

~~ИЗДАНИЕ~~  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ,  
МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ СССР

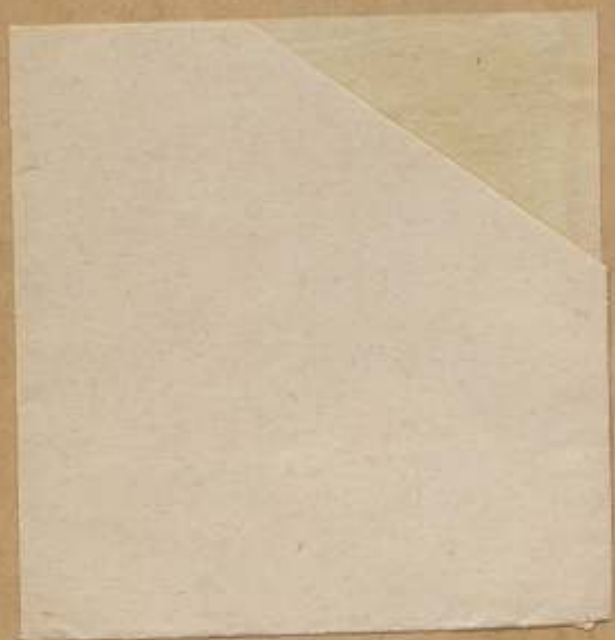
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ  
им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ  
ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ ГОСКОМИТЕТА

ВЫПУСК 78 (138)





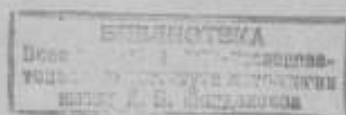
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ СССР  
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

---

# ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ ГОСКОМИТЕТА  
ВЫПУСК 78 (138)

*Под редакцией*  
к. т. н. Л. К. КАЯКА



ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ  
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД  
1965

2/  
№ 13370

Редакционный совет

П. Н. Агалецкий, Н. Н. Александрова, В. О. Арутюнов, С. В. Горбачевич,  
Е. Ф. Долинский, М. К. Жоховский, Л. М. Закс, В. В. Кандыба,  
Л. К. Каяк, И. И. Киренков, Д. К. Коллеров, Е. Т. Чернышев,  
К. П. Широков, Е. Г. Шрамков, Б. М. Яновский

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

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В сборнике приводятся результаты исследований в области линейных измерений, выполненных в 1962—1965 гг. во ВНИИМ и других институтах Государственного комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР.

Главной задачей работ этих лет было практическое осуществление перехода на новое определение единицы длины — метра — в длинах волн излучения криптона-86.

Ряд статей сборника посвящен этой проблеме, в них рассмотрены вопросы разработки и исследований интерференционных измерительных установок, предназначенных для измерения длины эталонов и образцовых штриховых мер высокой точности. Особый интерес представляют работы ВНИИМ, связанные с созданием нового эталонного интерференционного компаратора.

Для повышения точности наведения на штрихи при измерении длины штриховых мер во ВНИИМ разработаны и применяются фотоэлектрические микроскопы оригинальной конструкции, устройство и результаты исследований которых описаны в нескольких статьях сборника. В них показано также, что применение в приборах для линейных измерений средств электроники позволяет значительно ускорить и автоматизировать процесс измерений.

В статьях сборника, относящихся к линейным измерениям в промышленности и поверочной практике, рассматриваются вопросы измерений больших длин, методы проверки прямолинейности направляющих, а также методы измерения радиусов и контроля очковой оптики, результаты усовершенствования измерительных приборов и т. п.

С целью обеспечения единства и правильности дилатометрических исследований во ВНИИМ создан интерференционный дилатометр и выполнены работы по определению температурных коэффициентов удлинения некоторых материалов в широком интервале температур. Результаты этих работ приводятся в сборнике.

Требования к точности измерений длины в промышленности за последние годы значительно повысились; для их удовлетворения в неко-

торых случаях сейчас приходится использовать методы и средства измерений, которые прежде применялись только при поверке образцовых мер длины высшей точности. Поэтому несомненно, что ознакомление с новыми методами линейных измерений и новыми приборами, разработанными в метрологических институтах, будет полезным для широкого круга специалистов, работающих в области линейных и угловых измерений.

*Редактор*

## ЭТАЛОНЫ МЕТРА

*В статье приведены принятые международные рекомендации об условиях воспроизведения метра в длинах волн первичного эталонного излучения криптона-86 и о вторичных эталонных длинах волн. Рассматривается новая поверочная схема в области линейных измерений. Даны результаты сравнения эталонной единицы длины за 1960—1965 гг.*

Одиннадцатая генеральная конференция по мерам и весам 14 октября 1960 г. приняла новое определение единицы измерения длины: «Метр — длина, равная 1 650 763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями  $2 p_{10}$  и  $5 d_5$  атома криптона-86» (Резолюция 6) [1].

Это определение метра включено в ГОСТ 7664—61 «Механические единицы», введенный в действие с 1 июля 1961 г., и в ГОСТ 9867—61 «Международная система единиц», действующий с 1 января 1963 г.

Новое определение, сохраняя прежний размер метра, повышает его точность примерно на один порядок. Это уже второе изменение определения метра со времени принятия его в качестве единицы измерения длины в 1791 г. Если тогда его точность была  $1 \cdot 10^4$ , а по определению 1889 г. она оценивалась величиной  $1 \cdot 10^7$ , то в 1960 г. значение единицы длины установлено до 0,01 длины волны, т. е. с точностью  $2 \cdot 10^8$  (точность здесь понимается как обратная величина погрешности).

Такое уточнение определения единицы открывает принципиальную возможность повышения точности линейных измерений, но фактическое ее повышение зависит от того, с какой точностью будет воспроизводиться метр, с какой точностью его значение будет передаваться от первичного эталона образцовым и рабочим мерам и измерительным приборам.

Поэтому в резолюции 7 Одиннадцатой генеральной конференции Международному комитету мер и весов было поручено: 1) установить инструкции для введения в практику нового определения метра; 2) выбрать вторичные эталонные длины волн для интерференционных измерений длины и установить инструкции их применения; 3) продолжать начатые исследования с целью улучшения эталонов единицы длины.

Решение о выборе вторичных эталонных длин волн, необходимых для интерференционных измерений по методу совпадений дробных частей порядков интерференции, а также для измерений меньшей точности, было принято по предложению советской делегации.

В соответствии с п. 1 резолюции 7 Международный комитет мер и весов принял рекомендацию об условиях воспроизведения излучения криптона-86 как основного эталона единицы длины. В этой рекомендации указывается, что излучение криптона-86 должно воспроизводиться лампой с накаливаемыми электродами, содержащей криптон-86 чистотой не ниже 99% в количестве, достаточном для обеспечения наличия твердого криптона при температуре 64° К. Разряд должен происходить в капилляре с внутренним диаметром от 2 до 4 мкм и толщиной стенок около 1 мкм. Длина волны излучения, испускаемого лампой, с погрешностью до  $1 \cdot 10^{-8}$  равна длине волны, соответствующей переходу между невозмущенными уровнями  $2p_{10}$  и  $5d_5$ , при соблюдении следующих условий:

- 1) наблюдение производится вдоль капилляра с конца таким образом, что лучи света идут от катода в сторону анода (к наблюдателю);
- 2) нижняя часть лампы, включая капилляр, погружена в охлажденную ванну, где поддерживается температура тройной точки азота с отклонением не более 1 град;
- 3) плотность тока в капилляре равна  $3 \div 1 \text{ ка/м}^2$  ( $0,3 \pm 0,1 \text{ а/см}^2$ ) [1].

Международный комитет рекомендует пользоваться лампой конструкции Энгельгарда. При исследовании было установлено, что эта лампа имеет некоторые конструктивные недостатки, затрудняющие наблюдения. Криптоновая лампа более совершенной конструкции разработана во ВНИИМ Г. С. Поповым [2] и исследована в оптической лаборатории. Вопросы исследования спектральных линий мономатических источников света для интерференционных измерений длины и методики измерений длин волн рассмотрены в работе [3].

8—10 октября 1962 г. состоялась третья сессия Консультативного комитета по определению метра, которая рассмотрела результаты выполненных в национальных метрологических лабораториях работ по исследованию первичного эталонного излучения криптона-86 и вторичных эталонных излучений и по разработке новых источников излучений (атомные пучки, лазеры и др.) и интерференционных компараторов.

Консультативный комитет с удовлетворением отметил, что принятая в 1960 г. Международным комитетом мер и весов рекомендация о нормальных условиях воспроизведения первичного эталонного излучения изотопа криптона-86 обеспечивает воспроизведение метра с точностью, соответствующей новому его определению, и что указанная рекомендация в настоящее время не нуждается в каком-либо изменении и уточнении. Исследования контура спектральной линии эталонного излучения, выполненные в Международном бюро, показали, что наблюдаемая асимметрия контура не может вызвать погрешность в измерении длины, превышающую  $1 \cdot 10^{-8}$  м.

Однако при обсуждении конструкции лампы с криптоном-86 отмечались преимущества новых конструкций ламп ВНИИМ и NRC (Канада) по сравнению с лампой Энгельгарда и указывалось, что наблюдение излучения криптона поперек капилляра более выгодно; было рекомендовано продолжать исследования в направлении дальнейшего усовершенствования источников света.

В докладе Энгельгарда по вторичным эталонам длины волны были обобщены результаты исследований Международного бюро мер и весов и национальных лабораторий Англии, Австралии, СССР, США, ФРГ и Японии. В этих лабораториях были выполнены тщательные измерения длины волны излучений криптона-86, ртути-198 и кадмия-114 сличением с первичной эталонной длиной волны оранжевой линии криптона-86. Обсудив доклад, Консультативный комитет принял представленную



рабочей группой рекомендацию М1 о вторичных излучениях для интерференционных измерений длины и средних значениях их длин волн [4]. В 1963 г. эта рекомендация была утверждена Международным комитетом мер и весов.

В рекомендации М1 говорится, что в соответствии с инструкциями, данными Одиннадцатой генеральной конференцией мер и весов, в резолюции 7 (параграф 2). Консультативный комитет по определению метра рекомендует применять следующие вторичные излучения для интерференционных измерений длины:

### 1. Излучения криптона - 86.

| Спектральные термы | Длины волн в вакууме, $10^{-10}$ м |
|--------------------|------------------------------------|
| $2p_9 - 5d'_4$     | 6458,0720                          |
| $2p_8 - 5d_4$      | 6422,8006                          |
| $1s_3 - 3p_{10}$   | 5651,1286                          |
| $1s_4 - 3p_8$      | 4503,6162                          |

При этом предполагается, что длины волн этих излучений имеют указанные значения с относительной погрешностью до  $2 \cdot 10^{-8}$ , если излучения воспроизводятся в соответствии с рекомендацией, принятой Международным комитетом мер и весов, о нормальных условиях воспроизведения первичного эталонного излучения.

### 2. Излучения ртути - 198.

| Спектральные термы | Длины волн в вакууме, $10^{-10}$ м |
|--------------------|------------------------------------|
| $6^1P_1 - 6^1D_2$  | 5792,2683                          |
| $6^1P_1 - 6^3D_2$  | 5771,1983                          |
| $6^3P_2 - 7^3S_1$  | 5462,2705                          |
| $6^3P_1 - 7^3S_1$  | 4359,5624                          |

Предполагается, что длины волн этих излучений имеют указанное значение с относительной погрешностью  $5 \cdot 10^{-8}$ , когда соблюдаются следующие условия:

а) излучения воспроизводятся газоразрядной лампой без электродов, содержащей ртуть-198 чистотой не ниже 98% и аргон при давлении от 0,5 до 1,0 мм рт. ст.;

б) внутренний диаметр капилляра лампы равен приблизительно 5 мм и излучения наблюдаются поперек капилляра;

в) лампа возбуждается высокочастотным полем умеренной мощности и находится при температуре ниже  $10^3$  С;

г) объем лампы больше 20 см<sup>3</sup>.

### 3. Излучения кадмия - 114.

| Спектральные термы | Длины волн в вакууме, $10^{-10}$ м |
|--------------------|------------------------------------|
| $5^1P_1 - 5^1D_2$  | 6440,2480                          |
| $5^3P_2 - 6^3S_1$  | 5087,2379                          |
| $5^3P_1 - 6^3S_1$  | 4801,2521                          |
| $5^3P_0 - 6^3S_1$  | 4679,4581                          |

Предполагается, что длины волн этих излучений имеют указанные значения с относительной погрешностью  $7 \cdot 10^{-8}$ , когда соблюдаются следующие условия:

а) излучения воспроизводятся безэлектродной газоразрядной лампой, содержащей кадмий-114 чистотой не ниже 95% и аргон при давлении 1 мм рт. ст., приблизительно при температуре окружающей среды;

б) внутренний диаметр капилляра лампы равен приблизительно 5 мм и излучения наблюдаются поперек капилляра;

в) лампа возбуждается высокочастотным полем умеренной мощности и находится при температуре, при которой зеленая линия не самообращена.

Введение нового определения метра потребовало внесения изменений в поверочную схему, устанавливающую порядок передачи значения единицы измерения длины от первичного эталона образцовым и рабочим мерам и приборам.

До недавнего времени эталонами было принято считать образцовые меры и измерительные приборы, служащие для воспроизведения и хранения единиц измерений с наивысшей достижимой точностью при данном состоянии измерительной техники. Эталоны, осуществляемые в соответствии с установленным законом определением единицы измерения, являются первичными эталонами [5].

В связи с переходом к естественным эталонам, усложнением методов воспроизведения единиц измерений и появлением новых областей измерений понятие эталона в настоящее время несколько расширилось и эталоном называют совокупность метода, технических средств и физических констант, соответствующую определенной спецификации, служащую для воспроизведения, хранения и передачи единицы измерения и утвержденную в установленном порядке.

При изменении поверочной схемы было учтено это новое понятие эталона. Взамен действовавших ранее двух отдельных, не связанных между собой поверочных схем для штриховых и концевых мер длины, теперь составлена одна схема для мер длины и приборов для линейных измерений. Но так как изменения в поверочной схеме касались только верхних ее звеньев, относящихся к эталонам (а нижние звенья схемы остались в прежнем виде), то оказалось целесообразным разделить схему на две части: I — штриховые меры длины и поверяемые по ним приборы и II — концевые меры длины и поверяемые по ним приборы.

Необходимость такого разделения схемы на две части вызывается тем, что системы образцовых штриховых и образцовых концевых мер длины по своей структуре различны. В области штриховых мер имеются два разряда по несколько видов образцовых штриховых мер в каждом, различающихся по точности, например: образцовые геодезические жезлы 1-го разряда длиной 1, 3 и 4 м; образцовые штриховые меры и шкалы 1-го разряда длиной до 1 м; образцовые стальные рулетки 1-го разряда длиной 20 м и образцовые штриховые метры 1-го разряда.

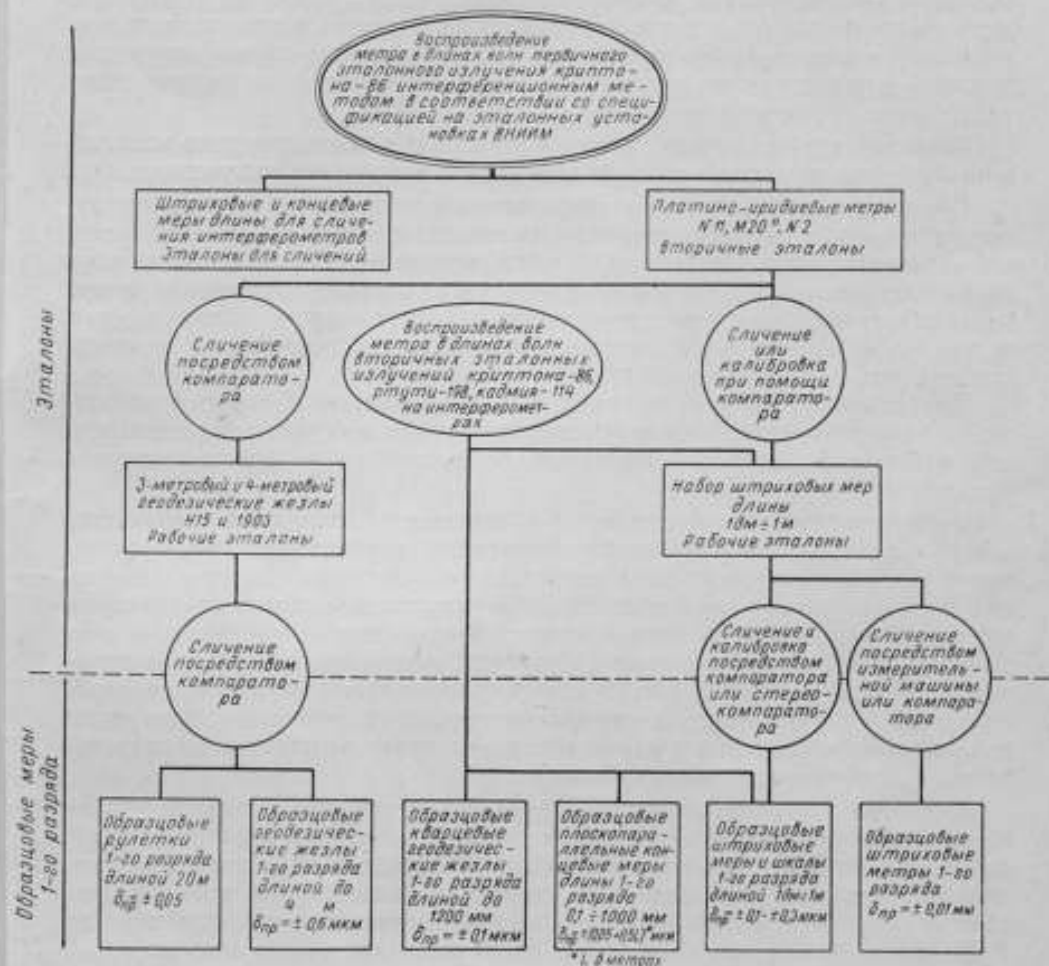
В области концевых мер имеются четыре разряда образцовых мер одного вида (стальные плоскопараллельные концевые меры) и только в пятый разряд, кроме плоскопараллельных концевых мер, включены нутромеры длиной от 2 до 10 м и специальные меры для проверки толщиномеров.

На рисунке показана верхняя часть новой поверочной схемы. Во главе схемы вместо копии международного прототипа — платино-иридиевого метра № 28, сейчас находится «Воспроизведение метра в длинах волн первичного эталонного излучения криптона-86 интерференционным методом в соответствии со спецификацией на эталонных установках ВНИИМ». В результате этой операции воспроизведенное значение метра должно быть передано на вещественный эталон — штриховую или концевую меры, которые будут служить в качестве вторичных эталонов единицы длины. Таким образом, первичным эталоном единицы длины будет совокупность, состоящая из источника первичного эталонного излучения

криптона-86, удовлетворяющего требованиям спецификации, эталонной интерференционной установки и принятой методики измерения.\*

В качестве источника первичного эталонного излучения во ВНИИМ применяются лампы как Энгельгарда, так и Попова. Имеются также и интерферометры для измерения длины как концевых, так и штриховых мер.

Платино-иридиевый метр № 28, служивший в течение 70 лет в качестве первичного эталона, будет храниться в прежних условиях. В будущем



предполагается измерять его длину с целью дальнейшего изучения стабильности платино-иридиевых мер во времени.

Вторичными эталонами единицы длины являются платино-иридиевые штриховые меры № 11, М20<sup>о</sup> и платино-иридиевая штрихово-концевая мера № 2, а также специальные штриховые и концевые меры длины — эталоны для сличения интерферометров.

\* Существует мнение, что под воспроизведением метра следует понимать лишь воспроизведение самого первичного излучения или волнового числа. В описанной же схеме как обязательный элемент предусматривается передача значения единицы длины мерам длины, являющимся вторичными эталонами, что практически более целесообразно.

Группа рабочих эталонов состоит из набора штриховых мер длиной 1 дм, 1 м и 4 м. Действительная длина рабочих эталонов может определяться либо сличением со вторичными эталонами на метрологических компараторах, либо (для мер длиной до 1 м) измерением на интерферометрах в длинах волн вторичных эталонных излучений криптона-86, ртути-198 или кадмия-114.

В схеме предусматривается, что по вторичным эталонным излучениям должна определяться и длина образцовых плоскопараллельных концевых мер 1-го разряда и кварцевых геодезических жезлов. Измерение длины мер абсолютным интерференционным методом в длинах волн вторичных эталонных излучений, заменяющих в данном случае первичное эталонное излучение, по существу, является операцией воспроизведения метра, но с соответственно меньшей точностью.

Имея это в виду, в новой поверочной схеме и предусмотрена возможность воспроизведения метра по вторичным эталонным излучениям.

Положение об эталонах и образцовых средствах измерения предусматривает, что для воспроизведения единиц данной физической величины может существовать только один первичный эталон. Значения же вторичных эталонов (эталонных сравнения и рабочих эталонов) могут устанавливаться как непосредственно по первичным эталонам, так и через посредство других вторичных эталонов. Эти правила целиком относятся и к эталонам единицы длины.

При наличии соответствующих интерферометров и строгом соблюдении условий спецификации воспроизведение метра с помощью вторичных эталонных излучений возможно осуществлять во всех институтах Госкомитета стандартов.

Интерферометры институтов, снабженные источниками вторичных эталонных излучений и удовлетворяющие требованиям инструкции, будут являться рабочими эталонами. Для обеспечения единства измерений в стране в этом случае необходимо регулярно с помощью эталонов сравнения производить сличения интерференционных установок, ибо точность измерений штриховых и концевых мер на интерферометре зависит не только от погрешностей интерференционного метода измерений, но также и от соблюдения нормальных условий, точности измерения показателя преломления воздуха, от температуры, от правильности юстировки и стабильности интерферометра.

Круговые сличения интерференционных установок институтов Госкомитета, служащих для измерения концевых мер 1-го разряда длиной до 100 мм, проводились уже много лет [6] и позволяли контролировать правильность интерференционных измерений. В настоящее время в программу круговых сличений включаются концевые меры длиной до 1000 мм.

В рекомендации М2 третьей сессии Консультативного комитета по метру [4] также предлагается начать подготовку к проведению международных сличений интерферометров как для концевых, так и для штриховых мер длиной до 1 м.

Во ВНИИМ имеются горизонтальный интерферометр № 5 для проверки концевых мер длиной от 100 до 1200 мм [7] и интерференционный компаратор УИК для проверки штриховых мер длиной до 1 м [8, 9]. Средняя квадратичная погрешность измерений на этих интерферометрах в настоящее время составляет около  $1 \cdot 10^{-7}$ .

Сейчас ведутся работы по исследованию разработанного и изготовленного во ВНИИМ нового эталонного интерференционного компаратора ЭИК, который войдет в первичный эталон единицы длины.

В статье М. Л. Бржезинского\* достаточно подробно описаны имеющиеся во ВНИИМ интерферометры для измерения длины штриховых мер.

Имеются все основания полагать, что на новом интерферометре ЭИК погрешности измерений будут снижены до  $(2 \div 3) \cdot 10^{-8}$  м.

В этом случае действительная длина вторичных эталонов платино-иридиевых метров № 11, № 2 и М20°, обладающих высокой стабильностью во времени и точные температурные коэффициенты которых известны, будет определена с погрешностью не более нескольких сотых долей микрометра. Достижение такой точности даст возможность снизить и погрешность измерений длины рабочих эталонов до  $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ .

Для повышения точности линейных измерений в промышленности важно не только повысить точность воспроизведения метра на эталонных установках, но и снизить погрешность методов передачи значений единицы длины образцовым и рабочим мерам и приборам. С этой целью во ВНИИМ усовершенствуются имеющиеся интерферометры и разработаны средства поверки шкал методом счета интерференционных полос и фотоэлектрические микроскопы\*\*.

Погрешности поверки образцовых штриховых и концевых мер будут снижены до  $\pm (2 \div 3) \cdot 10^{-7}$ . Можно предположить, что уже в ближайшее время будут реально достижимы следующие формулы точности образцовых мер длины:

$$\delta_0 = \pm(0,01 \pm 0,02l) \text{ мкм вторичные эталоны;}$$

$$\delta_0' = \pm(0,02 + 0,08l) \text{ мкм рабочие эталоны;}$$

$$\delta_1 = \pm(0,04 + 0,20l) \text{ мкм меры 1-го разряда,}$$

где  $l$  — длина мер в метрах.

Такая точность измерений сможет быть достигнута, если сами измеряемые меры будут изготовлены с высокой точностью, стабильны во времени и будут известны их температурные коэффициенты удлинения. Этим условиям безусловно удовлетворяют все имеющиеся у нас платино-иридиевые меры, некоторые штриховые рабочие эталоны и эталонные концевые меры из плавленого кварца.

### Результаты сличений

В связи с введением нового определения метра в 1963 г. были выполнены работы по измерению в длинах световых волн длины вторичных эталонов — платино-иридиевых метров № 11 и № 2.

Измерение длины метра № 11 производилось на интерференционном компараторе УИК по частям. В результате этих измерений общая длина метра № 11 оказалась равной

$$\text{№ 11}_{20^\circ\text{C}} = 1 \text{ м} + 1,19 \text{ мкм} \pm 0,06 \text{ мкм.}$$

При измерении длины метра № 11 на компараторе УИК в 1964 г. в среднем было получено

$$\text{№ 11}_{20^\circ\text{C}} = 1 \text{ м} + 1,23 \text{ мкм} \pm 0,10 \text{ мкм.}$$

\* См. стр. 15.

\*\* См. стр. 32.

По прежним сличениям с метром № 28 в 1960 г. во ВНИИМ и сличениям Международного бюро мер и весов в 1959 г. с эталонами Бюро длина метра № 11 принималась равной

$$\text{№ 11}_{20^{\circ}\text{C}} = 1 \text{ м} + 1,07 \text{ мкм в 1959 г. (МБМВ);}$$

$$\text{№ 11}_{20^{\circ}\text{C}} = 1 \text{ м} + 1,25 \text{ мкм в 1960 г. (ВНИИМ).}$$

Длина платино-иридиевой штрихо-концевой меры № 2 измерена на горизонтальном интерферометре № 5. Длина метра № 2, как концевой меры, определена двумя сериями по 9 и 11 измерений в каждой и были получены следующие результаты:

$$1 \text{ серия: } 1 \text{ м} + 157,93 \text{ мкм;}$$

$$2 \text{ серия: } 1 \text{ м} + 157,81 \text{ мкм;}$$

$$\text{Среднее } \dots \dots \dots 1 \text{ м} + 157,87 \text{ мкм.}$$

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений в первой серии равнялась  $\pm 0,14$  мкм, во второй —  $\pm 0,08$  мкм.

По измерениям в 1958 г. длина метра № 2 принималась равной  $1 \text{ м} + 157,97$  мкм.

Расхождения результатов измерений не превышают возможных погрешностей измерений, что свидетельствует об удовлетворительном состоянии как самих мер, так и измерительных установок.

На интерферометре УИК была измерена также длина рабочего эталона — метра № 567. Результаты этих измерений приводятся в табл. 1.

У нас в стране имеется большая группа рабочих эталонов единицы длины как старых, изготовленных более 30 лет тому назад, так и новых, изготовленных в 1956—1958 гг. Большая часть этих мер находится во ВНИИМ, а остальные — в других институтах Госкомитета. Во ВНИИМ ежегодно проводились сличения рабочих эталонов со вторичными эталонами (платино-иридиевыми метрами № 11 и № 2) на 4-метровом или 1-метровом компараторах по принятой в институте методике. Старые рабочие эталоны (метры R 116, R 86 и др.), номинальная длина которых при изготовлении была отнесена к температуре  $0^{\circ}$ , на интерферометре без специальных приспособлений измерить нельзя из-за больших отклонений их действительной длины от номинальной. Результаты сличений эталонов до 1960 г. были опубликованы ранее [10]. Результаты сличений за 1960—1965 гг. приводятся в табл. 1. В табл. 2 даны результаты сличений образцовых геодезических жезлов, служащих исходными мерами 24-метровых геодезических компараторов.

Результаты сличений рабочих эталонов показали:

1. Изменения длины рабочих эталонов ВНИИМ метров R116 и R86 не превышают возможных погрешностей компарирования  $\pm (0,1 \div 0,2)$  мкм, что говорит о практическом постоянстве их длины и об удовлетворительном состоянии метрологических компараторов.

2. Средние годовые изменения длины рабочих эталонов институтов Госкомитета метров № 68901, 68902, 387813 и 569 по своей величине несколько больше и лежат на пределе возможных погрешностей, но так как эти меры служат для измерений значительно меньшей точности, чем во ВНИИМ, состояние этих эталонов можно считать удовлетворительным. Подтверждаются также и прежние наши выводы о том, что период естественного старения инварных мер, изготовленных в двадцатые годы, практически закончился. Аналогичное заключение может быть сделано и по результатам сличения геодезических жезлов.

Таблица 1

| № метра                               | R 118                              | R 86               | 68901              | 68902                                | 387813        |
|---------------------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|---------------|
| $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ | $7,37 - 0,004 t'$                  | $11,36 + 0,003 t'$ | $1,56 + 0,0001 t'$ | $1,70 + 0,0002 t'$                   | 11,94         |
| Действительная общая длина мер        |                                    |                    |                    |                                      |               |
| Год сличения                          | при температуре $0^\circ \text{C}$ |                    |                    | при температуре $+20^\circ \text{C}$ |               |
| 1960                                  | 1 м + 2,2 мкм                      | 1 м + 11,0 мкм     | 1 м + 33,2 мкм     | 1 м + 9,7 мкм                        | 1 м + 1,9 мкм |
| 1961                                  | +2,0                               | +10,8              | +33,2              | +9,7                                 | —             |
| 1962                                  | +1,9                               | +11,0              | +34,1              | +10,0                                | —             |
| 1963                                  | +2,0                               | +10,6              | +33,5              | —                                    | +2,3          |
| 1964                                  | +2,1                               | +10,7              | +34,0              | +9,3                                 | —             |
| 1965                                  | +1,8                               | +10,6              | —                  | +9,7                                 | —             |

Продолжение табл. 1

| № метра                               | 564                                  | 567               | 568               | 569           | 611               |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|
| $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ | $2,56 - 0,008 t'$                    | $11,4 - 0,002 t'$ | $1,85 + 0,001 t'$ | 14,5          | $11,5 + 0,003 t'$ |
| Действительная общая длина мер        |                                      |                   |                   |               |                   |
| Год сличения                          | при температуре $+20^\circ \text{C}$ |                   |                   |               |                   |
| 1960                                  | 1 м - 22,9 мкм*                      | 1 м + 0,5 мкм     | 1 м + 9,2 мкм     | 1 м - 3,3 мкм | —                 |
| 1961                                  | -20,0                                | +0,6              | +9,6              | -1,7          | 1 м + 6,8 мкм     |
| 1962                                  | -19,6                                | +0,4              | +10,2             | -3,3          | —                 |
| 1963                                  | —                                    | +0,3<br>+0,6**    | —                 | -3,3          | —                 |
| 1964                                  | -18,9                                | +0,1              | —                 | -3,2          | +6,7              |
| 1965                                  | —                                    | +0,2**            | —                 | —             | +7,1              |

Примечания.  $t' = t - 20^\circ \text{C}$ .

\* Сличение 1958 г.

\*\* Измерение на интерференционном компараторе.

Таблица 2

| Год сличения | Действительная общая длина жезлов при температуре $0^\circ \text{C}$ |                              |                              |                           |                            |
|--------------|--|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|
|              | № 541<br>$5,386 - 0,0077 t'$   | № 615<br>$4,036 + 0,0166 t'$ | № 585<br>$16,196 - 0,013 t'$ | G14<br>$2,427 + 0,004 t'$ | F 13<br>$3,292 - 0,003 t'$ |
| 1960         | 3 м - 77,3 мкм   | 3 м - 66,4 мкм*              | 3 м - 338,1 мкм              | 3 м + 45,3 мкм            | 3 м + 28,5 мкм*            |
| 1961         | -77,1  | -66,0                        | —                            | —                         | —                          |
| 1962         | -77,0  | -66,5                        | —                            | +45,7                     | +29,1                      |
| 1963         | -76,2  | -66,1                        | —                            | —                         | —                          |
| 1964         | -76,0  | —                            | -338,5                       | +46,2                     | +29,6                      |

\* Сличение 1958 г.

3. Из группы новых рабочих эталонов наибольшим постоянством длины обладают метры № 567 и № 569. Инварные же меры № 564 и № 568 удлинились более чем на 1 мкм. Не изменилась практически за последние годы и длина меры № 611, изготовленной из сплава ЭИ-792 завода «Электросталь».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. Verb. des séances Comité International des Poids et Mesures, 2 série, t. 28, 1960.
2. Батарчукова Н. Р., Ефремов Ю. П. и Попов Г. С., Криптоновая лампа для воспроизведения эталона единицы длины, «Измерительная техника», № 8, 1962.
3. Батарчукова Н. Р., Новое определение метра, Изд. стандартов, 1964.
4. Comité Consultatif pour la définition du mètre, 3-e session, 1962.
5. Маликов М. Ф., Основы метрологии, М., 1949.
6. Алексеева Е. П., Шошина О. Ю., Сличение интерференционных установок институтов Комитета, Труды институтов Комитета стандартов, вып. 47(107), 1961.
7. Водкова Е. А., Карташев А. И., Романова М. Ф. и Степанов В. С., Универсальный интерферометр системы ВНИИМ для измерения концевых мер и геодезических кварцевых жезлов длиной до 1200 мм, Труды ВНИИМ, вып. 26(86), 1955.
8. Бржезинский М. Л., Универсальный интерференционный компаратор, Труды ВНИИМ, вып. 26(86), 1955.
9. Бржезинский М. Л., Интерференционные компараторы с фотоэлектрическими микроскопами для измерения штриховых мер длины, Сборник «Точность, взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении», изд. АН СССР, 1963.
10. Каяк Л. К., Эталоны длины и результаты их сличения, Труды институтов Комитета стандартов, вып. 47 (107), 1961.

Поступила в редакцию  
1/XII 1964 г.



## ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ КОМПАРАТОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ ШТРИХОВЫХ МЕР

*В статье дано описание конструкции интерференционных компараторов для измерения длины штриховых мер. Приведены некоторые результаты их исследования и измерений рабочих штриховых эталонов единиц длины.*

Во ВНИИМ в течение последних десяти лет велись работы, направленные на практическое решение задачи измерения длины штриховых мер в длинах световых волн, которая была поставлена в связи с предстоявшим тогда переходом на новый эталон длины. С переходом на определение метра через длину световой волны измерение длины рабочих эталонов может осуществляться с более высокой точностью интерференционным методом, который должен получить дальнейшее развитие и практическое применение не только для концевых, но и для штриховых мер длины. В результате этих работ создан и исследован универсальный интерференционный компаратор с фотоэлектрическим микроскопом и интерференционной коррекцией для измерения длины штриховых мер до 1000 мм. Положительные результаты его применения послужили основанием для разработки на этом же принципе более усовершенствованной установки — эталонного интерференционного компаратора для таких же пределов измерения.

### Универсальный интерференционный компаратор с фотоэлектрическим микроскопом

Как известно, интерференционные измерения длины концевых мер уже широко применяются на практике, тогда как для штриховых мер этот метод только в последние годы получил практическое разрешение. Хотя в принципе интерференционные измерения длины штриховых мер, так же как и концевых, сводятся к определению числа длин световых волн, укладывающихся между двумя положениями зеркала, применение интерференции света к измерению штриховых мер представляет технически более сложную задачу. При измерениях в интерферометре для измерения длины концевых мер зеркала остаются неподвижными, а в интерферометре для штриховых мер одно из зеркал при переходе от одного штриха к другому должно перемещаться. Для сохранения неизменной интерференционной картины, плоскость подвижного зеркала должна оставаться строго параллельной относительно своего исходного положения. Поэтому возможность практического использования двух-

лучевого интерферометра Майкельсона для измерения штриховых мер в значительной степени определяется конструкцией его оптико-механической системы. Как известно, для исключения погрешностей первого порядка нужно соблюдать принцип продольного компарирования, а для сохранения постоянной интерференционной картины перемещение подвижной системы с зеркалом должно быть строго прямолинейным, что для больших пределов измерения практически трудно выполнимо.

