованы четыре метода (проверены направляющие 12-метровой измерительной машины).

Одним из простых и точных методов проверки прямолинейности и плоскостности изделий является метод проверки уровнем [1—5]. С помощью уровня наиболее легко можно измерять отклонения от прямолинейности относительно линии горизонта в вертикальной

плоскости. Поэтому для полной проверки прямолинейности направляющих измерения уровнем комбинируют с каким-либо другим методом, например, с методом проверки по струне и микроскопу.

Сущность метода проверки уровнем заключается в определении превышения каждой последующей точки относительно предыдущей.

При нашем исследовании проверку прямолинейности направляющих 12-метровой машины производили специальным прибором с уровнем (микронивелиром, рис. 1).

Микронивелир состоит из двух металлических линеек: нижней и верхней. Нижняя линейка покоится на двух ножевидных опорах, расстояние между которыми можно изменять в пределах до 1 м. Верхняя и нижняя линейки одним концом соединены шарнирно. На верхней линейке установлен уровень и индикатор часового типа.

При больших отклонениях направляющих от прямолинейности пузырек уровня будет смещен из среднего положения в крайнее. Для возврата пузырька в среднее положение предусмотрен винт, при помощи которого верхнюю линейку с уровнем и индикатором можно поднимать или опускать. Винт и индикатор упираются в шлифованную площадку на верхней поверхности нижней линейки. Цена деления уровня (изменение угла наклона уровня, соответствующее одному делению шкалы его ампулы) составляла 15 мк на 1 м; цена деления индикатора — 1 мк.

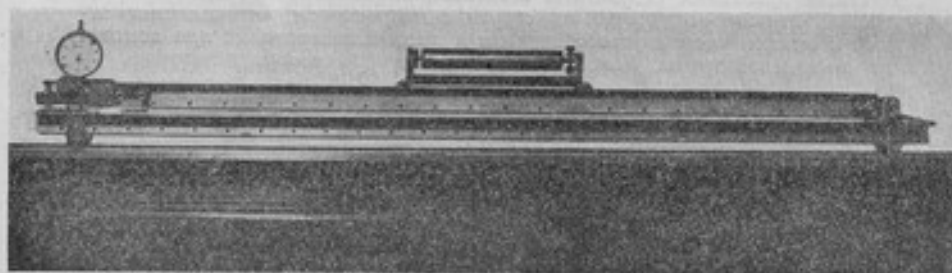


Рис. 1.

При проверке прямолинейности направляющих машины микронивелир последовательно перемещали через каждый метр. Нулевое положение пузырька уровня устанавливали до начала измерения. Для каждой направляющей было сделано 50 приемов измерений, каждый из которых состоял из прямого и обратного ходов. При обратном ходе микронивелир поворачивали на 180° , чтобы исключить погрешность нуля. Отсчеты производили по левому и правому концам пузырька и вычисляли его среднее положение. Затем брали среднее арифметическое из отсчетов прямого и обратного ходов.

Средняя квадратичная погрешность ряда, полученная при обработке по методу наименьших квадратов результатов измерений, составила 2 мк на 10 м. Эта погрешность весьма близко подходит к приведенному в литературе [1] значению средней квадратичной погрешности: 3 мк на 10 м для уровня с ценой деления 20 мк на 1 м при базе 0,5 м.

Исследования показали, что метод обладает достаточно высокой точностью, удобен в применении, позволяет проверять направляющие любой длины, является единственным методом, которым можно проверять винтообразность направляющих. При помощи уровня можно проверять не только прямолинейность направляющих станков, но также и плоскостность изделий любого размера.

Недостатком метода является то, что прецизионные уровни чувствительны к температурным влияниям и для получения надежных результатов измерения требуется много времени для установки пузырька. Кроме того, при проверке направляющих трудно ставить опоры микро-нивелира в одно и то же место на станине. Уровень не позволяет проверять поверхности, имеющие разрывы или уступы, а также выборочно некоторые точки направляющей или плоскости, не проверяя всю длину или площадь.

Представление о прямолинейности направляющих при проверке уровнем получается неполное — только в тех точках, в которых произведена проверка.

Сущность метода проверки по струне и микроскопу заключается в следующем. Параллельно направляющей натягивают струну и, перемещая микроскоп в специальном приспособлении, измеряют отклонения от прямолинейности в горизонтальной плоскости.

При исследовании этого метода также было выполнено 50 приемов измерений; каждый прием состоял из прямого и обратного ходов. Результаты измерений были обработаны по методу наименьших квадратов. Средняя квадратичная погрешность ряда измерений 5 мк на 10 м согласуется с литературными данными [1], по которым средняя квадратичная погрешность составляет: 4 мк на 5 м, 6 мк на 10 м и 40 мк на 30 м.

Необходимо отметить, что на результаты измерения сильное влияние оказывали провисание струны и ее колебания, хотя 12-метровая машина установлена на массивном фундаменте и измерения производили в лабораторных условиях.

Метод проверки прямолинейности по струне и микроскопу очень прост, не требует изготовления громоздкой и дорогостоящей аппаратуры, позволяет измерять отклонения от прямолинейности в горизонтальной плоскости непосредственно в линейных величинах.

Существенными недостатками этого метода являются: его сравнительно невысокая точность, так как за счет провеса струны под действием ее собственного веса нарушается резкость изображения в микроскопе, и чувствительность к колебаниям, происходящим от сотрясения пола, движения воздуха и т. д. Метод можно применять для проверки прямолинейности отдельных направляющих на длине до 30 м.

Некоторые заводы для проверки прямолинейности направляющих пользуются зрительными трубами фирмы «Цейсс» с переменным увеличением.

Сущность этого метода заключается в том, что по направляющей перемещают освещенную марку с крестом нитей. Изображение марки наблюдают в зрительную трубу, установленную на одном из концов направляющей, и измеряют отклонения от прямолинейности как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях при помощи отсчетного устройства, состоящего из двух стеклянных плоскопараллельных пластин. Цена деления отсчетного устройства 0,05 мм. Пределы измерения зрительной трубой фирмы «Цейсс» 40 м.

При обработке 50 измерений, выполненных во ВНИИМ, получена средняя квадратичная погрешность ряда, равная 10 мк на 10 м, тогда как в Экспериментальном научно-исследовательском институте металло-режущих станков (ЭНИМС), также производившем исследование этого метода [1], средняя квадратичная погрешность для зрительной трубы с таким же увеличением была 35 мк на 10 м.

Такие расхождения в значении погрешностей при исследовании этого метода во ВНИИМ и в ЭНИМС можно объяснить, по-видимому, дей-

ствием рефракции воздуха, которая в цеховых условиях ЭНИМС оказывала большее влияние на результаты измерения, чем в лабораторных условиях ВНИИМ.

С помощью зрительной трубы переменного увеличения можно измерять отклонения от прямолинейности направляющих станин, плоскостей плит, а также соосность отверстий и валов.

Недостатками метода являются погрешности за счет колебания визирной оси трубы при изменении ее фокусировки во время измерения и погрешности за счет влияния рефракции воздуха на больших расстояниях.

На некоторых предприятиях имеются приборы фирмы «Цейсс» с особой системой призм [1, 6]. Отличием этих приборов является отсутствие штриховой окулярной сетки. Марка прибора представляет собой зачерненную пластинку со штрихами — просветами.

Лучи света, проходя через марку, попадают в объектив прибора. Выйдя из объектива, они проходят через систему призм, которая дает одновременно два изображения марки — прямое и обратное, наблюдаемые через микроскоп прибора. За системой призм находится отрицательная линза, которая вместе с объективом образует телескопическую систему.

Отсчетное устройство прибора, состоящее из двух стеклянных плоскопараллельных пластин, позволяет измерять отклонения от прямолинейности как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях.

Для измерения прямолинейности направляющих различной длины прибор снабжен тремя микроскопами разного увеличения.

Из практики Ново-Краматорского завода выяснилось, что эти приборы не обладают высокой точностью. Так, например, погрешность измерения при проверке прямолинейности на длине 27 м достигает 0,2 мм [6]. Исследования метода в ЭНИМС [1] показали другую, значительно более высокую точность этого прибора: 5 мк на 5 м, 10 мк на 10 м, 30 мк на 30 м. Низкая точность результатов, полученных на Ново-Краматорском заводе, получилась, видимо, за счет того, что эксперименты были проведены в цеховых условиях и на результаты измерения оказала сильное влияние рефракция воздуха.

В принципе эти приборы должны давать высокую точность благодаря применению особой системы призм и формы перекрестия. Их можно применять для измерения прямолинейности только на длине до 30 м.

При проверке зрительными трубами (так же как и другими оптическими методами) прямолинейности направляющих большой длины сильное влияние на результат оказывает рефракция воздуха.

В промышленности находят себе применение также [3] зрительные трубы с точными уровнями, которые позволяют устанавливать ось визирования параллельно горизонту с точностью 0,025 мм на длине 15 м.

Автоколлимационный метод с применением ртутного зеркала можно использовать для проверки прямолинейности вертикальных направляющих и их перпендикулярности к горизонту.

Сущность этого метода заключается в следующем. Лучи света, выходя из коллиматора 8 (рис. 2), падают на призму 7, полупосеребренная диагональная плоскость которой направляет их через диафрагму 5 и марку 4 на ртутное зеркало 2, отражаясь от которого, они направляются в зрительную трубу 6 [7]. Зрительную трубу и призмы юстируют так, чтобы в поле зрения трубы были видны изображения марок 3 и 4, установленных в двух крайних положениях на направляющей. (Положению марки 3 соответствует положение ртутного зеркала 1).

Фокусирование зрительной трубы на марку осуществляют перемещением ртутного зеркала 2, которое можно помещать также выше проверяемой направляющей. Тогда ртутное зеркало в процессе измерения приходится отводить в сторону.

Принципиальная схема автоколлимационного метода с применением ртутного зеркала при использовании для проверки прямолинейности горизонтальных направляющих показана на рис. 3. Лучи света, выходя из коллиматора 1, проходят через марку 2 с крестом нитей, телескопическую систему 4 и призму 5 с полупосеребренной диагональной плоскостью, откуда падают на поверхность ртутного зеркала 8. Отражаясь от поверхности ртутного зеркала, лучи света снова проходят через полупосеребренную диагональную плоскость призмы 5 и призмой 6 направляются в зрительную трубу 7. (Положению марки 3 соответствует положение ртутного зеркала 9). Применяя дополнительные призмы или зеркала, можно проверить прямолинейность любой прямой линии. Отклонения от прямолинейности можно отсчитывать как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

При измерении направляющих большой длины пользуются телескопической системой 4, что позволяет уменьшить пределы перемещения ртутного зеркала 8. Без применения телескопической системы 4 расстоя-

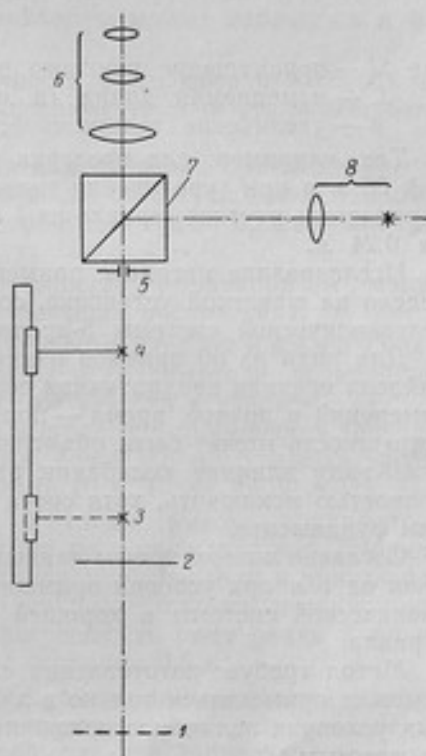


Рис. 2.

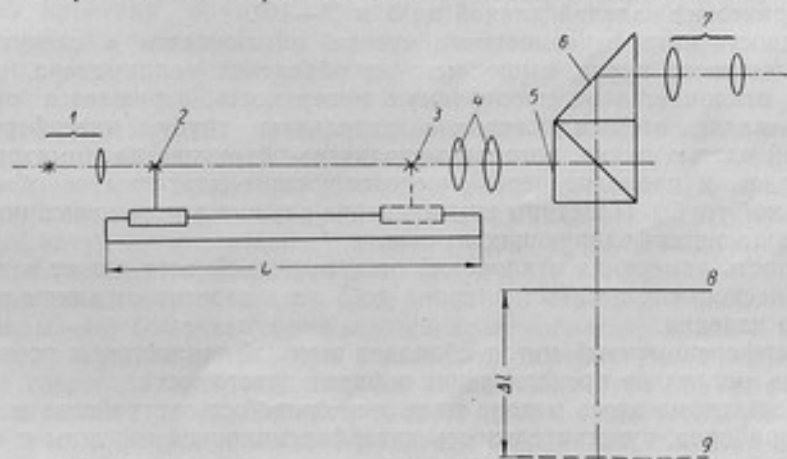


Рис. 3.

ние, на которое необходимо перемещать ртутное зеркало, должно быть равно половине длины проверяемой направляющей. Перемещение ртут-

ного зеркала при использовании телескопической системы 4 вычисляется по формуле [7]

$$\Delta l = \frac{1}{2} \frac{L}{\beta^2},$$

где Δl — перемещение ртутного зеркала;

L — измеряемая длина (в мм);

β — увеличение телескопической системы 4.

Так, например, для проверки прямолинейности направляющей длиной 50 м и при увеличении телескопической системы $\beta = 5$ требуется переместить ртутное зеркало на 1 м, а для направляющей длиной 12 м — на 0,24 м.

Исследование метода с применением ртутного зеркала было произведено на макетной установке, собранной по схеме рис. 3 с введением телескопической системы 5-кратного увеличения.

Для ряда из 50 приемов измерений, выполненных в дневное время, найдена средняя квадратичная погрешность порядка 5 мк на 1 м, а для измерений в ночное время — порядка 3 мк на 1 м. Такая большая погрешность может быть объяснена тем, что на результаты измерения оказывали влияние колебания ртутного зеркала, которые не удалось полностью исключить, хотя сосуд с ртутью был установлен на массивном фундаменте.

Согласно литературным данным [7], точность этого метода составляет 1 мк на 1 м при условии применения точной зрительной трубы, телескопической системы и хорошей амортизационной системы ртутного зеркала.

Метод требует изготовления сложной и дорогостоящей аппаратуры и может применяться только в лабораторных условиях, так как в цеховых условиях полностью исключить колебания ртути не представляется возможным.

Кроме исследованных нами методов, в практике нашли применение и другие методы проверки прямолинейности.

Академиком В. П. Линником предложен интерференционный метод для проверки прямолинейности плоскостей и образующих цилиндрических изделий длиной до 5 м [8—10].

Сущность интерференционного метода заключается в следующем. Часть светового пучка, вышедшего из объектива коллиматора, одним клином отклоняется на проверяемую поверхность, отражается от нее и, направляясь вторым клином в зрительную трубу, интерферирует с другой частью пучка, которая выходит из объектива коллиматора, не отклоняясь, и проходит через компенсирующие пластины в объектив зрительной трубы. Пластины компенсатора служат для компенсации разности хода интерферирующих пучков.

Точность измерения отклонений от прямолинейности лежит в пределах от нескольких десятых микрона до 5 мк и зависит от длины проверяемого изделия.

Интерференционный метод обладает высокой точностью и позволяет получить наглядное представление о форме поверхности.

Недостатками этого метода являются сложность устройства и юстировки приборов, чувствительность интерференционной картины к внешним колебаниям, особенно в заводских условиях, а также сравнительно малая длина проверяемых направляющих (не более 5 м). В последнее время за границей для проверки прямолинейности направляющих стали большой длины с высокой точностью применяют интерференционный метод, основанный на опыте Юнга [11—14].

Метод заключается в следующем. Если лучи света направить через конденсор на узкую одинарную щель, а затем на двойную щель, установленную параллельно одинарной щели, то они будут интерферировать, образуя интерференционную картину, которую можно наблюдать и фотографировать.

По литературным данным [13], точность этого метода 0,025 мм на 30 м. При тщательно поставленном эксперименте точность может быть доведена до 0,008 мм на 40 м.

Этот метод может применяться как для проверки прямолинейности станин станков, так и для контроля соосности отверстий, валов, подшипников и т. д. Для использования его требуется очень простая аппаратура.

Недостатками метода являются: влияние рефракции и малая яркость интерференционных полос на больших расстояниях.

Установка для измерения прямолинейности коллимационным методом состоит из зрительной трубы и коллиматора, перемещающегося по проверяемым направляющим от участка к участку.

Средняя квадратичная погрешность метода при применении зрительной трубы с диаметром объектива 40 мм, базой 0,5 м и угловым увеличением 27 составляет 4 мк на 5 м, 5 мк на 10 м, 10 мк на 30 м [1].

При автоколлимационном методе вместо коллиматора используют зеркало, которое передвигают по направляющим. Точность автоколлимационного метода при одинаковом увеличении и зрительной трубы и автоколлиматора примерно в два раза выше коллимационного метода [1, 3]. Средняя квадратичная погрешность ряда равна 2 мк на 5 м и 3 мк на 10 м (при базе каретки с зеркалом 0,5 м).

Коллимационный и, в особенности, автоколлимационный методы имеют высокую точность измерения и позволяют измерять отклонения от прямолинейности как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях.

Основным недостатком этих методов является то, что при больших проверяемых длинах погрешности увеличиваются за счет рефракции воздуха.

Для проверки прямолинейности направляющих большой длины применяют автоколлиматоры с пентапризмами [3]. Пентапризма в сочетании с автоколлиматором позволяет измерять вертикальные направляющие и устанавливать изделия под прямым углом.

Сущность метода проверки прямолинейности оптической линейкой заключается в следующем.

Лучи света от лампочки, проходя через прямоугольную призму, на которой нанесен горизонтальный штрих, попадают в систему призм, нижняя часть которой представляет собой прямоугольную призму, а верхняя часть — крышеобразную.

Лучи света, отразившись один раз от прямоугольной призмы и дважды — от боковых сторон верхней крышеобразной призмы, направляются в такую же призмную систему, но повернутую на 180° относительно горизонтальной оси. Двойное отражение в этом случае происходит в ее нижней части. Далее лучи света идут в прямоугольную призму и объектив, в фокусе которого находится стеклянная пластина с бисектором. Изображение штриха рассматривают через окуляр.

Оптическая система, состоящая из источника света, двух прямоугольных призм, объектива, стеклянной пластины с бисектором и окуляра, конструктивно оформлены в виде оптической трубки. Две системы призм укреплены по концам направляющей линейки.

Оптическая трубка, перемещаясь по проверяемой направляющей, соприкасается с ней при помощи измерительного наконечника. В зависимости от непрямолинейности проверяемой поверхности оптическая трубка будет то подниматься, то опускаться и соответственно будет смещено изображение штриха, рассматриваемого через окуляр.

Отклонения от прямолинейности прибор может измерять только в вертикальной плоскости. Пределы измерения прибора без перестановки его направляющей составляют 1,5 м, цена деления барабана окулярного микрометра 0,001 мм, пределы измерения окулярного микрометра 1 мм, точность прибора — 1 мк на 1 м [15—17].

Прибор очень прост в применении, не требует никакой предварительной юстировки, может быть использован не только в лабораторных, но и в заводских условиях, дает большую наглядность результатов измерений, с его помощью можно проверять не только прямолинейность направляющих, но и плоскостность плит.

С одной установки можно проверять прямолинейность и плоскостность изделий только до 1,5 м, для проверки изделий длиной больше 1,5 м прибор приходится последовательно переставлять.

В Японии Миядзаки Кою были разработаны оптический и емкостный электронные методы проверки прямолинейности [18, 19].

Сущность оптического электронного метода заключается в следующем. Параллельный пучок лучей, выходящий из коллиматора, падает на призму Дове и затем на фотоэлемент. В зависимости от непрямолинейности проверяемой поверхности изменяется наклон призмы и освещенность фотоэлемента, которая вызывает изменение напряжения в электрической цепи. По этому изменению судят об отклонении от прямолинейности. Метод был исследован только на небольших длинах (1 м).

Результаты измерения прямолинейности проверяемой поверхности оптическим электронным методом автор сравнивает с результатами измерения при помощи зрительной трубы (см. выше). Погрешность — такого же порядка, как и метода проверки зрительной трубой.

Сущность емкостного метода проверки прямолинейности заключается в следующем.

По проверяемой плоскости или направляющей автоматически передвигается каретка с измерительным стержнем, который связан с емкостным датчиком. Последний вместе с катушкой индуктивности образует колебательный контур, частота колебаний которого зависит от емкости, изменяющейся в зависимости от отклонения направляющей от прямолинейности [19].

Емкостные датчики обладают высокой чувствительностью. Например, при их помощи, пользуясь методом биения, удалось обнаружить перемещение порядка 10^{-7} мм [20].

Несмотря на высокую точность, применение емкостных датчиков весьма ограничено. Это объясняется тем, что для питания их используют переменное напряжение очень высокой частоты, вследствие чего очень трудно создать простой, надежный и стабильный прибор.

Заводы, применяя гидростатические методы проверки прямолинейности, используют самую разнообразную оснастку: металлические сосуды диаметром 100—200 мм, соединенные между собой трубками (в сосуды наливают воду или ртуть); открытые желоба, которые соединяются между собой трубками или гибкими шлангами; очень часто в качестве сообщающихся сосудов используют направляющие желобчатой формы [6, 21].

Более совершенный прибор для проверки прямолинейности, основанный на способе сообщающихся сосудов, был изготовлен в ЭНИМС [22]. Гидростатические измерительные головки этого прибора представляют собой небольшие закрытые резервуары со встроенными микрометрическими глубиномерами. Резервуары соединяются между собой шлангами с воздухом и водой.

Гидростатические методы очень просты в применении, позволяют проверять направляющие станин какой угодно длины, дают возможность устанавливать станины относительно уровня горизонта.

Этими методами можно проверять как прямолинейность направляющих станин станков, так и плоскостность плит, столов, круговых направляющих, прерывистые поверхности и поверхности с выступами.

Основными недостатками гидростатических методов являются их невысокая точность (погрешность порядка 0,01—0,02 мм), а также возможность проверять отклонение от прямолинейности только в вертикальной плоскости. Применяемые открытые гидростатические системы очень громоздки, чувствительны к механическим колебаниям. Кроме того, все эти методы требуют длинных шлангов, при укладке которых нужна осторожность, причем укладывают шланги на проверяемую поверхность, что нежелательно; на результаты измерения сильное влияние оказывают толчки и вибрации.

Выводы

Сравнивая между собой по точности исследованные во ВНИИМ методы проверки прямолинейности направляющих станин, можно сделать заключение о том, что самым точным является метод проверки уровнем. С помощью уровня можно производить измерения прямолинейности в вертикальной плоскости направляющих и плоскостей плит на длине до нескольких десятков метров.

Методом струны для проверки отклонений от прямолинейности в горизонтальной плоскости направляющих любой формы можно пользоваться максимум на длине до 30 м, так как при большей длине появляются погрешности за счет сильного колебания струны и из-за фокусировки микроскопа.

Автоколлимационный метод с применением ртутного зеркала может быть использован в лабораторных условиях для проверки отклонений от прямолинейности в любой плоскости и на длине до нескольких десятков метров.

Зрительными трубами можно пользоваться при проверке прямолинейности направляющих любой формы как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, на длине, не превышающей 30—40 м.

Из краткого обзора других методов следует, что наиболее точными являются интерференционные методы. Однако ввиду сложности аппаратуры, ее чувствительности к механическим колебаниям и к изменению внешних условий, эти методы измерения пока еще не нашли широкого применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловейчик Я. С., Проверка прямолинейности длинных направляющих, Сборник работ ЭНИМС, № 3, ЦБТИ МСС, 1949.
2. Когут А. Ф., Проверка больших плоскостей, Труды НГИМИП, вып. 1, Новосибирск, 1949.
3. Нитс К. Л., Alignment Testing, Engineering, October, 1948.

4. Rolt F. H., Tests for Straightness by Inclination Method, *The Engineer*, March 19, 1937.
5. Champetier L. Le contrôle de la précision des Machines-Outils. *Revue générale de mécanique*, Juin, № 90, 1956.
6. Партикевич Ф. В., Измерение прямолинейности в тяжелом машиностроении, «Производственный опыт в тяжелом машиностроении», вып. 2, Машгиз, 1952.
7. Contrôle optique de la rectitude et de la verticalité de lignes ou de plans. *Brevets Jobin et Yvon, Bariquand et Marre*, 1937.
8. Линник В. П., Интерферометр для контроля больших машинных деталей, «Оптико-механическая промышленность», июль, 1946.
9. Линник В. П., Интерферометр для измерения больших машинных деталей, «Приборы для измерения длин и углов», книга 7, Ломитомаш, 1948.
10. Линник В. П., Интерферометр для контроля больших машинных деталей, *ДАН СССР*, т. XXXV, 1, 1942.
11. Van Heel, Some practical Applications of a precision Alignment Method. *Applied scientific Research*, vol. 131, 1949.
12. Harrison P. W., An Interferometric Alignment Set. *Engineer*, 197, № 5128, 1954.
13. Harrison P. W., An Interferometric Alignment Set. *Machinery*, vol. 84, № 2164, 1954.
14. Ландсберг Г. С., *Оптика*, 1952.
15. Minaire Ch., *Precis de métrologie mécanique. Mesures contrôle industriel*, № 225, 1956.
16. Paul M., Les appareils d'optomécanique. *Revue générale de mécanique*, October, № 82, 1955.
17. Измерительные приборы иностранных фирм, «Станки и инструмент», № 3, 1956.
18. Миядзаки Кою, Electronic Method for measuring straightness based on slope, «Нихон кикай гаккай ронбунсю», 23, № 134, 1957.
19. Миядзаки Кою, Electronic Measurement of straightness based on Curvature, «Нихон кикай гаккай ронбунсю», 23, № 126, 1957.
20. Трапезников В. А., Городецкий И. Е., Петров Б. Н., Фельдбаум А. А., Автоматический контроль размеров, *Оборонгиз*, 1947.
21. Технология тяжелого машиностроения. Под редакцией проф. М. Л. Шахрая, Машгиз, 1952.
22. Никитин Б. Д., Гидростатические методы измерения прямолинейности и плоскостности, «Станки и инструмент», № 7, 1957.