Для ослабления влияния перекосов подвижного зеркала на искажение интерференционной картины приходится прибегать к дополнительным оптическим системам или применять коррекцию.

Универсальный интерференционный компаратор\* был построен с расчетом изучения возможностей использования принципа двухлучевого интерферометра для измерения штриховых мер непосредственно в длинах световых волн, а также для сравнения штриховых мер с концевыми [1].

На рис. 1 представлена схема универсального интерференционного компаратора с подвижным микроскопом. Зеркало 7 жестко связано

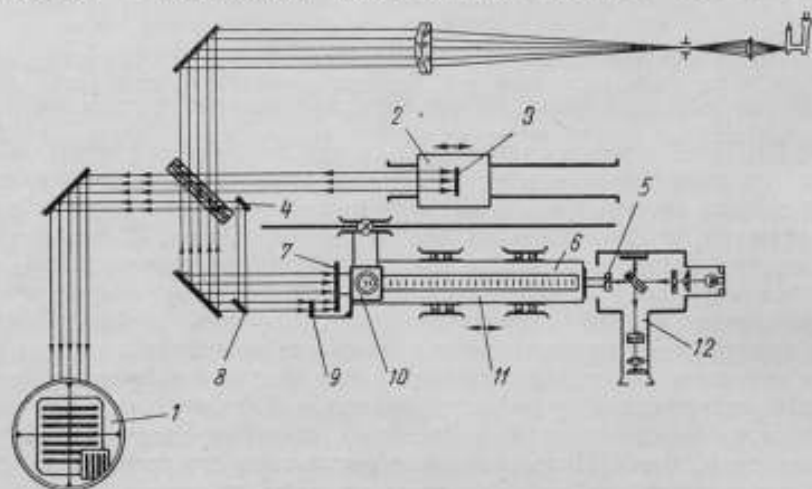


Рис. 1. Принципиальная схема универсального интерференционного компаратора.

1 — поле зрительной трубы; 2 — щель; 3 — референтное зеркало; 4, 8, 9 — вспомогательные зеркала; 5 — зеркало интерференционного индикатора; 6 — стол; 7 — основное зеркало; 10 — подвижный микроскоп; 11 — штриховая мера; 12 — интерференционный индикатор.

с тубусом микроскопа, который в процессе измерения перемещается по направляющей станины.

Для исключения погрешностей первого порядка и сохранения постоянного положения плоскости зеркала в компараторе применяется интерференционная коррекция. Для этой цели часть пучка света (площадью около  $1 \text{ см}^2$ ) вспомогательными зеркалами 4 и 8 направлена на дополнительное зеркало 9, жестко связанное с подвижным микроскопом 10 и расположенное несколько выше основного зеркала 7. При нулевой разности хода в белом свете этот пучок будет интерферировать с основным пучком, падающим на референтное зеркало. В поле зрительной трубы 1 будет наблюдаться дополнительная интерференционная картина, показанная на схеме в правом нижнем квадранте, положение которой может быть точно зафиксировано по черной ахроматиче-

\* Бржезинский М. Л., Авторское свидетельство № 98120 от 4 марта 1953 г.

ской полосе. Если же при перемещении микроскопа с зеркалом (вследствие недостаточной прямолинейности направляющих) изменится положение плоскости зеркала относительно его исходного положения, то это вызовет соответствующее изменение интерференционной картины. При восстановлении положения интерференционной картины с помощью регулировочных рычагов каретки будет откорректировано положение микроскопа с зеркалом. При наклоне каретки в вертикальной плоскости зеркала поворачиваются вокруг горизонтальной оси на такой же угол и смещаются в противоположных направлениях. Вследствие этого один пучок лучей удлиняется, а другой укорачивается на такую же величину и разность хода изменяется на удвоенную величину смещения. Линейные перемещения зеркал легко определить с погрешностью до 0,1 полосы по смещению интерференционной картины. В нашем случае смещение интерференционной картины на одну полосу (для белого света около 0,3 мкм) будет соответствовать линейному перемещению одного из зеркал на 0,15 мкм. При восстановлении интерференционной картины с точностью до 0,1 полосы вариации в установке основного подвижного зеркала будут в пределах  $\pm 0,015$  мкм. Так как плоскость измеряемой шкалы расположена ниже пучка света на 25–30 мм, то при этих наклонах зеркала и жестко связанного с ним микроскопа изображение штриха сместится на большую величину. Зеркала коррекционной системы удалены от оси поворота на 75 мм, а плоскость шкалы — на 100 мм. При этих условиях смещение основного зеркала на 0,015 мкм вызывает смещение изображения штриха на 0,020 мкм. В результате будет иметь место погрешность в измерении длины штриховой меры, равная  $0,020 - 0,015 = 0,005$  мкм. Следовательно, можно считать, что несоблюдение принципа совмещения линии измерения с плоскостью измеряемой шкалы не вносит при интерференционной коррекции существенной погрешности.

Рассмотрим другие, наиболее существенные, элементы компаратора. Референтное зеркало 3 помещается на каретке 2, которая при помощи ходового винта и дополнительного механизма микроподачи может перемещаться в пределах 1 м. При сравнении штриховой меры с концевой на этой каретке устанавливается концевая мера. Помещая в параллельном пучке коллиматора трубчатый эталон Фабри — Перо (который в данном случае будет выполнять роль оптического умножителя), можно измерить длину интервалов штриховой меры, кратных длине трубчатого эталона. Для измерения малых разностей компаратор имеет интерференционный индикатор 12.

Стол 6, на верхнюю платформу которого помещают измеряемую меру, смонтирован на точных шариковых подшипниках и при помощи микровинта его можно перемещать в пределах  $\pm 2$  мм в направлении линии измерений. На торцевой плоскости подвижной платформы стола укреплено зеркало 5 интерференционного индикатора, по которому фиксируется положение исходного штриха меры под микроскопом, а при перемещении микроскопа с зеркалом на вторую позицию измеряются малые разности. Цена деления шкалы интерференционного индикатора 12 определяется градуировкой его в длинах волн монохроматических источников света. Для этого перемещают механизм микроподачи зеркало платформы подвижного стола и отсчитывают число интерференционных полос данной длины волны и соответствующие этому показания интерференционного индикатора. Для определения дробных частей порядков интерференции вместо интерференционного индикатора могут быть применены и другие высокочувствительные устройства, такие как оптический клин или окулярный микрометр.



Универсальный интерференционный компаратор (рис. 2) дает возможность как производить абсолютные измерения непосредственно в длинах волн монохроматических источников света, так и сравнивать любые подразделения штриховых эталонов с концевыми мерами известного значения или с трубчатым эталоном. На первом этапе освоения интерференционного метода измерения штриховых мер это имело существенное значение, так как при предварительных исследованиях можно было установить значение штрихового эталона с погрешностью менее одного порядка интерференции, что дает возможность при абсолютных интерференционных измерениях ограничиться меньшим числом спектральных линий монохроматического источника или даже одной линией.

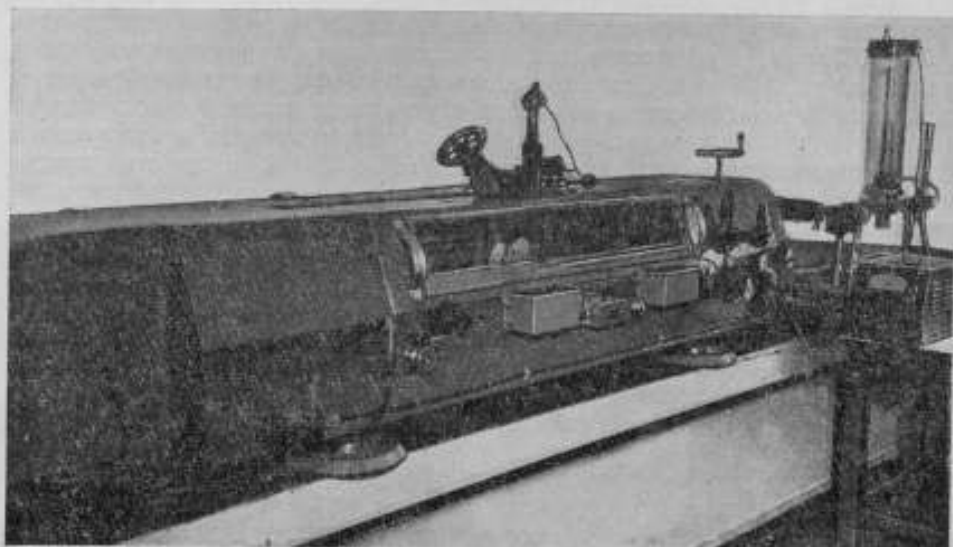


Рис. 2. Общий вид универсального интерференционного компаратора.

На опытном образце компаратора были выполнены экспериментальные работы с целью проверки в действии принципиально новых элементов конструкции, а также изучения влияния погрешностей юстировки, наведения на штрихи, термостатирования и других факторов на результаты измерения. Для изучения прибора производились измерения длины штриховых мер по трубчатому эталону Фабри—Перо и по концевым мерам известного значения. По результатам измерения шаговым методом отдельных интервалов и суммарному значению длины можно оценить характер накопления и распределения погрешностей метода.

В табл. 1 приведены результаты измерения длины платино-иридиевого метра № 11. На интерференционном компараторе измерялись отдельные дециметры, а значения интервалов относительно нулевого штриха получены суммированием дециметровых подразделений.

В табл. 2 приводятся средние значения общей длины этого же метра, полученные двумя различными методами: сравнением с метровой концевой мерой и по кварцевому трубчатому эталону.

Средние значения получены при наведении на штрихи как по обычному, так и по фотозлектрическому микроскопам. Эти результаты

хорошо согласуются между собой и с данными, полученными суммированием десяти дециметровых подразделений.

Произведены были также и абсолютные измерения в монохроматическом свете. Как уже сообщалось [2], абсолютный метод исследовался на интервалах меры до 200 мм, в этих пределах интерференционная кар-

Таблица 1

| Платино-иридиевый метр № 11   |                                    |
|---|------------------------------------|
| Интервалы, мм   | Действительная длина интервала, мм |
| 0-100   | 99,99847                           |
| 0-200   | 199,99897                          |
| 0-300   | 299,99952                          |
| 0-400   | 400,00021                          |
| 0-500   | 500,00040                          |
| 0-600   | 600,00086                          |
| 0-700   | 700,00110                          |
| 0-800   | 800,00118                          |
| 0-900   | 900,00145                          |
| 0-1000  | 1000,00121                         |
| Средняя квадратичная погрешность измерения дециметровых интервалов $\sigma = \pm 0,03$ мм |                                    |

Таблица 2

| Измеренные разности (мкм) при сравнении метра № 11                  |                   |  |                   |
|---|-------------------|--|-------------------|
| с концевой мерой 1000 мм  |                   | с трубчатых эталоном 100 мм                              |                   |
| Обычный микроскоп   | Фотоэлектрический | Обычный микроскоп  | Фотоэлектрический |
| +0,18   | +0,35             | -3,52  | -3,41             |
| +0,21   | +0,52             | -3,53  | -3,42             |
| +0,19   | +0,56             | -3,66  | -3,33             |
| +0,42   | +0,41             | -3,20  | -3,14             |
| +0,30   | +0,30             | -3,35  | -3,62             |
| +0,47   | +0,50             | -3,36  | -3,59             |
| +0,36   | +0,50             | -3,47  | -3,36             |
| —   | —                 | -3,46  | -3,50             |
| —   | —                 | -3,40  | -3,41             |
| —   | —                 | -3,63  | -3,52             |
| Среднее +0,30   | +0,45             | -3,46  | -3,43             |
| Общее среднее +0,38   |                   | -3,45  |                   |
| Поправка на концевую меру +0,85                                     |                   | Поправка к 10-кратному значению трубчатого эталона +4,70 |                   |
| Результат измерения метра № 11<br>1 м + 1,23 мкм                    |                   | Результат измерения метра № 11<br>1 м + 1,25 мкм         |                   |
| Средняя квадратичная погрешность результата $\sigma = \pm 0,12$ мкм |                   |  |                   |

тина еще хорошо видна и температурные погрешности оказывают меньшее влияние. Результаты измерения получены со средней квадратичной погрешностью порядка 0,02-0,05 мкм.

Компаратор заключен в термозащитный футляр легкого типа, температура помещения при измерении поддерживалась в пределах  $20^\circ \text{C} \pm 0,02$  град. Температуру мер измеряли дифференциальными термопарами. Для определения температурных погрешностей была проведена серия сравнений двух однометровых мер — штриховой и концевой, температурные коэффициенты которых различались на  $1 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>. На каждой мере было установлено по три термопары, за результат измерения принимали среднее значение из трех показаний. Температуру мер измеряли в начале и конце измерения. Результаты приведены в табл. 3.

| Дата измерения,<br>1963 г. | Температура мер, °С |          | Измеренная разность мер, мкм | Результат измерения, приведенный к 20° С, мкм | Дата измерения,<br>1963 г. | Температура мер, °С |          | Измеренная разность мер, мкм | Результат измерения, приведенный к 20° С, мкм |
|----------------------------|---------------------|----------|------------------------------|---|----------------------------|---------------------|----------|------------------------------|---|
|                            | штриховой           | концевой |                              |   |                            | штриховой           | концевой |                              |   |
| 13/II                      | 19,955              | 19,932   | -0,41                        | -0,68   | 16/II                      | 20,109              | 20,061   | -0,15                        | -0,69   |
| 13/II                      | 20,058              | 20,008   | -0,21                        | -0,78   | 27/VI                      | 19,800              | 19,913   | -1,53                        | -0,76   |
| 14/II                      | 20,015              | 19,980   | -0,38                        | -0,78   | 27/VI                      | 19,870              | 19,945   | -1,22                        | -0,79   |
| 14/II                      | 20,114              | 20,035   | +0,12                        | -0,78   | 29/VI                      | 19,958              | 20,054   | -1,40                        | -0,73   |
| 15/II                      | 20,181              | 20,070   | +0,49                        | -0,77   | 28/VI                      | 19,991              | 20,071   | -1,33                        | -0,71   |

Как можно видеть, в этой серии измерений, выполненных в разные месяцы года, существенно отличающиеся разности, будучи приведены к 20° С, дают достаточно близкие значения результата измерения, что может служить показателем надежности измерения температуры.

### Эталонный интерференционный компаратор

Исследования и практическое применение опытного интерференционного компаратора для измерения длины штриховых мер дали возможность разработать по этому же принципу усовершенствованный интерферометр, который будет служить в качестве эталонной установки для воспроизведения единицы длины — метра.

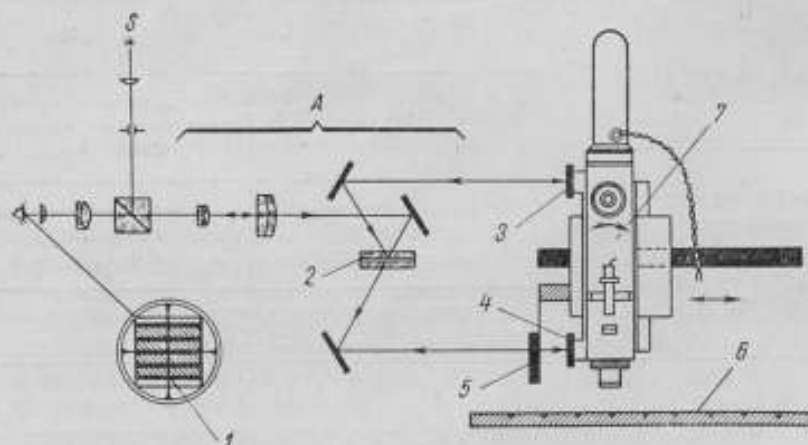


Рис. 3. Принципиальная схема коррекции эталонного интерференционного компаратора.

А — интерферометр для коррекции микроскопа с зеркалом.

Конструкция эталонного компаратора, упрощенная схема которого представлена на рис. 3 и 4, несколько усовершенствована и дополнена. Для коррекции подвижного микроскопа 7 с зеркалом предусмотрена отдельная интерференционная система (рис. 3). Тубус фотоэлектрического микроскопа, кроме основного зеркала 5, имеет два дополнительных зеркала 3 и 4, расположенных приблизительно симметрично относительно оси, вокруг которой микроскоп может наклоняться в верти-

кальной плоскости. На эти зеркала от разделяющей пластины 2 направлены два пучка света, которые интерферируют при нулевой разности хода в белом свете. По черной ахроматической полосе в поле 1 зрительной трубы точно фиксируется положение интерференционной картины. Интерферометр отъюстирован при перпендикулярном положении оси микроскопа относительно плоскости стола, на котором устанавливаются штриховую меру 6. Коррекционная система работает независимо от основного подвижного зеркала 5. За счет увеличения расстояния между зеркалами 3 и 4 повышена точность коррекции.

В компараторе предусмотрено также дополнительное устройство для улучшения наблюдательной системы. В двух ветвях интерферометра установлены узкие зеркала 3 и 3' (рис. 4), перекрывающие только среднюю часть пучков света. Эти зеркала, отъюстированы таким образом, что в центральной части поля зрения, как это показано в окружности А, в

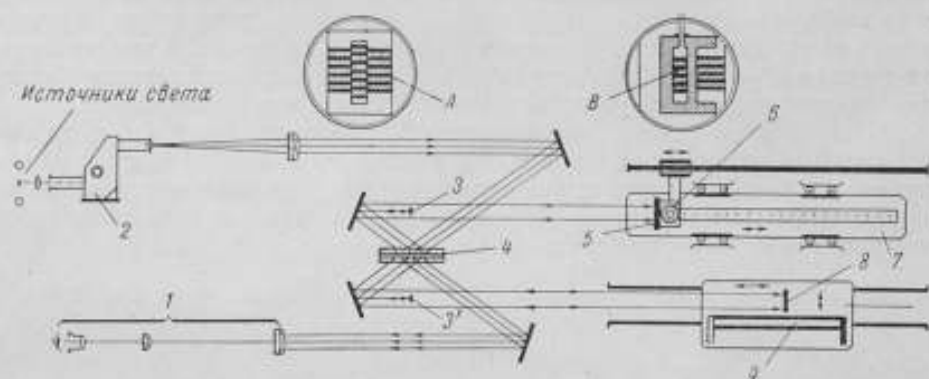


Рис. 4. Принципиальная схема эталонного интерференционного компаратора.

1 — зрительная труба; 2 — монохроматор; 3 и 3' — зеркала; 4 — разделяющая пластина; 5 — основное зеркало; 6 — фотоэлектрический микроскоп с зеркалом; 7 — каретка; 8 — референтное зеркало; 9 — хвостовая мера с вакуумной камерой.

всегда будет наблюдаться постоянная интерференционная картина. При измерении длины штриховой меры методом совпадения дробных частей интерференционная полоса этой картины служит индексом, относительно которого отсчитываются дробные части порядков интерференции, также как и в случае измерения коцевой меры, где интерференционная картина на свободной поверхности меры и контактной пластине наблюдается одновременно. По постоянной интерференционной картине в поле зрения можно также предварительно корректировать положение подвижных зеркал, устанавливая интерференционную картину по ширине и направлению полос. Впервые эта система была испытана на универсальном интерференционном компараторе и полностью себя оправдала.

Для приведения результатов измерения к значению длин волн в вакууме эталонная установка имеет отдельный интерферометр и трубчатую метровую меру с камерой для создания вакуума. Наблюдательная система выведена на общий пульт. Показатель преломления воздуха можно измерять также, используя основной интерферометр, если в одну из ветвей вместо референтного зеркала ввести меру с вакуумной камерой (как это показано на рис. 4). В этом случае роль референтного зеркала будет выполнять зеркало 5 на каретке с микроскопом. Поле зрения с интерференционной картиной при определении показателя преломления приведено на рис. 4 в окружности В. Компаратор оборудован

фотоэлектрическим микроскопом\*. Для того чтобы обеспечить воспроизведение метра с точностью порядка  $2 \cdot 3 \cdot 10^{-8}$  м, необходимо знать температуру измеряемой меры с погрешностью не более  $0,002 \div 0,003$  град.

Для измерения температуры предусмотрена специальная установка, состоящая из термометрического моста, платинового термометра сопротивления и дифференциальных медь-константановых термопар. Абсолютное значение температуры в одной постоянной точке компаратора измеряется с помощью платинового термометра сопротивления, малые разности температуры в интересующих нас точках меры по отношению к температуре исходной точки — с помощью дифференциальных медь-константановых термопар.

Эталонный интерференционный компаратор установлен во внутреннем полуподвальном помещении, которое со всех сторон окружено смежными помещениями, где средняя годовая температура  $+19^\circ\text{C}$  в течение года изменяется в пределах  $\pm 1$  град. Помещение компаратора оборудовано электронагревателями с автоматической регулировкой температуры в пределах  $20 \pm 0,01^\circ\text{C}$ . Более стабильный температурный режим обеспечивает термозащитный футляр, в котором заключен компаратор.

Источники света, монохроматор, зрительные трубы и другие механизмы управления процессом измерения расположены на одном пульте за термостатированной перегородкой. Вид эталонного интерференционного компаратора без пульта управления и термозащитного кожуха представлен на рис. 5.

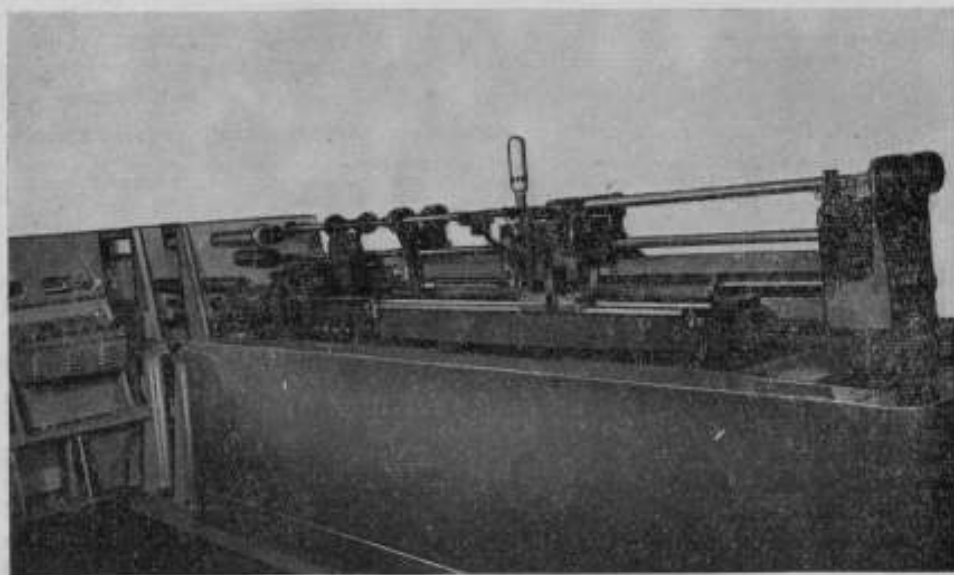


Рис. 5. Общий вид эталонного интерференционного компаратора.

Работы по созданию новой интерференционной установки выполнены силами института. Проектно-конструкторские и расчетные работы по эталонному компаратору выполнены конструкторами В. С. Степановым, Р. И. Комаровой и инженером М. В. Лобачевым.

Оптическая схема компаратора разрабатывалась и налаживалась при участии старшего научного сотрудника А. И. Карташева.

\* См. стр. 43.



## Продольный компаратор с параллельным расположением мер и интерференционной коррекцией

Как известно, для измерения длины штриховых мер применяются продольные и поперечные компараторы. При продольном компарировании меры располагаются последовательно одна за другой (рис. 6а), а микроскопы устанавливаются на соответствующие штрихи образцовой и поверяемой мер. Это необходимое условие для соблюдения принципа Аббе, согласно которому (во избежание погрешностей первого порядка) требуется, чтобы линия измерения и измеряемый объект лежали на одной прямой. В случае поперечного компарирования (рис. 6б) меры под микроскопами располагают параллельно, а микроскопы устанавливают на начальный и конечный штрихи измеряемого интервала и, поперечно перемещая стол, переходят с образцовой меры на поверяемую.

Каждый из этих методов компарирования имеет свои недостатки. В случае продольного компарирования мер большой длины (таких, как метр и более) длина стола компаратора должна более чем вдвое превышать номинальную длину мер; сравниваемые меры в этом случае могут находиться в различных температурных условиях, что может привести к ошибкам при измерении.

Возможности применения поперечных компараторов ограничены тем, что наименьшая длина измеряемых интервалов обусловлена расстоянием  $L$ , на которое могут быть сближены микроскопы. Практически у компараторов это расстояние трудно сделать меньше 100 мм. Кроме того, перед измерением каждого интервала нужно устанавливать новое расстояние между микроскопами, что сильно замедляет процесс компарирования.

От указанных недостатков продольного и поперечного компарирования можно было бы избавиться, применив схему расположения мер и микроскопов, указанную на рис. 6в, но такая схема компарирования не применялась, так как в этом случае невозможно избежать погрешностей первого порядка из-за непрямолинейности перемещения либо микроскопов по направляющей балки, либо каретки с мерами. Достигнуть такой прямолинейности хода каретки с мерами или прямолинейности балки, чтобы избежать при компарировании погрешностей первого порядка, практически невозможно.

Для продольного компарирования при параллельном расположении мер может быть применена схема компаратора (рис. 7), где несложная оптическая система в виде двухлучевого интерферометра служит для точной коррекции перемещения каретки с микроскопами\*. На подвиж-

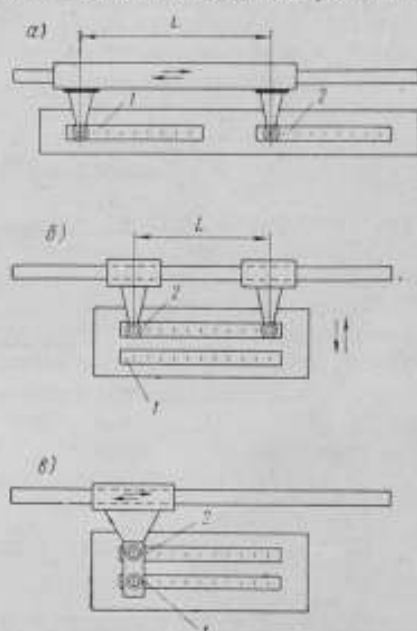


Рис. 6. Схемы компарирования.

а — продольное компарирование с последовательным расположением мер; б — поперечное компарирование; в — продольное компарирование с параллельным расположением мер.  
1 — образцовая мера, 2 — поверяемая мера.

\* Бржезинский М. Л., Авторское свидетельство № 113992 от 28 сентября 1957 г.

ной каретке 4 с двумя микроскопами 5 укреплены два зеркала  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . Эти зеркала установлены и отрегулированы таким образом, что при наличии светоразделяющей пластины 2 и вспомогательных зеркал  $\beta_{1-4}$  можно наблюдать интерференцию двух пучков в белом свете.

Положение каретки 4 с микроскопами 5 можно зафиксировать по черной полосе интерференционной картины в окуляре 9 зрительной трубы. Если при перемещении каретки с микроскопами в новое положение, интерференционная картина либо совсем исчезнет из поля зре-

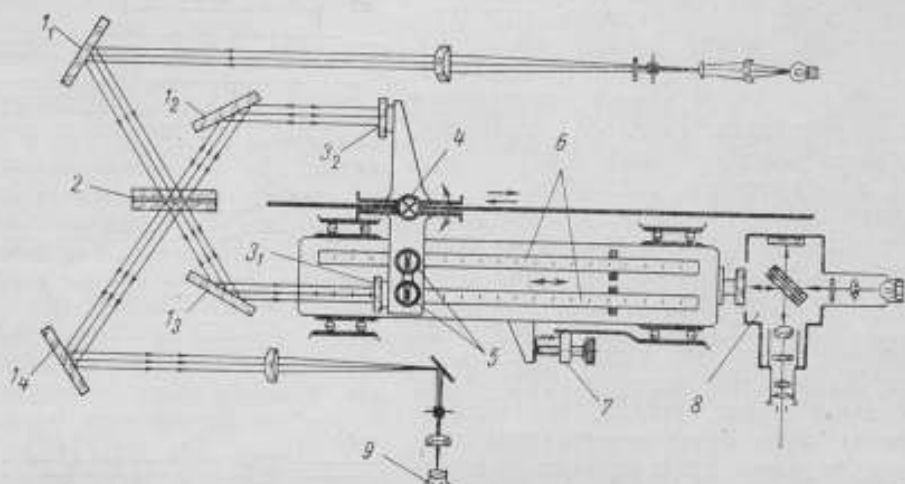


Рис. 7. Схема продольного компаратора с интерференционной коррекцией.

ния, либо изменит свое первоначальное положение, то при помощи регулировочных винтов (которыми снабжена каретка с микроскопами) можно легко и быстро восстановить в прежнее положение интерференционную картину. В результате этого зеркала  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , а следовательно, и оси микроскопов будут восстановлены относительно их первого исходного положения. Предлагаемая оптическая система дает возможность исключить перекосы каретки с микроскопами, которые при несоблюдении принципа Аббе могут внести погрешности при компарировании штриховых мер.

Штриховые меры 6 устанавливаются параллельно на столе, который легко и точно перемещают в небольших пределах микровинтом 7. Подвижная система стола связана с интерференционным индикатором 8, по которому могут быть измерены малые разности длин сравниваемых мер. Установив микроскопы на начальные штрихи мер и зафиксировав положение черной ахроматической полосы интерференционной коррекции, микроподачей стола наводят микроскопы поочередно на штрихи образцовой и поверяемой мер, производя отсчеты по интерференционному индикатору. После этого перемещают каретку с микроскопами на следующие штрихи измеряемого интервала, снова восстанавливают положение каретки по интерференционной коррекции, микроскопы наводят на штрихи и т. д.

Такая схема компаратора имеет ряд преимуществ: параллельное расположение мер почти вдвое уменьшает габариты прибора и обеспечивает лучшие температурные условия. При таком расположении микроскопов можно компарировать любые штриховые интервалы. Метод изме-

рения малых разностей по одному интерференционному индикатору\* с ценой деления 0,1—0,05 мкм имеет существенное преимущество по сравнению с обычно применяемыми для этих целей окулярными микрометрами, точность которых зависит от качества микровинта и от точности определения цены деления. В рассматриваемом методе разности измеряются по одному индикатору, цена деления которого не зависит от увеличения микроскопа и может быть установлена непосредственно в длинах световых волн.

Метод компарирования с параллельным расположением мер и интерференционной коррекцией был опробован на универсальном интерференционном компараторе. Вариации результатов при сравнении сантиметровых и дециметровых интервалов не превышали 0,02—0,05 мкм.

### Штрихо-концевые меры длины

Повышение точности измерения длины штриховых и концевых эталонов не может быть достигнуто без соответствующего повышения качества самих мер. Меры высокого качества необходимы как эталоны для сличения интерферометров. Стандартные меры, применяемые в настоящее время в промышленности, не отвечают новым требованиям. Современное состояние техники изготовления, применение сталей и сплавов специальных марок дают возможность получить меры более высокого качества как по точности их изготовления, так и по стабильности во времени. Для экспериментальных работ по исследованию точности интерференционных методов измерений был изготовлен из стали марки ХВГ набор специальных мер номинальных размеров 100, 110, 200, 210, 500, 510, 1000 и 1010 мкм. В поперечном сечении эти меры имеют профиль двутавровой балки (рис. 8), что значительно повышает их жесткость; в средней своей части они имеют такую же рабочую площадь, как и у стандартных мер (9×30 мм). При интерференционных измерениях на контактных пластинках не требуется увеличения поля зрения прибора, так как при такой форме сечения меры интерференционная картина на свободной поверхности ее и на контактной пластинке легко наблюдается в зоне, близко расположенной к средней части поперечного сечения меры, где обычно и определяется срединный размер. На торцовых плоскостях средняя рабочая часть меры ограничена неглубокими и узкими пазами. Доводка мер производилась по всей плоскости, а после изготовления угловые площадки были занижены на 10—15 мкм.

Для уменьшения массы и увеличения поверхности меры на свободных боковых сторонах ее сделаны ниши. Если на плоскостях, ограничивающих среднюю рабочую часть меры, нанести штрихи, то будем иметь штрихо-концевую меру. На концевых мерах 110, 210, 510, 1010 мкм имеются штриховые интервалы, равные соответственно 100, 200, 500 и 1000 мкм. Заготовки для этих мер с 1948 г. подвергались естественному и искусственному старению, окончательная доводка их была закончена

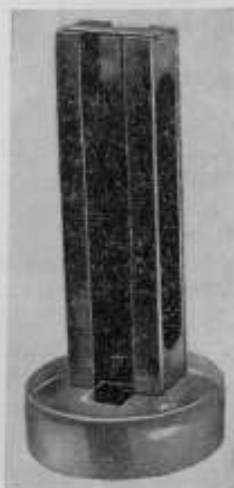


Рис. 8. Штрихо-концевая мера на контактной пластинке.

\* В качестве которого может быть использован контактный интерферометр И. Т. Уверского.

в 1956 г. Меры ежегодно измеряли абсолютным интерференционным методом. По результатам периодических измерений не было обнаружено таких изменений размеров, которые можно было бы отнести за счет нестабильности мер во времени. Вариации результатов ежегодных измерений находились в пределах 0,03 мкм для 100 мм размера; 0,07 мкм для 200 мм и 0,09 мкм для 1000 мм, что нужно отнести за счет точности метода измерения.

Применение фотоэлектрического микроскопа почти на порядок повышает точность наведения на штрихи. Однако надежные результаты в этом случае могут быть достигнуты при соблюдении ряда требований к качеству штрихов, равномерности их освещения и при соответствующей настройке микроскопа, в противном случае могут иметь место систематические погрешности. Для того чтобы иметь возможность провести экспериментальные работы по сравнению результатов измерения длины мер по штриховым интервалам с результатами измерения этих же мер как концевых, к штрихо-концевым мерам были изготовлены специальные боковички двух типов.

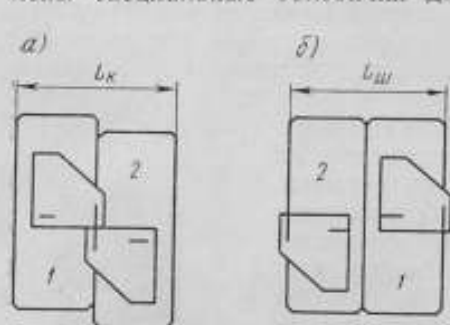


Рис. 9. „Нулевые“ боковички.

Боковички первого типа (рис. 9) — это две 10-мм концевые меры, на верхних нерабочих плоскостях которых наклеены зеркальные пластинки таким образом, что одна грань каждой пластинки смещена приблизительно на 1 мм относительно измерительной плоскости меры.

На зеркальных поверхностях пластинок, когда меры притерты, наносят тонкий штрих, который проходит приблизительно в плоскости контакта мер (рис. 9 а), но так, чтобы направление штриха совпадало с направлением линии контакта. Правильность нанесения штрихов контролировалась по результатам измерения штрихового интервала  $L_{ш}$  (рис. 9 б), когда меры притерты другими плоскостями. В этом случае результат должен быть равен сумме длин обеих концевых мер. С помощью таких боковичков концевую меру превращают в штриховую (рис. 10) и определяют ее длину как концевой меры, измеряя штриховой интервал  $L_{ш}$ .

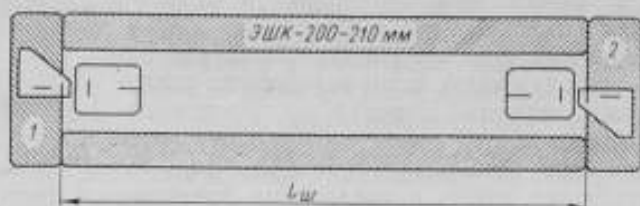


Рис. 10. Блок с „нулевыми“ боковичками.

Боковички второго типа представляют собой также концевые 10-мм меры, на нерабочих поверхностях которых с двух сторон нанесены штрихи.

Применение такого боковичка в сочетании со штрихо-концевой мерой показано на рис. 11. В этом случае сначала измеряют интервал  $a_1$ , а затем боковичок притирают к другому концу меры, но уже противопо-

ложной стороной, и измеряют штриховой интервал  $a_2$ . Штриховой интервал  $L_{ш}$  определяют из уравнения

$$L_{ш} = L_k - [(a_1 + a_2) - l_k],$$

где  $L_k$  — длина концевой меры,  
 $l_k$  — длина боковничка.