Поступила в редакцию
28/XII 1959 г.

Е. А. ВОЛКОВА
ВНИИМ

О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ПЛОСКОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ

В статье рассмотрены вопросы исследования плоскостности стеклянных пластин диаметром 200 мм и деформации поверхности пластин, вызываемые их собственным весом.

В связи с широким применением интерференционных методов исследований в различных областях науки проявляется значительный интерес к вопросам технологии изготовления плоских поверхностей оптических стекол больших диаметров (до 300 мм). Одним из существенных вопросов при изготовлении и оценке возможности применения плоской поверхности является вопрос об измерении отклонений от плоскости. Наиболее точный метод измерения отклонений от плоскости полированной поверхности основан на наблюдении интерференционных полос равной толщины в монохроматическом свете между поверхностями образцового и испытуемого стекол. На рис. 1 приведена одна из возможных схем интерферометра для оценки плоскостей, а на рис. 2 — поле зрения прибора при наблюдении интерференционных полос от поверхностей, не покрытых отражающими слоями. Для получения высокой точности измерений на этом приборе поверхность образцового стекла должна быть изготовлена с малыми отклонениями от плоскости и хорошо изучена. В объективе, служащем для наблюдения картины, остаточные aberrации должны иметь незначительную величину [1].

При исследовании наиболее ответственных плоских поверхностей сравниваемые плоскости образцового и испытуемого стекол покрывают тонкими высокоотражающими слоями металлов. На рис. 3 приведено поле зрения прибора при наблюдении интерференционных полос от поверхностей, покрытых отражающими слоями серебра.

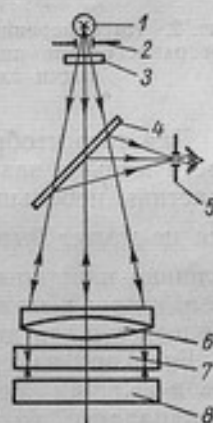


Рис. 1. Схема интерферометра для оценки плоскостей.

1 — источник света; 2 — диафрагма; 3 — фильтр; 4 — разделяющая пластинка; 5 — диафрагма; 6 — объектив; 7 — образцовая пластинка; 8 — испытуемая пластинка.

Измерения отклонений от плоскости должны производиться при равномерном распределении температур в объемах образцовой и испытуемой пластин. Для этого перед проведением измерений пластины устанавливают в термостатное устройство и выдерживают в течение нескольких часов.

Плохая теплопроводность стекла в пластинках толщиной более 20 мм и диаметром более 100 мм вызывает очень медленное установление температурного равновесия. Кроме того, заметное влияние на результаты исследования этих пластин оказывает деформация поверхностей образцового и испытуемого стекол от их собственного веса, так как на приборе они расположены горизонтально.

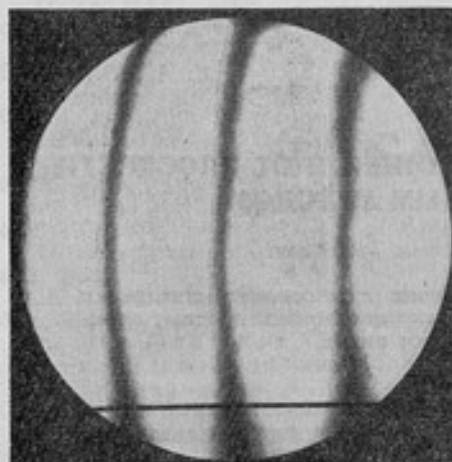


Рис. 2. Интерференционные полосы от поверхностей, не покрытых отражающими слоями.

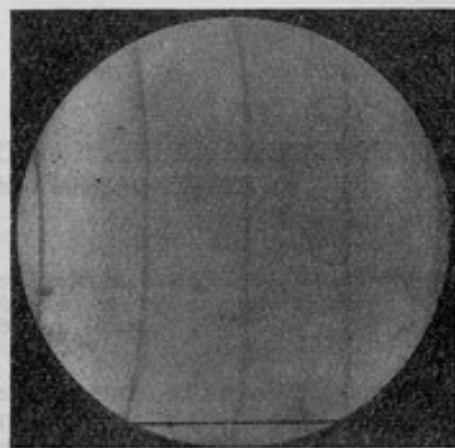


Рис. 3. Интерференционные полосы от поверхностей, покрытых отражающими слоями серебра.

Для того чтобы форма поверхности образцового стекла по возможности меньше зависела от температурного режима, следует применять пластины небольшой толщины, которая согласно технологии изготовления не может быть меньше $\frac{1}{8}$ или $\frac{1}{6}$ диаметра пластины. Малая же толщина пластины вызовет деформацию ее поверхности от собственного веса, которая может составить величину, значительно превосходящую неплоскостность данной пластины.

Если при измерении не учитывать влияния температурных градиентов и величин деформации поверхностей под действием собственного веса пластин, то это может привести к неправильной оценке погрешностей и к искажению представлений о действительном профиле изучаемой поверхности.

В настоящей статье рассматриваются результаты исследований поверхностей пластин с диаметром 200 мм на приборе Государственного оптического института (ГОИ) [2] и связанный с этим вопрос о деформации пластин от собственного веса.

Оптическая схема интерферометра ГОИ подобна схеме, изображенной на рис. 1, с той лишь разницей, что наличие призматической головки прибора позволяет очень быстро переходить от наблюдения интерференционной картины к ее фотографированию (с помощью фотокамеры с пленкой 24 и 36 мм). Прибор также позволяет после включения допол-

нительной линзы исследовать плоскопараллельность стеклянных пластин наблюдением колец равного наклона.

Образцовая пластина диаметром 200 мм и высотой 50 мм имеет по цилиндрической поверхности канавку на расстоянии 30 мм от образцовой нижней поверхности. В эту канавку вставляют обе половины разрезанного кольца, которое крепится в механической оправе, установленной в нижней части корпуса трубы прибора. Такое крепление обеспечивает опору образцового стекла на кольцевую поверхность. Исследуемое стекло кладут на регулируемый столик. Обе пластины можно закрывать цилиндром для термостатирования.

Интерферометр ГОИ был установлен в помещении полуподвального этажа, где термokonстантные условия были сравнительно удовлетворительными. Исследование пластин было выполнено в следующем порядке. Сначала произвели выбор лучшей образцовой плоскости, применив метод трех плоскостей. Все три сравниваемые поверхности предварительно покрывали тонким отражающим слоем серебра. Вместо образцового стекла в приборе поочередно устанавливали каждую из пластин и сравнивали ее поверхность с плоскостями двух других пластин. Нижнюю пластину при этом устанавливали на три эбонитовые опоры площадью около $0,5 \text{ см}^2$ каждая, расположенные в вершинах равностороннего треугольника, вписанного в окружность, ограничивающую контур пластины. С помощью регулировочных винтов столика создавали такой угол между поверхностями сравниваемых пластин, чтобы в поле зрения можно было наблюдать не более трех — пяти узких интерференционных минимумов полос равной толщины. Затем производили фотографирование интерференционной картины.

Для получения наиболее достоверных результатов измерений для каждой пары сравниваемых поверхностей было выполнено в различные дни не менее четырех серий фотографий. Серия включала от четырех до шести снимков, соответствующих установке интерференционных полос в направлении двух диаметров, ориентированных под углом около 70° один по отношению к другому.

Отклонения интерференционных полос от прямой линии измерялись на предварительно увеличенном снимке с помощью миллиметровой линейки. Измерения производили в пяти точках, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга (рис. 4), отступив от края пластины на 3 мм. Измеренные отклонения относили к значению ширины полосы (определенному как среднее по двум центральным полосам) и получали величины отклонений в полосах. Погрешность ряда измерений этим методом в среднем не превышала $0,015 \frac{\lambda}{2}$.

Первый ряд фотографий интерференционных полос был выполнен на приборе в утренние часы, но, поскольку в дневные часы в этом же помещении производились другие работы, то постоянство температуры в помещении до некоторой степени нарушалось (разность вечерней и утренней температур в комнате достигала $0,3^\circ \text{C}$).

Обработка фотографий этих серий показала, что измерения, произведенные в разные дни для одной и той же пары пластин, давали раз-

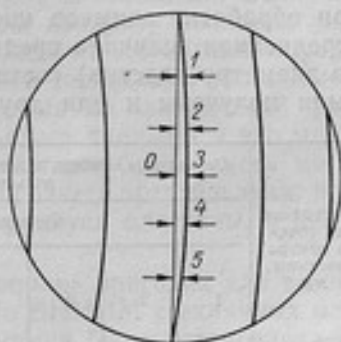


Рис. 4. Отклонения интерференционных полос.

личные результаты. Разность этих величин доходила иногда до 0,1 полосы, что могло быть объяснено лишь тем, что в объеме сравниваемых пластин было различное распределение температуры.

Если температура в комнате меняется плавно, то можно считать, что в воздухе центральной части комнаты будут иметь место горизонтальные зоны с постоянной температурой, в то время как в пластинах этого не будет. Пластины располагались так, что теплообмен с воздухом на их цилиндрических поверхностях протекает значительно быстрее, чем на плоских. Если считать, что коэффициент термического расширения стекла равен $8 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, то при разности средних температур около $0,075^\circ \text{C}$ между малыми вертикальными объемами стекла пластины на ее образующей и в центре деформация плоской поверхности будет составлять около 0,03 мк. Следовательно, при сравнении контуров поверхностей двух пластин с точностью порядка тысячных микрометра температурные градиенты в их объемах не должны превосходить тысячных долей градуса. Для этого необходимо, чтобы исследуемые пластины находились на приборе длительное время при постоянной температуре.

В предположении, что в том же помещении температура будет значительно стабильнее, если в комнату никто не будет входить в течение дня, кроме лиц, производивших фотографирование, был выполнен новый ряд измерений. Результаты сравнения двух плоскостей пластин № 1 и 11 по одному из диаметров получились вполне удовлетворительными, что видно из приведенной таблицы (одной из шести таблиц, полученных при обработке снимков интерференционных полос). Согласно таблице усредненная величина средней квадратичной погрешности (для 5 точек по диаметру пластин) составляет 0,0024 мк. Значения этого же порядка были получены и для других серий измерений.

| Расстояние от точек до центра пластин, мм | Отклонения полос, проходящей по диаметру пластин, от прямой относительно центральной точки в долях полос ($\lambda = 0,5461 \text{ мк}$) | | | | | | | | |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|------------------------------------------------|-------|
| | Номера снимков | | | | | | | Результаты измерения | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | среднее | средняя квадратичная погрешность результата, ± | |
| | | | | | | | | в долях полос | в мк |
| 97 | -0,06 | -0,07 | -0,07 | -0,06 | -0,05 | -0,03 | -0,06 | 0,006 | 0,002 |
| 49 | 0,0 | -0,04 | -0,06 | +0,02 | +0,03 | +0,05 | 0,0 | 0,020 | 0,005 |
| 0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | |
| -49 | -0,03 | -0,06 | -0,07 | -0,01 | +0,02 | -0,01 | -0,03 | 0,010 | 0,003 |
| -97 | -0,06 | -0,07 | -0,07 | -0,06 | -0,05 | -0,03 | -0,06 | 0,005 | 0,002 |

По-видимому, при эксплуатации прибора также потребуется значительное время для выравнивания температуры в образцовой и испытуемой пластинах. В связи с этим было интересно проверить, насколько оправдана значительная толщина образцовых пластин (50 мм при диаметре 200 мм), исходя из величины деформации пластин под влиянием их веса.

Применимость формул теории упругости, выведенных С. П. Тимошенко [3], для вычисления величин деформаций пластин из плавленного кварца под действием их веса показана в работе В. Б. Эмерсона [4], основное содержание которой состоит в следующем.

Исследуя поверхности кварцевых пластин с диаметрами 10,6 дюймов, В. Б. Эмерсон, применяя визуальный интерференционный метод, наблюдал интерференционные полосы (от поверхностей, не покрытых отражающими слоями), полученные в приборе, имеющем схему, подобную приведенной на рис. 1. Измерения были выполнены в термоконстантном помещении и, кроме того, сравниваемые пластины были снабжены специальным теплозащитным кожухом. Величина деформации от собственного веса круглой пластины, свободно расположенной на кольцевой опоре, относительно плоскости, проходящей через точки опор данного диаметра, может быть вычислена по формуле С. П. Тимошенко

$$W_{\max} = \frac{qa^4}{64D} \left(\frac{5+\nu}{1+\nu} + \frac{4}{3} \cdot \frac{3+\nu}{1-\nu^2} \cdot \frac{h^2}{a^2} \right),$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ — жесткость пластин при изгибе;

- E — модуль упругости;
- ν — коэффициент Пуассона;
- a — радиус пластины;
- h — толщина пластины;
- q — удельная нагрузка.

Преобразования этой формулы позволили В. Б. Эмерсону сделать вывод, что изгиб может быть выражен двумя слагаемыми. Величина первого слагаемого обратно пропорциональна квадрату толщины пластины, второго — не зависит от толщины. Исходя из этого, были определены деформации 4 кварцевых пластин разной толщины. Работа Эмерсона показала, что вычисления, произведенные по приведенной формуле, хорошо согласуются с экспериментальными данными и что минимальный изгиб поверхности исследуемой пластины будет иметь место при расположении опор в вершинах равностороннего треугольника, вписанного в круг, радиус которого равен 0,7 радиуса пластины, а центр совпадает с центром пластины.

Приведенная формула оказалась также вполне пригодна для вычисления величин деформаций исследованных во ВНИИМ стеклянных пластин диаметром 200 мм, когда нижняя пластина была установлена на подставки, расположенные в вершинах равностороннего треугольника. Это обстоятельство, по-видимому, изменяло только местные напряжения в непосредственной близости от опор, а деформация в центре поверхности весьма близка по величине к деформации пластины, расположенной на кольце. Максимальная величина деформации в центре пластины толщиной 50 мм и диаметром 200 мм в этом случае будет составлять $0,015 \text{ мк} \left(0,05 \frac{\lambda}{2} \right)$. Если сравниваемая пластина подвешена на кольце (или на трех опорах), то деформация на испытываемой поверхности будет обратной по знаку и равной по величине деформации нижней пластины.

Таким образом, при сравнении двух одинаковых пластин, как это имело место в нашем случае, разность деформаций пластин равна нулю и не оказывает влияния на определение величин отступлений пластин от плоскостности. При исследовании на приборе пластин другого диаметра и толщины необходимо вносить соответствующие поправки и, особенно, если исследуемые пластины будут впоследствии применяться при вертикальном расположении плоскостей.

Для сравнения условий работы прибора ГОИ и интерферометра фирмы «БОП» при проверке плоскостей диаметром 150 мм по той же формуле была вычислена деформация образцовой пластины прибора

фирмы «БОП». Деформация в центре нижней образцовой поверхности пластины диаметром 150 мм и толщиной 25 мм составляет 0,015 мк (выпуклость).

В 1951 г. поверхность образцовой пластины прибора фирмы «БОП» была исследована методом трех плоскостей. При этом исследуемая плоскость была расположена всегда сверху, так как размеры ее были невелики по сравнению с двумя другими пластинами лаборатории (диаметр 290 мм и толщина 70 мм). Нерабочая поверхность этих пластин была также полированной и при сравнении с пластиной прибора фирмы «БОП» их всегда устанавливали непосредственно на плоской хорошо обработанной поверхности столика.

В этом случае деформация в центре верхней поверхности пластины под действием ее собственного веса была много меньше деформации, которую можно вычислить по приведенной выше формуле для пластины, расположенной на кольцевой опоре. При этом деформация в ее центральной точке относительно точек поверхности по образующей круга диаметром 150 мм составит около 0,01 мк.

Вычисления отклонений трех пластин от плоскости были сделаны без учета деформаций пластин. Не была также принята во внимание и деформация образцовой пластины, которая вошла в расчетные уравнения в сумме с истинными отклонениями поверхности от плоскости. Вместе с тем деформации от собственного веса двух других пластин ввиду их малости в нашем случае не могли компенсировать деформацию образцовой пластины.

Результат исследования показал, что отклонения от плоскости нижней поверхности образцовой пластины в сумме с деформациями от изгиба не превосходят 0,045 полосы (вогнутость) с погрешностью порядка $\pm 0,005$ полосы. Можно предположить, что поверхность этой образцовой пластины была ранее изготовлена с кривизной, компенсирующей деформацию изгиба от собственного веса, причем эта кривизна несколько превысила деформацию.

Произведенные исследования позволяют установить, что при выборе толщины образцовых стекол, служащих для оценки качества плоскостей, следует учитывать два противоречивых требования. С одной стороны, необходимо получить возможно малую деформацию образцовой поверхности под влиянием собственного веса и, с другой стороны, пластина не должна иметь слишком большую температурную инерцию, которая приводит к искажению поверхности при наличии градиентов температуры в объеме пластины в процессе ее эксплуатации.

Образцовая пластина высшего качества может быть получена следующим образом. Выбрав толщину пластины равной около $\frac{1}{6}$ диаметра, вычисляют по формуле С. П. Тимошенко величину изгиба ее поверхности вследствие действия собственного веса пластины. Затем на образцовой поверхности пластины при ее обработке оставляют отклонения от плоскости, обратные по знаку и равные по абсолютной величине вычисленной деформации пластины от собственного ее веса.

При контроле поверхности пластины в процессе ее изготовления (путем наблюдения интерференционной картины полос равной толщины) опоры пластины должны быть расположены так, чтобы изгиб поверхности под действием собственного ее веса был минимальным. С этой целью исследуемую пластину следует устанавливать под изученной заранее поверхностью образцового стекла на три опоры, расположенные в вершинах равностороннего треугольника, вписанного в окружность с радиусом, равным 0,7 радиуса исследуемой пластины, и с центром,

совпадающим с центром пластины. Окончательная оценка готовой образцовой поверхности может быть выполнена методом трех плоскостей, причем две вспомогательные пластины должны иметь те же размеры, что и образцовая пластина. Так как образцовая пластина в приборе обычно висит на трех опорах, то для исключения влияния деформаций пластин на величину определяемых отклонений от плоскости сравниваемые пластины следует устанавливать так же на три опоры, расположенные непосредственно под опорами образцовой пластины.

Измерения отклонений образцовой поверхности от плоскости необходимо производить в термоконстантном помещении. Выдержка сравниваемых пластин при постоянной температуре перед измерением должна быть порядка 10 и более часов в зависимости от размеров пластин.

Оценку точности измерения плоскостей пластин следует производить с учетом влияния условий измерений, вызывающих иногда погрешности, сравнимые по величине с измеряемыми отступлениями от плоскости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Goder P. R. and Hollis W. W., «Journ. of Opt. Soc. Am.», vol. 47, № 9, 1957, p. 859—861.
2. Левин Б. М. и Духопел И. И., Интерферометр для контроля плоскостей и плоскопараллельности, «Оптико-механическая промышленность», № 6, 1958.
3. Тимошенко С. П., Пластинки и оболочки, ОГИЗ, 1948, стр. 460.
4. Emerson W. B., «Journ. of Research of N. B. S.», vol. 49, № 4, 1952, p. 241—247.

Поступила в редакцию
15/1 1960 г.

А. И. КАРТАШЕВ
ВНИИМ

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТ НЕРОВНОСТЕЙ НА ШЕРОХОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Предлагается новый способ исследования шероховатости поверхности как совокупности неровностей различной высоты, повторяющихся через определенные линейные интервалы. Примененный фотоэлектрический метод позволил получить «частотные характеристики» шероховатости для поверхностей некоторых типичных видов обработки. Представленные кривые и рекомендуемые численные параметры высот неровностей H и частот их образования ν позволяют найти связь с эксплуатационными свойствами поверхностей и установить единообразие в оценке шероховатости и волнистости.

Для характеристики шероховатости поверхности, определяемой наличием неровностей, пользуются, как известно, различными критериями. Наиболее общепринятыми и распространенными в настоящее время критериями являются высота неровностей R_z , среднее квадратичное отклонение от средней линии профиля $H_{ск}$ или среднее арифметическое отклонение от средней линии профиля R_a .

Определение шероховатости согласно этим критериям, а также соответствие их друг другу даны в ГОСТ 2789—59 и в литературе, посвященной этим вопросам [1]. Не останавливаясь на этих определениях, следует заметить, что для более подробного описания микрорельефа поверхности пользуются либо изображением профиля в выбранном направлении, т. е. профилограммой некоторых участков поверхности, либо дополнительными критериями. Такими дополнительными критериями, например, могут быть: шаг неровностей, т. е. среднее расстояние между вершинами отдельных неровностей, кривые опорных поверхностей, число точек пересечения кривой профиля со средней линией профиля или с какой-либо вспомогательной линией, опорная поверхность и др. Подобные математические приемы дают возможность с несколько большим приближением судить о шероховатости изучаемой поверхности (или же воспроизвести заданную шероховатость, назначив ту или иную технологию производства), чем это возможно сделать, пользуясь лишь одним из приведенных критериев. Однако отвлекающий характер этих вспомогательных критериев не дает ясного представления о реальной картине шероховатости.

В настоящей статье предлагаются более общие численные характеристики шероховатости поверхности, с помощью которых можно было бы судить о состоянии поверхности, не пользуясь изображением профиля, и воспроизвести шероховатость с заданными характеристиками, свободно выбирая технологический процесс, исходя из ограниченного количества численных значений величин, характерных для данного микро-рельефа поверхности. Иными словами, задача заключается в том, чтобы с помощью небольшого количества численных величин иметь возможность судить о шероховатости или воспроизводить ее почти с тем же приближением к реальной поверхности, какое достигается в результате изучения профилограмм.

Единичные критерии R_z , H_{sk} и R_a однозначно характеризуют шероховатость, если распределение значений высот неровностей близко к нормальному распределению Гаусса. Тогда соотношения этих величин, экспериментально определенных из большого числа измерений, совпадают с теоретическими расчетами. Это положение особенно находит подтверждение для такого технологического процесса, как шлифование [2], так как, видимо, процесс шлифования вызывает появление на поверхности неровностей, пропорциональных размерам зерен абразивного материала. С одной стороны, обработка поверхности с помощью абразива характеризуется одновременным участием очень большого числа случайно расположенных режущих граней зерен абразива, а, с другой стороны, и размеры зерен при их отборе, очевидно, распределяются по случайному закону, весьма близкому к нормальному распределению [3].

В случае применения других технологических процессов, когда на характер микрогеометрии обрабатываемой поверхности влияет несколько факторов (глубина резания и подача, шероховатость режущей кромки инструмента и характер пластических деформаций материала при точении, строгании и т. п.), распределение высот неровностей значительно отличается от нормального и носит специфический характер. То же явление может иметь место, когда следы предварительной обработки оказывают влияние на получаемую шероховатость. В подобных случаях кривые распределения неровностей могут значительно отличаться от нормального. Примером этого может служить рис. 1 [4]. Здесь приведены кривые распределения, соответствующие частоте появления неровностей, для различных видов механической обработки. При первом же взгляде на эти кривые можно заметить наличие некоторых максимумов (отмеченных нами стрелкой), причем для определенных видов обработки намечается даже два или три максимума. Так, например, для грубого точения можно предположить, что кривая распределения образовалась из трех нормальных распределений, видимо, вызванных тремя различными факторами.

Однако приведенные выше распределения, с нашей точки зрения, обладают тем недостатком, что не дают возможности выяснить происхождение неровностей различных видов, так как не представляют зависимостей частоты появления неровностей от расстояния между ними, т. е. зависимости от шагов.

В соответствии с изложенным, нами были проведены экспериментальные работы по более полному изучению частотных характеристик шероховатости.

Представим себе график распределения высот неровностей в зависимости от числа неровностей, приходящихся на единицу длины некоторого участка поверхности. Тогда, отложив по оси абсцисс значения величин $\nu = \frac{1}{s}$, где s — шаг неровностей, а по оси ординат — высоты

неровностей H , получим характерную кривую, примерный вид которой изображен на рис. 2. Очевидно, что для более грубых поверхностей максимум кривой будет располагаться выше и будет смещен ближе к началу координат, а для более тонких поверхностей наоборот. В случае, когда процесс установившийся, эти кривые будут симметричными и близкими к кривой Гаусса. Крутизна или пологость кривых указывает на степень регулярности процесса обработки. Регулярные неровности дадут на кри-

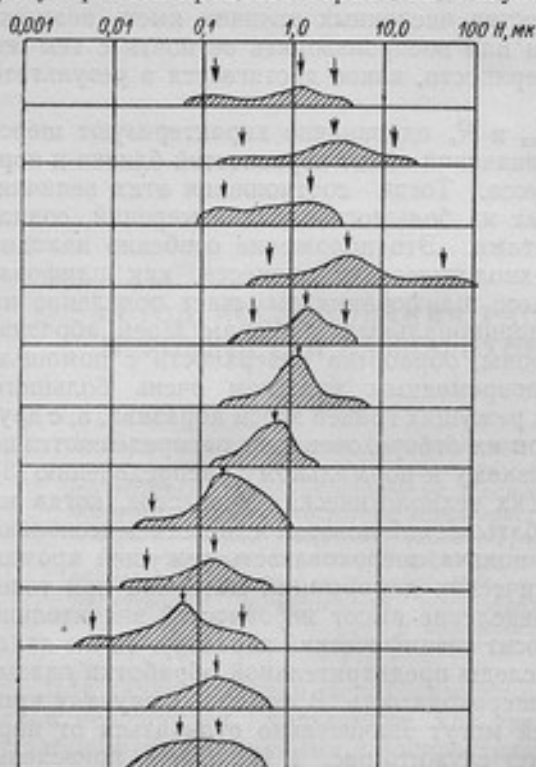


Рис. 1. Кривые распределения высот неровностей для (см. сверху вниз): сверления; грубого и тонкого фрезерования; грубого и чистового точения; грубого, отделочного и тонкого шлифования; полирования; лапнига; хонингования; суперфиниша.