Штрихо-концевые меры в сочетании с боковничками использовались для сравнения результатов измерения концевой меры с результатами

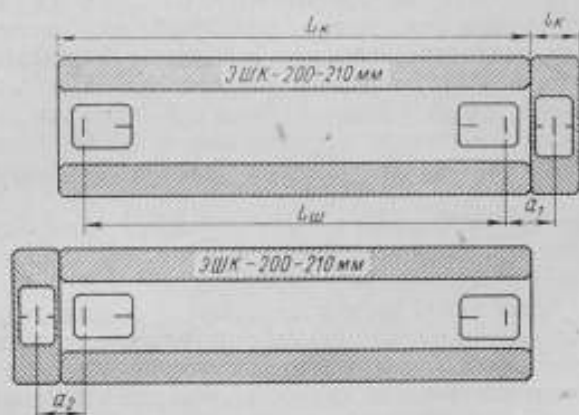


Рис. 11. Блок с обычными боковничками.

измерения ее или суммы двух мер по штриховым интервалам. Как известно, отклонение от плоскопараллельности измерительных поверхностей концевой меры весьма затрудняет точное определение ее длины. Поэтому при изготовлении штрихо-концевых мер предъявлялись высокие требования к плоскостности и параллельности измерительных поверхностей.

Две концевые меры, выполняющие роль боковничков, были изготовлены из оптического кварца, плоскопараллельность их измерительных плоскостей выдержана с высокой точностью. Меры были измерены абсолютным интерференционным методом каждая в отдельности и совместно в блоке на оптическом контакте. При измерении блока из двух концевых мер в длину блока входят два притирочных слоя (между мерами и между одной из мер и контактной пластиной). При измерении этих мер по штриховым интервалам притирочный слой также будет участвовать два раза.

Для исключения возможной погрешности за счет непараллельности измерительных плоскостей концевых мер штриховые интервалы, как правило, измеряли с двух сторон и за результат принимали среднее значение.

В случае, приведенном на рис. 11, когда кварцевая концевая мера (боковничок) применялась с концевыми стальными мерами, количество притирочных слоев при измерении блока из концевых мер (мера и боковничок) и штриховых интервалов было одинаково.

Качество контакта между стальной мерой и кварцевым боковничком легко контролируется. Концевые меры и блоки из них измеряли абсолютным интерференционным методом. Штриховые интервалы измеряли на универсальном интерференционном компараторе предварительно

методом сравнения с концевой мерой и окончательно абсолютным методом в длинах световых волн.

Опытные измерения производились с блоками из концевых и штрихо-концевых мер до 200 мм в различных комбинациях с нулевыми боковичками и с боковичками в виде концевой меры со штрихом. Некоторые результаты этих измерений приведены ниже:

1. Действительная длина блока из двух кварцевых мер по 12 мм по результатам измерения как концевой меры равна 24,00853 мм, длина его, полученная по сумме двух штриховых интервалов, оказалась равной 24,00857 мм.

2. Длина штрихо-концевой меры ЭШК-1-100-110 мм между измерительными поверхностями равна 110,00012 мм, между штрихами 100,00264. По результатам измерения в блоке с боковичками в первом случае получено 110,00018 мм, во втором 100,00253 мм.

Действительная длина концевой меры ЭК-1-200 мм по результатам измерения на интерферометре Кёстера равна 200,00143 мм, по результатам измерения как штриховой меры с боковичками получено значение 200,00157 мм.

Эти результаты показывают, что точность измерения штриховых интервалов интерференционным методом может быть такого же порядка, как и при измерении концевых размеров.

Кроме того, многочисленные измерения малых штриховых интервалов (10—20 мм) и сопоставление их с результатами измерения длины концевых мер показали, что при тонких и четких штрихах и правильной настройке фотоэлектрического микроскопа длина штрихового интервала может быть измерена с большей определенностью, чем у концевой меры, имеющей даже допустимые по стандарту отклонения от плоскопараллельности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бржезинский М. Л., Универсальный интерференционный компаратор, Труды ВНИИМ, вып. 26(86), 1955.
2. Бржезинский М. Л., Интерференционные измерения штриховых эталонов длины, «Измерительная техника», № 2, 1963.

Поступила в редакцию  
1/IX 1964 г.

ИСПЫТАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛАМП  
С ЕСТЕСТВЕННЫМ КРИПТОНОМ

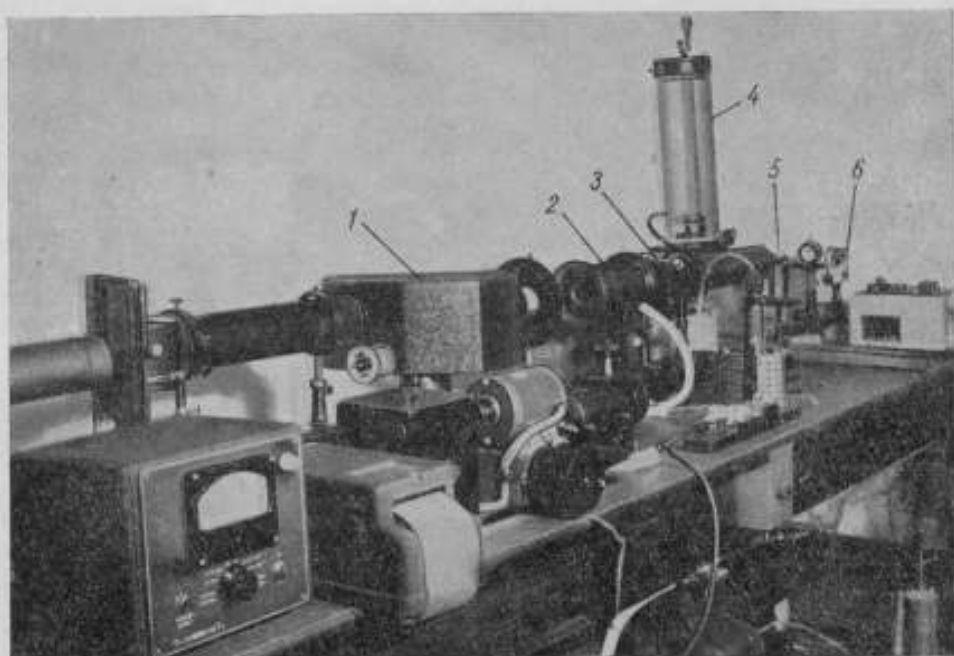
*В статье описаны результаты исследований излучения спектральных ламп, заполненных естественным криптоном. Путем сравнения с первичной эталонной длиной волны оранжевой линии  $Kr^{86}$  получены значения длин волн восьми линий видимой области спектра естественного криптона.*

Спектральные лампы с холодным катодом, заполненные естественным криптоном, по инструкции № 75—50 [1] применяются для поверки концевых мер. При измерениях обычно пользуются значениями длин волн естественного криптона из таблиц Кестерса (1935 г.) или Брюса, составленных по данным Лителфилда (1946 г.) [2]. Представляло интерес выяснить, с какой точностью эти значения длин волн соответствуют излучению спектральных ламп с холодным катодом и нужна ли аттестация выпускаемых ламп по длинам волн. Для этого на установке ВНИИМ были измерены длины волн восьми линий видимой области спектра криптона, излучаемых тремя различными лампами. Измерения производились по методу совпадения дробных частей порядков интерференции, определенных в нескольких спектральных линиях. В качестве эталонной использовалась длина волны оранжевой линии криптона ( $Kr^{86}$ ). Источником эталонного излучения служила лампа ВНИИМ, сконструированная Г. С. Поповым [3]. Эта лампа удовлетворяет спецификации условий возбуждения спектра  $Kr^{86}$ , рекомендованной Международным комитетом по мерам и весам.

В установке ВНИИМ [4] для измерения длин волн и полуширины спектральных линий (см. рисунок) свет от лампы 6 с естественным криптоном и лампы 4 с  $Kr^{86}$  с помощью системы призм 5 поочередно направляется на щель коллиматора 3 и затем на эталон Фабри — Перо 2. Эталон помещен в барокамеру, откачиваемую форвакуумным насосом до давления 0,20 н/м<sup>2</sup>. Далее свет проходит через призмы спектрографа 1 и фокусируется линзой в плоскости фотопластинки.

При измерении использовали разборный эталон Фабри — Перо со смешными кварцевыми кольцами длиной 47 и 100 мм. Коэффициент отражения светодетельных слоев 90—92% при пропускании 7—5%. Спектр естественного криптона фотографировали поочередно со спектром  $Kr^{86}$ . Экспозиция для эталонной лампы составляла 2 сек, для лампы с естественным криптоном — от 1 сек до 2 мин в зависимости от

интенсивности линии; при этом получались одинаковые почернения для линий разной интенсивности. На одну пленку снимали спектры трех исследуемых ламп поочередно со спектром  $Kr^{86}$ . Для определения дробной части порядка интерференции, сфотографировав спектры  $Kr^{86}$



Установка ВНИИМ для измерения длин волн и полуширины спектральных линий.

и естественного криптона, измеряли диаметры колец равного наклона на фотоэлектрическом компараторе и на микроскопе МИР-12. Дробную часть порядка интерференции подсчитывали по пяти измеренным диаметрам. Следует заметить, что при этом не нужно было вводить поправки на дисперсию воздуха, так как при давлении его в барокамере  $0,13 \text{ н/м}^2$  погрешность в определении дробной части составит  $0,5 \cdot 10^{-3}$ . Для всех измеряемых длин волн (за исключением фиолетовой  $\lambda 4503 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ) получены результаты при двух разностях хода 94 и 200 мм. Поправки на дисперсию скачки фазы  $\delta\lambda_1$  и  $\delta\lambda_2$  рассчитывали по формулам [5]

$$\delta\lambda_1 = (\lambda_2 - \lambda_1) \frac{\Delta_2}{\Delta_2 - \Delta_1}; \quad \delta\lambda_2 = (\lambda_2 - \lambda_1) \frac{\Delta_1}{\Delta_2 - \Delta_1}; \quad \lambda = \lambda_1 + \delta\lambda_1 = \lambda_2 + \delta\lambda_2,$$

где  $\lambda_1$  — длина волны света при разности хода  $\Delta_1$ ,  
 $\lambda_2$  — то же при разности хода  $\Delta_2$ .

Длина волны фиолетовой линии  $\lambda 4503 \cdot 10^{-10} \text{ м}$  определялась путем сравнения с фиолетовой линией  $Kr^{86}$ , рекомендованной Консультативным комитетом по определению метра и представленной для утверждения на XII Генеральной конференции по мерам и весам в качестве вторичной эталонной длины волны. Измерения производились только при одной разности хода 94 мм по трем снимкам для каждой из трех ламп. Поправка на дисперсию скачка фазы для этой линии не вводилась.



Значения длин волн естественного криптона в вакууме, полученные при разности хода 94 мкм для каждой из исследованных во ВНИИМ ламп без учета поправки на дисперсию скачка фазы, приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Длина волны естественного криптона<br>ламп, $10^{-10}$ м |           |           |                                     | Средняя<br>квadraticная<br>погрешность*<br>$10^{-14}$ м |
|--|-----------|-----------|-------------------------------------|---|
| № 1  | № 2       | № 3       | Среднее<br>значение<br>$10^{-10}$ м |   |
| 6458,0751  | 6458,0745 | 6458,0740 | 6458,0745                           | 4   |
| 6422,8051  | 6422,8045 | 6422,8047 | 6422,8048                           | 3   |
| 6057,8048  | 6057,8047 | 6057,8037 | 6057,8044                           | 4   |
| 5872,5441  | 5872,5438 | 5872,5441 | 5872,5440                           | 3   |
| 5651,1313  | 5651,1310 | 5651,1298 | 5651,1307                           | 3   |
| 5571,8373  | 5571,8370 | 5571,8367 | 5571,8370                           | 2   |
| 5563,7711  | 5563,7712 | 5563,7706 | 5563,7710                           | 4   |
| 4503,6183  | 4503,6174 | 4503,6171 | 4503,6176                           | 2   |

\* Средняя квадратичная относится к ряду из 10 измерений.

В табл. 2 даны измеренные значения длин волн естественного криптона с введением поправки на дисперсию скачка фазы и усредненные по трем лампам, а также данные Лителфилда и вычисленное среднее значение по этим определениям.

Расхождения данных ВНИИМ и Лителфилда не носят систематического характера и находятся в пределах погрешности измерений.

Полученные результаты показывают, что при выпуске ламп не следует верить их по длинам волн, достаточно лишь проверить предел видимости интерференционной картины и по этому пределу установить пригодность ламп. Полученные средние значения длин волн можно рекомендовать для применения при проверке концевых мер до 75 мкм в системе Госкомитета стандартов и на заводах, изготавливающих меры.

Таблица 2

| Длина волны естественного<br>криптона в вакууме ( $10^{-10}$ м)<br>по данным |            | Среднее<br>значение<br>$10^{-10}$ м |
|--|------------|-------------------------------------|
| ВНИИМ  | Лителфилда |                                     |
| 6458,0745  | 6458,0755  | 6458,0750                           |
| 6422,8048  | 6422,8033  | 6422,8040                           |
| 6057,8041  | 6057,8045  | 6057,8043                           |
| 5872,5440  | 5872,5443  | 5872,5441                           |
| 5651,1298  | 5651,1309  | 5651,1303                           |
| 5571,8376  | 5571,8372  | 5571,8374                           |
| 5563,7753  | —          | 5563,7753                           |
| 4503,6176  | 4503,6180  | 4503,6178                           |

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция 75-50 для проверки плоскопараллельных концевых мер длины 1-го и 2-го разрядов абсолютным интерференционным методом, Стандартгиз, 1957.
2. Edlen B., Transactions of the International Astronomical Union, v. X, 1960, pp. 211-233.
3. Батарчукова Н. Р., Ефремов Ю. П., Попов Г. С., Криптоновая лампа для воспроизведения эталона единицы длины, «Измерительная техника», № 8, 1962.
4. Ефремов Ю. П., Применение фотоэлектрической регистрации интерференционных полос, «Измерительная техника», № 6, 1958.
5. Meissner W., IOSA, v. 31, 1941, p. 405; v. 32, 1942, p. 185.

Поступила в редакцию  
10/VIII 1964 г.

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ШТРИХОВЫХ МЕР  
СЧЕТОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС

*В статье описана аппаратура для измерения длины штриховых мер счетом интерференционных полос, разработанная во ВНИИМ, и приводятся результаты измерений.*

Применение метода счета интерференционных полос с использованием средств электроники для определения целого порядка интерференции и отсчета дробной части полосы позволяет не только повысить точность измерений длины, но и автоматизировать процесс измерений. Первые работы в этом направлении были выполнены в 50-е годы [1—7].

Во ВНИИМ создана интерференционная установка для измерения штриховых мер длины счетом интерференционных полос (рис. 1). В качестве интерферометра в ней использован прибор для измерения линейных шкал [8]. Источником монохроматического света служит безэлектродная лампа Hg<sup>199</sup>, длина волны зеленой линии Hg<sup>198</sup> 546 нм которой является вторичным эталоном длины.

При измерении капилляр лампы устанавливали перпендикулярно оптической оси интерферометра, лампа охлаждалась дистиллированной водой при температуре 20°С, расход которой стабилизировался. Лампа возбуждалась генератором высокой частоты на 100 Мгц с выходной мощностью 100 Вт.

Пучок лучей источника 1 фокусируется конденсором 2 на входную щель интерферометра 3, установленную в фокальной плоскости объектива 5.

Линия 546 нм выделяется с помощью светофильтра 4. Зеркалом 6 параллельный пучок направляется на разделяющую пластину 7. Затем проходящая часть этого пучка поступает на зеркало 8, установленное на каретке 9. Отраженная часть пучка идет на зеркало 10, соединенное с кареткой 11, на которой устанавливается поверяемая шкала 12.

Пучки лучей, отраженные зеркалами 8 и 10, после разделяющей пластины интерферируют, вспомогательными зеркалами 14 и 15 направляются в коллиматор 16 и через объектив 17 — в фотоэлектрический преобразователь (18—26). Преобразование световых потоков в электрический сигнал осуществляется фотоэлектрическими умножителями 20 и 24.

Поверяемую шкалу устанавливают на каретке так, чтобы штрихи находились в фокальной плоскости фотоэлектрического микроскопа 13. Его окулярная часть имеет два патрубка: в одном установлен окуляр для визуальных наблюдений, в другом помещено модулирующее и приемное устройства\*.

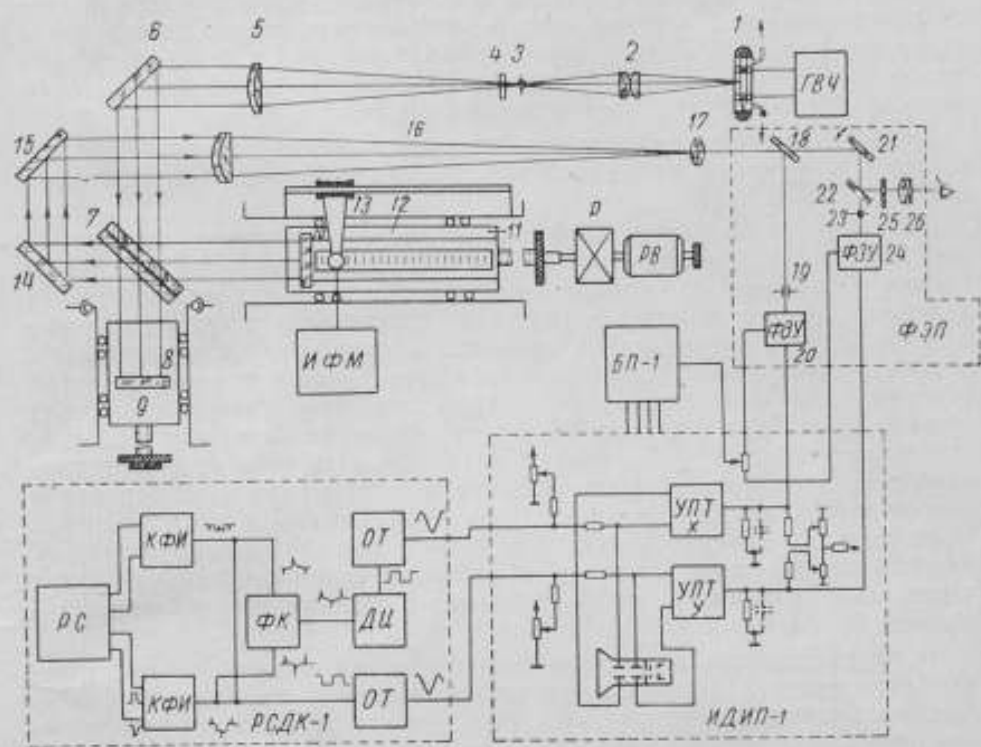


Рис. 1. Структурная схема установки для измерения штриховых мер длины.

ГВЧ — генератор высокой частоты, Р — редуктор, РВ — реверсивный двигатель, БП — блок питания типа БП-1, ИФМ — индикатор фотоэлектрического микроскопа, ФЭП — фотоэлектрический преобразователь, ОТ — одностабильный триггер, РС — реверсивный счетчик, КФИ — каскад формированных импульсов, ФК — фазоинверсный каскад.

При перемещении каретки со штриховой мерой в плоскости изображения интерференционной картины наблюдают перемещение интерференционных полос.

Наведение на штрихи по фотоэлектрическому микроскопу производят возвратно-поступательными перемещениями каретки. Поэтому разработанная аппаратура обеспечивает возможность реверсивного счета интерференционных полос.

Чтобы различать направление движения каретки в приборе, получают два световых сигнала интерференции, сдвинутых относительно друг друга по фазе на  $90^\circ$ . С этой целью пучок лучей разделяется полупрозрачной пластиной 18 на две части. В каждом канале в плоскости изображения интерференционной картины имеются диафрагмы 19, 23. При перемещении интерференционной картины относительно диафрагм происходит модуляция светового потока.

\* См. стр. 43.

Для юстировки разделяющей пластины имеются рычаги, установленные с наружной стороны корпуса. Зеркало 21 имеет рычаг, выведенный наружу корпуса прибора и предназначенный для тонких поворотов в пределах  $\pm 10^\circ$  оси рамки, на которой укреплена оправа зеркала.

Поворотом зеркала 21 смещают интерференционную картину относительно щели 23 и устанавливают необходимый сдвиг фаз между световыми потоками. Принятый способ разделения светового потока полупрозрачной пластиной дает возможность работать на одной и той же полосе; это уменьшает влияние как непрямолинейности перемещения зеркала 10, так и дефектов основных зеркал.

Для визуального наблюдения интерференционной картины в один из каналов вводится откидное зеркало 22, направляющее пучок в окуляр 26 с сеткой 25.

При выборе выходных диафрагм необходимо учитывать два основных требования. С одной стороны, для полного использования светового потока и площади фотокатода лучше работать с интерференционными полосами, ширина которых значительно превосходит апертуру. Однако в этом случае невозможно получить сдвиг фаз. Следовательно, в поле зрения должно находиться не менее  $1/4$  части полосы. С другой стороны, для получения максимально полезного светового сигнала ширина каждой щели должна быть равна половине ширины полосы, т. е. в поле зрения должно находиться  $3/4$  полосы. При этом из-за непрямолинейности движения каретки перекося одного из зеркал интерферометра относительно другого вызывает изменение ширины и наклона полос. Если же в поле зрения поместить  $n$  полос, выходную щель установить на половину ширины полосы, то влияние непрямолинейности будет уменьшено в  $n$  раз, но последнее приводит к уменьшению световых потоков на фотокатодах ФЭУ также в  $n$  раз.

В макете прибора для получения достаточных для работы электронных схем сигналов сначала были использованы многощелевые диафрагмы. Эксперименты показали, что даже при тщательном изготовлении таких диафрагм невозможно было получить коэффициент модуляции  $M > 50\%$ , в то время как в идеальном случае  $M = 64\%$ .

Применение многощелевой диафрагмы с  $m$  щелями дает увеличение сигнала меньше чем в  $m$  раз. Между тем требования к прямолинейности хода возрастают в  $m$  раз. Поэтому при данной прямолинейности хода каретки и глубине модуляции преимущество всегда остается на стороне единичной щели.

В приборе имеется набор диафрагм с единичными щелями, которые можно устанавливать в специальной оправе. Для согласования с наклоном интерференционных полос возможен поворот щелей в пределах  $\pm 15^\circ$ .

Световые потоки из-за потерь в интерферометре и ограничения поля зрения щелью малы ( $10^{-8}$ – $10^{-9}$  лм), поэтому для преобразования световых потоков можно использовать только фотоэлектронные умножители (ФЭУ).

Поскольку при остановке каретки интерферометра нужно сохранить информацию, в схеме применены усилители постоянного тока.

Тип ФЭУ выбирали с учетом максимальной спектральной чувствительности к линиям  $\text{Hg}^{198}$ . Фотоэлектронные умножители типов ФЭУ-27, ФЭУ-14Б, ФЭУ-15, ФЭУ-32, выпускаемые отечественной промышленностью, имеют максимальную спектральную чувствительность к  $\lambda \approx 500$  нм. В преобразователе был использован ФЭУ-27, так как его интегральная чувствительность при одинаковых напряжениях питания

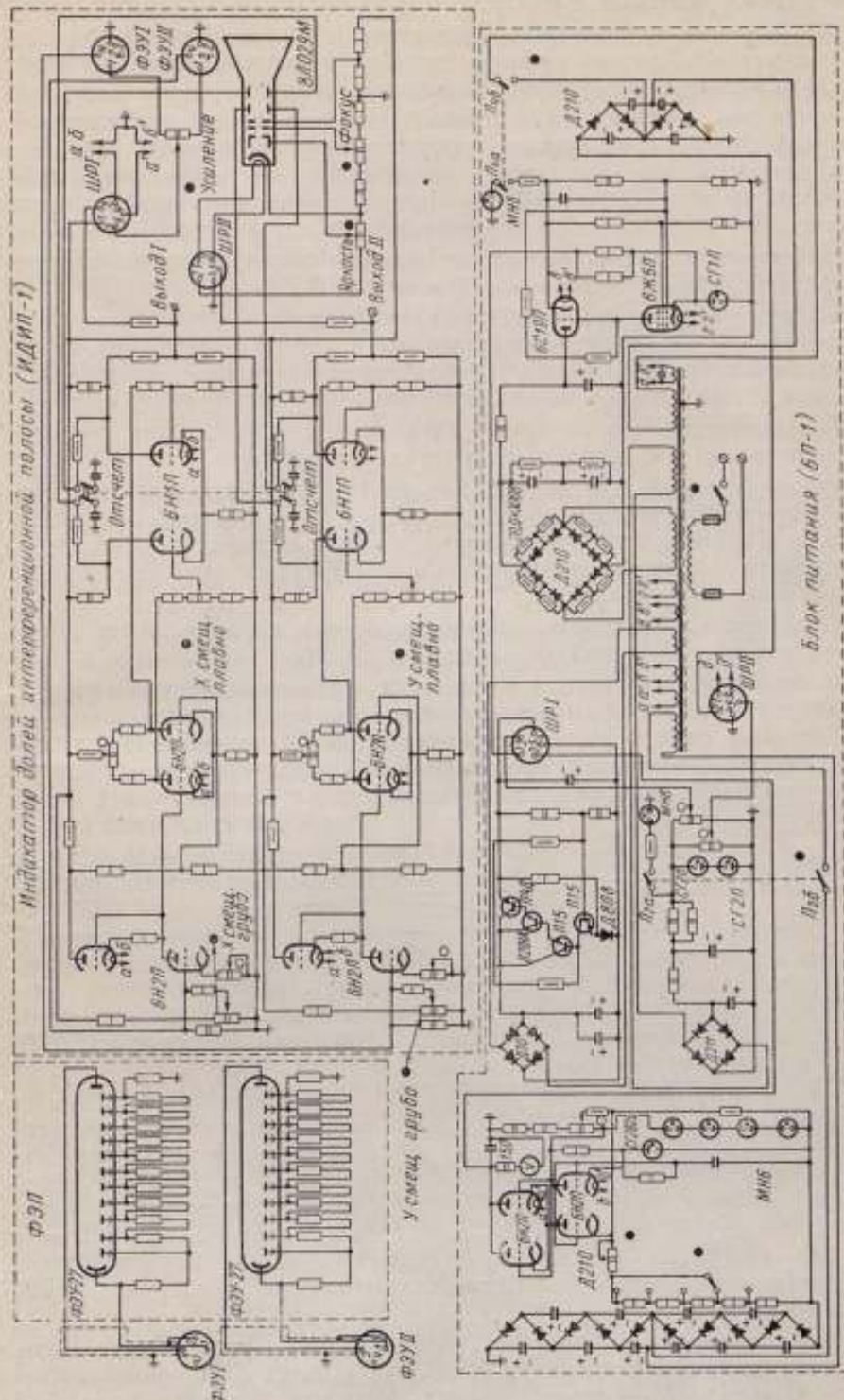


Рис. 2. Принципиальная схема индикатора долей интерференционной полосы (ИДИП-1) и блока питания (БП-1).

больше, а темновой ток меньше. Это дает возможность работать при более слабых световых потоках.

ФЭУ работает при анодных токах меньше 0,1 ма. Поэтому для снижения его тока питания принято суммарное сопротивление делителя в 2,2 раза большее, чем рекомендованное в паспорте.

Специально разработанный простой высоковольтный стабилизатор, питающий ФЭУ, обеспечивает постоянный коэффициент усиления. Нестабильность его выходного напряжения не превышает 0,02%, а напряжение пульсации 0,001%. При регулировании коэффициента усиления ФЭУ выходное напряжение изменяется в пределах 700—1500 в.

Уравнивание выходных электрических сигналов осуществляется перераспределением высокого напряжения между ФЭУ.

Конструктивно фотоэлектрический преобразователь выполнен в виде отдельного узла с жестким креплением к корпусу интерферометра. Он соединен гибкими кабелями с усилителями постоянного тока (УПТ), на входах которых включены сопротивления нагрузки (рис. 1).

Для увеличения как полезного сигнала, так и отношения сигнал—шум желательно увеличивать сопротивления нагрузки.

Наличие входной шунтирующей емкости при увеличении сопротивления нагрузки уменьшает полезный сигнал с возрастанием скорости движения каретки, что ограничивает максимальную скорость счета. Поэтому для соединения преобразователя с УПТ выбран коаксиальный кабель РК-50 ( $C_n = 25 \text{ пф/м}$ ).

Результирующая емкость нагрузки получена порядка 80 пф, и сопротивления нагрузки выбраны равными 2,2 Мом.

Так как световой сигнал от интерференционной картины состоит из полезной переменной составляющей и постоянного среднего уровня, электрический сигнал на нагрузке ФЭУ соответственно имеет те же составляющие. Постоянная составляющая компенсируется на входах УПТ путем подачи положительного напряжения, снимаемого с регулируемых сопротивлений.

Усилители выполнены по балансным схемам (рис. 2). Первый каскад УПТ построен по схеме последовательного баланса, а два других — по схемам параллельного баланса. Общий коэффициент  $K$  усиления УПТ равен 10 000.

Использование балансных схем и стабилизированных источников питания на катодных и анодных цепях дает возможность уменьшить дрейф УПТ до 1 мв/ч

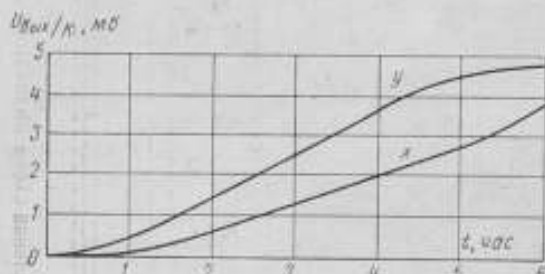


Рис. 3. Характеристика приведенного ко входу дрейфа усилителей постоянного тока по каналам  $x$  и  $y$ .

(рис. 3), где  $U_{\text{вых}}/K$  — дрейф, приведенный к входу. Следовательно, УПТ позволяют работать при сигналах, снимаемых с нагрузки ФЭУ, порядка 3—5 мв.

Частотные характеристики УПТ и всего тракта усиления от фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) до выхода УПТ представлены на рис. 4, где  $K_f/K_0$  — отношение коэффициента усиления на любой частоте к коэффициенту усиления по постоянному току. Из графика

видно, что сигнал уменьшается в 2 раза при скорости перемещения интерференционных полос, равной 1000 *полос/сек*. Применение ФЭП с большей полосой пропускания (рис. 4,  $K_f/K_0$  без ФЭП) позволит увеличить скорость счета в 1,5 раза. Но уже при существующей граничной частоте  $f_{гр} = 800$  *гц* отношение сигнал — шум приближается к трем при полезном сигнале 5 *мв*.

С выхода УПТ два электрических сигнала, сдвинутых относительно друг друга на 90°, поступают на одностабильные триггеры (рис. 1), на выходе которых получаются прямоугольные импульсы. Компенсация постоянной составляющей на входе триггеров осуществляется подачей отрицательного смещения от отдельного источника отрицательного напряжения — 200 *в*.

Каждой интерференционной полосе соответствует один период синусоидального сигнала и соответственно один прямоугольный импульс.

В одном из каналов прямоугольный импульс дифференцируется в дифференцирующей цепочке и поступает на фазоинверсный каскад, с двух выходов которого снимаются импульсы, сдвинутые относительно друг друга на 180°.

На вход формирующих каскадов поступают одновременно прямоугольные и продифференцированные импульсы.

В зависимости от фазовых соотношений входных сигналов, т. е. от того, какой из сигналов опережает другой на 90°, на входах формирующих каскадов действуют импульсы сложной формы.

Уровень срабатывания формирующих каскадов выбран таким, что на выходе получается импульс только тогда, когда полярности прямоугольного и дифференцированного импульсов совпадают. Таким образом решена задача однозначности направления счета.

С выхода формирующих каскадов снимаются и поступают на реверсивный счетчик положительные и отрицательные импульсы. Для двунаправленного счета разработан декатронный реверсивный счетчик типа РСДК-1 с объемом счета 10<sup>6</sup> импульсов. Счетчик выполнен на декатронах типа ОГ4 в виде отдельного прибора со схемой формирования импульсов и блоком контроля. Декатроны не приспособлены для реверсивного счета, поэтому задача сложения и вычитания импульсов решена в схеме, что сильно усложнило счетчик. Последний имеет неравномерное распределение скорости реверса по декадам вследствие различных скоростей прохождения импульсов счета и управления реверсом. Максимальная скорость однонаправленного счета равна 1300 *имп/сек*, в то время как скорость реверсивного счета по декадам равна: для первой 1300 *имп/сек*, второй 1200 *имп/сек*, третьей 1000 *имп/сек*, для остальных от 700 до 400 *имп/сек*. Когда нижний одностабильный триггер находится в состоянии с высоким потенциалом на выходе, а верхний — на пороге срабатывания, шумы вызывают срабатывание триггера, причем каждому шумовому импульсу соответствует появление на выходе формирующих каскадов одного импульса на сложение и другого — на вычитание.

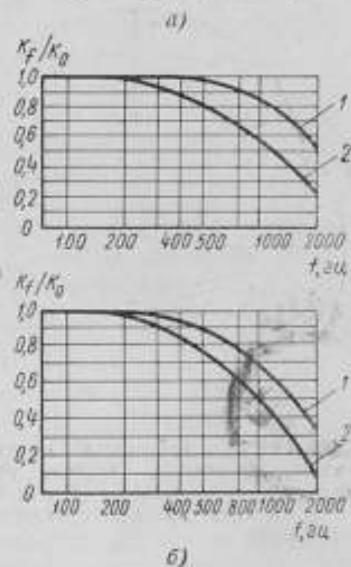


Рис. 4. Частотные характеристики усилителей постоянного тока по каналам  $y$  (а) и  $x$  (б) собственные (1) и с фотоэлектрическим преобразователем (2).

Поэтому при правильной работе счетчика алгебраическая сумма импульсов от шумов равна нулю.

Снижение скорости реверса по декадам приводит к просчетам в последующей декаде, если все предыдущие декады установлены в положение 9—0 и схема формирования импульсов находится в состоянии работы от шумов.

Вероятность попадания в точку просчета с повышением номера декады резко уменьшается. Практически получение шумового сбоя возможно для верхних декад, начиная с четвертой.

Вариации показаний реверсивного счетчика, обусловленные отклонениями штриховых мер от номинала, находятся в пределах первых двух декад, поэтому шумовой сбой верхних декад классифицируется как грубый промах, который можно легко обнаружить и исправить в результатах измерений.

Для повышения точности измерения длины установка имеет индикатор дробных частей интерференционной полосы. В качестве последнего использована электронно-лучевая трубка ЭЛТ. Принцип определения дробной части полосы заключается в измерении относительной фазы геометрической суммы двух синусоидальных сигналов от интерференционных полос, сдвинутых относительно друг друга на  $90^\circ$ .

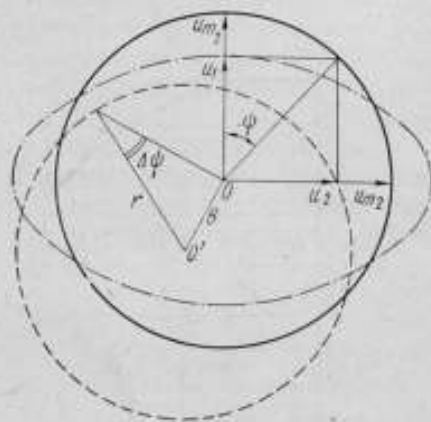


Рис. 5. Искажения картины на экране электронно-лучевой трубки, приводящие к появлению погрешностей отсчета дробных частей.