вой узкие и острые пики, а технологические процессы, при которых образуются неровности с различными шагами, дадут пологие кривые.

Для получения численных и наглядных характеристик, соответствующих предлагаемому принципу рассмотрения совокупности неровностей, представляло интерес получить экспериментальные данные для типичных видов поверхностей. Экспериментальные кривые были получены для характерных видов технологического процесса на специально собранной установке.

Принцип действия этой установки заключается в следующем. Пусть с помощью какого-либо достаточно точного профилирующего прибора получена профилограмма некоторого участка исследуемой поверхности. Затем такая профилограмма переносится на прозрачную пленку или вырезается в виде маски так, чтобы участки, расположенные выше профильной кривой, оставались прозрач-

ными, а ниже — непрозрачными. Изготовленная таким образом лента сливается так, что получается цилиндр с непрерывной замкнутой кривой, контур которой изображает профиль исследуемого участка поверхности; маска размещается на барабане, приводимом во вращение от мотора.

Схема установки представлена на рис. 3. Источник света 1 освещает с помощью конденсора 2 щель 3, проектируемую объективом 4 и призмой 5 в плоскость маски, расположенной на барабане 6. При вращении барабана световой поток (направляемый линзой 7), падающий на фотоэлемент 8, будет изменяться в зависимости от конфигурации маски. Характер изменения светового потока, а следовательно, и фототока будет соответствовать периодическим изменениям высот неровностей в пределах исследуемого участка поверхности. Скорость вращения барабана можно отрегулировать так, что эти периодические изменения будут

вызывать электрические сигналы, поступающие в усилитель 9. Поскольку частоты сигналов находятся в области звуковых частот, то такой спектр электрических колебаний можно анализировать с помощью обычных звуковых анализаторов. Для этой цели на выходе усилителя, питаемого от блока питания, установлен звуковой анализатор 10. При определенной и постоянной скорости вращения барабана с маской в общем спектре электрических колебаний с помощью звукового анализатора, последовательно настраиваемого на резонанс, можно обнаружить присутствие определенных характерных частот. Интенсивность этих частот пропорциональна величинам высот неровностей, периодически появляющихся с данной частотой, а сама

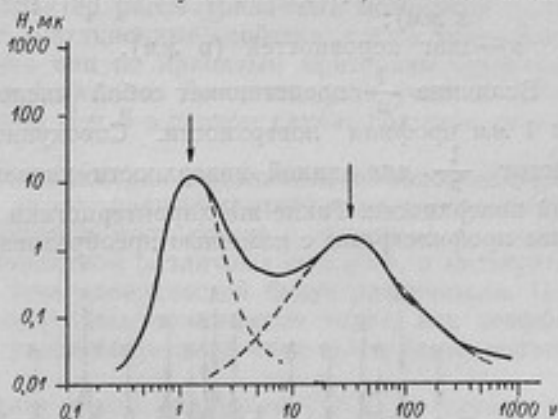


Рис. 2. Общий пример распределения высот неровностей в зависимости от числа их на единицу длины.

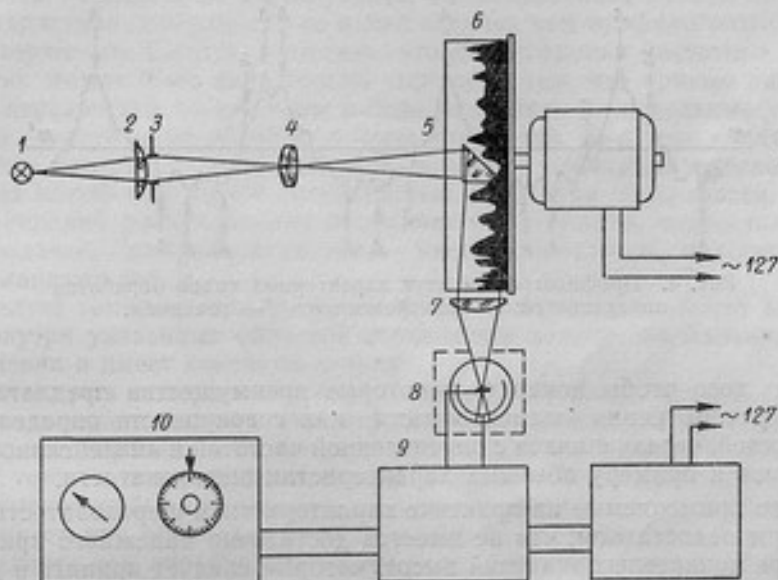


Рис. 3. Схема установки для изучения частотных характеристик.

частота связана с размерами шага, т. е. средним расстоянием между этими неровностями, и может быть найдена из простого соотношения

$$\frac{1}{s} = \frac{vf}{nl},$$

где n — число оборотов барабана (в сек);

v — линейное горизонтальное увеличение профилограммы-маски;

f — частота, регистрируемая анализатором;
 l — длина профилограммы-маски (длина окружности барабана в мм);
 s — шаг неровностей (в мм).

Величина $\frac{1}{s}$ представляет собой число неровностей, приходящееся на 1 мм профиля поверхности. Совокупность характерных значений частот $\frac{1}{s}$ для данной поверхности названа частотной характеристикой поверхности. Такие же характеристики можно получить путем анализа профилограмм с помощью преобразований Фурье.

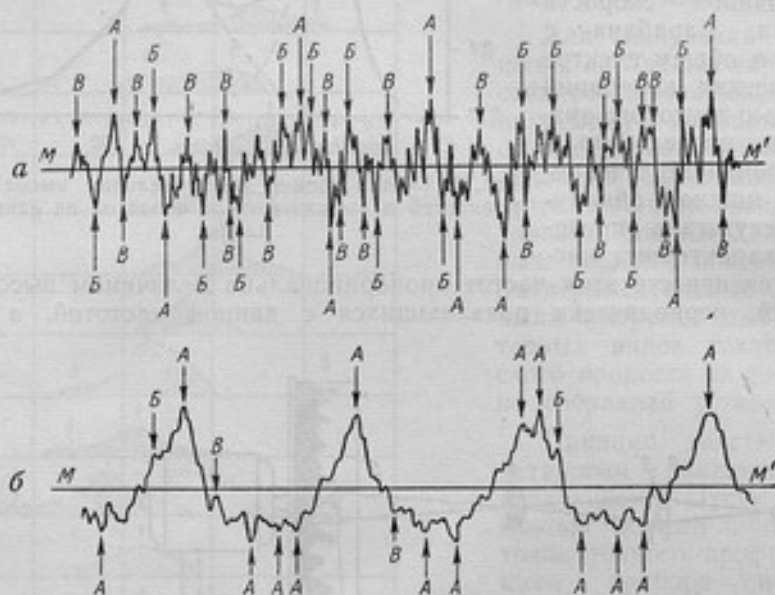


Рис. 4. Профилограммы двух характерных видов обработки поверхностей: а — шлифованием; б — точением.

Для того чтобы показать некоторые преимущества предлагаемого метода рассмотрения шероховатости как совокупности определенных неровностей, чередующихся с определенной частотой и «интенсивностью», обратимся к примеру обычных характеристик шероховатости.

Часто применяемые на практике характеристики шероховатости страдают тем недостатком, что не имеется достаточно надежного критерия в выборе конкретных значений высот, которые следует принять в расчет при вычислении средних значений. Примером может служить поверхность с установившимся нормальным процессом шлифования. Если произвести обработку профилограммы такой поверхности (рис. 4, а), то можно сделать несколько различных вычислений. Пусть отбор различных высот неровностей определяется разрешающей способностью прибора, с помощью которого производится суммирование. В первом случае примем в расчет лишь высоты А, во втором — высоты А и В и в третьем — высоты А, В и В. Средние значения на одном и том же участке профиля для этих случаев будут несколько возрастающими.

При аналогичной обработке профилограммы поверхности, представленной на рис. 4, б, те же средние значения для случаев суммирования

высот A , A и B или A , B и B будут убывающими. В то же время по критерию R обе поверхности имеют одинаковую шероховатость. Из самих профилограмм видно, что характер рассматриваемых поверхностей совершенно различен и их эксплуатационные свойства также могут быть разными, несмотря на то, что они по принятым критериям относятся к одинаковым классам шероховатости. Ясно, что доля участка более «высокочастотных» неровностей B и B в первом случае большая, чем во втором.

Однако в двух приведенных примерах с различной технологией обработки поверхности значения рассмотренных критериев мало отличаются друг от друга. Ясно, что получить поверхность с заданным значением R_z , $H_{ср}$ или R_a можно множеством различных способов, и эксплуатационные и другие свойства этих поверхностей будут различными. Под эксплуатационными свойствами здесь понимаются такие, как коэффициенты трения, способность удерживать смазочные материалы, подверженность коррозии и т. п.

Таким образом, пользование одним критерием ГОСТ не всегда приводит к однозначным результатам, так как этот критерий мало связан с геометрией микропрофиля.

В этом отношении частотные характеристики шероховатости поверхности дают более полную характеристику микрогеометрии, представляя картину распределения характерных средних высот неровностей в зависимости от числа их, приходящегося на каждый миллиметр длины поверхности. Можно было бы возразить, что пользование кривой частотной характеристики поверхности не менее сложно, чем профилограммой этой же поверхности. Следует заметить, что расшифровка частотных характеристик может быть значительно упрощена тем, что кривые распределения неровностей по частотам можно разделить на отдельные участки, как бы спектральные области, полосы или линии. При этом следует считать, что каждая из этих областей является монохроматической, т. е. вызвана какой-либо одной особенностью обработки поверхности, например функцией распределения абразивного материала, скоростью резания, подачей, вибрацией системы инструмент-станок, пластическими деформациями и т. п.

Следует также сделать допущение, что распределение высот неровностей внутри указанных областей подчиняется закону нормального распределения и имеет конечную ширину.

Рассмотрим поверхность, обработанную точением, причем скорость резания и подачи были такими, что на ней образовались более или менее регулярные неровности со средним шагом $0,75$ мк и высотой $10-15$ мк. Кроме того, на поверхности остались следы от того, что режущая кромка инструмента не была идеально прямолинейной, а имела неровности, образовавшиеся при обработке режущих граней. Характер этих неровностей определен абразивным материалом, с помощью которого производилась заточка режущих граней инструмента.

Далее вполне допустимо предположить, что появление неровностей с шагами, несколько большими или меньшими величины $0,75$ мк, вызвано лишь случайными факторами (неравномерностью подачи, неоднородностью материала и пластических деформаций и т. п.). Также случайный характер носит и распределение неровностей на режущей кромке, вызванное большим числом зерен абразивного материала различной величины. Однако в этом случае величины неровностей будут значительно меньше, чем вызванные подачей и глубиной резания, и можно предположить, что они составят величины порядка $1-2$ мк по высоте и будут иметь шаги в пределах $0,3-0,005$ мк. Пользуясь этими

данными, не трудно было построить предположительное распределение высот и шагов неровностей в виде графика, приведенного на рис. 2.

В этом случае подача и скорость резания вызовут линию в области $\nu = 1,3 \text{ мм}^{-1}$ с интенсивностью 12,5 мк, а шероховатость режущей кромки — линию в области $\nu = 40 \text{ мм}^{-1}$ с интенсивностью 1,5 мк. Построив от этих точек (с координатами 12,5; 1,3; и 40; 1,5) кривые нормального распределения (пунктирные линии), получим в сумме общее предположительное распределение (сплошная линия) неровностей по высотам и частоте их появления на единицу длины участка поверхности. Экспериментальные кривые распределения по частотам для различного характера шероховатости поверхности подтверждают рациональность предложенного построения. Кривые распределения по частотам для реальных шероховатостей могут иметь более сложный характер.

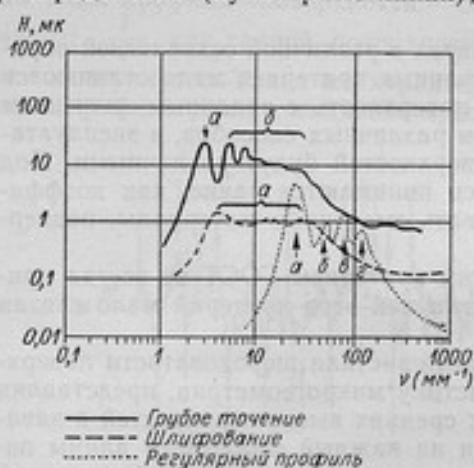


Рис. 5. Кривые частотных характеристик для типичных видов обработки.

регулярным профилем, полученные на установке. Рассматривая кривые, можно заметить, что при грубом точении имеет место широкий спектр частот, причем соответственно приведенным выше теоретическим предпосылкам видны две характерные области.

Характерные линии спектра шероховатости (рис. 5) приведены в таблице.

| Вид обработки | Максимумы | Интенсивность H линии, мк | Частота ν , мм^{-1} | Примечания |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Грубое точение . . | $\left\{ \begin{array}{l} a \\ b \end{array} \right.$ | 34 | 2,5 | Узкий максимум Широкая полоса |
| | | 10 | 12 | |
| Шлифованная поверхность стекла . . . | a | 1 ÷ 2 | 2 ÷ 100 | Непрерывный спектр |
| Регулярный профиль треугольной формы . | $\left\{ \begin{array}{l} a \\ b \\ c \end{array} \right.$ | 5 | 25 | |
| | | 1 | 50 | |
| | | 2 | 80 | |
| | | 0,8 | 120 | |

Для облегчения рассмотрения частотных характеристик и назначения параметров шероховатости с требуемыми свойствами можно ограничиться двумя или тремя характерными линиями.

Для этого, видимо, достаточно выбрать четыре или шесть численных значений, т. е. две или три интенсивности H и две или три соответствующие им частоты ν . В качестве примера на рис. 6 приведен чертеж детали, на котором нанесены символы, определяющие шероховатости ее

обработки. По значениям (в области шероховатости) высоты неровностей торцевой и боковой поверхностей одного порядка по ГОСТ они были бы отнесены к одному классу чистоты поверхности. При соблюдении же частотных характеристик совершенно ясно, что в первом случае на боковой поверхности допускается такая обработка, как полировка не очень высокого класса с остаточной волнистостью порядка 10 мк. Во втором случае — это точная доведенная поверхность, получаемая совершенно иной технологией. Таким образом, при наличии волнистости интерпретация микрогеометрии поверхности может характеризоваться

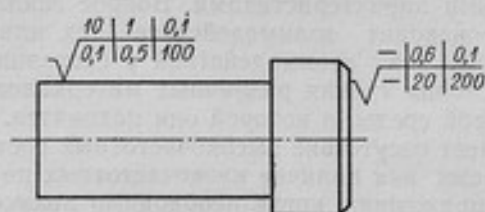


Рис. 6. Пример условного изображения шероховатости на чертеже.

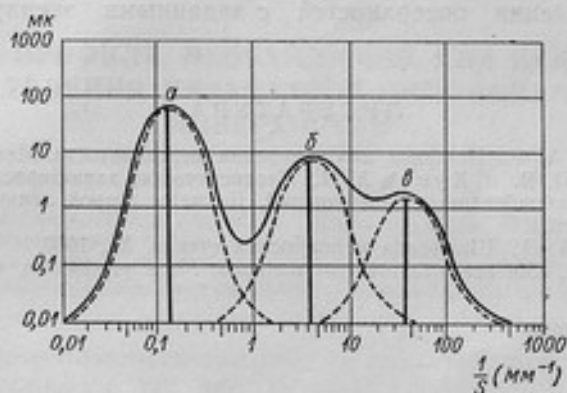


Рис. 7. Схематическое распределение высот неровностей при наличии волнистости.

тремя основными спектральными областями: а) $\sqrt{\frac{H_1}{v_1}}$ — область волнистости; б) $\sqrt{\frac{H_2}{v_2}}$ — область доминирующих признаков шероховатости; в) $\sqrt{\frac{H_3}{v_3}}$ — область высокочастотных неровностей. Схематический график такого распределения с учетом волнистости представлен на рис. 7.

Заключение

Исследование частотных характеристик шероховатости открывает совершенно новые возможности в рассмотрении микрогеометрии поверхности как совокупности спектрального распределения различных неровностей в зависимости от числа их, приходящегося на единицу длины. Эти возможности заключаются в том, что эксплуатационные свойства деталей машин (проявляющиеся в сопряжениях при различных посадках, в условиях трения, а также в свойствах поверхностей при обтекании их жидкостями и газами, в антикоррозионной устойчивости и в декоративном виде поверхности) могут быть заданы более рационально при учете спектрального состава распределения неровностей.

Такой новый подход позволяет более правильно и экономично назначать технологию обработки, пользуясь строго определенными численными характеристиками. Вопрос заключается в том, на каких основах происходит взаимодействие тех или иных деталей машин и какова связь этих взаимодействий с состоянием микрогеометрии поверхности. Условия трения различных материалов зависят от свойств поверхности и той среды, в которой они находятся. В этом случае большое значение имеет отсутствие высокочастотных составляющих в характеристике, в то время как наличие низкочастотных не имеет значения. При посадочных сопряжениях, когда необходимо получение точного соответствия формы поверхности (доводка) и молекулярного сцепления (притирания), большую роль играет наличие высокочастотных составляющих (концевые меры) и отсутствие низкочастотных. Эта задача может быть решена путем подбора соответствующих абразивных материалов.

Таким образом, приведенные выше примеры показывают, что частотные характеристики значительно расширяют возможность выбора технологии для получения поверхностей с заданными эксплуатационными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лесохин А. Ф., Приборы для измерения шероховатости, Машгиз, 1956.
2. Линник Ю. В. и Хусун А. П., Статистические характеристики профильных кривых, Качество обработанных поверхностей, Доклады второй ленинградской конференции, Машгиз, 1954.
3. Темкин Б. С., Шлифовка и полировка стекла, М., 1947.
4. Walter L., Surface measurement methods, Mass production, v. 32, № 6, 1956.

Поступила в редакцию
28/XII 1959 г.

А. Н. КАРТАШЕВА
ВНИИК

О ДЛИНЕ ПРОФИЛЯ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ НАДЕЖНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

В статье рассматривается вопрос о длине профиля, необходимой для надежного определения параметров шероховатости поверхности (R_a , H_{sk} и др.). На основании проведенных экспериментальных исследований всем выявленным закономерностям дается принципиальное объяснение.

Измерения шероховатости поверхности деталей машин должны быть достаточно надежными, так как эксплуатационные свойства машин в значительной степени зависят от шероховатости поверхности отдельных деталей.

Значения любого параметра высоты неровностей зависят от длины профиля поверхности, по которому определяется этот параметр, или от длины профилограммы, по которой производится подсчет определяемого параметра.

Как же оценить «истинное» (т. е. имеющее место на самом деле) значение того или иного параметра шероховатости для данной конкретной поверхности, поскольку распределение неровностей ее носит статистический характер и определение параметра производится при наличии погрешностей измерения?

Для определения параметра R_a шероховатости поверхности (среднего арифметического отклонения профиля) по новому стандарту ГОСТ 2789—59 предусмотрена следующая формула:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx,$$

где l — базовая длина;

y — расстояние точек измеренного профиля до его средней линии.

В этом же стандарте приведен ряд базовых длин l , равных 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8 и 25 мм, и рекомендации, каким из значений этого ряда следует пользоваться при том или ином классе чистоты поверхности. Так,

для классов 6+8 следует брать $l=0,8$ мм; для классов 9+12 $l=0,25$ мм и т. д.

Однако экспериментальные исследования профилей различных поверхностей показывают, что если параметр R_a определять только на длине профиля, равной l , то для каждого профиля получается ряд значений R_a , сильно отличающихся друг от друга в зависимости от того, какой из участков профиля взят.

Вместе с тем исследования показывают, что, постепенно увеличивая длину участка измерения, можно сравнительно быстро достичь «критического» значения длины профиля L_k , после чего значения параметров H_{sk} или R_a остаются почти постоянными, колеблясь лишь в пределах погрешностей прибора.

Если конкретный технологический процесс обработки поверхности обеспечивает получение определенной степени ее шероховатости на сравнительно небольшом участке (что имеет место в современном машиностроении и приборостроении), то независимо от мелких случайных физических факторов, вызывающих вариации высот неровностей, определенная степень шероховатости поверхности по закону больших чисел проявится сквозь массу случайных отклонений неровностей. Таким образом, статистическая закономерность распределения высот неровностей поверхности при достаточной длине участка измерения проявляется в определенной устойчивости параметров шероховатости. Это, конечно, не означает, что при большой длине профиля значения того или иного параметра, определяемые на длине, не меньшей L_k , будут неизменными в начале и конце его.

При большой длине профиля за период его обработки в технологическом процессе могут произойти изменения, влияющие на средний уровень шероховатости. Тогда профиль оказывается неоднородным и эта неоднородность проявится в изменениях значений параметра систематического характера.

Итак, под критической длиной участка измерения L_k будем понимать минимальную длину профиля, необходимую для получения устойчивого значения того или иного параметра шероховатости. Критерий устойчивости можно выбрать, исходя из следующих соображений. Глубина регистрируемых прибором неровностей изменяется по двум причинам: вследствие неоднородности неровностей исследуемой поверхности и из-за нестабильности показаний прибора. Очевидно, нецелесообразно требовать от того или иного параметра шероховатости поверхности большей устойчивости, чем нестабильность прибора и неоднородность шероховатости, фактически присущая исследуемой поверхности.

Следует заметить, что если при выявлении неоднородности шероховатости поверхности параметр шероховатости определять на длине меньшей, чем критическая L_k , то будут получены завышенные значения неоднородности по сравнению с фактическими, так как добавится некоторая «фиктивная» неоднородность, появившаяся в результате того, что параметр определялся на длине профиля, недостаточной для получения его устойчивого значения.

Для определения, какой же длины должен быть профиль, чтобы надежно определить параметры шероховатости, было проведено исследование профилей поверхностей, полученных наиболее распространенными видами финишной обработки: шлифованием, полированием, доводкой и т. п.

Профилограммы были записаны на отечественном профилографе-профилометре «Калибр-ВЭИ» и на приборе «Пертометр» ФРГ. Записан-

ная на бумажной ленте профилограмма разбивалась на участки, длина которых соответствовала базовой длине l . В пределах каждого участка была проведена своя средняя линия. Интервал между ординатами был выбран 2,0 и 2,5 мм. Значения параметра R_a определялись по нарастающим суммам абсолютных значений ординат от первой до n -ной ординаты.

Обработке были подвергнуты профилограммы, снятые с различных поверхностей (табл. 1).

Таблица 1

| № образца | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|------------|
| Класс чистоты | 7 | 7 | 8 | 7 | 7 | 10 | 12 |
| Вид обработки | Круглое шлифованное | Плоское шлифованное | Чистовое точение | Торцевое фрезерование | Цилиндрическое фрезерование | Доводка | Полировка |
| Профилограф | Калибр-ВЭИ* | Калибр-ВЭИ* | Пертометр* | Пертометр* | Пертометр* | Пертометр* | Пертометр* |
| Увеличение: горизонтальное | 450 | 450 | 160 | 160 | 160 | 400 | 1 600 |
| вертикальное | 4 000 | 4 000 | 4 000 | 4 000 | 4 000 | 40 000 | 100 000 |
| Длина: базовая, мм | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,25 | 0,25 |
| профиля (число базовых длин) | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 9 | 18 |
| Число базовых длин, при котором достигается устойчивое значение параметра R_a | 3-4 | 3-4 | 3-4 | 3-4 | 3-4 | 6-7 | 7 |

По результатам обработки профилограмм построены кривые (рис. 1 и 2).

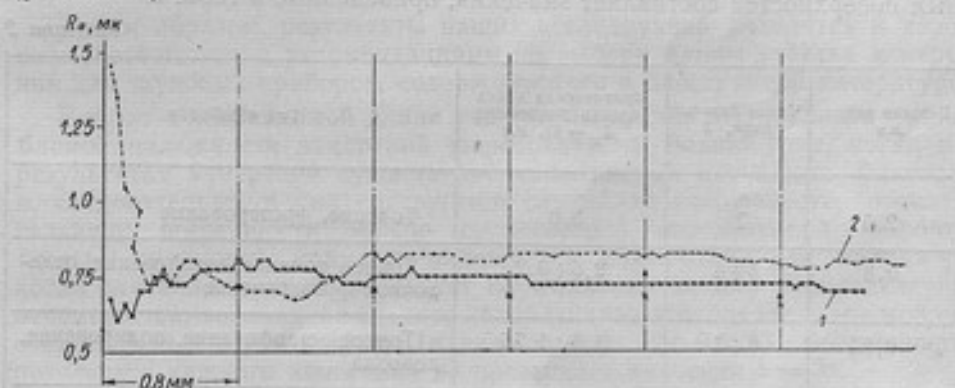


Рис. 1. Изменение параметра R_a в зависимости от длины профиля для шлифованных поверхностей.

На рис. 1 видно, что для образцов № 1 (1) и 2 (2) в пределах первого участка, соответствующего одной базовой длине (0,8 мм), кривая претерпевает резкие изменения; в пределах двух участков она стано-

вится более плавной, но параметр R_a еще нельзя считать устойчивым. Его можно считать достаточно устойчивым только при минимальной длине, равной 3—4 базовым. На этом же рисунке крестиками и точками показаны для сравнения значения R_a , подсчитанные при длине профилограммы, соответствующей одной базовой длине (0,8 мм).