Электрические синусоидальные сигналы с УПТ (приблизительно равные), сдвинутые по фазе на  $90^\circ$  и подаваемые на отклоняющие пластины ЭЛТ, вызывают перемещение светового пятна на экране по окружности. Один оборот светового пятна соответствует перемещению зеркала интерферометра на  $\lambda/2$ . В общем виде дробная часть полосы в долях окружности (рис. 5) равна

$$d = \frac{\psi}{2\pi} = \frac{\text{arctg}(U_2/U_1)}{2\pi},$$

где сигналы по первому и второму каналам равны

$$U_1 = U_{01} + U_{m1} \cos \frac{2\pi}{m} x,$$

$$U_2 = U_{02} + U_{m2} \sin \frac{2\pi}{m} x.$$

Здесь  $U_0$  — постоянная составляющая;

$U_m$  — амплитуда переменной составляющей;

$m$  — ширина изображения интерференционной полосы;

$x$  — перемещение интерференционной полосы в плоскости щели, которое однозначно связано с перемещением подвижной каретки интерферометра.

Для идеального случая, когда  $U_{01} = U_{02} = 0$ ,  $U_{m1} = U_{m2}$  и сдвиг фаз равен  $90^\circ$ , дробная часть полосы  $d = \frac{x}{m}$ .

Если  $U_{m1} \neq U_{m2} \neq 0$ , а остальные условия соблюдаются, то это приводит к смещению центра окружности относительно центра отсчетной шкалы на  $b$  (рис. 5), т. е. к погрешности отсчета.



Если  $U_{m1} \neq U_{m2}$ , то окружность превращается в эллипс, и это тоже вызывает погрешность отсчета (рис. 5).

Погрешность возникает и тогда, когда не соблюдается угол сдвига фаз сигналов, т. е.

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \pm \Delta\varphi.$$

Теоретический анализ показал, что погрешность отсчета по индикатору долей интерференционной полосы (ИДИП-1) не превышает 0,05 интерференционной полосы при соблюдении следующих условий:

$$1) \frac{b}{r} \leq 0,3; \quad 2) 2 > \frac{U_{m2}}{U_{m1}} > 0,5; \quad 3) \Delta\varphi < \pm 15^\circ.$$

Перед измерениями, наклоняя относительное зеркало 8 (рис. 1), в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях, создавали угол клина, при котором в поле зрения наблюдались четыре интерференционные полосы. При этом ребро клина ориентировалось параллельно оси вращения зеркала 21. Согласование щелей с интерференционной картиной осуществляли поворотами втулок с укрепленными в них диафрагмами при снятых ФЭУ. После согласования сетка 25 окуляра устанавливается параллельно полосам. В дальнейшем это дает возможность согласовывать интерференционную картину со щелями без снятия ФЭУ путем ориентации полос относительно сетки 25.

Поверяемая шкала общеизвестными приемами устанавливается по ходу каретки. Затем проверяется чувствительность фотоэлектрического микроскопа по отклонению стрелки его индикатора при одновременном наблюдении смещения каретки по индикатору долей полосы. Обычно чувствительность 1÷1,5 полосы устанавливалась по отклонению стрелки индикатора микроскопа на половину шкалы.

Для шкалы Д-29 из инвара, интервалы которой измерялись методом счета интерференционных полос, была определена погрешность наведения на штрих. При различной чувствительности индикатора фотоэлектрического микроскопа и использовании для отсчетов индикатора дробных частей средняя квадратичная погрешность ряда из 10 наведений находилась в пределах 0,006—0,010 мкм.

Для стабилизации режима электронная аппаратура и питание источника включаются за полчаса до измерений. Непосредственно перед измерением включают высоковольтное питание ФЭУ и, чтобы вывести световое пятно на экран, компенсируют постоянную составляющую входного сигнала. При перемещении каретки интерферометра на экране ЭЛТ наблюдается фигура Лиссажу, и производится "точная" компенсация по совмещению центра фигуры с центром экрана. Поворотом зеркала 21 и уравниванием электрических сигналов уравнивают на экране окружность.

Интервал штриховой меры измеряли следующим образом. Подачей каретки начальный штрих шкалы устанавливали по нулевому показанию фотоэлектрического микроскопа. Показания счетчика полос сбрасывали на нуль, а по индикатору дробных частей полосы производили отсчет  $d_0$ . Затем каретку со шкалой последовательно перемещали до следующих штрихов измеряемых интервалов и снимали показания  $N_i$  — по счетчику целых и  $d_i$  — по индикатору дробных частей полосы.

Длина измеряемого интервала равна

$$L_i = (N_i + d_i - d_0) \frac{\lambda}{2}.$$

Измерение проводили в термостатированном помещении, но электронная аппаратура находилась вблизи интерферометра (рис. 6).

Результаты измерений миллиметровых интервалов шкалы Д-29 приведены в табл. 1. Вспомогательная шкала 1,0 мм меры была измерена по интервалам через 0,1 мм.

Таблица 1

| Интервалы<br>шкалы, мм       | 0-1      | 0-2      | 0-3       | 0-4       | 0-5       |
|------------------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Длина интервалов в импульсах | 3 661,70 | 7 321,05 | 10 987,95 | 14 650,90 | 18 313,30 |
|                              | 70       | 15       | 90        | 90        | 30        |
|                              | 70       | 15       | 95        | 95        | 35        |
|                              | 75       | 20       | 10 988,00 | 95        | 30        |
|                              | 75       | 20       | 00        | 95        | 40        |
|                              | 75       | 15       | 05        | 95        | 35        |
|                              | 75       | 10       | 05        | 14 651,00 | 35        |
|                              | 75       | 15       | 05        | 14 650,95 | 35        |
|                              | 80       | 20       | 05        | 14 651,00 | 35        |
|                              | 80       | 10       | 00        | 14 650,95 | 35        |
| Среднее<br>в импульсах<br>мм | 3 661,75 | 7 321,15 | 10 988,00 | 14 650,95 | 18 313,35 |
|                              | 0,99980  | 1,99884  | 3,00015   | 4,00028   | 5,00026   |

Продолжение табл. 1

| Интервалы<br>шкалы, мм                         | 0-6       | 0-7       | 0-8       | 0-9       | 0-10      |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Длина интервалов в импульсах                   | 21 975,05 | 25 637,80 | 29 301,15 | 32 963,80 | 36 626,40 |
|  | 0,5       | 50        | 10        | 85        | 40        |
|  | 05        | 80        | 15        | 80        | 35        |
|  | 10        | 80        | 20        | 80        | 35        |
|  | 10        | 85        | 20        | 85        | 35        |
|  | 10        | 90        | 25        | 90        | 50        |
|  | 10        | 90        | 25        | 95        | 50        |
|  | 05        | 80        | 20        | 90        | 50        |
|  | 10        | 80        | 20        | 80        | 50        |
|  | 10        | 95        | 20        | 95        | 50        |
| Среднее<br>в импульсах<br>мм                   | 21 975,10 | 25 637,80 | 29 301,20 | 32 963,85 | 36 626,4  |
|  | 5,99979   | 7,00016   | 8,00037   | 9,00043   | 10,00046  |
| Примечание. 1 мм = $\lambda/2 = 0,273039$ мкм. |           |           |           |           |           |

Для определения внутренней сходимости результаты десятикратных измерений 10 интервалов шкалы рассматривали как одну совокупность равнозначных измерений.

Средняя квадратичная погрешность  $\sigma$  одного измерения интервала шкалы методом счета полос оказалась равной при измерении через 1 мм 0,02 мкм и через 0,1 мм 0,03 мкм. Смещение нуля в процессе измерения не превышало 0,03 мкм за 30 мин, хотя температурные условия измерения были недостаточно благоприятны из-за нагрева электронной аппаратуры и в особенности двигателя каретки.

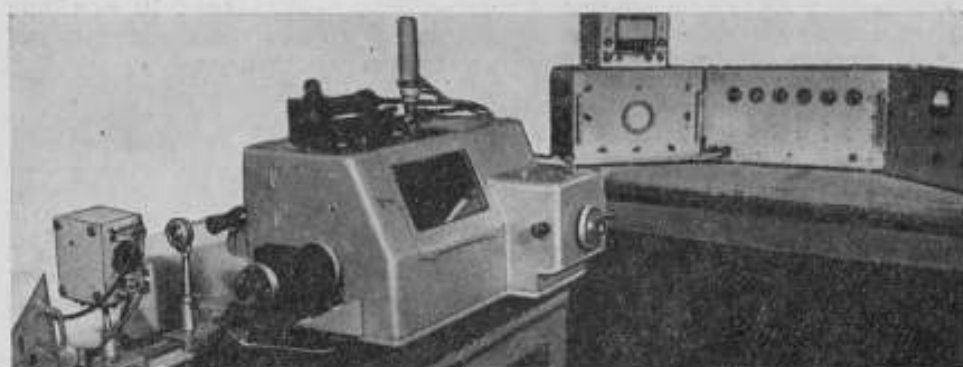


Рис. 6. Общий вид макета установки.

Каретку интерферометра можно перемещать электродвигателем через редуктор и винт микроподачи. Вследствие вибраций сигнал интерференции с наложенными на него вибрационными шумами не позволял работать при скоростях счета больше 250 имп/сек. При перемещении каретки от руки скорость доводилась до 500 имп/сек.

Таблица 2

| Интервалы шкалы, мм | Отклонения длины от номинала, определенные при измерении, мкм |                         | Интервалы шкалы, мм | Отклонения длины от номинала, определенные при измерении, мкм |                         |                         |
|---------------------|---|-------------------------|---------------------|---|-------------------------|-------------------------|
|                     | счетом интерференционных полос                                | по эталону Фабри — Перо |                     | счетом интерференционных полос                                | по эталону Фабри — Перо | по концевым мерам длины |
| 0—0,1               | +0,07   | +0,08                   | 0—1                 | -0,20   | -0,19                   | -0,19                   |
| 0,2                 | +0,07   | -0,06                   | 2                   | -1,16   | -1,01                   | -1,02                   |
| 0,3                 | -0,45   | -0,38                   | 3                   | +0,15   | +0,08                   | +0,13                   |
| 0,4                 | -1,11   | -1,17                   | 4                   | +0,28   | +0,19                   | +0,14                   |
| 0,5                 | -1,59   | -1,60                   | 5                   | +0,26   | +0,08                   | +0,17                   |
| 0,6                 | -2,21   | -2,21                   | 6                   | -0,21   | -0,12                   | -0,01                   |
| 0,7                 | -1,89   | -1,86                   | 7                   | +0,16   | +0,02                   | -0,07                   |
| 0,8                 | -1,12   | -1,14                   | 8                   | +0,37   | +0,50                   | +0,45                   |
| 0,9                 | -0,74   | -0,76                   | 9                   | +0,43   | +0,37                   | +0,45                   |
| 1,0                 | -0,43   | -0,49                   | 10                  | +0,46   | +0,54                   | +0,44                   |

В табл. 2 для сопоставления приведены результаты измерения интервалов шкалы по трубчатому эталону Фабри — Перо и по концевым мерам. Среднее расхождение результатов, полученных методом счета полос,

и результатов измерения по концевым мерам равно

$$|\bar{\Delta}_f| = 0,09 \text{ мкм},$$

при наибольшем

$$|\bar{\Delta}|_{\max} = 0,23 \text{ мкм}.$$

Среднее расхождение с результатами, полученными однократным измерением шкалы по эталону Фабри — Перо, составляет 0,10 мкм, при наибольшем 0,18 мкм. Для вспомогательной шкалы среднее расхождение результатов, полученных двумя методами, составляет

$$|\bar{\Delta}_f| = 0,05 \text{ мкм},$$

при наибольшем

$$|\Delta|_{\max} = 0,13 \text{ мкм}.$$

Несмотря на высокую сходимость результатов, полученных при измерениях в одинаковых условиях ( $\tau = 0,03 \text{ мкм}$ ), измерения при изменении условий дали расхождения до 0,14 мкм. Это указывает на возможность неисключенных систематических погрешностей, причины которых нужно исследовать.

Дальнейшее развитие работ предусматривает усовершенствование всей аппаратуры для увеличения пределов и автоматизации измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Root E., Патент США 2. 604004, выданный 22 июля 1952 г.
2. Peck E. R. and Obetz S. W., Wavelength or Length Measurement by Reversible Fringe Counting, Journal of the Optical Society of America, v. 43, № 6, 1953.
3. Branin F. H., A Bidirectional Electronic Counter for Use in Optical Interferometry, Journal of the Optical Society of America, v. 43, № 10, 1953.
4. Ko Hara and Smith D. S., Length Measurement by Fringe Counting, The Review of Scientific Instruments, v. 30, № 8, 1959.
5. Cook H. D. and Marzetta L. A., An Automatic Fringe Counting Interferometer for Use in the Calibration of Line Scales, Engineering and Instrumentation, v. 65C, № 2, 1961.
6. Коронкевич В. П., Трулев Ю. И., Счетчик интерференционных полос для измерения малых длин, «Измерительная техника», № 8, 1959.
7. Коронкевич В. П., Трулев Ю. И., Фотоэлектрическое устройство для измерения длины с помощью счета интерференционных полос, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 47(107), 1961.
8. Трофимова Н. В., Интерференционный метод измерения шкал до 200 мм, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 47(107), 1961.

Поступила в редакцию  
20/VII 1964 г.

## ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП

*В статье описан принцип работы и схема фотометрического фотоэлектрического микроскопа. Рассмотрены некоторые соотношения для преобразователя светового потока в электрический сигнал. Приведены экспериментальные данные об испытании фотоэлектрического микроскопа.*

При измерениях точных штриховых мер микроскоп с окулярной маркой долгое время был единственным средством для наведения на штрихи. Точность наведения на штрих по биссектору или другой окулярной марке ограничивается разрешающей способностью микроскопа и зависит от индивидуальных особенностей наблюдателя. В последнее время вместо визуального наблюдения штрихов применяют метод фотоэлектрической регистрации положения штриха меры, что исключает субъективные ошибки и значительно повышает точность наведения. В основу действия всех фотоэлектрических микроскопов положен принцип преобразования изменения светового потока, которое происходит при смещении штриха меры, в пропорциональное изменение электрического напряжения или тока. В настоящее время разработаны и применяются различные принципы устройства и конструктивные варианты фотоэлектрических микроскопов [1—2].

Во ВНИИМ разработан фотометрический микроскоп, принципиальная схема которого представлена на рис. 1. Свет от источника 3 через конденсор, призму-кубик 2 и объектив микроскопа 1 освещает поле меры. Увеличенное изо-

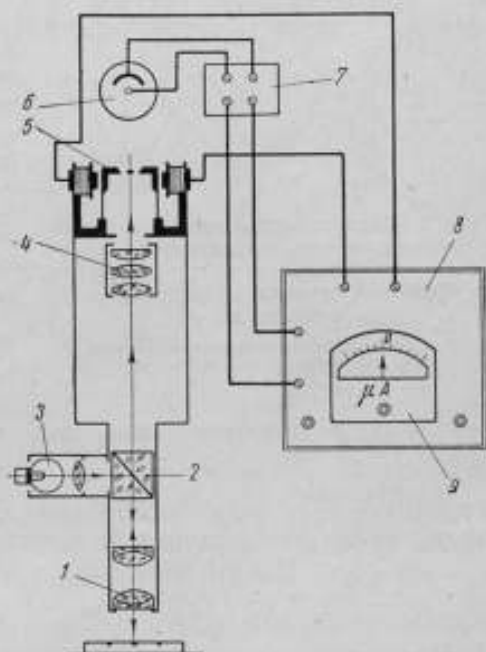


Рис. 1. Принципиальная схема фотоэлектрического микроскопа.

бражение штриха через объектив 1 и окуляр 4 проектируется в плоскости щели вибратора 5. Электромагниты вибратора, питаемые напряжением с частотой сети 50 гц, через два полупроводниковых диода возбуждают колебания щели той же частоты, обеспечивая модуляцию светового потока. Электронная часть микроскопа состоит из фотопреобразователя 6, усилителя 7, фазочувствительного выпрямителя (демодулятора) 8 и стрелочного прибора 9.

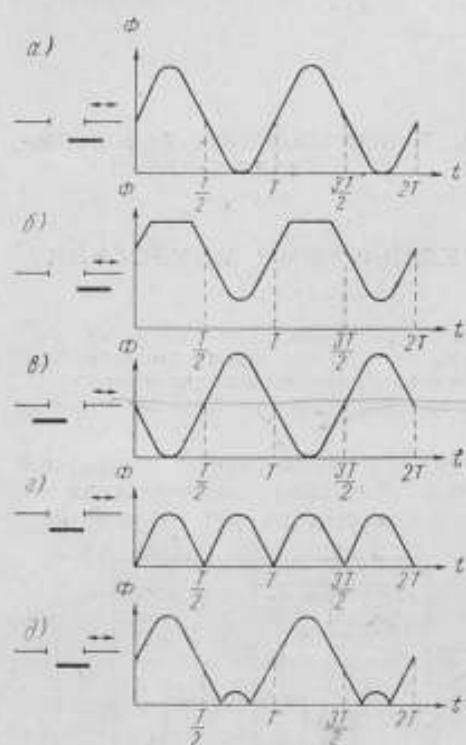


Рис. 2. Характер изменения светового потока на выходе модулятора в зависимости от относительного смещения изображения штриха и центра колебаний щели.

$\Phi$  — световой поток на выходе модулятора,  
 $T$  — период колебаний вибратора.

литуде. Если смещение произошло на ту же величину, но в обратную сторону:  $\Delta x = -\frac{c}{2}$  (в), то фаза сигнала изменяется на  $180^\circ$ . В случае  $\Delta x = 0$  (г), т. е. когда центр штриха совпадает с центром колебаний щели, амплитуда колебаний сигнала уменьшается вдвое, а основная частота удваивается. При отклонении  $\Delta x < \frac{c}{2}$  (д) в сигнале появляются составляющие как основной, так и двойной частоты.

Используя кольцевой фазочувствительный выпрямитель, коммутируемый напряжением с частотой сети, получим постоянный ток, зависящий только от наличия в сигнале составляющей 50 гц (и всех нечетных гармоник) и не зависящий как от составляющей 100 гц, так и от всех четных гармоник. Поэтому магнитоэлектрический прибор, включенный на выходе демодулятора, при точном наведении на штрих, т. е. при

Периодические колебания щели вибратора относительно изображения штриха вызывают модуляцию светового потока. Модулированный световой поток падает на фотопреобразователь, вызывая пропорциональные изменения фототока, усиливаемые затем в усилителе. Форма модулированного электрического сигнала определяется рядом факторов: с одной стороны — распределением освещенности в направлении колебаний щели, соотношением размеров щели и изображения штриха, характером и амплитудой колебаний щели [3], с другой стороны — линейностью амплитудной и частотной характеристик фотозлектрического преобразователя и усилителя.

На рис. 2 показан характер изменения светового потока в зависимости от смещения  $\Delta x$  оси изображения штриха по отношению к центру колебания щели, равной ширине изображения штриха  $c$ . Амплитуда колебания равна половине ширины щели. При смещении  $\Delta x = \frac{c}{2}$  (а) получается сигнал, изменяющийся с частотой колебаний вибратора, при  $\Delta x > \frac{c}{2}$  (б) сигнал, сохраняя ту же основную частоту, оказывается ограниченным по амплитуде.

$\Delta x = 0$  (з), будет показывать нуль. При отклонении от положения точного наведения на штрих в сигнале возникает составляющая основной частоты, которая вызовет появление выпрямленного тока, отклоняющего стрелку прибора в сторону, соответствующую смещению  $\Delta x$  от положения равновесия, так как фаза этой составляющей будет зависеть от направления смещения ( $a$  и  $b$ ).

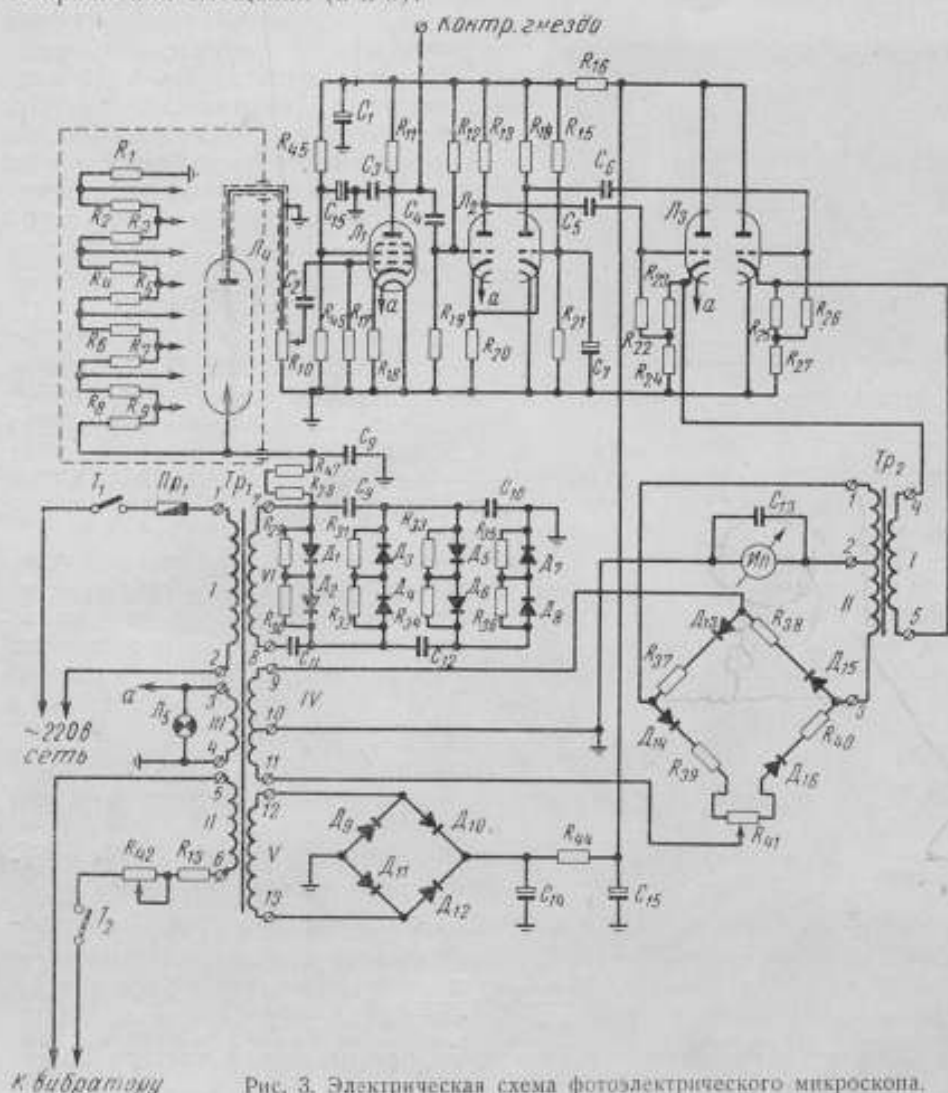


Рис. 3. Электрическая схема фотоэлектрического микроскопа.

В качестве фотопреобразователя в фотоэлектрическом микроскопе (рис. 3) применен фотоэлектронный умножитель ФЭУ-31 ( $L_1$ ), питаемый выпрямителем с 4-кратным умножением напряжения от изолированной обмотки VI сетевого трансформатора  $Tr_1$ , с конденсаторами  $C_9-C_{12}$  и диодами  $D_1-D_5$ . Фотоумножитель ФЭУ-31 имеет сравнительно малые размеры при высокой чувствительности порядка  $1 \text{ а/лм}$  и напряжении питания  $1000 \text{ в}$ . Усилитель переменного тока, получающий сигнал от ФЭУ с делителя напряжения (трехзажимный реостат  $R_{10}$ ), включенного нагрузкой ФЭУ для регулирования чувствительности, имеет три каскада: 1-й каскад — усилитель на сопротивлениях на пентоде БЖП ( $L_1$ ),

2-й каскад — парафазный усилитель на двойном триоде 6НЗП ( $L_2$ ) и 3-й каскад — катодные повторители на лампе 6НЗП ( $L_3$ ) — питаемый противофазными напряжениями сигнала, между катодами которых включен выходной трансформатор  $Tr_2$ . Кольцевой фазочувствительный выпрямитель получает сигнал со вторичной обмотки  $Tr_2$  и коммутирующее напряжение — с обмотки IV сетевого трансформатора  $Tr_1$ . Между



Рис. 4. Общий вид вибратора.

средними точками обмоток включен прибор М-24 с сопротивлением порядка 900 ом и шкалой 50—0—50 мкА, шунтированный конденсатором  $C_{13}$  емкостью 1000 мкФ. Для уменьшения нагрузки коммутирующей обмотки в плечах фазочувствительного выпрямителя включены последовательно сопротивления  $R_{37}$ — $R_{40}$  по 1,5 ком и для уравнивания демодулятора — трехзажимный реостат  $R_{41}$ .

Чтобы уменьшить возможность появления наводки с частотой 50 гц, в питание ФЭУ включен дополнительный фильтр, состоящий из конденсатора  $C_8$  и двух сопротивлений  $R_{47}$  и  $R_{28}$ . Уси-

литель питается от двухполупериодного мостового выпрямителя, имеет фильтр на выходе и дополнительно фильтр в цепи питания первых двух каскадов.

При разработке вибратора (рис. 4) были приняты все меры для того, чтобы облегчить его подвижную часть (щель) и поднять собственную частоту до 110—120 гц. Степень успокоения вибратора мала:  $\beta = 0,01 \div 0,02$ . Поэтому при возбуждении частотой 50 гц он практически не изменяет амплитуду колебаний при изменении частоты.

Так как

$$\Theta_{\omega m} = \Theta_{0 m} \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2\beta\eta)^2}},$$

где  $\Theta_{\omega m}$  и  $\Theta_{0 m}$  — амплитуды колебаний при угловой частоте  $\omega$  и при  $\omega \rightarrow 0$ ;

$\eta$  — относительная частота — отношение частоты вынужденных колебаний к собственной частоте вибратора  $\omega_0$ ,

и учитывая, что при  $\eta < 0,5$  и  $\beta = 0,01 \div 0,02$  можно пренебречь вторым подкоренным членом, получим

$$\frac{\Theta_{\omega m}}{\Theta_{0 m}} = \frac{1}{1 - \eta^2}.$$

Относительное изменение амплитуды при изменении частоты вынужденных колебаний

$$\gamma_0 = \frac{1}{1 - \eta^2} \gamma_{\eta}$$

при  $\eta < 0,5$  не будет превышать 1,3  $\gamma_{\eta}$ . Еще более существенно, что угол  $\psi$  отставания колебаний вибратора от вынуждающей силы, равный

$$\psi = \text{arctg} \frac{2\beta\eta}{1 - \eta^2},$$

при  $\eta = 1$  всегда равен 90°, между тем при  $\eta = 0,5$  и малых  $\beta$  угол

$$\psi = \frac{2\beta\eta}{1 - \eta^2} < 1,3\beta,$$



т. е. равен всего  $2\div 3^\circ$ , и не изменяется существенно при колебаниях частоты.

Для контроля правильности фокусировки микроскопа и расположения штриха по отношению к щели имеется окуляр, в который с помощью полупрозрачного кубика отводится меньшая часть светового потока от штриха. Положение визира в поле зрения окуляра согласовано с положением центра колебаний в поле зрения щели.

Фотокатод ФЭУ располагается в 2 см от плоскости щели, так что свет, прошедший через щель, рассеивается по значительной поверхности фотокатода. Это уменьшает влияние изменения местной чувствительности фотокатода на изменение величины тока при перемещении по нему светового пятна. Кроме того, рассеянное магнитное поле вибратора при таком расстоянии не вызывает магнитной модуляции тока ФЭУ. Общий вид фотоголовки и блока электроники показан на рис. 5.



Рис. 5. Общий вид фотоголовки и блока электроники.

Основным достоинством фотоэлектрического микроскопа является наличие только одного канала. При равенстве световых потоков, проходящих правее и левее штриха, т. е. при совпадении центра колебания щели с центром штриха, нулевое показание не зависит от изменений накала лампы, чувствительности фотоумножителя и усиления усилителя, хотя от всех этих факторов зависит чувствительность фотоэлектрического микроскопа.

Вторым важнейшим достоинством фотоэлектрического микроскопа является его высокая избирательность, достигнутая за счет применения фазочувствительного выпрямителя и инерционности магнитоэлектрического прибора и выходного фильтра. Это обеспечивает полосу пропускания порядка 1 гц и существенно ослабляет влияние шумов, особенно значительных у фотоумножителей. Причинами, вызывающими смещение нуля фотоэлектрического микроскопа, могут быть следующие:

1. Неравномерное освещение поля меры.
2. Смещение микроскопа относительно штриховой меры вследствие недостаточной жесткости крепления его.

По этой причине пришлось отказаться от откидного зеркала для визуального наблюдения штриха через окуляр и заменить его полупрозрачным кубиком, хотя это привело к некоторой потере чувствительности.

3. Смещение центра колебаний щели вибратора, обусловленное некоторой асимметрией его изготовления.

Особенно существенным является качество плоских стальных пружин, на которых закрепляется щель, их подобие и симметрия расположения электромагнитов. При увеличении амплитуды колебаний за счет асимметрии происходит смещение центра колебаний в сторону электромагнита с меньшим зазором между полюсом и якорем.

4. Наводка напряжения с частотой 50 гц в тракте усилителя, вызывающая смещение нуля.

Эти наводки снижаются экранированием и фильтрами в питании. При постоянстве наводок неправильно настраивается нуль прибора, а при изменении общей чувствительности (из-за любых причин) происходит изменение положения нуля.

5. Нарушение уравновешенности фазочувствительного выпрямителя, обусловленное некоторой асимметрией диодов и изменением их характеристик с прогревом.

Лучшие результаты получаются в случае применения специально отбираемых кремниевых диодов.

В процессе отработки опытных образцов микроскопов исследовалась их чувствительность, точность наведения на штрихи и стабильность положения нуля. Точность наведения и чувствительность определялись на специальном приспособлении с интерференционным отсчетным устройством. При соблюдении оптимальных условий для модулятора (ширина щели равна ширине изображения штриха) и освещении штриха лампочкой напряжением 2,5 в при токе 0,45 а имела место средняя квадратичная погрешность наведения  $0,008 \div 0,01$  мкм. Чувствительность микроскопа при этих условиях составляла  $0,003 \div 0,005$  мкм на 1 мка.

Чтобы исключить возможные температурные погрешности, при испытании стабильности нуля применялась специальная инварная насадка со штрихом на зеркальной площадке, которая крепилась на оправе объектива микроскопа. Испытания показали, что нулевое положение стрелки микроамперметра при непрерывной работе микроскопа в течение 2 ч изменялось в пределах 3-5 делений шкалы, что соответствовало  $0,016 \div 0,025$  мкм.

Заводом «Эталон» уже изготовлено несколько микроскопов описанной конструкции, которые успешно применяются на интерференционных компараторах для измерения штриховых мер длины и могут быть использованы во всех случаях, где требуется точная и быстрая установка на штрихи меры или другие отсчетные устройства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дубиновский А. М., Фотоэлектрические микроскопы для объективной наводки на штрихи шкал, ч. I и II, «Оптико-механическая промышленность», № 6 и 11, 1961.
2. Феклистов Е. М., Фотоэлектрические микроскопы, «Измерительная техника», № 12, 1962.
3. Михайлова М. Г., Об оптимальных условиях работы сканирующих устройств при фотоэлектрической регистрации, «Измерительная техника», № 1, 1963.

Поступила в редакцию  
10/XI 1963 г.

**ДВОЙНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП  
ДЛЯ КОМПАРИРОВАНИЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ  
ШТРИХОВЫХ МЕР ДЛИНЫ**

*В статье описан двойной фотоэлектрический микроскоп для компарирования подразделений штриховых мер длины. Исследована точность и приведены результаты измерений на нем. Применение фотоэлектрического микроскопа может в несколько раз повысить производительность компарирования подразделений штриховых мер, а также дает возможность снизить погрешности результатов измерений.*

За последние годы значительно расширилось применение точных штриховых мер длиной до 1 м и более в качестве шкал, встраиваемых непосредственно в приборы или станки и являющихся их исходными мерами. От точности изготовления и поверки этих штриховых мер в значительной степени зависит точность приборов и станков. При наладке и поверке точности станков также пользуются штриховыми мерами.

Штриховые меры многоразмерны и поверяют обычно все их подразделения. Метрологические компараторы, с помощью которых сличаются эталоны длины и калибруются их шкалы, как правило, не приспособлены для сплошной поверки миллиметровых подразделений и вследствие этого методы поверки очень трудоемки. Поэтому стало необходимым разработать производительные методы поверки подразделений мер длиной до 1 м с требуемой для практики точностью ( $\pm 0,2 \div 0,3$  мкм).

Повысить производительность поверки возможно путем автоматизации измерений штриховых мер, используя средства электроники, позволяющие создать высокочувствительные и малоинерционные измерительные системы. Последние годы как в СССР, так и за рубежом разрабатывались методы фотоэлектрического наведения на штрихи, которые имеют ряд преимуществ, выгодно отличающих их от методов визуального наведения.

Практически можно считать уже решенным вопрос о замене при измерении штриховых мер метода наведения на штрихи с помощью обычного микроскопа объективным методом наведения с помощью фотоэлектрического микроскопа.

Уже известно довольно много систем фотоэлектрических микроскопов [1-10]: фотометрических, фазовых, фазоимпульсных, различающихся по принципу преобразования измеряемой величины. Конструкции этих микроскопов, их недостатки и достоинства описаны во многих статьях.

В большинстве фотоэлектрические микроскопы являются однолучевыми и предназначаются для наведения на штрихи. Для измерения разности длин сличаемых образцовой и поверяемой мер такие микроскопы, как правило, применять невозможно. Предстояло создать конструкцию фотоэлектрического микроскопа, пригодного для непосредственного измерения разностей длин штриховых мер, сравниваемых на измерительной машине или компараторе. Причем, если в первых исследованиях [5] для этого использовали оптико-механические средства измерения малых разностей, то сейчас стояла задача создания электронного измерительного устройства, ибо применение фотоэлектрического микроскопа позволяет получить сигнал для ввода в автоматизированную систему отсчетного устройства. При этом было решено применить принцип продольного компарирования двух штриховых мер (одна из которых служит исходной).

Для автоматизации метода проверки штриховых мер на измерительной машине на основе анализа различных систем микроскопов и опытных исследований разработаны: 1) двойной фотоэлектрический микроскоп с двумя объективами и одним вибратором\* и 2) специальная электронная аппаратура для измерения разностей длин сравниваемых штриховых мер.\*\*

Принцип измерения разностей длин штриховых мер, сравниваемых с помощью двойного фотоэлектрического микроскопа, первый вариант которого уже описан [5], заключается в преобразовании длины в короткие интервалы времени, которые могут быть измерены радиотехническими средствами.

Двойной фотоэлектрический микроскоп (рис. 1) установлен на измерительной машине, стол которой с лежащими на нем мерами перемещается по направляющим с помощью ходового винта и гайки.

Сличаемые штриховые меры расположены параллельно на отдельных платформах. Каждая платформа имеет регулировочные устройства для установки мер по высоте, азимуту и длине. Электрическая аппаратура размещена на отдельном столе рядом с машиной.

Принцип действия двойного фотоэлектрического микроскопа следующий. Изображения штрихов сличаемых мер с помощью вибратора сканируют в плоскости неподвижной щели. В момент пересечения щели изображениями штрихов происходит модуляция светового потока, и в цепи фотоэлемента возникают импульсы тока. Если начальные штрихи сравниваемых мер предварительно были совмещены, а сличаемые интервалы мер равны, то изображения штрихов будут одновременно пересекать щель, и импульсы будут совпадать по времени. Когда сличаемые интервалы не равны, изображения штрихов образцовой и поверяемой мер пересекают щель с некоторым интервалом времени  $\tau$ , который пропорционален измеряемой разности длин.

Интервалы времени  $\tau$  между двумя импульсами измеряются по эталонной частоте с помощью электронного счетного устройства.

Действительная длина  $l_n$  интервалов шкалы поверяемой меры при проверке методом компарирования определяется по формуле

$$l_n = l_0 + \Delta l + l_0 (\alpha_0 - \alpha_n) (t - 20^\circ), \quad (1)$$

где  $l_0$  — длина соответствующего интервала образцовой меры;  
 $\alpha_0$ ,  $\alpha_n$  — температурные коэффициенты удлинения образцовой и поверяемой мер;

\* Авторское свидетельство № 156316 от 23 июня 1963 г.

\*\* Заявка № 807537/26—10 с приоритетом от 12 декабря 1962 г.

$\Delta l$  — измеренная при сличении разность длин мер;  
 $t$  — температура измерения.

Результаты измерения  $\Delta l$  с помощью двойного фотоэлектрического микроскопа могут быть представлены в общем виде формулой

$$\Delta l = k\tau, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент преобразования оптической и электронной частей микроскопа.

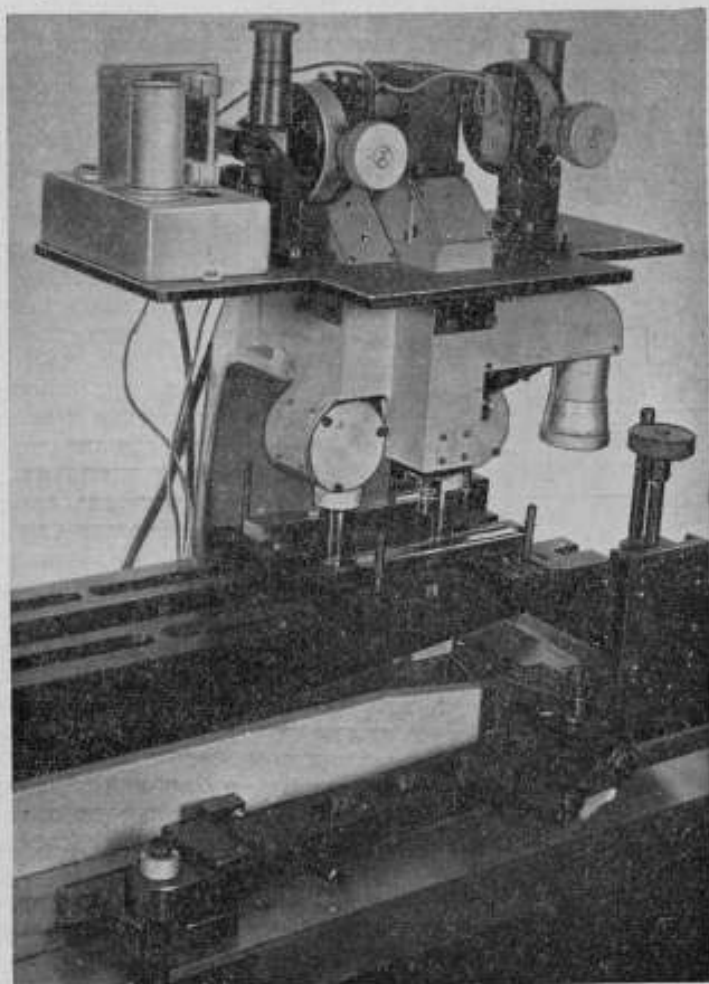


Рис. 1. Общий вид двойного фотоэлектрического микроскопа.

Так как промежуток времени  $\tau$  измеряем с помощью частоты эталонного генератора, то можно написать, что

$$\tau = N \frac{1}{f_n},$$

где  $f_n$  — частота эталонного генератора;

$N$  — измеренное число высокочастотных импульсов в интервале времени  $\tau$ .

Тогда

$$\Delta l = k \frac{1}{f_a} N,$$

или, вводя обозначение

$$\tau = \frac{k}{f_a}, \quad (3)$$

получим

$$\Delta l = \tau N, \quad (4)$$

где  $\tau$  — значение (цена) одного импульса в линейной мере.

Следовательно, для определения разности длин измеряемых мер необходимо не только сосчитать число высокочастотных импульсов в интервале  $\tau$ , но и знать значение (цену) одного импульса в линейной мере. Цена импульса зависит от увеличения оптической системы микроскопа, частоты и амплитуды колебания вибратора, скорости сканирования и от коэффициентов преобразования в блоках электронного отсчетного устройства.

Вычислить цену одного импульса  $\tau$ , пользуясь формулой (3), практически трудно, так как точное значение коэффициента  $k$  расчетным путем определяется только приближенно. Поэтому цена импульса определялась экспериментально.

Двойной фотоэлектрический микроскоп состоит из оптической системы, вибратора и фотодатчиков. Наблюдаемые в микроскоп (рис. 2) штрихи освещаются двумя лампами 11 типа МН, питаемыми постоянным током. Каждый световой пучок проходит по одному из

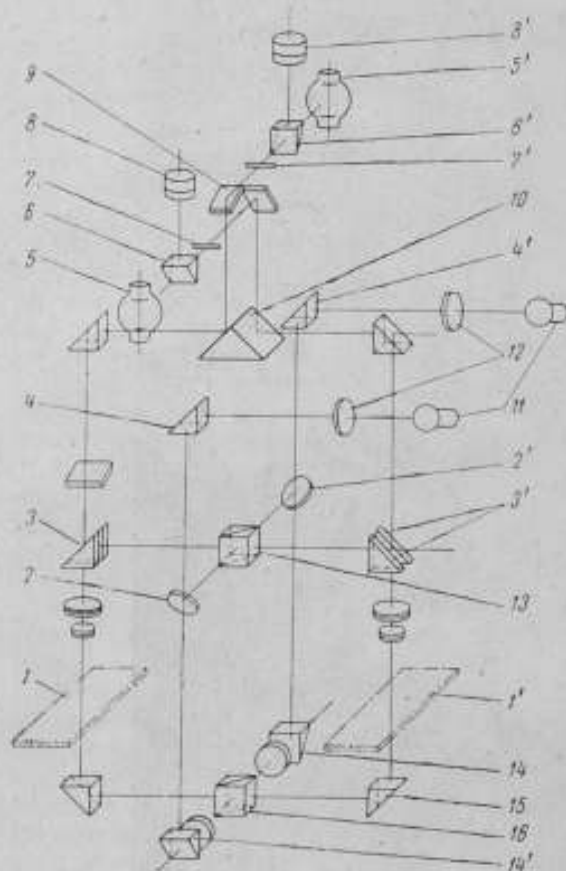


Рис. 2. Оптическая схема двойного фотоэлектрического микроскопа.

двух каналов. Конденсоры 12, призмы 4, 4' и зеркала 2, 2' конструктивно выполнены совершенно одинаково. Зеркала 2 и 2' могут находиться в двух положениях. Когда они расположены под углом  $45^\circ$  к оптической оси микроскопа, наблюдения производят в отраженном свете. В этом случае пучки проходят через призму-куб 13, призмы 3 и 3' и через объективы — полированные поверхности шкал мер 1 и 1'. При другом положении зеркал 2 и 2' пучки проходят на систему призм 14, 14', 15, 16, 16', и наблюдения производятся в проходящем свете. Изображения штрихов в микроскопе с помощью призмы 10 и зеркал вибратора 9

проектируются в плоскости щелей 7 и 7'. Зеркала вибратора взаимно-перпендикулярны и жестко связаны друг с другом, причем каждое зеркало образует с оптической осью угол  $45^\circ$ . Щели имеют микрометрический винт, который позволяет менять их ширину в интервале от 0 до 0,4 мм. За щелями на одном с ними уровне находятся фотоэлементы 5 и 5'. Для визуального наблюдения штриха и наведения на него служат призмы 6 и 6' и окуляры 8 и 8'. При работе фотоэлектрического микроскопа призмы 6 и 6' отодвигают, открывая фотоэлемент. Увеличение оптической части микроскопа  $\sim 7^\times$ . Глубина фокусировки 0,05 мм.

Вибратор предназначен для сканирования изображений штрихов сличаемых мер. Зеркала вибратора при помощи электромагнитной системы совершают колебания с частотой 50 гц. В результате в плоскости изображений обоих оптических каналов, совпадающей с плоскостями щелей 7 и 7', происходит сканирование изображений штрихов с той же частотой 50 гц и амплитудой, равной амплитуде колебания зеркал. При сканировании изображений штрихов на выходе фотоэлементов происходит временная развертка импульсов от наблюдаемых в микроскоп штрихов. Частота следования импульсов, как уже говорилось, будет в два раза больше частоты сканирования, т. е. 100 гц, так как за один период колебания зеркал вибратора возникают импульсы прямого и обратного хода сканирования.

Собственная резонансная частота подвижной системы вибратора 70–80 гц. Конструкция его позволяет получать амплитуду колебаний до 0,7 мм. Возбуждающие катушки питаются через стабилизатор от сети 50 гц.

Благодаря применению двухканальной оптической системы при измерении исключаются погрешности из-за смещения центра колебания вибратора, так как любое смещение его одинаково скажется как на образцовой, так и на поверяемой мерах.

Возможность измерений как при прямом, так и при обратном ходе вибратора позволяет исключить погрешности, вызываемые различиями штрихов по ширине на каждой из мер. Более того, этим исключается влияние возможного различия между фотоэлектрическим и визуальным методами наведения на штрихи.

Электронное измерительное устройство микроскопа 1 (рис. 3) имеет два одинаковых канала преобразования импульсов, блок отбора импульсов, отсчетный блок и блок для определения знака измеряемой разности.

Канал преобразования импульсов состоит из фотопреобразователя (усилителя) 4, временного дискриминатора 5, инвертора 6, унвивбратора 7 и дифференцирующей цепочки 8 с диодным ограничителем 9. Блок фотопреобразователя установлен непосредственно на микроскопе.

Фотопреобразователь состоит из фотоэлемента 2, предусилителя и катодного повторителя 3. В качестве преобразователей световых импульсов в электрические служат фотоэлементы типа СЦВ-3. Усиленные сигналы с предусилителя поступают на катодный повторитель, а затем на вход электронного измерительного устройства.

Усилитель 4 служит для усиления сигналов до нескольких десятков вольт, обеспечивая надежную работу последующих элементов схемы.

Дискриминатор 5 служит для отбора импульсов, возникающих при прямом или обратном ходе вибратора. Он имеет два входа, и на его выходе появляется сигнал только в том случае, если на обоих входах сигналы действуют одновременно.

Так как длительность селекторных импульсов, поступающих на вход дискриминатора, равна половине периода колебания сканирующего устройства, то через лампу проходят импульсы, соответствующие движе-

нию сканирующего устройства только в одну сторону. Если фазу положительных селекторных импульсов изменить на  $180^\circ$ , то будут проходить импульсы, соответствующие другому (обратному) ходу движения вибратора.

Инвертор 6 служит для изменения полярности импульсов после временного дискриминатора, что необходимо для запуска унвивбратора.

Унвивбратор 7 преобразует импульсы с пологими фронтами в импульсы с более крутыми фронтами (до  $2-3 \text{ мксек}$ ). Отрицательные импульсы с унвивбратора поступают на цепочку 8, дифференцируются и затем проходят на ограничитель 9, где ограничивается положительная часть дифференцированного импульса. Отрицательный всплеск этого импульса подается на триггер счетного блока 10. На тот же триггер подаются аналогичным образом преобразованные импульсы второго канала. Наличие двух отдельных электронных каналов повышает разрешающую способность электронного устройства.

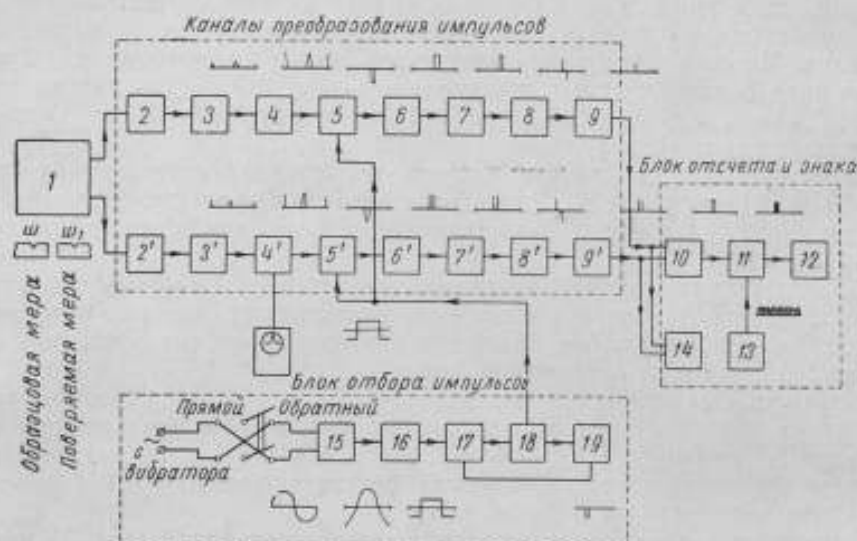


Рис. 3. Блок-схема электронного измерительного устройства.

Если бы импульсы от штрихов, расстояние между которыми меньше ширины штриха, подавались на один канал, происходило бы сложение амплитуд импульсов, и это расстояние измерить было бы нельзя. Благодаря разделенному преобразованию исходных импульсов возможности измерений будут ограничиваться лишь флуктуацией шумов фотозащитных элементов.

Блок отбора импульсов служит для выбора импульсов прямого или обратного хода, а также для пропуска на счетный блок заданного числа импульсов, так как электронное устройство измеряет временные интервалы между передними фронтами импульсов десять раз. Этот блок состоит из фазовращателя 15, усилителя-ограничителя 16, коммутирующего устройства 17, инвертора и катодного повторителя 18 и пересчетной на десять ячеек 19.

Фазовращатель и усилитель-ограничитель служат для преобразования синусоидальной формы напряжения, питающего вибратор, в прямоугольные импульсы с длительностью полпериода колебания вибратора, которые затем используются в качестве селекторных импульсов дискриминатора 5. Если при первом положении переключателя измерения



проводили по импульсам прямого хода (по переднему краю штрихов), то после изменения фазы на  $180^\circ$  измерения будут проводиться по импульсам обратного хода (по заднему краю штрихов).

Коммутирующее устройство 17 через инвертор 18 подает прямоугольные импульсы на временные дискриминаторы 5 в каналах преобразования и на пересчетную ячейку 19, причем не непрерывно, а дискретно — «пачками» по десять импульсов.

Блок формирования импульсов, длительность которых пропорциональна измеряемой разности, состоит из триггера 10 и временного дискриминатора 11. Запускается триггер импульсами, поступающими с выхода каналов преобразования. Длительность образованного триггером импульса равна временному интервалу между импульсами штрихов, соответствующему измеряемой разности длин. Десять таких импульсов поступают на дискриминатор 11, на который непрерывно подается от кварцевого генератора 13 высокая частота 100 кГц. Высокочастотные импульсы, совпадающие по времени с десятью селекторными импульсами, подсчитывает пересчетный прибор 12. Подсчитанное число импульсов соответствует десятикратной измеренной разности длин сличаемых интервалов штриховых мер.

Блок 14 указывает знак измеряемой разности длин в зависимости от очередности следования импульсов штрихов образцовой и поверяемой меры. Если импульсы штрихов образцовой меры идут по нижнему, а поверяемой — по верхнему каналу и измеренная разность имеет знак плюс, то импульс от поверяемой меры появится раньше, чем импульс от исходной меры, и на панели загорается неоновая лампочка, соответствующая знаку плюс, и наоборот.

В качестве источника питания анодных, накальных и сетчатых цепей схемы измерительного устройства использовали выпрямитель типа ВС-12.

Для питания канала ламп предусилителя применяли выпрямитель на 6,3 в типа ВС-13. Анодные цепи предусилителя питаются от батареи типа БАС-80 напряжением 250 в.

Изготовление и наладка электронного устройства выполнены М. Л. Файтельсоном.

### Исследование точности измерений

Для исследований двойной фотоэлектрический микроскоп был отъюстирован. При этом наличие сложной двухканальной оптической системы потребовало выполнения следующих требований к юстировке фотоэлектрического микроскопа: оптические оси обоих каналов микроскопа должны быть параллельны между собой и перпендикулярны плоскости сличаемых шкал, предметные плоскости обоих оптических каналов микроскопа совмещены, а его щели параллельны между собой и перпендикулярны направлению движения стола измерительной машины. При юстировке микроскопа штрихи фокусировались по максимуму импульса на экране осциллографа.

Для исключения влияния на результаты измерения остаточных погрешностей из-за несовершенной юстировки микроскопа был применен метод установки штрихов по одному каналу микроскопа на нуль, т. е. штрихи одной меры (образцовой) всегда устанавливались возможно ближе к оси микроскопа. Установка штрихов в нулевое положение контролировалась по положению на экране осциллографа импульсов прямого и обратного хода.

При исследовании микроскопа экспериментально установлено, что ширина щели должна быть не более двойной ширины изображения штрихов.

Задачей исследования вибратора было определение величины участка, на котором погрешность измерения, вызываемая неравномерностью скорости сканирования, не превышала бы  $\pm 0,2$  мкм. Зависимость числа высокочастотных импульсов от измеряемой разности длин будет линейна при постоянной скорости сканирования.

Длительность измеряемого интервала времени  $\tau$  зависит от скорости перемещения изображений штрихов в момент пересечения щели. Сканирование изображений штрихов в плоскости щелей с помощью вибратора происходит со скоростью  $v = a_0 \cos \omega t$ .

В пределах указанной погрешности неравномерностью скорости перемещения изображений штрихов можно пренебречь, если центр сканирования штриха (середина размаха колебаний) находится вблизи щели.

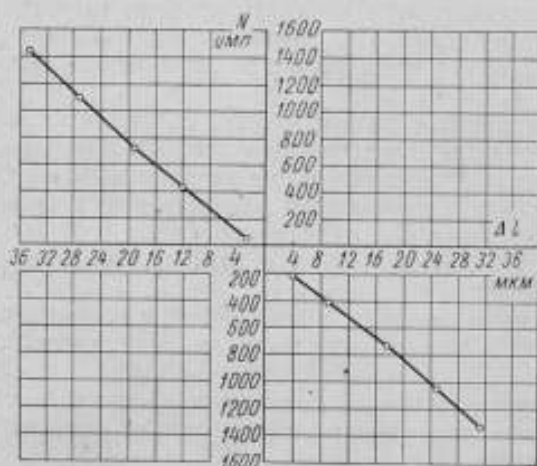


Рис. 4. Результаты измерения разности длин измеряемых мер.

На рис. 4 показаны результаты измерения разности длин измеряемых мер (в импульсах), когда штрих одной меры все время находился вблизи центра сканирования, а штрих, наблюдаемый по другому каналу, смещался в обе стороны от начального положения. Как видно, на участке до 20 мкм в обе стороны от центра сканирования изменение числа импульсов пропорционально изменению измеряемого интервала.

Во втором опыте производилось измерение постоянной разности длин между штрихами на участке в 20 мкм в обе стороны от центра сканирования. В этом случае число импульсов также практически оставалось постоянным, следовательно, изменения скорости сканирования не вызвали погрешностей, выходящих за пределы точности измерений.

Если иметь в виду, что точные штриховые меры изготавливаются с погрешностью не более  $\pm (5-10)$  мкм, то ограничение пределов измеряемых разностей длин  $\pm 20$  мкм вполне допустимо. Измерение одной и той же разности длин показало, что при изменении напряжения тока (в пределах до 20%), подаваемого на лампу осветителя, изменение числа импульсов не превышает погрешности измерения.

Изготовленный двойной фотоэлектрический микроскоп предусматривает параллельную установку сличаемых мер, а это требует, чтобы стол измерительной машины перемещался по направляющим строго прямо-

Допускаемые пределы измерений смещений штриха будут тем больше, чем больше амплитуда сканирования. Расчеты показали, что измерения допустимо производить в пределах участка, соответствующего 0,3 амплитуды, т. е., в нашем случае, в пределах до 20-25 мкм в плоскости шкалы.

Точность измерений зависит от стабильности режима работы вибратора, определяемой постоянством напряжения тока, подаваемого на катушки вибратора, а также от точности изготовления деталей подвижной системы.

линейно. Параллельное расположение мер имеет некоторые выгоды по сравнению с последовательным, так как при параллельном расположении уменьшаются габариты установки и снижаются температурные погрешности за счет уменьшения как температурного градиента вдоль мер, так и разности их температур. Но параллельное расположение мер может быть оправдано только при условии, что отклонения хода стола от прямолинейности не превышают  $\pm 0,5''$ . В этом случае погрешности в результатах измерений, вызываемые непрямолинейностью хода стола, не превысят 0,2 мкм (при расстоянии между осями мер до 80 мм).

Если же отклонения от прямолинейности будут более  $1''$ , то принятая схема микроскопа может быть применена только при наличии специального коррекционного устройства.

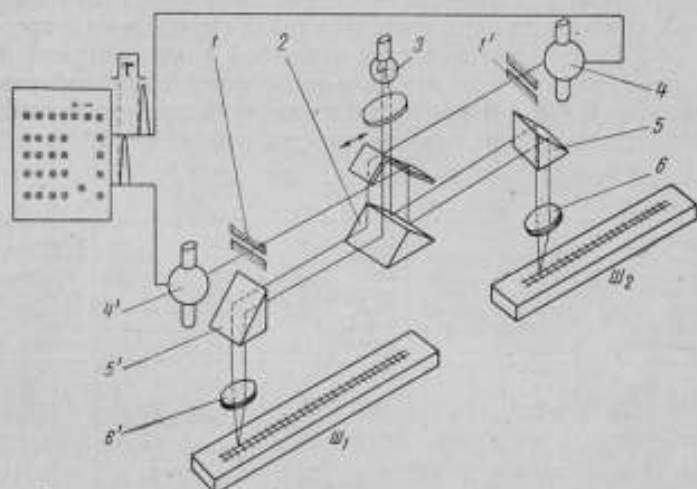


Рис. 5. Схема двойного фотоэлектрического микроскопа для последовательного расположения мер.

Когда сличаемые меры устанавливают последовательно, конструкцию двойного микроскопа следует изменить. На рис. 5 показана схема двойного фотоэлектрического микроскопа для продольного компаратора с последовательным расположением сличаемых мер.

Световой пучок от источника света 3 разделяется призмой 2 на две части и далее по двум каналам через призмы 5 и 5' и объективы 6 и 6' световые пучки падают на поверхности сличаемых мер Ш<sub>1</sub> и Ш<sub>2</sub>.

Изображения стрихов мер проецируются на плоскости щелей 1 и 1', за которыми расположены фотоэлементы 4 и 4'. Принцип действия этого микроскопа тот же, что и у микроскопа для параллельно расположенных мер.

Цена (значение) одного импульса в линейной мере ввиду возможных различий оптических и электронных каналов определяется экспериментально для каждого канала измерительной системы. Если же стрихи одной из мер всегда устанавливать в центре сканирования и измерения фактически производить, пользуясь одним каналом, то и цену импульса определяют только для этого канала.

Цену импульса в линейной мере можно определить, измерив уже известную разность длины двух сличаемых мер или одновременно измерив линейное смещение одной из сличаемых мер по двойному фотоэлектрическому микроскопу и с помощью интерферометра типа ИКПГ или микрокатора.

Этот второй метод был применен для определения цены импульса изготовленного двойного микроскопа.

Зная  $\Delta l = l_2 - l_1$  — смещение меры по показаниям микрокалора — и разность отсчетов  $N_2 - N_1$  по счетчику электронного устройства (число импульсов  $N$ ), можно вычислить цену одного импульса

$$\tau = \frac{\Delta l}{N_2 - N_1}$$

При определении цены импульса напряжение на вибраторе оставалось неизменным. Так как погрешность измерения перемещения меры измеряли с помощью интерферометра или микрокалора и она не превышала  $\pm 0,2$  мкм, а погрешность определения числа импульсов не превышала  $\pm 5$ , то средняя цена импульса была определена с погрешностью не более  $1 \div 2\%$ , что соответствует заданной нами точности измерений. В случае необходимости точность определения цены импульса может быть повышена. В табл. 1 приводятся значения цены импульса рабочего канала, определенные при напряжении на вибраторе  $23,50 \pm 0,15$  в.

Таблица 1

| Перемещение меры, $\Delta l$ мкм | Изменение разности длин, в импульсах | Цена импульса $\tau$ , мкм | Отклонение от среднего, в мкм | Перемещение меры, $\Delta l$ мкм | Изменение разности длин, в импульсах | Цена импульса $\tau$ , мкм | Отклонение от среднего, в мкм | Перемещение меры, $\Delta l$ мкм | Изменение разности длин, в импульсах | Цена импульса $\tau$ , мкм | Отклонение от среднего, в мкм |
|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 8,6                              | 325                                  | 26,4                       | +0,4                          | 15,5                             | 590                                  | 26,2                       | +0,2                          | 16,0                             | 617                                  | 25,9                       | -0,1                          |
| 9,0                              | 347                                  | 25,9                       | -0,1                          | 16,6                             | 641                                  | 25,9                       | -0,1                          | 15,4                             | 578                                  | 26,6                       | +0,6                          |
| 8,3                              | 311                                  | 26,6                       | +0,6                          | 15,9                             | 614                                  | 25,9                       | -0,1                          | 16,5                             | 689                                  | 25,8                       | -0,2                          |
| 9,5                              | 361                                  | 26,3                       | +0,3                          | 7,7                              | 296                                  | 26,0                       | 0                             | 16,0                             | 628                                  | 25,6                       | -0,4                          |
| 16,0                             | 613                                  | 26,1                       | +0,1                          | 8,9                              | 360                                  | 26,7                       | +0,7                          | 16,0                             | 647                                  | 24,9                       | -1,1                          |
| 15,5                             | 602                                  | 25,9                       | -0,1                          | 16,0                             | 596                                  | 26,8                       | +0,8                          | 16,0                             | 643                                  | 24,9                       | -1,1                          |
| 16,0                             | 629                                  | 25,4                       | -0,6                          | 15,2                             | 582                                  | 26,1                       | +0,1                          |                                  |                                      |                            |                               |

$\tau = 26,0 \pm 0,5$  мкм.

Цена импульса отсчетного устройства в линейной мере зависит не только от таких постоянных факторов, как увеличение оптической системы микроскопа или характеристик электронных блоков, но также и от некоторых переменных факторов и, в особенности, от изменений амплитуды сканирующего устройства, вызываемых изменением напряжения на катушках вибратора. Так, например, определение цены импульса при различных напряжениях тока от 17,5 до 27 в показало, что необходимое постоянство цены импульса достигается при неизменности подаваемого на вибратор напряжения в пределах  $0,1 \div 0,2$  в.

При измерении интервала времени  $\tau$  между двумя импульсами элементы радиотехнической схемы вносят свои погрешности. Так, погрешность из-за флуктуации шумов фотоэлементов достигает  $\pm 50$  мксек. Эта погрешность не зависит от величины измеряемой разности длин. Из сплошного спектра шумов наибольшее влияние оказывают шумы, частота которых близка к частотному спектру импульсов. Погрешность может быть уменьшена путем отбора фотоэлементов. Флуктуации шумов подчиняются статистическому закону и уменьшить их влияние на точ-

Таблица 2

| Число импульсов, прямой ход |            | Разность отсчетов в импульсах | Число импульсов, обратный ход |            | Разность отсчета в импульсах |
|-----------------------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|------------|------------------------------|
| 1-й отсчет                  | 2-й отсчет |                               | 1-й отсчет                    | 2-й отсчет |                              |
| +124                        | +125       | -1                            | -292                          | -289       | -3                           |
| +128                        | +124       | +4                            | -289                          | -284       | -5                           |
| +65                         | +65        | 0                             | -181                          | -176       | -5                           |
| +65                         | +68        | -3                            | -175                          | -171       | -4                           |
| +63                         | +56        | +7                            | -230                          | -229       | -1                           |
| +55                         | +50        | +5                            | -232                          | -217       | -15                          |
| -79                         | -80        | +1                            | -227                          | -228       | +1                           |
| -93                         | -82        | -11                           | -229                          | -239       | +10                          |
| +100                        | +102       | -2                            | -242                          | -237       | -5                           |
| +101                        | +100       | +1                            | -244                          | -243       | -1                           |
| -167                        | -152       | -15                           | -157                          | -166       | +9                           |
| -168                        | -166       | -2                            | -156                          | -160       | +4                           |
| +56                         | +53        | +3                            | -164                          | -167       | +3                           |
| +57                         | +48        | +9                            | -160                          | -168       | +8                           |
| -99                         | -103       | +4                            | -215                          | -221       | +6                           |
| -110                        | -102       | -8                            | -213                          | -215       | +2                           |
| +62                         | +66        | -4                            | -213                          | -202       | -11                          |
| +72                         | +61        | +11                           | -211                          | -208       | -3                           |
| +47                         | +47        | 0                             | -160                          | -166       | +6                           |
| +40                         | +35        | +5                            | -165                          | -167       | +2                           |
| -93                         | -101       | +8                            | -219                          | -229       | +10                          |
| -98                         | -88        | -10                           | -219                          | -230       | +11                          |
| +40                         | +34        | +6                            | -209                          | -210       | +1                           |
| +44                         | +35        | +9                            | -205                          | -206       | +1                           |
| -84                         | -77        | -7                            | -110                          | -125       | +15                          |
| -78                         | -76        | -2                            | -112                          | -114       | +2                           |
| -44                         | -37        | -7                            | -248                          | -246       | -2                           |
| -41                         | -35        | -6                            | -235                          | -239       | +4                           |
| -40                         | -53        | +13                           | -115                          | -128       | +13                          |
| -40                         | -50        | +10                           | -129                          | -119       | -10                          |
| +25                         | +26        | -1                            | -110                          | -106       | -4                           |
| +42                         | +39        | +3                            | -104                          | -99        | -5                           |
| -54                         | -58        | +4                            | -92                           | -92        | 0                            |
| -58                         | -55        | -3                            | -86                           | -88        | +2                           |

Таблица 3

| Число импульсов |              | Измеренная разность длин в импульсах | Отклонение от среднего |
|-----------------|--------------|--------------------------------------|------------------------|
| прямой ход      | обратный ход |                                      |                        |
| -261            | +43          | -152                                 | -2                     |
| -251            | +40          | -146                                 | +4                     |
| -256            | +48          | -152                                 | -2                     |
| -267            | +46          | -156                                 | -6                     |
| -260            | +46          | -153                                 | -3                     |
| -255            | +38          | -146                                 | +4                     |
| -236            | +72          | -154                                 | -4                     |
| -230            | +75          | -152                                 | -2                     |
| -222            | +73          | -148                                 | +2                     |
| -225            | +85          | -155                                 | -5                     |
| -219            | +73          | -146                                 | +4                     |
| -232            | +70          | -151                                 | -1                     |
| -242            | +35          | -138                                 | +12                    |
| -255            | +55          | -155                                 | -5                     |
| -258            | +53          | -156                                 | -6                     |
| -247            | +62          | -154                                 | -4                     |
| -248            | +69          | -158                                 | -8                     |
| -235            | +65          | -150                                 | 0                      |
| -253            | +53          | -153                                 | -3                     |
| -255            | +49          | -152                                 | -2                     |
| -263            | +39          | -151                                 | -1                     |
| -253            | +40          | -146                                 | +4                     |
| -245            | +42          | -144                                 | +6                     |
| -259            | +42          | -150                                 | 0                      |
| -254            | +37          | -146                                 | +4                     |
| -260            | +48          | -154                                 | -4                     |
| -257            | +46          | -152                                 | -2                     |
| -255            | +53          | -154                                 | -4                     |
| -243            | +49          | -146                                 | +4                     |
| -251            | +39          | -145                                 | +5                     |
| -249            | +43          | -146                                 | +4                     |
| -248            | +51          | -150                                 | 0                      |
| -255            | +46          | -150                                 | 0                      |

ность измерений можно также за счет усреднения большего числа измерений.

Погрешность измерения временного интервала из-за разброса порогов срабатывания триггеров на импульсах с крутизной фронтов  $2 \div 3$  мксек не превышает 1 мксек, что значительно меньше погрешностей, вызываемых шумами.

Для определения погрешности электронного отсчетного устройства были произведены многократные двойные измерения различных разностей длин сравниваемых мер (табл. 2) через полчаса после включения аппаратуры при прямом и обратном ходах сканирующего устройства и неизменном напряжении тока на катушках вибратора. Средняя квадратичная погрешность импульсов, вычисленная по разностям двойных измерений, составляет  $\pm 5$  импульсов.

В табл. 3 приведены результаты многократных измерений постоянной разности длин сличаемых интервалов. Измерения начинались сразу же после включения вибратора и продолжались 10 мин. Отсчеты производились при прямом и обратном ходе. Как мы видим, в среднем отдельные результаты отклоняются от общего среднего менее чем на 4 и только в двух случаях более чем на 6 импульсов. Смещения центра сканирования не сказались на результатах измерений, что еще подтверждает достоинства двойного микроскопа.

Для исследования стабильности работы микроскопа и измерительного устройства во времени измерены разности длин двух мер в течение 6 ч (табл. 4). Предварительно блоки отсчетного устройства прогревали 30 мин.

Таблица 4

| Время отсчета, час. и мин. | Измеренная разность длин |       |                              | Время отсчета, час. и мин. | Измеренная разность длин |       |                              | Время отсчета, час. и мин. | Измеренная разность длин |       |                              |
|----------------------------|--------------------------|-------|------------------------------|----------------------------|--------------------------|-------|------------------------------|----------------------------|--------------------------|-------|------------------------------|
|                            | в импульсах              | в мкм | Отклонение от среднего в мкм |                            | в импульсах              | в мкм | Отклонение от среднего в мкм |                            | в импульсах              | в мкм | Отклонение от среднего в мкм |
| 12—15                      | -212                     | -5,94 | -0,14                        | 14—30                      | -213                     | -5,96 | -0,12                        | 16—45                      | -221                     | -6,19 | +0,11                        |
| 12—30                      | -213                     | -5,96 | -0,12                        | 14—45                      | -219                     | -6,13 | +0,05                        | 17—00                      | -221                     | -6,19 | +0,11                        |
| 12—45                      | -218                     | -6,10 | +0,02                        | 15—00                      | -219                     | -6,13 | +0,05                        | 17—15                      | -220                     | -6,16 | +0,08                        |
| 13—00                      | -212                     | -5,94 | -0,14                        | 15—15                      | -216                     | -6,04 | -0,04                        | 17—30                      | -222                     | -6,22 | +0,14                        |
| 13—15                      | -214                     | -6,00 | -0,08                        | 15—30                      | -221                     | -6,19 | +0,11                        | 17—45                      | -221                     | -6,19 | +0,11                        |
| 13—30                      | -212                     | -5,94 | -0,14                        | 15—45                      | -219                     | -6,13 | +0,05                        | 18—00                      | -220                     | -6,16 | +0,08                        |
| 13—45                      | -223                     | -6,24 | +0,16                        | 16—00                      | -215                     | -6,02 | -0,06                        |                            |                          |       |                              |
| 14—00                      | -220                     | -6,16 | +0,08                        | 16—15                      | -216                     | -6,05 | -0,03                        |                            |                          |       |                              |
| 14—15                      | -208                     | -5,82 | -0,26                        | 16—30                      | -221                     | -6,19 | +0,11                        | Среднее                    | -217                     | -6,08 |                              |

Изменения результатов по своей величине не превышают погрешностей измерений, что говорит о достаточной устойчивости работы микроскопа и всех блоков отсчетной системы. Слабо выраженный систематический характер изменений разности длин сличаемых интервалов во времени может быть результатом температурных влияний.

Погрешность  $\sigma_{\Delta l}$  измерения разности длин  $\Delta l$  сличаемых интервалов, как это видно из уравнения (4), будет

$$\sigma_{\Delta l} = \sqrt{\sigma_l^2 N^2 + \sigma_N^2},$$

где  $\sigma_l$  и  $\sigma_N$  — соответственно средние квадратичные погрешности определения цены и числа импульсов.

Погрешность средней цены импульса  $\gamma$  определена экспериментально и оказалась равной  $\pm 0,0005$  мкм, а погрешность отсчета  $N$  составила  $\pm 5$  импульсов. Тогда для  $\Delta l = 10$  мкм погрешность  $\sigma_{\Delta l}$  будет равна  $\pm 0,13$  мкм. Такова ожидаемая средняя квадратичная погрешность ряда измерений с помощью двойного фотоэлектрического микроскопа.

Погрешность  $\sigma_{\Delta l}$  будет меньше, если цену импульса определять с большей точностью, а в электронном измерительном устройстве предусмотреть усреднение результата измерений из большого числа измерений интервала  $\tau$  между импульсами.

В погрешность результатов поверки, кроме погрешности сличений, будут входить погрешности исходной меры и температурные погрешности измерений. Величины этих погрешностей зависят от того, какая мера применяется в качестве исходной (этalon или мера I-го разряда), и от строгости соблюдения внешних условий измерений. Так как эти погрешности имеют место и при обычном компарировании, причины и характер их известны, то в настоящей статье они не рассматриваются.