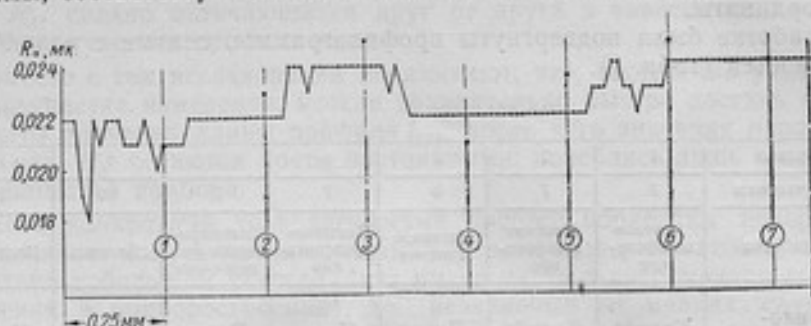


Рис. 2. Изменение параметра R_a в зависимости от длины профиля для полированной поверхности.

Результаты обработки профилограммы образца № 7 представлены на рис. 2 в виде графика, из которого видно, что для получения устойчивого значения параметра R_a длина профиля должна соответствовать 7 базовым длинам. Точками на этом графике обозначены значения R_a , подсчитанные на длине профилограммы, соответствующей одной базовой длине (0,25 мм).

Из изложенного можно сделать следующий вывод: минимальная длина профиля для надежного определения параметра R_a должна содержать 3—4 базовые длины по 0,8 мм для поверхностей, обработанных шлифованием, точением, фрезерованием и 6—7 базовых длин по 0,25 мм для поверхностей более чистых, обработанных доводкой и полированием. Это справедливо также и для определения параметра $H_{ск}$.

Резюмируя сказанное, мы приходим к выводу, что критическая длина участка измерения L_k для параметров R_a и $H_{ск}$ шероховатости различных поверхностей составляет значения, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

| Базовая длина, мм | Число базовых длин, R | Критическая длина участка измерения $L_k = Rl$, мм | Вид обработки |
|-------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 2,5 | 2 | 5,0 | Точение, фрезерование |
| 0,8 | 3÷4 | 2,5÷3,2 | Тонкое точение, шлифование, отделочное фрезерование |
| 0,25 | 6÷7 | 1,5÷1,75 | Тонкое шлифование, полирование, доводка |
| 0,08 | 8÷10 | 0,6÷0,8 | Тонкое полирование, тонкая доводка |

Для поверхностей, имеющих строго регулярный профиль, параметры шероховатости должны быть статистически постоянными при длине про-

филя, кратной шагу регулярных неровностей. Проведенное исследование штриховых образцов с регулярным профилем, изготовлявшихся ВНИИМ, показало, что для подсчета параметра R_z по профилограмме минимальная длина ее должна содержать 4—5 шагов неровностей (обязательно целое число).

Исследования показали также, что параметр R_z (высота неровностей) с увеличением длины участка измерения все время возрастает. Поэтому для получения определенного результата параметр R_z следует определять на длине L_k , равной одной базовой длине.

При этом необходимо учитывать, что оценка шероховатости поверхности с помощью параметра R_z является весьма приближенной и уступает по точности оценке с помощью параметров R_a и H_{ck} .

Как показали исследования, значения R_z , вычисленные на разных участках одной и той же профилограммы, каждый из которых соответствует базовой длине, могут отличаться друг от друга на 100% и более. Поэтому для надежной оценки следует определять параметр R_z для нескольких отдельных участков профилограммы.

В иностранной литературе имеются некоторые сведения о длине профиля, необходимой для надежного определения параметров шероховатости. В описании, приложенном английской фирмой Тейлор — Гобсон к последней модели профилографа-профилометра Тейлисерф, указано, что на этом приборе может быть установлена длина участка измерения параметра R_a , равная 1,75; 3,75 и 7,5 мм, при базовых длинах, соответственно равных 0,25; 0,8 и 2,5 мм; иначе говоря, длина участка, на котором определяется параметр R_a , включает 7 базовых длин по 0,25 мм, 4—5 базовых длин по 0,8 мм и 3 базовых длины по 2,5 мм.

В американском стандарте на шероховатость поверхности B46.1 — 1955 указано, что для приборов с постоянной трассой интегрирования длина этой трассы должна быть по крайней мере в 5 раз больше величины cutoff (наибольшего шага неровностей, учитываемых прибором при измерении с установленной для данного типа прибора погрешностью). Американский термин cutoff соответствует английскому sampling length и нашему термину «базовая длина», принятому в ГОСТ 2789—59 на шероховатость поверхности.

Таким образом, результаты наших исследований находятся в хорошем соответствии с рекомендациями по выбору длины участка измерения для щуповых приборов, содержащимися в иностранной литературе.

Вопрос о необходимой длине участка измерения тесно связан с проблемой надежности измерений шероховатости. Всякий раз, когда на результатах измерений существенно сказываются случайные факторы и, следовательно, в них содержится случайная погрешность, оценить величину погрешности можно с некоторой определенной вероятностью, служащей мерилем надежности измерений. Так например, когда случайная величина следует нормальному закону распределения вероятностей, то, зная ее среднее квадратичное отклонение σ , мы можем считать, что с вероятностью (надежностью) $P = 0,9973$ погрешность результата каждого измерения не превышает значения $\Delta = 3\sigma$.

В качестве примера рассмотрим сначала единичный профиль, на средней линии которого укладывается k базовых длин.

Допустим, что при определении параметра R_a на участке, длина которого равна только одной базовой длине l , получаем рассеивание значений, описываемое средним квадратичным отклонением σ_{R_a} при приближенно нормальном законе распределения R_a . Тогда, при надеж-

ности определений этого параметра, измеряемой вероятностью $P = 0,9973$, получим предельную погрешность определения R_a на одном случайно выбранном участке профиля длиной l в виде

$$\Delta R_{a,l} = 3\sigma_{R_a}.$$

Полагая, что «истинное» значение R_a отвечает его среднему значению на всем профиле и что значения R_a на соседних участках независимы или слабо зависимы друг от друга, получим

$$\Delta R_{a,k} = \frac{3\sigma_{R_a}}{\sqrt{k}},$$

где k — число базовых длин, укладываемых на длине участка, на котором определяется R_a .

При этом значение k ограничивается неоднородностью поверхности и во всяком случае не может быть бесконечно большим.

При законе распределения, отличающемся от нормального, коэффициент 3 следует заменить другим коэффициентом, отвечающим вероятности $P = 0,9973$.

Поступила в редакцию
3/VIII 1959 г.

И. П. ВАГАНОВ
Свердловский филиал ВНИИМ

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРОМЕТРИЧЕСКИХ НУТРОМЕРОВ НА ИХ ЖЕСТКОСТЬ

В статье дано обобщение результатов экспериментальных исследований жесткости микрометрических нутромеров разных конструкций, проведенных в последние годы Свердловским филиалом ВНИИМ и некоторыми отечественными заводами тяжелого машиностроения. Приведены величины изменения длины нутромера в зависимости от переноса точек его опоры, от поворотов нутромеров вокруг своей оси, от усилия сжатия вдоль оси нутромера и от величины нагрузки, создаваемой в средней его части. Эти данные могут быть использованы при конструировании новых типов нутромеров и при решении вопроса о выпуске унифицированных микрометрических нутромеров наилучших конструкций.

В настоящее время на заводах тяжелого машиностроения нашей страны применяется несколько конструкций микрометрических нутромеров с отсчетным устройством: сборные с цилиндрическими удлинителями, раздвижные (телескопические) с выдвигной штангой и сигарообразные (биконические).

Описание конструкции и некоторые характеристики микрометрических нутромеров разных типов даны в книге А. Д. Рубинова [1].

В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований жесткости микрометрических нутромеров разных конструкций, проведенных в последние годы Свердловским филиалом ВНИИМ совместно с Уралмашзаводом (УЗТМ) и несколько ранее — Уралмашзаводом, Ленинградским металлическим заводом (ЛМЗ) и Электростальским заводом тяжелого машиностроения (ЭЗТМ). Всего обработано свыше 1000 серий наблюдений.

Эти результаты могут быть полезны при решении вопроса о выпуске унифицированных микрометрических нутромеров наилучшей конструкции. В табл. 1 приведены данные об увеличении длины нутромеров при перенесении точек опоры из положения 100÷250 мм от измерительных поверхностей в положение, когда длина нутромера получается наибольшей. Данные характеризуют выполнение установленных ГОСТ 10—58 требований на жесткость нутромеров. Эти допускаемые стандартом изменения длины для удобства сравнений указаны в первой строке табл. 1.

| Исследуемый тип муфты | Завод-изготовитель | Средняя длина муфты, мм | Увеличение длины муфты, мм | | | | | | | Средняя квадратичная погрешность, мм | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------|-------|------|------|-------|-------------------|--------------------------------------|-------------|--------|------|------|-------|
| | | | Размеры муфты | | | | | | | | | | | | |
| | | | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | | 4500 | 5000 | 5500 | 6000 | |
| Микрометрические муфты* | — | — | 5 | 10 | 15 | 25 | 35 | 40 | -4055 | -70 | 55 | — | 70 | — | — |
| Удлинитель | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Синтаробразные конические ЭЗТМ | Уралмашзавод филиал ВНИИМ и УЗВМ | Свердловский филиал ВНИИМ и УЗВМ | — | 1 | 1 | 0 | 4 | 5 | 9 ₂ | — | к i n | 40 | i | o | 4÷2 |
| Конические муфты с коническими концами (не более 300 мм на каждый конец) | ЭЗТМ | Свердловский филиал ВНИИМ и УЗВМ | — | 1 | 1 | — | — | 11 | 2 ₃₀ 1 | 30 | — | — | — | — | 2÷1 |
| Цилиндрические муфты с коническими концами (не более 500 мм на каждый конец) | » ЭЗТМ | Свердловский филиал ВНИИМ и УЗВМ | 1-0 | 5-0 | 60- | —5- | 10 | 50 | i n o j s | — | — | — | — | — | 10÷15 |
| То же (не более 800 мм на каждый конец) | Свердловский филиал ВНИИМ и УЗВМ | Свердловский филиал ВНИИМ и УЗВМ | — | — | 1 6.0 | — | 160 | 1 9 П | — | 180 | — | m • ik | — | — | 10÷15 |
| Микрометрические муфты (не более 400 мм) | ЧЗС | Свердловский филиал ВНИИМ и УЗВМ | 1-1 | 6 | 61 | 21 | 52 | 5 | 6 | 21 | 52 | 9 | — | — | 2 |

* Допуск по ГОСТ 10-58.

| Исполнительное предприятие | Задание на изготовление | Увеличение диаметра, мм | Размеры и Средние значения | | Средняя квадратическая погрешность, мкм | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|----------|-----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| | | | Размер | Ратичная | | | | | | | | | |
| | | | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 | 5500 | 6000 |
| Микрометрический нутромер: | | | | | | | | | | | | | |
| НМИ № ТТ 1 (500—10000 мм) с числом удлинителей * | Филиал ВНИИМ | Свердловский ФНИИМ ВНИИМ | | | | | | | | | | | |
| 4, из них односторонних | | | 12 | | | | | | | | | | |
| 5 " " " " " " | | | | | | | | | | | | | 7 |
| 6 " " " " " " | | | | | | | | | | | | | 0 30 |
| 7 " " " " " " | | | | | | | | | | | | | 35 |
| 8 " " " " " " | | | | | | | | | | | | | ~30 |
| 9 " " " " " " | | | | | | | | | | | | | 15 |
| 10 " " " " " " | | | | | | | | | | | | | 7 |
| НОИ № Т2 (500—4000 мм) 4- | Филиал ВНИИМ | Свердловский ФНИИМ ВНИИМ | 5 | | | | | | | | | | 20 ÷ 40 |
| Т6 же (4000—6000 мм) | | | | | | | | | | | | | 30 |
| Т6 же (4000—6000 мм) | | | | | | | | | | | | | Ш - 1 к |
| Т6 же (4000—6000 мм) | | | | | | | | | | | | | 10 ÷ 16 |
| Т6 же (4000—6000 мм) | | | | | | | | | | | | | 10 ÷ 40 |
| Т6 же (4000—6000 мм) | | | | | | | | | | | | | 10 ÷ 110 |
| Т6 же (4000—6000 мм) | | | | | | | | | | | | | 30 ÷ 1000 |

* В числах удлинителей не включены размеры от 2 до 5 мм в карданном штифте.
 ** Первоначальное количество израсходованных 500 и 1000 мм от микрометрических нутромеров.

Первоначальные точки опоры взяты на расстоянии 100+250 мм от измерительных поверхностей, так как обычно за эти места держат нутромеры при измерениях.

Из табл. 1 следует, что наиболее жесткими являются сигарообразные удлинители Уралмашзавода, изготовленные в 1958—1959 гг. из листовой стали марки 15КП толщиной 0,5 мм. Каждый удлинитель по всей длине образующей имеет четыре ребра жесткости. Вес таких удлинителей длиной 5500 мм составляет всего 5,9 кг.

Установлено, что удовлетворяют требованиям ГОСТ 10—58 только сигарообразные удлинители Уралмашзавода, конические и цилиндрические удлинители ЭЗТМ и микрометрический нутромер Челябинского инструментального завода (ЧИЗ) новой конструкции с пределами измерений 150+4000 мм.