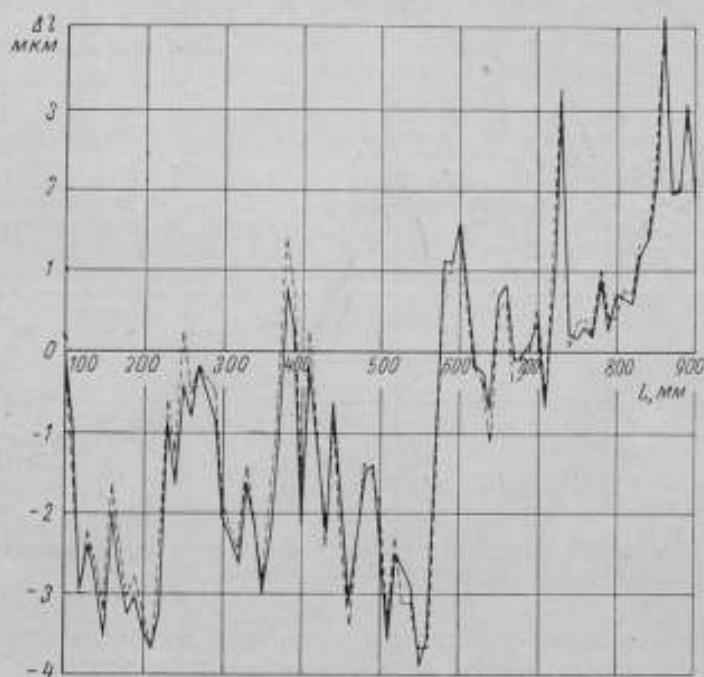


Рис. 6. Результаты двух приемов измерений.

Погрешности измерений разности длин сличаемых интервалов с помощью двойного фотоэлектрического микроскопа и электронного отсчетного устройства были определены по результатам многократных измерений сантиметровых подразделений двух однометровых штриховых мер № 568 и 564 на участке от 10 до 90 см. Результаты двух приемов одной из серий этих измерений показаны на рис. 6.

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений разности длин двух мер, вычисленная по разностям двойных измерений, в этой серии равна  $\pm 0,16$  мкм. Такова погрешность однократных измерений, определенная по внутренней сходимости результатов измерений.

Так как при поверке подразделений штриховых мер обязательно будет производиться не менее трех приемов измерений, то средняя квадратичная погрешность результатов измерений не превысит  $\pm 0,1$  мкм.

На выполнение одного приема измерений с помощью двойного фотоэлектрического микроскопа затрачивалось времени в 4—5 раз меньше, чем при обычной поверке на измерительной машине, причем непосредственно на измерение одной разности длин с переключением схемы на прямой и обратный ход и списывание отсчета по счетчику требуется не более 15 сек. Значительно большую часть времени занимает подача стола машины. Время измерений может быть сокращено, если по счетчику делать по два, а не по четыре отсчета числа импульсов, как делалось при опытных измерениях, стол машины будет подаваться автоматически и на выходе отсчетного устройства будет предусмотрена запись результатов.

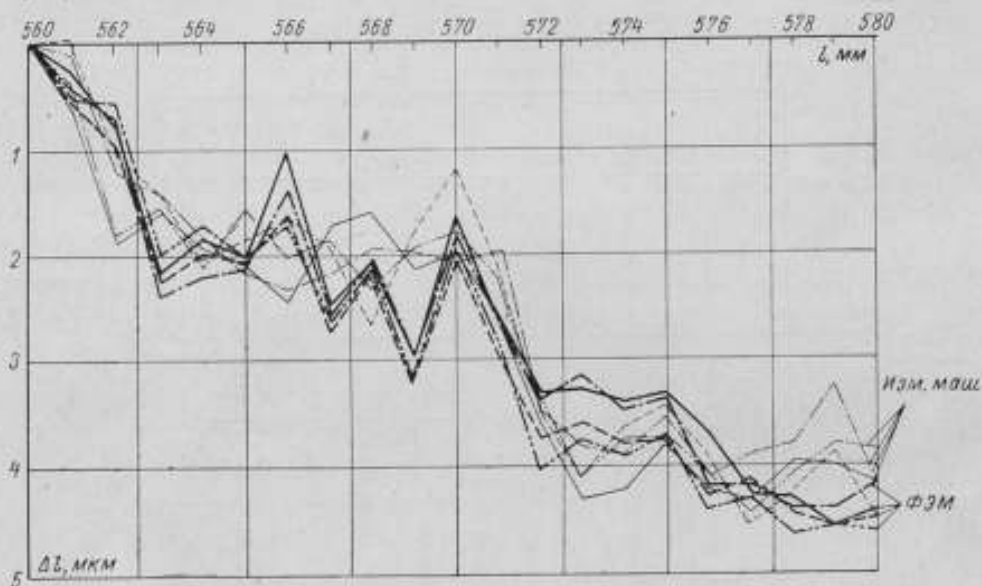


Рис. 7. Результаты измерений с помощью фотоэлектрического микроскопа и измерительной машины.

Для сопоставления результатов измерений по фотоэлектрическому микроскопу с результатами, полученными на измерительной машине, было произведено четыре приема измерений разностей длин миллиметровых подразделений одних и тех же мер этими двумя методами. На рис. 7 толстыми линиями показаны результаты измерений с помощью фотоэлектрического микроскопа (ФЭМ), а тонкими — визуальным методом на измерительной машине.

Разброс результатов отдельных приемов измерений с помощью фотоэлектрического микроскопа заметно меньше, чем с помощью микроскопов с окулярными микрометрами. Расхождения средних результатов измерений на измерительной машине и с помощью фотоэлектрического микроскопа носят случайный характер и в среднем равны 0,4 мкм.

Так как погрешности измерений штриховых мер на измерительной машине оцениваются величиной порядка  $\pm 0,5$  мкм, то полученные результаты сравнений можно считать вполне удовлетворительными.



Случайный характер расхождения подтверждает предположение об идентичности условий наведения на штрихи визуальным методом с помощью микроскопа с окулярным микрометром и объективным методом с помощью двойного фотоэлектрического микроскопа.

Исследование разработанных новых средств проверки подразделений шкал точных штриховых мер длины компараторным методом показало возможность создания автоматического фотоэлектрического компаратора для сплошной проверки подразделений штриховых мер с повышенной точностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Moreau H., Un Microscope Micrométrique photoélectrique Mesures Contrôle Industr., № 16/1, 1951.
2. Карташев А. И., Новый метод измерения скорости света, Труды ВНИИМ, вып. 25 (86), 1955.
3. Clark J. S. and Cook K. H., A photoelectric microscope for the measurement of linear Scales, Journal of Scientific instruments, v. 33, September, 1956.
4. Ефимов А. А., Отрященко Ю. М., Фотоэлектрический метод отсчета кругов меридианных инструментов, «Астрономический журнал», т. 37, вып. 1, 1960.
5. Каяк Л. К., Торопин С. И., Фотоэлектрические микроскопы для компарирования штриховых мер длины, «Измерительная техника», № 2, 1960.
6. Феклистов Е. П., Фотоэлектрические микроскопы, «Измерительная техника», № 12, 1962.
7. Дубиновский А. М., Импульсный фотоэлектрический микроскоп для объективной наводки на штрихи шкал, «Оптико-механическая промышленность», № 6 и 11, 1961.
8. Михайлова М. Г., Об оптимальных условиях работы сканирующих устройств при фотоэлектрической регистрации, «Измерительная техника», № 1, 1963.
9. Хлебников Н. С., Сложные фотокагоды, ЖТФ, т. 16, 1946.
10. Купершмидт Ш. Н. и Егоров Ю. В., Автоматическое отсчетное устройство для координатно-расточного станка, «Станки и инструменты», № 4, 1962.

Поступила в редакцию

8/VII 1964 г.

### ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО К ДВОЙНОМУ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ МИКРОСКОПУ

*В статье описана электронная схема разработанного во ВНИИМ измерительного устройства к двойному фотоэлектрическому микроскопу, предназначенного для компарирования подразделений штриховых мер.*

Электронное измерительное устройство является неотъемлемой частью двойного фотоэлектрического микроскопа, применяемого для измерения малых разностей длин при сличении двух штриховых мер.

От выбора принципиального решения и качества выполнения этого устройства зависит не только точность, но и степень возможной автоматизации измерений.

Измерительное устройство состоит из фотопреобразователя с предварительным усилителем, электронной измерительной схемы и счетчика.

Фотопреобразователь и предварительный усилитель (рис. 1) собраны отдельным блоком, расположены непосредственно на самом микроскопе и соединены с блоками измерительной схемы высокочастотным кабелем РК-19. Это позволяет вынести электронные блоки (большой источник тепла) из помещения, где находится компаратор.

Рис. 1. Схема фотопреобразователя и предварительного усилителя с катодным повторителем.

На основе экспериментальных исследований различного типа фотопреобразователей: фотоумножителей, фотосопротивлений и фотоэлементов, были выбраны фотопреобразователи с наибольшим отношением сигнала к шуму при наименее благоприятных условиях работы, когда ярко освещенная щель на мгновение перекрывается темным изображением штриха.

Отношение сигнала к шуму имеет большое значение, так как основная погрешность при измерении фотоэлектрическим микроскопом обусловлена именно флуктуацией шумов. Установлено, что у фотоумножителей отношение сигнала к шуму наименьшее. Несколько больше оно

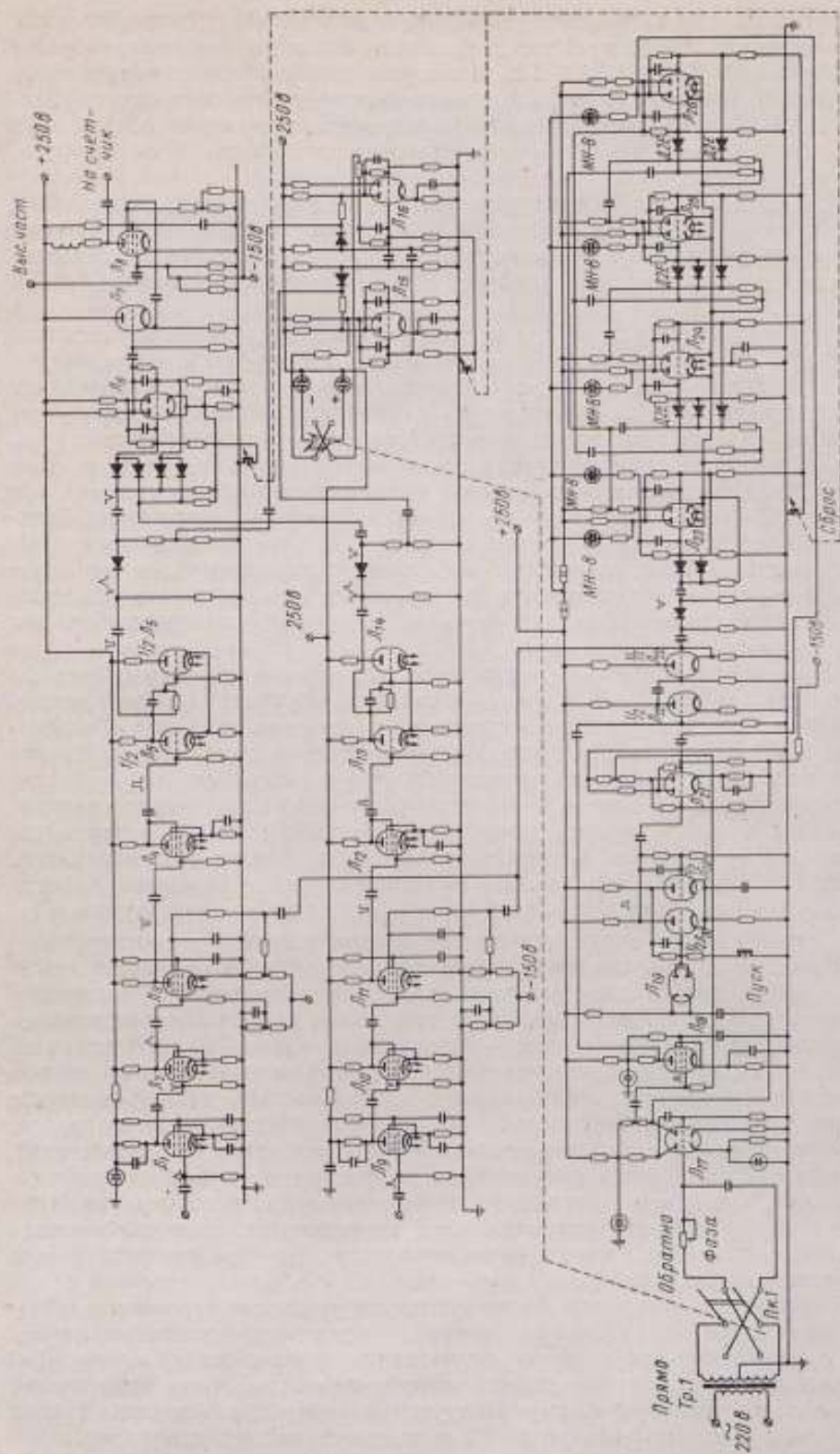


Рис. 2. Схема электронного измерительного устройства.

у некоторых типов фотоспротивлений, а наибольшее у фотоэлементов. Из всех типов исследованных фотоэлементов для работы были выбраны фотоэлементы СЦВ-3 и ЦВ-3, у которых отношение сигнала к шуму больше 20. Предпочтение было отдано сурьмяно-цезиевым фотоэлементам СЦВ-3, так как они более стойки к температурным изменениям и их «утомление» на много меньше «утомления» кислородно-цезиевых фотоэлементов ЦВ-3.

Для предварительного усиления импульсов и передачи их на основной усилитель электронного измерительного устройства используется однокаскадный усилитель с коэффициентом усиления 130 и катодный повторитель с коэффициентом усиления 0,8, собранные на лампах 6Ж2П (рис. 1).

При выборе типа ламп для предварительного усилителя и катодного повторителя учитывалось, что они находятся непосредственно на микроскопе и вблизи мер, а поэтому должны выделять как можно меньше тепла. Кроме того, для уменьшения влияния потерь при передаче сигнала по кабелю на основной усилитель желательно предусмотреть, чтобы усиление предусилителя было по возможности большим. Для этого необходимы лампы с большой крутизной характеристики (их ток накала 0,3—0,4 а, а анодный ток 10—30 ма), но они потребляют большую мощность и будут нагревать микроскоп и меры. Пальчиковые двойные триоды, хотя и уменьшают тепловую отдачу, потребляя меньшую мощность, но не обеспечивают необходимого коэффициента усиления из-за малой крутизны характеристики. Все это обусловило выбор для предусилителя пентодов типа 6Ж2П.

Основной усилитель электронной измерительной схемы (рис. 2) собран на лампах  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$ ,  $L_{10}$  и служит для усиления до нескольких десятков вольт импульсов, поступающих с предусилителя, что обеспечивает надежную работу последующих элементов схемы. Коэффициент усиления двух каскадов около 100, что можно было бы получить и с помощью одной лампы, но поскольку для работы временного дискриминатора нужны импульсы положительной полярности, то в усилителе имеется второй каскад, который в основном выполняет роль инвертора. В первом каскаде параллельно анодной нагрузке включена емкость (около 1000 пф) для подавления высокочастотного спектра шумов.

Дискриминатор предназначен для отбора импульсов, соответствующих движению зеркала вибратора в одну сторону. Он собран на лампе  $L_3$  и имеет два входа. Импульсы с усилителя непрерывно поступают на первую сетку. В исходном состоянии лампа закрыта отрицательным напряжением по первой сетке — 30 в и по третьей — 60 в. В процессе работы схемы лампа периодически открывается подаваемыми на третью сетку селекторными импульсами с длительностью, равной половине периода вибратора. Через лампу  $L_3$  проходит верхняя часть импульса, соответствующего движению зеркала вибратора в одну сторону; импульс, соответствующий движению зеркала вибратора в другую сторону, не проходит, так как в этот момент лампа закрыта. Поскольку лампа по первой сетке закрыта отрицательным напряжением, то это повышает устойчивость работы схемы и исключает ложные срабатывания из-за шумовых всплесков.

Селекторные импульсы формируются на усилителе-ограничителе  $L_{17}$  из напряжения, питающего вибратор. На сетку первой половины лампы  $L_{17}$  с фазовращателя подается синусоидальное напряжение около 50 в. Режим выбран так, чтобы на аноде второй половины лампы напряжение имело прямоугольную форму. Полученные таким образом селекторные импульсы с амплитудой около 60 в подаются на дискриминатор.

Во вторичную обмотку трансформатора, питающего вибратор, включен фазовращатель, который позволяет плавно изменять фазу селекторных импульсов от 0 до  $130^\circ$ . Плавное изменение фазы селекторных импульсов дает возможность скомпенсировать фазовый сдвиг подвижной системы вибратора с фазой питающего напряжения. Изменения фазы скачком на  $180^\circ$  производится тумблером, который переключает концы вторичной обмотки трансформатора, идущие на фазовращатель.

При верхнем положении тумблера ручку фазовращателя устанавливают так, чтобы через дискриминаторы проходили импульсы, соответствующие прямому ходу зеркала вибратора. Тогда при нижнем положении тумблера будут проходить импульсы, соответствующие только обратному ходу зеркала вибратора. Следовательно, в верхнем положении тумблера будут измеряться разности длин по правым краям штрихов, а в нижнем — по левым. Действительная разность длин будет равна среднему из результатов измерений при прямом и обратном ходе. Селекторные импульсы поступают на временные дискриминаторы  $L_5$  и  $L_{11}$  через электронный ключ. Последний собран на лампах  $L_{16}$ — $L_{21}$ . Лампа  $L_{16}$  в исходном состоянии закрыта по первой сетке отрицательным напряжением  $-40$  в. Селекторные импульсы на аноде этой лампы появятся, когда отрицательное напряжение на первой сетке будет снято. Если в определенные моменты поочередно с помощью двух связанных триггеров  $L_{20}$ ,  $L_{21}$  снимать и подавать на лампу  $L_{16}$  отрицательное напряжение, то она будет работать как коммутатор. Аноды второго триггера через сопротивления подключены к земле, а катоды — к отрицательному напряжению  $-150$  в. Сетка левого триода первого триггера через диод связана с усилителем-ограничителем, анод правого триода второго триггера — с управляющей сеткой коммутирующей лампы  $L_{18}$ , а сетка правого триода второго триггера через конденсатор соединена с выходом пересчетной декады. Если левый триод первого триггера открыт, то первый пришедший отрицательный импульс продифференцированных селекторных импульсов закроет его и откроет правый триод. Положительный импульс с анода левого триода воздействует на сетку левого триода второго триггера  $L_{21}$  и открывает его, а правый триод этого триггера закроется, и напряжение на его аноде, равное  $-10$  в, будет подано к сетке лампы  $L_{18}$ . Лампа откроется, и селекторные импульсы пройдут на усилитель и катодный повторитель  $L_{22}$ , откуда они одновременно подаются на дискриминаторы и пересчетную декаду на 10. После прохождения 10 импульсов через пересчетную декаду ключевая лампа закроется благодаря наличию обратной связи с правым триодом второго триггера, напряжение на аноде которого понизится от  $-10$  до  $-40$  в. Подача селекторных импульсов на временные дискриминаторы также прекратится.

Управлять ключевой лампой  $L_{18}$  с помощью второго триггера нельзя, так как момент открытия может совпасть с моментом прохождения селекторного импульса на первой сетке этой лампы. В этом случае через лампу пройдет селекторный импульс, длительность которого меньше половины периода вибратора, и временные дискриминаторы могут не пропустить импульс от штриха одной из мер. Когда импульсы от штрихов не проходят через оба дискриминатора, усреднение результата произойдет не по 10, а по 9 интервалам. Следовательно, открывать ключевую лампу необходимо только в интервалах между селекторными импульсами, что и достигается триггером  $L_{20}$ . В сеточной цепи его левого триода имеется кнопка «пуск», когда ее нажимают, левый триод открывается, а правый закрывается и не действует на ключевую лампу. Если момент возврата кнопки «пуск» совпадет с моментом действия селек-

торного импульса на ключевую лампу, то триггер ждет, пока не пройдет селекторный импульс. Задний фронт селекторного импульса опрокинет триггер  $L_{20}$ , и возникший в аноде положительный импульс воздействует на триггер  $L_{21}$ , который откроет коммутирующую лампу и схему перед приходом следующего селекторного импульса.

Пересчетная декада состоит из четырех триггерных каскадов, собранных на лампах  $L_{23}$ — $L_{26}$  и работает как 16-кратная пересчетная схема с обратными связями. Пересчетная декада работает при пониженном анодном напряжении (при открытой лампе — 50—60 в, закрытой — 100—110 в). В анодную цепь каждого каскада включены неоновые лампы МН-8, которые служат для контроля прохождения импульсов. Положительный импульс с четвертого каскада используется для закрытия лампы  $L_{18}$ .

Пересчетная декада работает от отрицательных импульсов, преобразованных из задних фронтов селекторных импульсов на дифференцирующей цепочке и диодном ограничителе. Диод включен так, что не пропускает положительные импульсы после дифференцирования.

Запускать пересчетную декаду передним фронтом селекторных импульсов нельзя, так как после прохождения девяти импульсов, передний фронт десятого импульса закроет ключевую лампу раньше, чем пройдет через нее весь селекторный импульс, и дискриминаторы могут не пропустить последнюю пару импульсов от штрихов или один из них, что приведет к неверному результату.

Формирование импульсов штрихов в прямоугольные с крутизной фронтов 2—3 мксек происходит после дискриминаторов на лампах  $L_4$ ,  $L_5$  и  $L_{12}$ ,  $L_{13}$ .

Унивибраторы (лампы  $L_5$ ,  $L_{13}$ ) вырабатывают отрицательные прямоугольные импульсы с большой крутизной, которые затем дифференцируются на цепочке  $RC$ . Положительные импульсы после дифференцирования ограничиваются, а отрицательные, соответствующие передним фронтам импульсов, поступают через диоды на триггер  $L_6$ . Крутизна передних фронтов импульсов 2 мксек, а длительность 10—12 мксек. Триггер  $L_6$  (рис. 2), собранный на двойном триоде, вырабатывает прямоугольные импульсы, длительность которых пропорциональна разности длин измеряемых подразделений. В исходном состоянии левый триод триггера открыт, а правый закрыт.

Первый импульс, пришедший по одному из каналов, опрокидывает триггер, и напряжение на аноде левого триода, резко повысившись, держится до тех пор, пока не придет второй импульс. Полученный прямоугольный импульс по своей длительности равен временному интервалу между передними фронтами импульсов с фотоэлементов и пропорционален расстоянию между краями измеряемых штрихов. Прямоугольный импульс через катодный повторитель  $L_7$  поступает на третью сетку временного дискриминатора  $L_8$ . Последующие 9 пар импульсов формируются аналогично.

На первую сетку дискриминатора  $L_8$  с кварцевого генератора подается частота 100 кГц. Лампа закрыта по первой и третьей сетке отрицательным напряжением — 5 в и — 40 в. Число периодов генератора, совпавших во времени с десятью прямоугольными импульсами, считает электронный счетчик. В качестве счетчика могут использоваться пересчетные приборы, разрешающее время которых менее 10 мксек.

Кварцевый генератор выполнен в виде отдельного прибора, суточный уход его частоты не превышает 10 гц.

Схема знака\* измеряемой разности длин состоит из двух связанных триггеров, собранных на лампах  $L_{15}$  и  $L_{16}$ , и двух диодов.

В исходном состоянии левые половины ламп открыты, а правые закрыты. Неоновые лампочки, включенные в аноды правых половин ламп, не горят. Если импульсы штрихов образцовой меры идут по нижнему каналу, а поверяемой — по верхнему, и импульс штриха поверяемой меры появится раньше, чем импульс штриха образцовой меры, то отрицательный импульс с верхнего канала через диод правого триггера  $L_{16}$  поступит на сетку левого триггера  $L_{15}$  и опрокинет его, при этом загорится неоновая лампочка, соответствующая знаку «плюс». Запоздавший импульс штриха образцовой меры через диод левого триггера  $L_{15}$  не пройдет, так как диод закрыт повысившимся напряжением на аноде этого триода. Для определения знака последующей измеряемой разности схема знака приводится в исходное состояние кнопкой «сброс».

Если у измеряемой разности знак «минус», то импульс от штриха образцовой меры придет первым и, пройдя через диод триггера  $L_{15}$  на сетку триггера  $L_{16}$ , опрокинет его. В результате этого загорится лампочка, соответствующая знаку «минус», и закроется диод, включенный в анод этого триггера. Импульс штриха поверяемой меры не проходит через этот диод, и схема остается в этом состоянии до следующего измерения.

Для определения знака при измерении на обратном ходе зеркала вибратора, необходимо иметь в виду, что порядок поступления импульсов на схему знака изменится, и при отсчете нужно брать обратный знак или переключать индикаторные лампочки. Преобразования импульсов при наличии двух каналов позволило повысить разрешающую способность электронного измерительного устройства, так как импульсы после дифференцирования по своей длительности будут в 20 раз меньше импульсов от штрихов мер и не будут перекрывать друг друга, даже если расстояние между штрихами меньше их ширины (рис. 3). При наличии одного канала в этом случае на фотоэлементе происходило бы сложение амплитуд импульсов и точные измерения были бы невозможны.

Исследование электронного измерительного устройства показало, что наименьшая разность, которую можно измерить, определяется флуктуацией шумов фотоэлементов и составляет 0,3 мкм, в то время как при одном канале электронного измерительного устройства эта разность была бы не менее удвоенной ширины штрихов и при ширине штрихов 5 мкм составит 10 мкм.

Поступила в редакцию  
10/XI 1963 г.

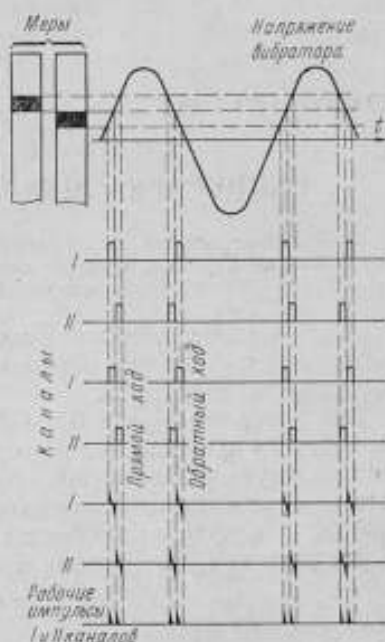


Рис. 3. Преобразование импульсов при наличии двух электронных каналов.

\* Схема знака разработана И. Н. Должиким.

## КАЛИБРОВКА ШКАЛЫ ПО ЭТАЛОНУ ФАБРИ—ПЕРО

*В статье описан метод калибровки подразделений шкалы по эталону Фабри—Перо как частный случай метода калибровки Перара при наличии дополнительной связи условных уравнений.*

При поверке высокоточных шкал методом калибровки погрешности подразделений шкалы определяют сравнением ее интервалов в различных сочетаниях [1, 2].

На интерферометре ВНИИМ для поверки шкал [3] калибровку подразделений производили по эталону Фабри—Перо, используя как вспомогательную «идеальную» шкалу интервалов, кратных расстоянию между отражающими поверхностями эталона. Отклонения действительной длины интервалов «идеальной» шкалы прогрессивно возрастают с увеличением интервала, при этом выполняется условие

$$\lambda_i - \lambda_{i-1} = \lambda = \text{const},$$

где

$$\lambda_i = i\lambda, \quad i = 1, 2, 3, \dots,$$

$\lambda$  — отклонение длины эталона Фабри—Перо от номинала.

Ниже дана система условных уравнений при калибровке шкалы по эталону Фабри—Перо, где  $x_0, \dots, x_{10}$  — поправки положения штрихов интервалов калибруемой шкалы;  $a_i, b_i, \dots, l$  — непосредственно измеряемые разности длин сравниваемых интервалов калибруемой шкалы и «шкалы эталонов»:

$$\begin{array}{lll} x_0 - x_1 + \lambda = a_1 & x_1 - x_2 + \lambda = b_1 & x_2 - x_3 + \lambda = c_1 \\ x_0 - x_2 + 2\lambda = a_2 & x_1 - x_3 + 2\lambda = b_2 & x_2 - x_4 + 2\lambda = c_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_0 - x_{10} + 10\lambda = a_{10} & x_1 - x_{10} + 9\lambda = b_9 & x_2 - x_{10} + 8\lambda = c_8 \\ x_3 - x_4 + \lambda = d_1 & x_4 - x_5 + \lambda = l_1 & x_5 - x_6 + \lambda = f_1 \\ x_3 - x_5 + 2\lambda = d_2 & x_4 - x_6 + 2\lambda = l_2 & x_5 - x_7 + 2\lambda = f_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_3 - x_{10} + 7\lambda = d_7 & x_4 - x_{10} + 6\lambda = l_6 & x_5 - x_{10} + 5\lambda = f_5 \\ x_6 - x_7 + \lambda = q_1 & x_7 - x_8 + \lambda = h_1 & x_8 - x_9 + \lambda = k_1 \\ x_6 - x_8 + 2\lambda = q_2 & x_7 - x_9 + 2\lambda = h_2 & x_8 - x_{10} + 2\lambda = k_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_6 - x_{10} + 4\lambda = q_4 & x_7 - x_{10} + 3\lambda = h_3 & \\ & x_9 - x_{10} + \lambda = l & \end{array}$$



Для перехода к новой серии наблюдений перемещают микроскоп или каретку со шкалой на длину подразделения шкалы, или относительное зеркало на длину эталона.

Приведенная система условных уравнений содержит 12 неизвестных ( $x_0, \dots, x_{10}$  и  $\lambda$ ). Для однозначного решения системы принимают, как и при калибровании компараторным методом,  $x_0 = 10$ , а  $x_{10}$  известным, сокращая число неизвестных до 10.

Решая систему условных уравнений по способу наименьших квадратов [4], получают систему нормальных уравнений:

$$11x_0 - \Sigma x + 55\lambda = p_0 \quad (I)$$

$$11x_1 - \Sigma x + 44\lambda = p_1 - q_1 \quad (II)$$

$$11x_2 - \Sigma x + 33\lambda = p_2 - q_2 \quad (III)$$

$$11x_3 - \Sigma x + 22\lambda = p_3 - q_3 \quad (IV)$$

$$11x_4 - \Sigma x + 11\lambda = p_4 - q_4 \quad (V)$$

$$11x_5 - \Sigma x = p_5 - q_5 \quad (VI)$$

$$11x_6 - \Sigma x - 11\lambda = p_6 - q_6 \quad (VII)$$

$$11x_7 - \Sigma x - 22\lambda = p_7 - q_7 \quad (VIII)$$

$$11x_8 - \Sigma x - 33\lambda = p_8 - q_8 \quad (IX)$$

$$11x_9 - \Sigma x - 44\lambda = p_9 - q_9 \quad (X)$$

$$11x_{10} - \Sigma x - 55\lambda = -q_{10} \quad (XI)$$

где

$$\Sigma x = x_1 + x_2 + \dots + x_{10},$$

$$p_0 = a_1 + \dots + a_{10},$$

$$p_1 = b_1 + \dots + b_9,$$

$$\dots \dots \dots$$

$$p_9 = k_1 + k_2,$$

$$p_9 = l_1,$$

$$q_1 = a_1,$$

$$q_2 = a_2 + b_1,$$

$$\dots \dots \dots$$

$$q_9 = a_9 + b_8 + c_7 + d_6 + e_5 + f_4 + q_3 + h_2 + k_1,$$

$$q_{10} = a_{10} + b_9 + c_8 + d_7 + e_6 + f_5 + q_4 + h_3 + k_2 + l_1.$$

Вычисление свободных членов нормальных уравнений производилось по предложенной Пераром схеме (см. рисунок), в которой в основном треугольнике размещаются свободные члены условных уравнений. В наружных рядах треугольника записывают величины  $p_i, q_i, S_i$ , представляющие суммы свободных членов по диагонали и вертикалям треугольника. Одновременно с буквенными обозначениями в схеме вписаны цифровые данные примера калибровки по эталону Фабри—Перо шкалы с делениями через 0,1 мм, нанесенной на эталонном дециметре Д-29.

Общая длина этой шкалы была предварительно измерена в монохроматическом свете и по концевым мерам:

$$x_{10} = -0,49 \text{ мм.}$$

Контролем правильности вычислений является равенство

$$\Sigma q_i = \Sigma p_i = \Sigma S_i.$$

Для определения значений неизвестных полученная система нормальных уравнений приводится к более простому виду путем несложных преобразований (последовательным вычитанием уравнений (I—II), (I—III), (I—IV), ..., (I—XI) и (X—XI]):

$$11(x_0 - x_1) + 11\lambda = p_0 - (p_1 - q_1) \quad (I')$$

$$11(x_0 - x_2) + 22\lambda = p_0 - (p_2 - q_2) \quad (II')$$

$$11(x_0 - x_9) + 99\lambda = p_0 - (p_9 - q_9) \quad (IX')$$

$$11(x_0 - x_{10}) + 110\lambda = (p_9 - q_9) + q_{10}. \quad (X')$$

В этом случае систему нормальных уравнений можно решить путем последовательной подстановки. Так, из уравнения (X') при  $x_0 = 0$  и известном  $x_{10}$  следует

$$\lambda = \frac{p_{10} + q_{10} + 11x_{10}}{110}$$

после чего из уравнения (I') при подстановке найденного значения  $\lambda$  можно определить  $x_1$ :

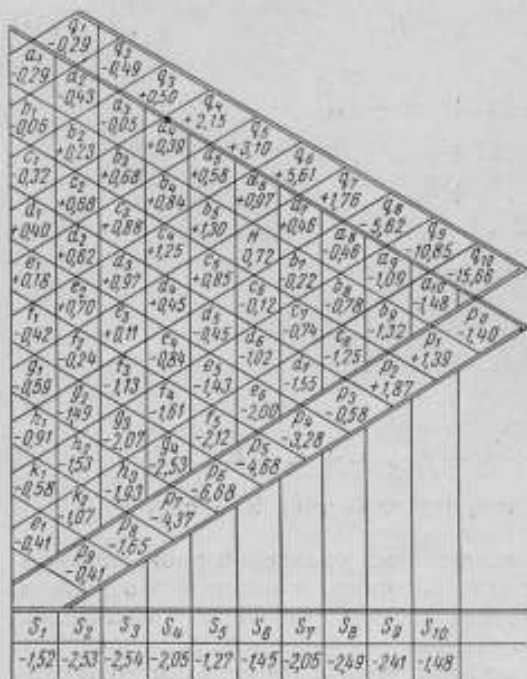
$$x_1 = \frac{-p_0 - (p_1 - q_1) + 11\lambda}{11}$$

Из уравнения (II') находят  $x_2$ :

$$x_2 = \frac{-p_0 - (p_2 - q_2) + 22\lambda}{11}$$

и т. д. Последнее уравнение служит контролем правильности вычислений:

$$x_{10} = \frac{-(p_9 - q_9) - q_{10} + 11\lambda}{11}$$



ния системы нормальных уравнений, где жирным обозначены вычисленные значения неизвестных.

$$\begin{array}{cccc}
11x_0 = 0 & -p_0 = +1,40 & -p_0 = +1,40 & -p_0 = +1,40 \\
+11x_{10} = -5,39 & +(p_3 - q_3) = +1,08 & +(p_6 - q_6) = -12,99 & -(p_9 - q_9) = +10,44 \\
+p_0 = -1,40 & +33\lambda = -6,72 & +66\lambda = +13,47 & +99\lambda = -19,21 \\
+q_{10} = -15,66 & & & 
\end{array}$$

$$\begin{array}{cccc}
110\lambda = -22,45 & 11x_3 = -4,24 & 11x_6 = -24,36 & 11x_9 = -8,37 \\
\lambda = -0,204 & x_3 = -0,38 & x_6 = -2,21 & x_9 = -0,76
\end{array}$$

$$\begin{array}{cccc}
-p_0 = +1,40 & -p_0 = +1,40 & -p_0 = +1,40 & +(p_9 - q_9) = -10,44 \\
+(p_1 - q_1) = +1,68 & +(p_4 - q_4) = -5,43 & +(p_7 - q_7) = -6,13 & +q_{10} = +15,66 \\
+11\lambda = -22,45 & +44\lambda = -8,88 & +77\lambda = -15,72 & +11x_9 = -8,32 \\
& & & +11\lambda = -2,24
\end{array}$$

$$\begin{array}{cccc}
11x_1 = +0,84 & 11x_4 = -12,92 & 11x_7 = -20,45 & 11x_{10} = -5,34 \\
x_1 = +0,08 & x_4 = -1,17 & x_7 = -1,86 & x_{10} = -0,49
\end{array}$$

$$\begin{array}{cccc}
-p_0 = +1,40 & -p_0 = +1,40 & -p_0 = +1,40 & \\
-(p_2 - q_2) = +2,36 & +(p_5 - q_5) = -7,78 & -(p_8 - q_8) = +3,97 & \\
+22\lambda = -4,48 & +55\lambda = -11,22 & +88\lambda = -17,96 & 
\end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
11x_2 = -0,72 & 11x_5 = -17,60 & 11x_8 = -12,59 \\
x_2 = -0,07 & x_5 = -1,60 & x_8 = -1,14
\end{array}$$

Средняя квадратичная погрешность условных уравнений равна

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum \rho_i^2}{N - m}}$$

где  $\rho$  — остаточные погрешности условных уравнений;  
 $N$  и  $m$  — число уравнений и неизвестных соответственно.

Для нашего примера калибровки шкалы Д-29 по эталону Фабри — Перо, когда  $N = 55$  и  $m = 10$ ,

$$\sigma = \pm 0,15 \sqrt{\sum \rho_i^2}$$

Средняя квадратичная погрешность результатов калибровки интервалов шкалы вычислялась по формуле

$$\sigma_{x_i} = \pm Q_i \sigma$$

где  $Q_i$  — коэффициент, обратно пропорциональный корню квадратному из соответствующего веса неизвестного, определяемый по формуле Ганзена [5] как функция  $n$  (число калибруемых интервалов) и  $i$ :

$$Q_i = Q_{n-i} = \sqrt{\frac{3 + U_i T_i}{2(n+1)}}$$

где  $T_i = \frac{n-2i}{n}$ ,  $U_i = 1$ ,

$$U_i = U_{i-1} - \frac{2}{i(n+1-i)} \sum_{k=1}^{i-1} U_k$$

Найденные по этим формулам значения  $Q_i$  варьируют в пределах 0,37—0,42 и могут быть приняты равными в среднем 0,4.

Весовой коэффициент  $Q_\lambda$  неизвестного  $\lambda$  при калибровке интерференционным методом определен как функция весовых коэффициентов [6] при неизвестных  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{10}$ , соответствующих компараторному методу. С учетом дополнительной связи  $\lambda_i = i\lambda$

$$Q_\lambda = \frac{\sum Q_{\lambda_i}}{\sum i} = 0,08.$$

Вследствие наличия дополнительной связи для неизвестных  $\lambda_i$  при калибровке по эталону Фабри—Перо для неизвестного  $\lambda$  значение весового коэффициента  $Q_\lambda = 0,08$  много меньше, чем при калибровке компараторным методом, при котором значение  $Q_\lambda$  лежит в пределах  $0,316 \div 0,763$ .

Следовательно, по результатам калибровки можно определить не только отклонения длины интервалов шкалы, но и (с целью дополнительного контроля) отклонение длины эталона Фабри—Перо, определяемое обычно интерференционным методом.

В рассматриваемом примере  $\sigma = 0,04$  мкм, и погрешности определения неизвестных  $x_i$  и  $\lambda$  при усреднении весовых коэффициентов  $Q_{x_i}$  будут равны соответственно

$$\sigma_{x_i} = Q_{x_i} \sigma = 0,40\sigma = 0,016 \text{ мкм},$$

$$\sigma_\lambda = Q_\lambda \sigma = 0,08\sigma = 0,003 \text{ мкм}.$$

| Калибровка             | Отклонения длины эталона Фабри—Перо $\lambda$ мкм          |                    |        |        |        |        |
|------------------------|--|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| по полной схеме Перара | Кратность умножения $i$                                    | 1                  | 2      | 3      | 4      | 5      |
|                        | Отклонения интервалов «шкалы эталонов» $\lambda_i$         | -0,203             | -0,430 | -0,620 | -0,821 | -0,999 |
|                        | $\frac{\lambda_i}{i}$                                      | -0,203             | -0,215 | -0,207 | -0,205 | -0,200 |
|                        | $\left(\frac{\lambda_i}{i}\right)_{\text{ср}} = \lambda_0$ | -0,205 $\pm$ 0,005 |        |        |        |        |
| по сокращенной схеме   | $\lambda$  | -0,204             |        |        |        |        |

Продолжение

| Калибровка             | Отклонения длины эталона Фабри—Перо $\lambda$ мкм          |                    |        |        |        |        |
|------------------------|--|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| по полной схеме Перара | Кратность умножения $i$                                    | 6                  | 7      | 8      | 9      | 10     |
|                        | Отклонения интервалов «шкалы эталонов» $\lambda_i$         | -1,235             | -1,436 | -1,637 | -1,874 | -1,970 |
|                        | $\frac{\lambda_i}{i}$                                      | -0,206             | -0,205 | -0,206 | -0,208 | -0,197 |
|                        | $\left(\frac{\lambda_i}{i}\right)_{\text{ср}} = \lambda_0$ | -0,205 $\pm$ 0,005 |        |        |        |        |
| по сокращенной схеме   | $\lambda$  | -0,204             |        |        |        |        |

Средняя квадратичная погрешность  $S$  определения поправок подразделений шкалы с учетом исходных данных находится по формуле [7]

$$S_i = \pm (\sigma + bL),$$

где  $b$  — коэффициент, зависящий от погрешности определения общей длины шкалы;

$L$  — длина интервала шкалы в мм.

При определении общей длины шкалы с погрешностью 0,05 мкм

$$b \approx 3 \cdot 10^{-2},$$

$$S_{x_i} = \pm (0,016 + 3 \cdot 10^{-2}L) \text{ мкм.}$$

Для интервалов 0,1—1,0 мм погрешность  $S_{x_i}$  изменяется в пределах 0,02—0,05 мкм. Точность определения неизвестного  $\lambda$  можно проверить косвенно путем сопоставления результатов определения отклонения длины эталона по приведенной ранее схеме с 10 неизвестными и по схеме для калибровки шкал компараторным методом с 19 неизвестными (инструкция 82—56). При обработке результатов калибровки в последнем случае отклонения «шкалы эталонов» рассматривались как независимые переменные  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{10}$ , из которых в третьей графе таблицы получен ряд значений, соответствующих однократной длине эталона  $\lambda_{0i} = \lambda_i/L$ .

Среднее значение отклонения длины эталона  $\bar{\lambda}_0 = -0,205$  мкм получено со средней квадратичной погрешностью  $\bar{\delta} = \pm 0,005$  мкм и согласуется с отклонением  $\lambda = -0,204$  мкм длины эталона по результатам калибровки по схеме, приводимой в этой статье.

Таким образом, с помощью эталона Фабри—Перо при калибровке подразделений шкал по методу Перара схема упрощается благодаря меньшему числу неизвестных и наличию дополнительной связи между ними.

В результате калибровки можно также определять отклонение длины эталона Фабри—Перо с высокой точностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция 82—56 по поверке образцовых шкал 1- и 2-го разрядов, Стандартгиз, 1957.
2. P é r a r d Albert, Note sur le Calcul des étalonnages de grandeurs en progression arithmétique, Travaux et mémoires du BIPM, t. XVI, 1917.
3. Трофимова Н. В., Интерференционный метод измерения шкал до 200 мм. Труды ВНИИМ, вып. 47 (107), 1961.
4. Маликов М. Ф., Основы метрологии, Стандартгиз, 1949.
5. P e r n e t M. I., Comparaisons des mètres dans l'air à la température ambiante, Travaux et mémoires du BIPM, t. IV, 1887.
6. B r o c h O. I., Note sur l'étalonnage des sous—divisions d'une règle, Travaux et mémoires du BIPM.
7. Бариннов В. А., Современное состояние эталонов длины, Стандартгиз, 1941.

### НАИВЫГОДНЕЙШИЕ ТОЧКИ ОПОР КВАРЦЕВОГО ЖЕЗЛА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО КОМПАРАТОРА

*В статье приведены уравнения для определения наивыгоднейших положений точек опор, обеспечивающих параллельность зеркал жезла интерференционного геодезического компаратора, и определена допустимая погрешность установки кварцевого жезла на опорах.*

В интерференционных геодезических компараторах исходной мерой является кварцевый жезл, представляющий ступенчатую концевую меру длины (рис. 1), изготовленную из трубки плавного кварца, к концам которой приварены кварцевые пластины. На полированные плоскости

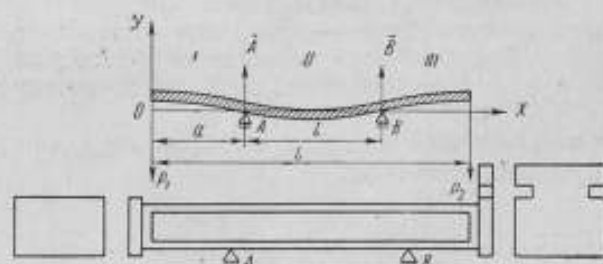


Рис. 1. Схема кварцевого жезла.

этих пластин посажены на молекулярный контакт кварцевые зеркала, отражающие поверхности которых обращены в одну сторону.

За длину жезла принимается длина перпендикуляра между отражающими поверхностями зеркал, которые должны быть параллельны. О параллельности зеркал жез-

ла при измерении на интерферометре судят по изображению интерференционных полос, а при работе на компараторе — по совпадению дифракционных изображений источника света, рассматриваемых в зрительную трубу, установленную на бесконечность.

Кварцевый жезл как, во время измерения его длины, так и при работе на интерференционном компараторе, лежит на двух опорах A и B. Кварцевая трубка жезла под влиянием собственного веса и веса зеркал изгибается. Если точки опоры выбраны произвольно, параллельность зеркал жезла, достигнутая при его изготовлении, может быть нарушена. В связи с этим возникает существенно важная для практических целей задача: определить наивыгоднейшее положение точек опор, обеспечивающих параллельность зеркал жезла.

При изготовлении жезла трудно добиться полной взаимной параллельности зеркал, поэтому незначительная непараллельность их при работе с жезлом устраняется с помощью специальных пружин. Если точки опор для кварцевого жезла выбраны неправильно, то для обеспе-

чения параллельности зеркал кварцевую трубку жезла необходимо больше изогнуть.

Поскольку длина жезла не изменится только при установке его на опоры, обеспечивающие параллельность зеркал, то важно знать не только положение этих точек опор, но и допускаемую погрешность положения кварцевого жезла на опорах.

При расчете положения опорных точек кварцевый жезл интерференционного компаратора можно рассматривать как балку с равномерно распределенной нагрузкой  $q$  (вес единицы длины кварцевой трубки) и силами  $P_1$  и  $P_2$ , действующими по концам трубки.

Силы  $P_1$  и  $P_2$  равны весу зеркал жезла с приваренной к трубке пластиной, при этом возможны два случая:

$$P_1 \neq P_2 \quad \text{и} \quad P_1 = P_2 = P.$$

Рассмотрим первый случай, когда  $P_1 \neq P_2$ . Составим дифференциальное уравнение упругой линии жезла

$$EJy'' = \pm M,$$

где  $M$  — изгибающий момент;

$J$  — момент инерции поперечного сечения кварцевой трубки;

$E$  — модуль упругости.

Дифференциальные уравнения упругой линии для каждого из трех участков  $I$ ,  $II$ ,  $III$  кварцевой трубки, если принять за начало координат точку приложения силы  $P_1$ , будут

$$\left. \begin{aligned} EJ \frac{d^2y}{dx^2} &= -P_1x - q \frac{x^2}{2} \quad \text{при } 0 \leq x < a, \\ EJ \frac{d^2y}{dx^2} &= -P_1x - q \frac{x^2}{2} + \bar{A}(x-a) \\ &\quad \text{при } a \leq x < a+l, \\ EJ \frac{d^2y}{dx^2} &= -P_1x - q \frac{x^2}{2} + \bar{A}(x-a) + \bar{B}(x-a-l) \\ &\quad \text{при } a+l \leq x \leq L. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\bar{A}$  и  $\bar{B}$  — реакции опор.

Принтегрировав уравнения (1), получим уравнения тангенсов углов наклона касательных к упругой линии на каждом участке стержня:

$$\left. \begin{aligned} EJ \frac{dy}{dx} &= -P_1 \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} + C_1 \\ EJ \frac{dy}{dx} &= -P_1 \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} + \bar{A} \frac{(x-a)^2}{2} + C_2 \\ EJ \frac{dy}{dx} &= -P_1 \frac{x^2}{2} - q \frac{x^3}{6} + \bar{A} \frac{(x-a)^2}{2} + \bar{B} \frac{(x-a-l)^2}{2} + C_3, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $C_1 \div C_3$  — постоянные интегрирования.

Так как на границах участков  $I$  и  $II$  и  $II$  и  $III$  тангенсы углов наклона касательных равны, следует, что в этих уравнениях  $C_1 = C_2$  и  $C_2 = C_3$ , а поэтому  $C_1 = C_2 = C_3 = C$ .

Уравнения прогибов для каждого участка стержня получим после интегрирования уравнений (2):

$$\left. \begin{aligned} EJy &= -P_1 \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} + Cx + D_1, \\ EJy &= -P_1 \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} + \bar{A} \frac{(x-a)^3}{6} + Cx + D_2, \\ EJy &= -P_1 \frac{x^3}{6} - q \frac{x^4}{24} + \bar{A} \frac{(x-a)^3}{6} + \bar{B} \frac{(x-a-l)^3}{6} + Cx + D_3. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $D_1 \div D_3$  — постоянные интегрирования.

Так как на границах участков (при  $x = a$  и  $x = a + l$ ) прогибы равны, то  $D_1 = D_2$  и  $D_2 = D_3$ , т. е.  $D_1 = D_2 = D_3 = D$ .

Постоянную интегрирования  $C$  определим из уравнений (3). При  $x = a$  и  $x = a + l$  будем иметь  $y = 0$ , и первое и второе уравнения (3) примут вид

$$\begin{aligned} -P_1 \frac{a^3}{6} - q \frac{a^4}{24} + Ca + D &= 0, \\ -P_1 \frac{(a+l)^3}{6} - q \frac{(a+l)^4}{24} + \bar{A} \frac{l^3}{6} + C(a+l) + D &= 0. \end{aligned}$$

Отсюда

$$C = \frac{4P_1[(a+l)^3 - a^3] + q[(a+l)^4 - a^4] - 4\bar{A}l^3}{24l}. \quad (4)$$

Зеркала жезла будут параллельны между собою, если касательные к упругой линии кварцевой трубки в начале первого ( $x = 0$ ) и в конце третьего ( $x = L$ ) участков будут параллельны оси  $OX$ , т. е.

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = 0 \text{ и } \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=L} = 0. \quad (5)$$

Из уравнений (2) с учетом равенства (4) получим следующую систему двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{4P_1[(a+l)^3 - a^3] + q[(a+l)^4 - a^4] - 4\bar{A}l^3}{24l} &= 0, \\ -P_1 \frac{L^2}{2} - q \frac{L^3}{6} + \bar{A} \frac{(L-a)^2}{2} + \bar{B} \frac{(L-a-l)^2}{2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Реакции опор  $\bar{A}$  и  $\bar{B}$  могут быть найдены из равенств

$$\left. \begin{aligned} -P_1 a - \bar{B}l + P_2(L-a) + qL \left( \frac{L}{2} - a \right) &= 0 \quad (\Sigma M_A = 0), \\ -P_1(a+l) + \bar{A}l + P_2[L - (a+l)] + qL \left[ \frac{L}{2} - (a+l) \right] &= 0 \\ &(\Sigma M_B = 0). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

отсюда

$$\bar{A} = \frac{M(a+l) - mL}{l}; \quad \bar{B} = \frac{-Ma + mL}{l},$$

где  $m = P_2 + \frac{Q}{2}$ ;

$Q = qL$  — вес кварцевой трубки;

$M = P_1 + P_2 + Q$  — общий вес кварцевого жезла.

Подставляя найденные значения реакций  $\bar{A}$  и  $\bar{B}$  в уравнения (6), получим

$$\left. \begin{aligned} 4qa^3 + ql^3 + 12P_1a^2 + 4(P_1 - M)l^2 + 6qa^2l + 4qal^2 + \\ + 4(3P_1 - M)al + 4mLL &= 0, \\ (mL - Ma)l - Ma^2 + 2mLa + \left( M - 2m - P_1 - \frac{Q}{3} \right) L^2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Решив второе уравнение (8) относительно  $l$ , получим

$$l = \frac{Ma^2 - 2da - S}{d - Ma}, \quad (9)$$

где

$$d = mL \text{ и } S = L^2 \left( M - 2m - P_1 - \frac{Q}{3} \right) = L^2 \left( P_2 + \frac{Q}{3} \right). \quad (10)$$



Обозначим через  $n_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, 8$ ) коэффициенты первого уравнения системы (8) и сгруппируем члены с одинаковыми степенями  $l$ :

$$n_1 a^3 + n_2 l^3 + n_3 a^2 + (n_4 + n_6 a) l^2 + (n_5 a^2 + n_7 a + n_8) l = 0.$$

После подстановки в это уравнение значения  $l$ , определяемого равенством (9), получим уравнение шестой степени относительно неизвестной  $a$

$$k_1 a^6 + k_2 a^5 + k_3 a^4 + k_4 a^3 + k_5 a^2 + k_6 a + k_7 = 0, \quad (11)$$

где

$$k_1 = -qM^3,$$

$$k_2 = 2M^2 \left[ Q \left( P_2 + \frac{Q}{2} \right) - 2P_1 M \right],$$

$$k_3 = ML \left[ 8P_1 M \left( P_2 + \frac{Q}{2} \right) - 2Q \left( P_2 + \frac{Q}{2} \right)^2 + MQ \left( P_2 + \frac{Q}{3} \right) \right],$$

$$k_4 = 4ML^2 \left[ M(P_1 + M) \left( P_2 + \frac{Q}{3} \right) - (M + 2P_1) \left( P_2 + \frac{Q}{2} \right)^2 \right],$$

$$k_5 = L^3 \left[ 4(P_1 + 3M) \left( P_2 + \frac{Q}{3} \right)^3 - 12M^2 \left( P_2 + \frac{Q}{2} \right) \left( P_2 + \frac{Q}{3} \right) + \right. \\ \left. + 2Q \left( P_2 + \frac{Q}{3} \right) \left( P_2 + \frac{Q}{2} \right)^2 - MQ \left( P_2 + \frac{Q}{3} \right)^2 \right],$$

$$k_6 = -L^4 \left[ 4(P_1 - M) \left( P_2 + \frac{Q}{3} \right) \left( P_2 + \frac{Q}{2} \right)^2 + 4M(P_1 - M) \left( P_2 + \frac{Q}{3} \right)^2 + \right. \\ \left. + 2Q \left( P_2 + \frac{Q}{2} \right) \left( P_2 + \frac{Q}{3} \right)^2 + 8 \left( P_2 + \frac{Q}{2} \right)^4 \right],$$

$$k_7 = L^5 \left[ Q \left( P_2 + \frac{Q}{3} \right) + 4(P_1 - M) \left( P_2 + \frac{Q}{2} \right) \left( P_2 + \frac{Q}{3} \right)^2 + \right. \\ \left. + 4 \left( P_2 + \frac{Q}{3} \right) \left( P_2 + \frac{Q}{2} \right)^3 \right].$$

Уравнение (11) после деления на  $k_1$  примет вид:

$$a^6 + r_1 a^5 + r_2 a^4 + r_3 a^3 + r_4 a^2 + r_5 a + r_6 = 0. \quad (12)$$

Наивыгоднейшие точки опор для кварцевого жезла 30-метрового интерференционного компаратора ВНИИМ, у которого  $P_1 = 0,091$  кгс (0,892 н),  $P_2 = 0,113$  кгс (1,107 н),  $Q = 0,638$  кгс (6,252 н),  $M = 0,842$  кгс (8,252 н),  $L = 970$  мм,  $q = 0,657$  кгс/м (6,439 н/м), можно определить из уравнения (14) после подстановки этих значений:

$$a^6 - 0,718588 a^5 - 0,419986 a^4 - 0,523021 a^3 + 0,773579 a^2 - \\ - 0,256825 a + 0,023165 = 0. \quad (13)$$

Решая уравнение (13), получим  $a = 151$  мм. Подставляя полученное значение  $a = 151$  мм в уравнение (9), найдем расстояние между опорами жезла  $l = 682$  мм (рис. 2).

Рассмотрим второй случай, когда у кварцевого жезла силы  $P_1 = P_2 = P$ .

Будем искать положение точек опор жезла, равноудаленных от его концов, при установке на которые будет обеспечена параллельность зеркал жезла (касательные к концам изогнутой оси жезла горизонтальны). В этом случае  $2a + l = L$ , а реакции опор будут  $\bar{A} = \bar{B} = P + \frac{Q}{2}$ .

После подстановки значения реакций в систему уравнений (6) и несложных преобразований каждое из них примет вид

$$Ma^2 - LMa + \frac{QL^2}{6} = 0$$

Отсюда искомые расстояния  $a$  от конца жезла до точек опор будут

$$a_{1,2} = \frac{L}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{2}{3} \frac{Q}{M}} \right). \quad (14)$$

Если у кварцевого жезла интерференционного компаратора ВНИИМ масса переднего и заднего зеркал будет одинакова и положить  $P = \frac{P_1 + P_2}{2}$ , то после

подстановки в равенство (14) соответствующих значений, получим  $a = 143,9$  мм и  $l = 682,6$  мм.

При этом, в отличие от первого случая, когда  $P_1 \neq P_2$ , жезл при неизменном расстоянии между опорами  $l = 0,6826$  м должен быть смещен вправо примерно на 7 мм.

Определим допускаемую погрешность  $\Delta a$ , с которой жезл может быть установлен на опорах в зависимости от допустимой погрешности установки его зеркал на параллельность.

Уравнения тангенсов углов наклона касательных к упругой линии трубки жезла в начале первого ( $x = 0$ ) и в конце

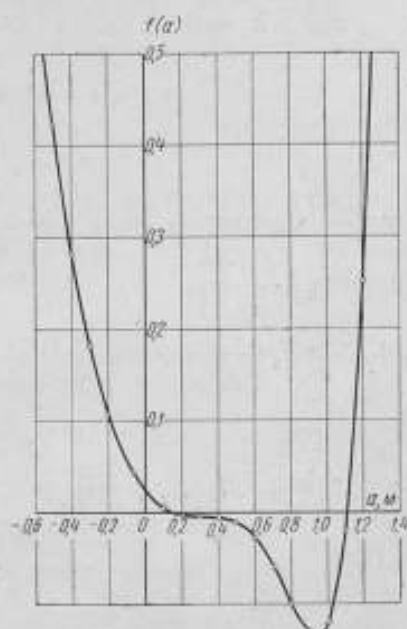


Рис. 2. График функции  $f(a)$ .

третьего ( $x = L$ ) участков, согласно уравнениям (2), (3), (6), (8), будут равны

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{1}{EJ} [4qa^3 + 12P_1a^2 + 6qa^2l + 4qal^2 + 12P_1al - 4Mal + ql^3 + 4P_1l^2 - 4Ml^2 + 4mLl],$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{1}{EJ} \left[ 4qa^3 + 12P_1a^2 + 6qa^2l - Ma^2 + 4qal^2 + 12P_1al - 5Mal + 2mLa + ql^3 + 4P_1l^2 - 4Ml^2 + 5mLl + \left( M - 2m - P_1 - \frac{Q}{3} \right) L^2 \right].$$

Отсюда для малых углов  $\alpha$  после дифференцирования и замены  $\Delta a = \Delta l = \Delta L$  получим:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \alpha_1^* &= \frac{p}{EJ} [18qa^2 + 36P_1a + 20qal + 7ql^2 + 20P_1l + 12Ml + 4Ma + 4mL] \Delta L, \\ \Delta \alpha_2^* &= \frac{p}{EJ} [18qa^2 + 36P_1a + 20qal + 7ql^2 + 20P_1l + 13Ml + 7Ma + 7mL] \Delta L. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Для кварцевого жезла ВНИИМ  $J = 5,086 \cdot 10^{-3} \text{ м}^4$  и, принимая  $E = 68 \cdot 10^8 \text{ кг/м}^2$  и  $\rho = 206\,265''$ , после подстановки в равенство (15) этих значений получим

$$\Delta\alpha_1^* = 8691,2 \Delta L \text{ и } \Delta\alpha_2^* = 10734,4 \Delta L. \quad (16)$$

Если  $\psi$  — допускаемый предельный угол между зеркалами жезла, то должно выполняться неравенство

$$\Delta\alpha_1^* + \Delta\alpha_2^* < \psi. \quad (17)$$

Выше указывалось, что параллельность отражающих плоскостей зеркал жезла при работе на интерференционном компараторе контролируется совпадением двух дифракционных изображений источника света коллиматора.

Угловая величина  $\mu$  дифракционного изображения\* равна

$$\mu = \frac{2\lambda}{h},$$

где  $\lambda$  — длина волны света;

$h$  — высота отверстия в диафрагме.

Подставляя в это равенство значения  $\lambda = 0,0005 \text{ мм}$  и  $h = 12 \text{ мм}$ , найдем, что  $\mu = 18''$ .

Если положить, что при совмещении двух дифракционных изображений предельный угол  $\psi$  между зеркалами не может быть больше  $9''$ , неравенство (17) примет вид

$$19\,425,6 \Delta L < 9'',$$

отсюда

$$\Delta L < \frac{9}{19\,425,6} \approx 0,0005 \text{ м}.$$

Следовательно, при установке жезла на опорах с погрешностью не более  $0,5 \text{ мм}$  зеркала жезла будут установлены с параллельностью в пределах  $9''$ . Окончательная установка параллельности зеркал может быть достигнута путем незначительного изгиба кварцевой трубки жезла специально предусмотренным для этой цели устройством.

Поступила в редакцию  
9/IV 1963 г.

\* Кондрашков А. В., Интерференция света и ее применение в геодезии, Геодезиздат, 1956.

**УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ  
ЛЕНТОЧНЫХ И ПРОВОЛОЧНЫХ МЕР ДЛИНОЙ ДО 24 м**

*В статье описана созданная во ВНИИМ дилатометрическая установка для определения температурных коэффициентов удлинения ленточных и проволочных мер длиной 20 и 24 м. Исследование показало, что погрешность определения температурного коэффициента проволоки (на всю длину) на установке не превышает  $\pm 1$  мкм/град.*

Во ВНИИМ создана специальная дилатометрическая установка для исследований проволочных и ленточных мер длиной до 24 м в температурном интервале от  $-5$  до  $+40^\circ\text{C}$ . Схема ее показана на рис. 1, а общий вид — на рис. 2.

Основными частями дилатометра являются: термокамера 2, холодильник 5, нагреватель 10, пульт управления 3, измерительная часть, состоящая из трех микроскопов М-1, М-2, М-3, и исходная образцовая мера 1. Температуру воздуха внутри термокамеры можно изменять в диапазоне от  $-5$  до  $+40^\circ\text{C}$ , подавая в ее трубы охлажденный или нагретый воздух.

В замкнутой системе воздухопроводов установлены два вентилятора, из них вентилятор 6 нагнетает в термокамеру воздух, а 7 — отсасывает. С помощью заслонок 8 и 9 циркулирующий в системе воздухопровода воздух можно направлять либо через холодильник, либо через нагреватель. Для уменьшения температурного градиента вдоль камеры воздух подается в нее через пять вводов, расположенных по всей длине камеры.

Термокамера состоит из трех концентрично расположенных стальных труб диаметром 184, 228 и 280 мм, длиной около 25 м, закреплена на двух металлических балках, лежащих на специальных фундаментах, и заключена в деревянный футляр. Пространство между камерой и футляром заполнено тепловой изоляцией.

Для лучшей циркуляции воздуха концы термокамеры соединены малым трубопроводом и внутри нее (по концам) установлены два малых вентилятора. По всей длине верхней части термокамеры имеется вырез, который закрывается двойными теплоизолированными крышками. Через этот вырез исследуемая проволока свободно подвешивается внутри камеры на блоках под натяжением 10 кгс ( $\sim 98$  н). Для исследования ленточных мер на горизонтальной плоскости внутри термокамеры смонтирован на поворачивающихся кронштейнах откидной стол длиной 24 м. При исследовании проволоки этот стол отодвигают в сторону.

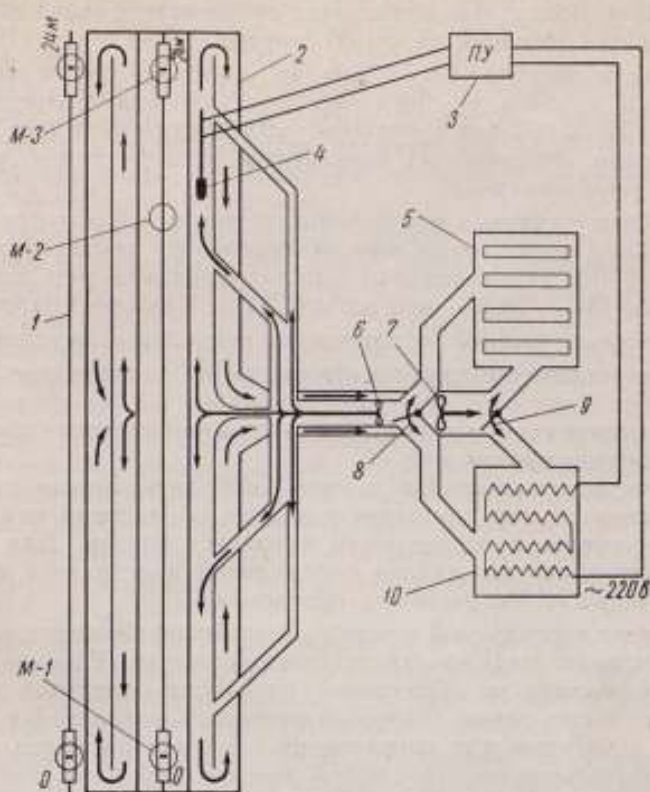


Рис. 1. Схема dilatометрической установки.



Рис. 2. Общий вид dilatометрической установки.

Холодильник 5 представляет собой теплоизолированный оцинкованный бак с системой труб, через которые пропускается воздух, поступающий из камеры. Воздух в холодильнике охлаждается заложённым в него сухим льдом или обычным льдом со спиртом.

Нагреватель воздуха 10 состоит из двойной теплоизолированной металлической коробки, внутри которой установлена четырехсекционная электропечь. Печь связана с пультом управления 3 с помощью электромагнитных реле, управляемых контактным термометром 4, установленным внутри термокамеры 2.

Три двойных отсчетных микроскопа установки служат для измерения удлинений исследуемой меры при изменении ее температуры. Микроскопы М-1 и М-2 предназначены для исследования мер длиной 20 м, а микроскопы М-1 и М-3 — мер длиной 24 м. Каждый микроскоп имеет два тубуса с объективами  $5\times$  увеличения и спиральный окулярный микрометр. Общее увеличение микроскопа около  $60\times$ , предметное расстояние 54 мм.

На пересечении осей вертикального и горизонтального тубусов микроскопа установлена призма-куб.

В микроскоп одновременно можно наблюдать штрихи шкал исследуемой и исходной мер, при этом исходная образцовая мера висит на блоках вне камеры, а исследуемая находится внутри. Для измерений проволоки закрепляют на шкалах специальные пластинки с микроштрихами, что уменьшает погрешности наведения.

Температура исследуемой и исходной проволоки измеряется с помощью дифференциальных медь-константановых термопар. Рабочие спай трех термопар закреплены на образцовой проволоке, имеющей комнатную температуру, а свободные спай этих термопар находятся в отдельном термостате, в котором для определения температуры спаев установлен ртутный палочный термометр с ценой деления 0,01 град. Девять других термопар закреплены через равные промежутки на вспомогательной проволоке, натянутой внутри термокамеры рядом и на одном уровне с исследуемой проволокой. Свободные спай этих термопар помещены в красномедный стакан, закрепленный внутри камеры в нижней части ее текстолитовой крышки. Температуру их определяют также по ртутному палочному термометру с ценой деления 0,01 град.

В установке используются переключатели типов ПБ-12 и ПБ-43 и гальванометр типа М 21/5. В отличие от ранее известных [1, 2], dilatометрическая установка ВНИИМ позволяет производить исследования абсолютным методом и в более широком диапазоне температур.

Измерительная часть установки с двойными микроскопами является самостоятельной и может быть рекомендована для применения в поверочной практике в качестве компаратора для сравнения мер большой длины.

На точность результатов измерений оказывает влияние неточность установки микроскопов. Микроскопы должны быть установлены так, чтобы их вертикальные тубусы находились в одной вертикальной плоскости с точностью до  $0,5^\circ$  [3], а горизонтальные — были перпендикулярны к ней. Предметные плоскости трех микроскопов должны находиться в одной горизонтальной плоскости.

Если  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — углы наклона осей микроскопов, то погрешность в измерении длины исследуемой меры из-за неточности фокусировки  $h_1$  и  $h_2$  будет

$$\Delta l = h_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - h_2 \operatorname{tg} \varphi_2.$$

При  $h = 0,12$  мм и  $\varphi = 0,5^\circ$  погрешность  $\Delta l \approx \pm 1,4$  мкм. Так как при определении температурных коэффициентов удлинения производят не менее четырех приемов измерений по крайней мере при четырех температурных состояниях, то погрешность среднего будет не более  $\Delta l_{\text{ср}} \approx \pm 0,4$  мкм.

Установка вертикальных тубусов микроскопов производилась по отвесу на тонкой нити, находящейся в предметной плоскости горизонтального тубуса микроскопа. При перемещении микроскопа по вертикали в пределах до 14 мм заметных отклонений нуля микрометра от нити отвеса не наблюдалось.

При юстировке горизонтальных тубусов микроскопов образцовую проволоку А-8 поочередно подвешивали внутри термокамеры под вертикальными тубусами и вне термокамеры для наблюдения через горизонтальные тубусы.

Незначительно поворачивая микроскоп вокруг вертикальной оси, добивались совпадения отсчетов по окулярным микрометрам с отсчетами, полученными при наблюдении через вертикальные тубусы.

Цена деления спиральных окулярных микрометров для каждого из тубусов определена по трем хорошо изученным миллиметровым интервалам шкалы рабочих эталонов. В среднем цена деления окулярного микрометра у левого и правого микроскопов равна 1,019 мкм.

Градуировку дифференциальных термометров производили известным методом [4] по образцовым ртутным термометрам с ценой деления 0,01 град.

Исследование температурного режима в термостатной камере показало, что поперечный градиент температуры в ней, измеренный с помощью термометров, не превышает 0,05 град. Температурный градиент вдоль камеры иногда достигал 1,0 град.

Для определения температурных коэффициентов удлинения  $\alpha$  и  $\beta$  исследуемой меры абсолютным методом сравнивают ее длину при различных температурах с длиной исходной образцовой меры, имеющей сравнительно постоянную температуру и малые температурные коэффициенты  $\alpha'$  и  $\beta'$ , известные с достаточной точностью.\*

Отклонения температуры  $t_i$  исходной меры от ее средней температуры  $t_{\text{ср}}$  обычно незначительны, и длина меры  $L_{t_i}$  при температуре  $t_i$  вычисляется по формуле

$$L_{t_i} = L_{t_{\text{ср}}} + \alpha_{t_{\text{ср}}}(t_i - t_{\text{ср}}), \quad (1)$$

где  $L_{t_{\text{ср}}}$  — длина исходной образцовой меры при температуре  $t_{\text{ср}}$ ;

$\alpha_{t_{\text{ср}}} = \alpha' + 2\beta't_{\text{ср}}$  — температурный коэффициент удлинения исходной образцовой меры при температуре  $t_{\text{ср}}$ .

Длина исследуемой меры  $l_i$  при температуре  $t_i$  равна

$$l_i = l_0 + \alpha t_i + \beta t_i^2, \quad (2)$$

где  $l_0$  — длина исследуемой меры при нормальной температуре  $20^\circ\text{C}$  или при  $0^\circ\text{C}$ .