Все остальные микрометрические нутромеры по своей жесткости не удовлетворяют ГОСТ 10—58 и поэтому применение их, а тем более изготовление, нецелесообразно.

В табл. 2 приведены данные о средних изменениях длины нутромера при поворотах его вокруг своей оси. Средняя квадратичная погрешность σ приведенных результатов не зависит от пределов измерения и равна в среднем ± 4 мк.

Нутромеры длиной до 3000 мм практически не изменяют свою длину при повороте вокруг своей оси (при неизменных точках опоры), а для нутромеров длиной 4000 мм изменение не превышает 0,01 мм (кроме микрометрического нутромера НМИ с пределами измерений 500+10 000 мм завода ЧИЗ), что не повлияет на точность измерения. С увеличением пределов измерения (более 4000 мм) длина нутромера любой конструкции при повороте вокруг своей оси значительно меняется, особенно если точки опор расположены вблизи (100+200 мм) от измерительных поверхностей нутромера.

При разных положениях нутромера относительно оси стрела прогиба, а значит и длина нутромера будут разными. Эти изменения длины нутромера зависят от величины, состава и количества удлинителей, качества сборки, случайных погрешностей свинчивания и т. п., а у сигарообразных удлинителей — также и от неоднородности изготовления ребер жесткости. Поэтому при конструировании и изготовлении нутромеров с пределами измерения свыше 4000 мм необходимо предъявлять особенно высокие требования к качеству их сборки, к однородности материала и деталей, а также сводить к минимуму количество свинчиваемых удлинителей.

Кроме предусмотренного в ГОСТ 10—58 допуска на диаметр окружности, которую описывает точка касания измерительной поверхности нутромера при вращении его вокруг своей оси, на наш взгляд, необходимо ввести в ГОСТ также пункт об ограничении величин изменения длины нутромера при его поворотах, начиная с размера 3000 мм и выше, и при положении опор на расстоянии 100+200 мм от измерительных поверхностей. Эксперименты показали, что при больших диаметрах окружностей, описываемых измерительной поверхностью нутромера при его поворотах вокруг своей оси, могут иметь место малые изменения длины и, наоборот, при малых диаметрах — большие изменения длины.

Конечно, для установления величины допуска требуются дополнительные специальные исследования, в особенности для пределов измерения свыше 6000 мм, но, по нашему мнению, можно предложить следующие максимальные величины изменения длины нутромера при его

Таблица 2

| Исследуемые нутромеры | Завод-изготовитель | Организация-исследователь | Расстояние точек опоры от измерительной поверхности стп, мм, или доля длины L | Измерение длины нутромеров, мм | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| | | | | Размеры нутромеров, мм | | | | | | | | | | | |
| | | | | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 | 5500 | 6000 | |
| Удлинитель: сигарообразные | Уралмашзавод | Свердловский филиал ВНИИМ и ЭЗТМ | 70 ÷ 85 0,2 L | 0 | 1 | 1 | 1 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 8 | 42 | — |
| | | | | — | — | 0 | 0 | — | — | — | 2 | 2 | 2 | 7 | 5 |
| конические конические с малыми удлинителями (не более 500 мм на каждый конец) | ЭЗТМ | . | 170 | — | — | — | — | — | 12 | 5 | 10 | 12 | — | — | — |
| | | | | — | — | — | — | — | — | 13 | — | 19 | 20 | — | — |
| цилиндрические | . | Свердловский филиал ВНИИМ | 170 | — | — | — | 8 | 2 | 3 | — | — | — | — | — | — |
| | | | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Нутромеры микро- метрические: | ЧИЗ | То же | 70 ÷ 150 | — | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 6 | 10 | — | — | — |
| | | | | — | — | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 2 | — | — | — | — |
| НМИ № Т1 (500 — 10 000 мм) | . | . | 100 ÷ 250 0,2 L | — | — | — | — | 12 | 5 | — | 42 | — | 65 | 100 | — |
| | | | | — | — | — | — | — | — | 15 | — | 12 | 15 | — | — |
| НМИ № Т2 (500 — 10 000 мм) | . | ЛМЗ | 50 ÷ 150 0,2 L | — | — | 5 | — | — | — | 2 | 6 | — | 27 | 6 | 33 |
| | | | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 5 |
| раздвижной (2500 — 4000 мм) | К. Маар | Свердловский филиал ВНИИМ | 100 ÷ 110 0,2 L | — | — | — | — | 10 | 4 | — | 34 | — | — | — | — |
| | | | | — | — | — | — | — | — | 17 | — | — | — | — | — |
| то же (4000—6000 мм) | . | То же | 100 ÷ 120 0,2 L | — | — | — | — | — | — | — | 8 | — | — | 60 | — |
| | | | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 5 | — | 10 |

Таблица 3

| Исследуемые нутромеры | Завод-изготовитель | Организац.-исследовател. | Величина нагрузки вдоль оси нутромера, кг | Уменьшение длины нутромеров, мм | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|---|---|
| | | | | Размеры нутромеров, мм | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 | 5500 | 6000 | | | |
| Удлинитель: стигмообразные | УЗТМ | Свердловский филиал ВНИИМ и УЗТМ | 2 | 2 | — | — | — | — | — | 3 | 4 | 4 | — | — | — | — | |
| | | | 4 | 4 | — | — | — | — | 7 | 8 | 9 | — | — | — | — | — | |
| | | | 9 | 8 | — | — | — | — | 16 | 16 | 20 | — | — | — | — | — | — |
| | | | 11 | 10 | — | — | — | — | 20 | 21 | 24 | — | — | — | — | — | — |
| конические | ЛМЗ | ЛМЗ | 3 | — | 5 | — | — | — | — | — | — | 7 | — | — | — | — | |
| | | | 10 | — | 14 | — | — | — | — | — | — | — | 21 | — | — | — | |
| | | | 4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 20 | — | — | — | — |
| | | | 8 | — | — | — | — | — | — | — | — | 35 | 26 | 35 | — | — | — |
| Макрометрический нутромер (150—4000 мм) | ЧИЗ | Свердловский филиал ВНИИМ | 2 | 4 | 5 | 5 | — | 6 | 7 | 7 | 7 | 9 | — | — | — | — | |
| | | | 4 | 9 | 11 | 13 | 15 | 16 | 19 | 21 | — | — | — | — | — | — | |
| | | | 6 | 14 | 17 | 20 | 24 | 26 | 27 | 33 | — | — | — | — | — | — | |
| | | | 8 | 19 | 24 | 27 | 32 | 36 | 38 | 44 | — | — | — | — | — | — | |

Таблица 4

| Исследуемые нутромеры | Завод-изготовитель | Организац.-исследователь | Величина нагрузки, кг | Уменьшение длины нутромеров, мм | | | | | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------|
| | | | | Размеры нутромеров, мм | | | | | | | | | | |
| | | | | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 | 5500 | 6000 |
| Сигарообразные удли- нители | УЗТМ | Свердловский Финнал ВНИИМ и УЗТМ | 1 2 4 6 9 | 0 0 1 1 2 | 0 0 1 3 5 | 0 1 2 4 8 12 | 3 6 12 19 36 | 3 7 18 28 52 | 4 7 18 35 — | — — — — — | 6 14 31 50 — | 10 20 45 75 100 | — — — — — | |
| Раздвижной микро- метрический нутромер на пределы измерений: 1000—1700 мм | К. Маар | УЗТМ | 1 5 | 0 2 | — 11 | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — |
| 1700—2500 . | | | 1 5 | — 0 | — 0 | — 3 32 | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — |
| 2500—4000 . | | | 1 5 | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — |
| 4000—6000 . | | | 1 5 | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — | — — |
| Микрометрический нутромер (150—4,00 мм) | ЧИЗ | Свердловский Финнал ВНИИМ | 2 4 6 8 | 0 1 1 1 | 0 0 1 1 | 1 2 3 5 | 2 5 9 12 | 7 16 28 36 | 18 42 67 99 | 31 75 132 189 | — — — — | — — — — | — — — — | |

поворотах вокруг своей оси, которые могли бы быть допустимыми по ГОСТ 10—58:

| Пределы измерения, мм | Изменение длины нутромера, мк |
|--------------------------|----------------------------------|
| 3 000 ÷ 4 000 | 10 |
| 4 000 ÷ 5 000 | 15 |
| 5 000 ÷ 6 000 | 25 |
| 6 000 ÷ 8 000 | 50 |
| 8 000 ÷ 10 000 | 90 |

В табл. 3 даны результаты экспериментальных определений средних изменений длины нутромера в зависимости от величины усилия сжатия вдоль его оси. Исследования показали, что любое изменение расположения точек опор совершенно не влияет на результат измерений.

Средняя квадратичная погрешность σ определения изменения длины нутромера в зависимости от величины усилия сжатия вдоль его оси, не зависящая, как показали исследования, от длины нутромера, оказалась равной ± 2 мк.

Опыты показали, что величина усилия сжатия вдоль оси нутромера находится в линейной зависимости от его длины. Очевидно, что при использовании нутромера в вертикальном положении необходимо вводить соответствующую поправку на сжатие вдоль его оси, зависящую от веса нутромера. При большом весе нутромера должна быть учтена поправка на сжатие и смятие измерительных сферических или цилиндрических поверхностей наконечника и изделия, когда нутромер опирается при вертикальном измерении на измеряемую поверхность (эта поправка, по Г. Берндту [2], по сравнению с вышеуказанной, является малой величиной).

В табл. 4 приведены данные об изменении длины нутромера в зависимости от величины нагрузки, создаваемой в средней его части при расположении точек опор на расстоянии около 100 мм от измерительных поверхностей нутромера.

Таким образом, исследования показали, что из всех рассмотренных нутромеров наиболее жесткую конструкцию имеют сигарообразные удлинители, изготовленные в 1958—1959 гг. Уралмашзаводом. Наименее жесткими являются раздвижные (телескопические) и сборные цилиндрические нутромеры ЧИЗ с пределами измерения 500—10 000 мм.

Для микрометрических нутромеров длиной более 4000 мм наиболее выгодно применять сигарообразные (биконические) удлинители, присоединяя к ним малые удлинители нутромера ЧИЗ (150—4000 мм) не более 500 мм на каждый конец.

Представляется целесообразным изготовить составные сигарообразные микрометрические нутромеры с тем, чтобы при измерении размеров до 12 000 мм длина любой части удлинителя не превышала 4000 мм, а общее количество больших удлинителей было бы не более трех.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рубинов А. Д. Измерение больших размеров в машиностроении, Машгиз, 1959.
2. Берндт Г., Основы и приборы технических линейных измерений, перев. с нем., ОНТИ, 1935.

Поступила в редакцию
14/VII 1959 г.

СОДЕРЖАНИЕ

| | Стр. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Предисловие | 3 |
| 1. Н. Р. Батарчукова. Новый эталон для воспроизведения единицы длины | 5 |
| 2. Л. К. Каяк. Эталоны длины и результаты их сличений | 23 |
| 3. А. Н. Королева. Юстировка и исследование однометрового и четырехметрового компараторов | 39 |
| 4. С. И. Торопин. О точности измерения температуры эталонов длины при сличении на компараторах | 49 |
| 5. Е. П. Алексеева, О. Ю. Шошина. Сличение интерференционных установок институтов Комитета | 63 |
| 6. А. З. Полкова. Влияние нестабильности плоскопараллельных концевых мер длины высших разрядов на погрешности измерения их длины | 80 |
| 7. А. Н. Королева. Образцовые стеклянные шкалы | 86 |
| 8. Л. К. Каяк, С. И. Торопин. Тридцатиметровый интерференционный компаратор ВНИИМ | 92 |
| ✓ 9. Н. В. Трофимова. Интерференционный метод измерения шкал до 200 м.м. | 113 |
| ✓ 10. М. Ф. Гречко, Л. И. Смирнова, Г. И. Стракув, Е. Е. Шарова. Эталонная установка для измерения углов | 127 |
| ✓ 11. Л. Н. Логачева, В. Я. Эйдинов. Интерференционный метод измерения углов | 139 |
| 12. Л. Л. Медянцева. О влиянии кривизны измерительных поверхностей угловых мер на точность измерений их различными методами | 151 |
| ✓ 13. В. П. Коронкевич, Ю. И. Трулев. Фотоэлектрическое устройство для измерения длины с помощью счета интерференционных полос | 155 |
| 14. В. П. Голубкова, В. П. Коронкевич, О. Р. Прейсман, Е. И. Финкельштейн. Прибор для проверки рычажно-механических головок и микроиндикаторов | 159 |
| 15. Е. Е. Шарова. Исследование некоторых методов проверки прямолинейности направляющих станин | 167 |
| ✓ 16. Е. А. Волкова. О точности измерений отклонений от плоскости интерференционным методом | 177 |
| 17. А. И. Карташев. Метод исследования распределения высот неровностей на шероховатой поверхности | 184 |
| 18. А. Н. Карташева. О длине профиля, необходимой для надежного определения параметров шероховатости поверхности | 193 |
| 19. И. П. Ваганов. Результаты экспериментальных исследований микрометрических нутромеров на их жесткость | 199 |