\* Температурные коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  отнесены ко всей длине меры.

Из равенств (1) и (2) получим

$$\Delta l_0 + \alpha t_i + \beta t_i^2 = \Delta l_i, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta l_0 &= l_0 - L_{t_0}, \\ \Delta l_i &= l_i - L_{t_i} - \alpha_{t_0} (t_i - t_0). \end{aligned}$$

В уравнении (3) величины  $\Delta l_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  являются неизвестными и для их определения производят ряд измерений разности  $\Delta l_i$  при различных температурах исследуемой меры, причем получают столько уравнений вида (3), сколько было рядов наблюдений. Поскольку результаты измерений сопровождаются случайными погрешностями измерений разности длин и температуры мер, то число  $n$  уравнений (3) должно быть больше, чем число неизвестных. Решение системы из  $n$  условных уравнений

$$\begin{aligned} \Delta l_0 + \alpha t_1 + \beta t_1^2 &= \Delta l_1 \\ \Delta l_0 + \alpha t_2 + \beta t_2^2 &= \Delta l_2 \\ \dots & \\ \Delta l_0 + \alpha t_n + \beta t_n^2 &= \Delta l_n \end{aligned} \quad (4)$$

производится по способу наименьших квадратов, что дает возможность оценить и точность вычисленных значений коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ .

Решать систему (4) удобно по упрощенной схеме, исключив из уравнений величины  $\Delta l_0$  и сократив таким образом число неизвестных до двух. Получим новую систему уравнений

$$\begin{aligned} a_1 x + b_1 \beta' &= l_1 \\ a_2 x + b_2 \beta' &= l_2 \\ \dots & \\ a_n x + b_n \beta' &= l_n, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \beta' &= 10\beta; \quad a_i = t_i - t_{cp}; \\ b_i &= 0,1 (t_i^2 - t_{cp}^2); \quad l_i = \Delta l_i - \Delta l_{cp}. \end{aligned}$$

Решая систему уравнений (5) по способу наименьших квадратов, получим

$$\begin{aligned} [aa] x + [ab] \beta' &= [al], \\ [ab] x + [bb] \beta' &= [bl], \\ \alpha &= \frac{[bb] [al] - [ab] [bl]}{N}, \\ \beta' &= \frac{[aa] [bl] - [ab] [al]}{N}, \end{aligned}$$

где

$$N = [aa] [bb] - [ab]^2.$$

Веса неизвестных равны

$$P_x = \frac{N}{[bb]}, \quad P_{\beta'} = \frac{N}{[aa]}.$$



Средняя квадратичная погрешность  $\sigma_0$  ряда измерений равна

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-2}},$$

где  $v$  — остаточные погрешности, а средние квадратичные погрешности найденных значений  $\alpha$  и  $\beta'$  будут

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_0}{\sqrt{P_\alpha}}, \quad \sigma_{\beta'} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{P_{\beta'}}} \quad \text{и} \quad \sigma_\beta = 0,1 \sigma_{\beta'}.$$

Длину проволоки для любой температуры  $t$ , при выполнении измерений с ее помощью, можно вычислить по уравнению

$$L_t = L_{20} + \alpha(t-20) + \beta(t-20)^2 = L_{20} + \alpha_t \Delta t,$$

где

$$\alpha_t = \alpha + \beta(t-20), \quad \Delta t = t - 20^\circ.$$

Погрешность  $\delta$  определения поправки  $\Delta L_t = \alpha_t \Delta t$  равна

$$\delta = \sqrt{\sigma_\alpha^2 \Delta t^2 + \alpha^2 \sigma_{\Delta t}^2}. \quad (6)$$

Здесь  $\sigma_\alpha$  — погрешность температурного коэффициента удлинения;

$\sigma_{\Delta t}$  — погрешность измерения температуры меры.

Поскольку при измерении, помимо температурной погрешности, имеют место и другие погрешности, то должно выполняться неравенство  $\delta < n\xi_t$ , ( $0 < n \leq 1$ ), где  $\xi_t$  — заданная погрешность измерений проволокой. Из равенства (6) следует, что  $\delta \geq \sigma_\alpha \Delta t$ . Заменяя  $\delta$  большей величиной  $n\xi_t$ , будем иметь

$$n\xi_t > \sigma_\alpha \Delta t; \quad \sigma_\alpha < \frac{n\xi_t}{\Delta t}, \quad (7)$$

и

$$\sigma_{\Delta t} \leq \frac{1}{\alpha} \sqrt{n^2 \xi_t^2 - \sigma_\alpha^2 (\Delta t)^2}.$$

В зависимости от заданной точности линейных измерений, пользуясь формулами (7), можно вычислять необходимую точность определения коэффициента  $\alpha$  и точность измерения температуры  $t$ . Например, если компарирование проволоки должно производиться с погрешностью  $\pm 5$  мкм, то, полагая  $n = 0,3$  и  $\Delta t = 2$  град, получим

$$\sigma_\alpha \leq 0,8 \text{ мкм/град.}$$

При экспериментальном исследовании dilatометрической установки были определены температурные коэффициенты удлинения инварных проволок А-8 и № 611 в интервале 3—31°С. В каждой температурной серии было произведено четыре приема измерений.

Решение систем уравнений дало для проволоки № 611 значения коэффициентов

$$\alpha = +16,1 \text{ мкм/град}, \quad \beta = -0,06 \text{ мкм/град}^2$$

со средними квадратичными погрешностями

$$\pm 0,7 \text{ мкм/град} \text{ для } \alpha \text{ и } \pm 0,02 \text{ мкм/град}^2 \text{ для } \beta.$$

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений  $\sigma_0$  обусловлена погрешностью измерений как удлинений  $\Delta L_t$  исследуемой прово-

локи, так и ее температуры. Полагая равную вероятность влияния этих погрешностей на результат измерений, после дифференцирования равенства (3) найдем погрешность  $\sigma_t$  измерения температуры проволоки

$$\sigma_t = \frac{1/2\sigma_0}{\alpha + 2\beta t} \quad (8)$$

Подставляя в равенство (8) найденные значения  $\alpha$  и  $\beta$  и среднее значение температуры исследуемой меры  $t_{\text{ср}} = 17^\circ \text{C}$ , получим

$$\sigma_t \approx \pm 0,17 \text{ град.}$$

Метод измерения температуры проволоки с помощью дифференциальных термпар оказался наиболее простым и практичным. Исследования показали, что средняя квадратичная погрешность ряда измерений температуры проволоки, даже при наличии температурного градиента вдоль камеры, не превышает 0,2 град.

Инварная проволока № 611 после определения ее температурных коэффициентов была подвешена вне термокамеры и сейчас служит в установке в качестве исходной образцовой меры.

При исследовании инварной проволоки А-8 были получены следующие значения ее температурных коэффициентов:

$$\alpha = 19,8 \text{ мкм/град}, \quad \beta = -0,06 \text{ мкм/град}^2.$$

Определение коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  проволоки А-8 представляло для нас особый интерес, поскольку их значения уже определялись в Международном бюро мер и весов методом Гильома (по исследованию однометрового образца проволоки той же плавки) и в Центральном НИИ геодезии, аэросъемки и картографии (ЦНИИГАиК) термоэлектрическим методом [2]. В таблице даны результаты этих определений, приведенные к  $20^\circ \text{C}$ .

| Лаборатория                            | Год  | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ | $\beta \cdot 10^6 \text{ град}^{-2}$ |
|--|------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Международное бюро мер и весов . . . . | 1903 | +23,6                                 | -0,06                                |
| ЦНИИГАиК . . . . .                     | 1957 | +18,3                                 | +0,219                               |
| ВНИИМ . . . . .                        | 1961 | +17,4                                 | -0,06                                |

Значение температурного коэффициента  $\alpha$  по нашим измерениям близко к результату ЦНИИГАиК. Значения коэффициента  $\beta$ , полученные во ВНИИМ и ЦНИИГАиК различаются. Значения  $\beta$  по нашим измерениям совпадают с полученным в Международном бюро, где оно найдено (отдельно от определения  $\alpha$ ) в результате специальных исследований короткого образца по методу Физо, поскольку компараторные методы исследования однометрового образца не дают возможности получить значение  $\beta$  с достаточной точностью. С другой стороны, значение  $\alpha$ , определенное в Международном бюро по исследованиям однометрового образца, значительно отличается от наших результатов. Значения температурных коэффициентов проволок, полученные методом измерения их длины при различных температурах, но в стационарных условиях, следует считать более достоверными.

Температурные коэффициенты удлинения для 24-метровых инварных проволок на установке ВНИИМ определяются со средними квадратичными погрешностями порядка  $\pm 1 \text{ мкм/град}$  для  $\alpha$  и  $\pm 0,025 \text{ мкм/град}^2$  для  $\beta$ .

В сочетании с ранее выполненной работой по созданию 30-метрового интерференционного компаратора [5] наличие 24-метрового дилатометра дает возможность производить во ВНИИМ полную поверку 24-метровых геодезических проволок и образцовых ленточных мер длины с необходимой для практики точностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bonhoure A., Le nouveau dilatomètre pour fils géodésiques du Bureau International, Paris, 1955.
2. Юркевич А. С., Термоэлектрический метод определения температурных коэффициентов расширения лент и проволок, Труды ЦНИИ геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 34, Геодезиздат, М., 1941.
3. Данилов В. В., К вопросу о влиянии наклонов осей микроскопов на точность определения длины базиса компаратора, Сборник научно-технических и производственных статей по геодезии, картографии, топографии, аэросъемке и гравиметрии, вып. III, Геодезиздат, 1944.
4. Торопин С. И., О точности измерения температуры эталонов длины при сличениях на компараторах, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 47(107), 1961.
5. Каяк Л. К., Торопин С. И., Тридцатиметровый интерференционный компаратор ВНИИМ, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 47(107), 1961.

Поступила в редакцию  
3/IX 1963 г.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА  
УДЛИНЕНИЯ ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА И СТЕКЛА СОРТА 23**

*В статье приводятся результаты определений температурных коэффициентов удлинения плавленого кварца в интервале 20—750° С и стекла сорта 23 в интервале 20—350° С, произведенных на интерференционном dilatометре ВНИИМ абсолютным методом. Кратко описаны устройство интерференционного dilatометра ВНИИМ и методика исключения погрешностей, возникающих от неточной установки исследуемого образца.*

В связи с тем, что последние годы характеризуются усложнением условий эксплуатации машин и агрегатов, а также расширением температурных интервалов, появилась необходимость исследовать свойства материалов в условиях, отличающихся от нормальных. С этой целью во ВНИИМ были исследованы на абсолютном интерференционном dilatометре [1] температурные коэффициенты удлинения ряда материалов.

Интерференционный dilatометр (рис. 1) состоит из печи-термостата 2, терморегуляторов 1, устройств для измерения температуры образца и для измерения длины.

Трубчатая печь-термостат имеет три обмотки: основную — для создания заданной температуры и две дополнительные — для выравнивания температурного поля вдоль печи. Внутрь печи вводится кварцевый столик, на который помещают образец, заключенный между двумя кварцевыми пластинами. Образец и пластины образуют интерферометр. Для уменьшения температурного градиента верхняя часть столика заключена в массивный металлический блок. Исследуемый образец изготовлен так, что он в трех точках соприкасается с каждой из пластин. Опорные поверхности образца непараллельны между собой, поэтому при освещении интерферометра параллельным пучком света образуются интерференционные полосы равной толщины. В качестве источника монохроматического света используются лампы с  $Cd^{114}$ .

Длина образца измеряется методом совпадения дробных частей порядков интерференции [2]. Терморегулятор с фотореле обеспечивает в течение 1—2 ч постоянство температуры с колебаниями, не превышающими 0,05 град. Температура образца измеряется двумя платиноводий-платиновыми термопарами, помещаемыми в непосредственной близости от образца на разной высоте по его длине. Это повышает точность измерения температуры и позволяет заметить случайные ошибки измерений, возникающие из-за загрязнения электродов или неравенства темпера-

тур свободных концов термопар, а также судить о градиенте температур по высоте образца. Т. э. д. с. термопар измеряется компенсационным методом. Погрешность измерения температуры не превосходит 0,05% от перепада температуры вдоль электродов.

Для исследования температурного градиента по высоте образца создана специальная дифференциальная термопара, позволяющая измерять температуру в трех точках на высоте 30 мм. При исследовании

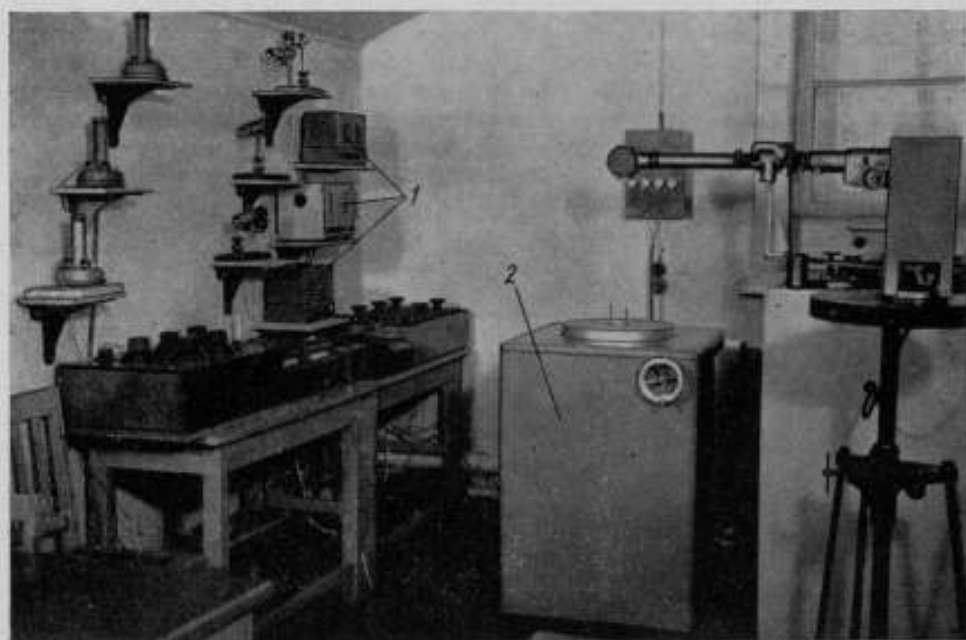


Рис. 1. Общий вид dilatометрической установки.

установки были выбраны режимы нагрева, обеспечивающие минимальный градиент по высоте образца, который в настоящее время не превышает 0,3 град. Каждой задаваемой температуре соответствует определенное сочетание токов в основной и дополнительных обмотках. Последовательный переход от одной температуры к другой и рациональный выбор скоростей нагрева для каждого материала обеспечивают равномерный прогрев всех деталей интерферометра и исключают их взаимное смещение в процессе нагрева.

Результаты исследований на dilatометре в значительной степени зависят от погрешностей установки образца, возникающих при попадании посторонних включений между пластинами интерферометра и образцом (пыль, жировые слои от рук наблюдателя и воздушные прослойки), что может вызвать изменение угла клина интерферометра. Поэтому жировые слои и пыль предварительно удаляли, пользуясь спиртом и беличьей кисточкой. Воздушные прослойки устраняли, нагревая образец до 200° С. Все включения, оставшиеся между пластинами и образцом, при этом выгорали, а воздух при расширении вытеснялся.

Перед каждой новой серией измерений образец несколько раз устанавливали в печь. Повторение при этом интерференционной картины показывало на отсутствие посторонних включений и правильность установки образца.

После окончания нагрева образец постепенно охлаждали до нормальной температуры. Совпадение в пределах погрешности измерений длины образца до и после нагрева свидетельствует об отсутствии разворотов и сдвигов пластин и образца относительно друг друга.

Длина образца на dilatометре измеряется в условиях, отличных от нормальных. Как известно, длина волны зависит от температуры, влажности и давления воздуха. Поэтому необходимо в полученное из измерений значение длины образца ввести поправку для того, чтобы перейти от значений длин волн, соответствующих нормальным условиям, к их значениям в условиях измерений. Поправка вычисляется по формуле Сирса и Баррела [3]. Ввиду того, что расчеты ведутся для зеленой линии  $\text{Cd}^{114}$  с  $\lambda_{\text{вол}} = 0,50858475$  мкм, то для других длин волн это внесет погрешность в результаты измерений не более  $2,5 \cdot 10^{-6}$ . При температурах, значительно отличающихся от нормальной, погрешность определения поправки возрастает от  $2 \cdot 10^{-7}$  при  $20^\circ\text{C}$  до  $5 \cdot 10^{-8}$  при  $700^\circ\text{C}$ .

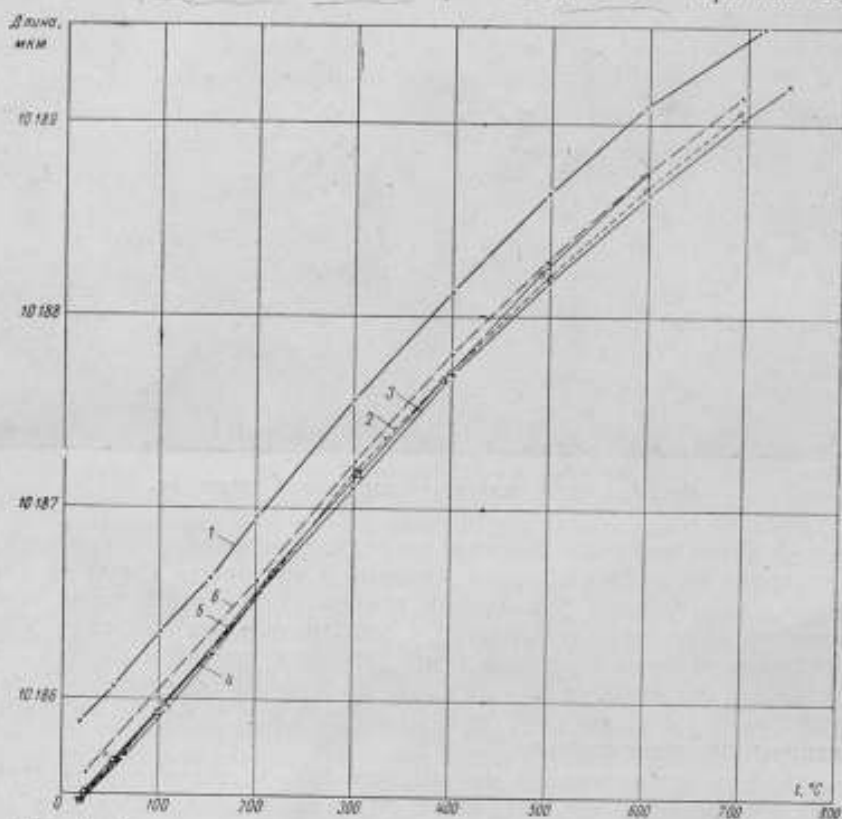


Рис. 2. Изменение длины образцов плавленого кварца с изменением температуры.

Для исследования температурного коэффициента удлинения  $\alpha$  плавленого кварца производства завода Ломоносова было изготовлено три образца высотой около 10 мм. Исследование образца № 1 производилось одной серией, образцов № 2 и 3 — несколькими сериями. В каждой серии образец устанавливали заново, выдерживали при нормальной температуре в течение нескольких часов и затем измеряли его длину в выбранной точке. После этого образец нагревали, последовательно останавливаясь в точках около 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700,

750° С. При каждой из этих температур образец выдерживали длительное время и затем измеряли его длину, повторяя измерение не менее четырех раз. За результат принимали среднее из полученных данных. Измерив длину образца, ток в основной обмотке увеличивали и продолжали нагрев до следующей температуры. Средний температурный коэффициент удлинения в интервале 20° С ÷  $t$  вычислялся по формуле

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{l_t - l_{20}}{l_{20}(t - 20^\circ)} \quad (1)$$

где  $l_{20}$ ,  $l_t$  — длина образца при температурах 20° С и  $t$  соответственно.

Результаты измерения длины образцов № 2 и 3 из плавленого кварца при различных температурах приведены на рис. 2. Кривые 1, 2, 3 и 4 построены по данным четырех различных серий измерений образца № 3, кривые 5 и 6 — для образца № 2. Погрешности в определении длины образца для различных серий и образцов не превосходят 0,1 мкм.

Результаты определения  $\alpha_{\text{ср}}$  плавленого кварца приведены в табл. 1. Расхождения в значениях  $\alpha_{\text{ср}}$ , полученных в разных сериях измерений для одних и тех же температурных интервалов, не превосходили  $3 \cdot 10^{-8} \text{ град}^{-1}$ . Для разных образцов эти расхождения достигали  $4 \cdot 10^{-8} \text{ град}^{-1}$ .

Таблица 1

| Образец № 1                  |                                       | Образец № 2                  |                                       |                              |                                       | Образец № 3                  |                                       |                              |                                       |                              |                                       |                              |                                       |
|------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| I серия                      |                                       | I серия                      |                                       | II серия                     |                                       | I серия                      |                                       | II серия                     |                                       | III серия                    |                                       | IV серия                     |                                       |
| $t_1 - 20,4^\circ \text{ C}$ |                                       | $t_1 - 23,4^\circ \text{ C}$ |                                       | $t_1 - 23,4^\circ \text{ C}$ |                                       | $t_1 - 16,2^\circ \text{ C}$ |                                       | $t_1 - 16,6^\circ \text{ C}$ |                                       | $t_1 - 17,3^\circ \text{ C}$ |                                       | $t_1 - 19,7^\circ \text{ C}$ |                                       |
| $t_2$                        | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ | $t_2$                        | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ | $t_2$                        | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ | $t_2$                        | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ | $t_2$                        | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ | $t_2$                        | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ | $t_2$                        | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ |
| —                            | —                                     | 52,0                         | 0,50                                  | —                            | —                                     | 47,4                         | 0,53                                  | 51,8                         | 0,54                                  | 51,9                         | 0,53                                  | 64,0                         | 0,52                                  |
| —                            | —                                     | 97,9                         | 0,53                                  | —                            | —                                     | 101,4                        | 0,56                                  | 103,4                        | 0,57                                  | 100,8                        | 0,55                                  | 108,3                        | 0,54                                  |
| —                            | —                                     | 149,9                        | 0,56                                  | —                            | —                                     | 155,5                        | 0,56                                  | —                            | —                                     | 151,1                        | 0,56                                  | 154,0                        | 0,56                                  |
| 200,6                        | 0,58                                  | 215,5                        | 0,58                                  | 198,7                        | 0,58                                  | 197,7                        | 0,57                                  | 197,6                        | 0,58                                  | 199,3                        | 0,58                                  | 202,4                        | 0,58                                  |
| 292,3                        | 0,59                                  | 302,3                        | 0,58                                  | 300,3                        | 0,58                                  | 298,4                        | 0,57                                  | 302,1                        | 0,60                                  | 298,5                        | 0,59                                  | —                            | —                                     |
| 397,0                        | 0,58                                  | 391,6                        | 0,57                                  | 399,8                        | 0,57                                  | 398,9                        | 0,57                                  | 397,6                        | 0,58                                  | 398,3                        | 0,58                                  | —                            | —                                     |
| 489,0                        | 0,57                                  | 490,6                        | 0,56                                  | 498,0                        | 0,55                                  | 499,2                        | 0,55                                  | 499,7                        | 0,56                                  | 499,5                        | 0,56                                  | —                            | —                                     |
| 583,8                        | 0,54                                  | 596,9                        | 0,55                                  | 594,5                        | 0,54                                  | 600,7                        | 0,55                                  | 596,6                        | 0,54                                  | 597,4                        | 0,54                                  | —                            | —                                     |
| 685,0                        | 0,53                                  | —                            | —                                     | 695,7                        | 0,52                                  | 695,5                        | 0,51                                  | 693,3                        | 0,52                                  | 696,6                        | 0,52                                  | —                            | —                                     |
| —                            | —                                     | —                            | —                                     | —                            | —                                     | 741,9                        | 0,51                                  | —                            | —                                     | —                            | —                                     | —                            | —                                     |

$t_1$ ,  $t_2$  — среднее значение измеренной температуры в °С.  
 $\alpha$  — средний температурный коэффициент удлинения в интервале температур  $t_1 - t_2$  °С.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что погрешности определения  $\alpha$  на интерференционном dilatометре ВНИИМ не превосходят  $4 \cdot 10^{-8} \text{ град}^{-1}$ .

По данным табл. 1 на рис. 3 построены кривые 1—7 зависимости от температуры коэффициента  $\alpha_{\text{ср}}$ . Кривая 1 построена по значениям, полученным как среднее из результатов измерения  $\alpha_{\text{ср}}$  в различных сериях и для различных образцов. Кривая 1 показывает, что коэффициент  $\alpha_{\text{ср}}$  плавленого кварца сначала возрастает с увеличением температуры, затем при температурах, близких к 300° С, достигает максимума. При температурах выше 400° С коэффициент  $\alpha_{\text{ср}}$  уменьшается.

Метод совпадения дробных частей порядков интерференции не позволяет исследовать  $\alpha$  выше  $800^{\circ}\text{C}$ , так как выше этой температуры начинается интенсивное свечение всех раскаленных тел и интерференционная картина плохо видна.

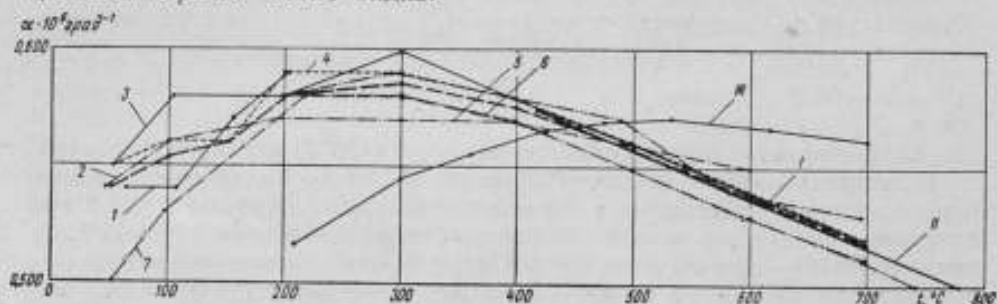


Рис. 3. Зависимость температурного коэффициента удлинения плавленого кварца от температуры.

Поэтому полученные результаты определения  $\alpha$  могут быть сравнены с результатами других исследователей (см. табл. 2) только в интервале  $20 \div 800^{\circ}\text{C}$ . На рис. 3 кривая II построена по данным Мозера [4], а кривая III — по данным Рэндалла [5].

Таблица 2

| $t^{\circ}\text{C}$ | Средний температурный коэффициент удлинения $\alpha_{\text{ср}, t} \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ |            |                        |             |               |                      |       |
|---------------------|--|------------|------------------------|-------------|---------------|----------------------|-------|
|                     | Randall [5]  | Scheel [7] | Souder and Hidnert [8] | Beattie [9] | Saunders [10] | Otto and Thomas [11] | ВНИИМ |
| 1                   | 2  | 3          | 4                      | 5           | 6             | 7                    | 8     |
| 0                   |  |            |                        | 0,382       |               |                      |       |
| 25                  |  |            |                        | 0,419       |               |                      |       |
| 50                  |  |            |                        | 0,451       |               |                      | 0,475 |
| 75                  |  |            |                        | 0,479       |               |                      |       |
| 100                 |  | 0,506      | 0,442                  | 0,502       |               |                      | 0,527 |
| 150                 |  |            |                        | 0,537       |               |                      | 0,540 |
| 200                 | 0,509  | 0,584      | 0,490                  | 0,559       | 0,500         | 0,589                | 0,563 |
| 250                 |  |            |                        | 0,572       |               |                      |       |
| 300                 | 0,539  | 0,627      | 0,522                  | 0,579       | 0,553         | 0,591                | 0,577 |
| 350                 |  |            |                        | 0,579       |               |                      |       |
| 400                 | 0,557  | 0,636      | 0,543                  | 0,576       | 0,581         | 0,577                | 0,568 |
| 450                 |  |            |                        | 0,570       |               |                      |       |
| 500                 | 0,563  | 0,612      | 0,516                  |             | 0,569         | 0,558                | 0,552 |
| 600                 | 0,562  | 0,600      | 0,526                  |             | 0,551         | 0,538                | 0,536 |
| 700                 | 0,556  | 0,571      |                        |             | 0,528         | 0,517                | 0,515 |
| 750                 |  |            | 0,498                  |             |               |                      | 0,503 |
| 800                 | 0,543  |            |                        |             | 0,506         | 0,496                | 0,481 |
| 900                 | 0,535  |            | 0,478                  |             | 0,496         | 0,478                |       |
| 1000                | 0,541  |            | 0,478                  |             |               | 0,471                |       |
| 1060                |  |            |                        |             |               | 0,480                |       |
| 1100                | 0,582  |            |                        |             |               |                      |       |



Полученные нами результаты хорошо согласуются с данными Мозера, расхождения с данными Рандалла при температурах около 100°С достигают  $1 \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup>, на других участках эти расхождения не превышают  $5 \cdot 10^{-8}$  град<sup>-1</sup>.

С целью определения не только линейного, но и квадратичного коэффициента  $\beta$  температурной формулы, результаты измерения длины кварцевого образца при различных температурах были обработаны по способу наименьших квадратов. Такая обработка результатов измерений позволила для плавленного кварца вычислить  $\alpha_{20}$  и  $\beta$  для интервала температур 20÷300°С:  $\alpha_{20} = 0,50 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>;  $\beta = 0,0004 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-2</sup>.

Исследование стекла сорта 23 имело особое значение, так как предполагалось в дальнейшем использовать его для изготовления образцов, служащих для проверки относительных dilatометров, применяемых в электровакуумной промышленности.

Из шести пластин одной плавки было изготовлено шесть образцов. Все они были исследованы в интервале 20÷120°С. Расхождение в значениях  $\alpha_{ср}$  для них не превышает  $6 \cdot 10^{-8}$  град<sup>-1</sup>. Затем образцы № 1 и 6 были исследованы в интервале 20÷350°С.

При исследовании температурного коэффициента удлинения  $\alpha$  стекла длина образца определялась двумя методами:

1. Находили длину образца методом совпадения дробных частей порядков интерференции при двух температурах в стационарном режиме и по формуле (1) вычисляли  $\alpha_{ср}$ .

2. Длину образца определяли непосредственно методом счета интерференционных полос [6] в динамическом режиме со скоростью нагрева 0,001 град/сек.

Температурный коэффициент удлинения в этом случае определяли по формуле

$$\alpha = \frac{\lambda_n \Delta N}{2L_{20} \Delta t} + \frac{273}{760} \cdot \frac{n_0 - 1}{\Delta t} \left( \frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right), \quad (2)$$

где  $\Delta N$  — число прошедших интерференционных полос;

$\lambda_n = 0,50858475$  мкм — длина волны;

$L_{20}$  — длина образца при 20°С (мкм);

$\Delta t = t_2 - t_1$  град, где  $t_1$  и  $t_2$  — две последовательные температуры °С;

$p$  — давление (мм рт. ст.);

$T_1 = 273 + t_1$ ;  $T_2 = 273 + t_2$ ;

$n_0$  — коэффициент преломления воздуха при 20°С.

На рис. 4 и 5 приведены в качестве примера результаты определения удлинения образцов № 1 и 6 стекла сорта 23 методом счета числа интерференционных полос (кривые 1 рис. 4 и 5) и методом совпадения дробных частей порядков интерференции (кривая 2 рис. 4 и кривые 2 и 3 рис. 5) в интервале температур 20÷330°С. Как видно из графиков, расхождение в определении удлинения  $\Delta l$  этими двумя методами составляет около 0,10 мкм. Результаты вычисления средних температурных коэффициентов удлинения стекла сорта 23 двумя методами в интервале 20÷350°С приводятся в табл. 3; расхождения в значениях  $\alpha$  при этом не превышают  $3 \cdot 10^{-8}$  град<sup>-1</sup>.

Таким образом, если теплопроводность исследуемого материала достаточно высока, скорость нагрева образца не более 0,001 град/сек и температурный коэффициент удлинения не менее  $5 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>, то для определения  $\alpha$  можно с достаточной точностью применить динамический метод.

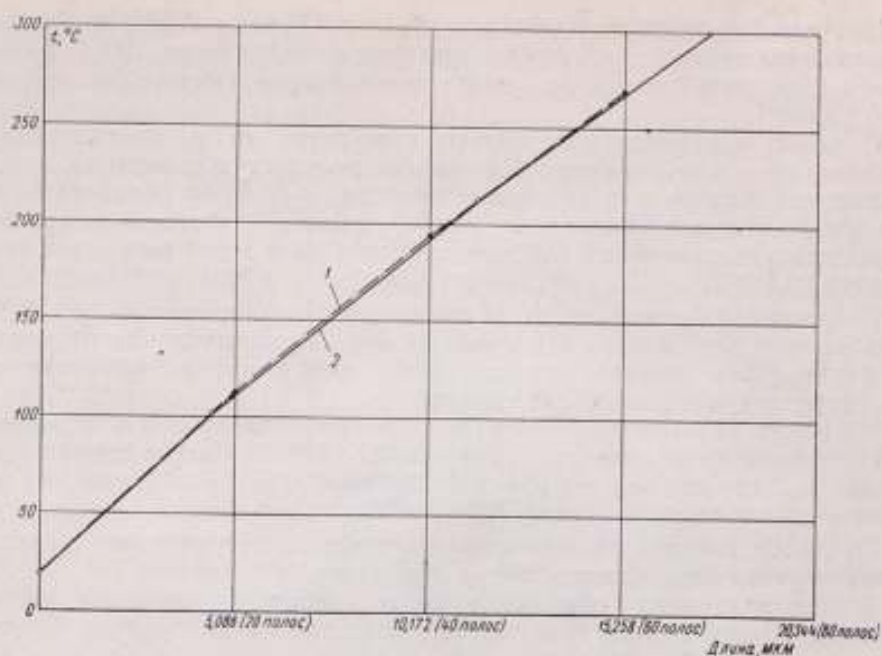


Рис. 4. Изменения длины образца № 1 стекла сорта 23 с изменением температуры.

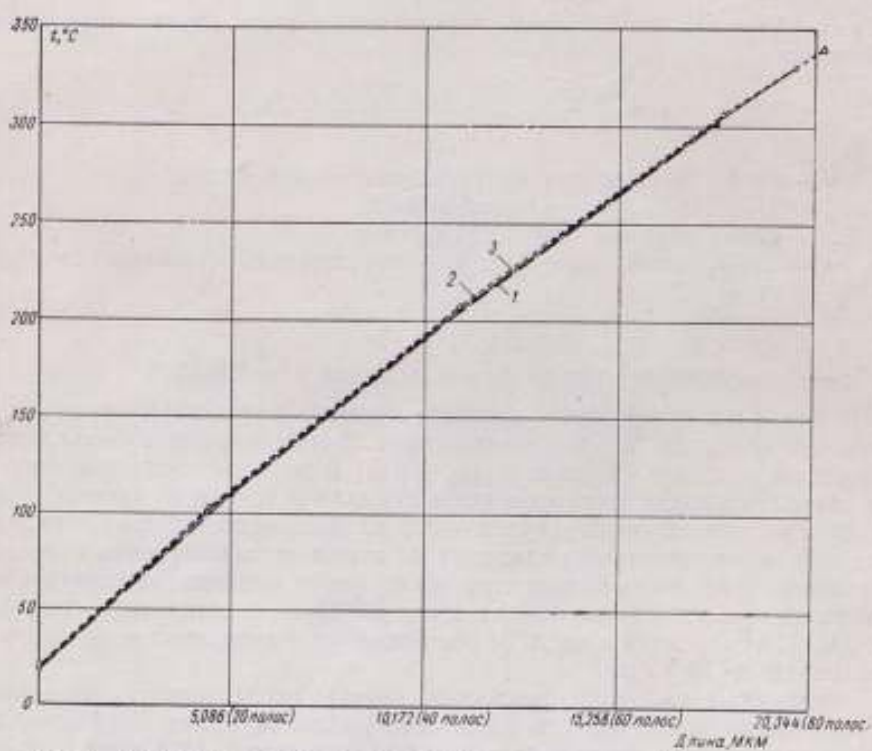


Рис. 5. Изменение длины образца № 6 стекла сорта 23 с изменением температуры.

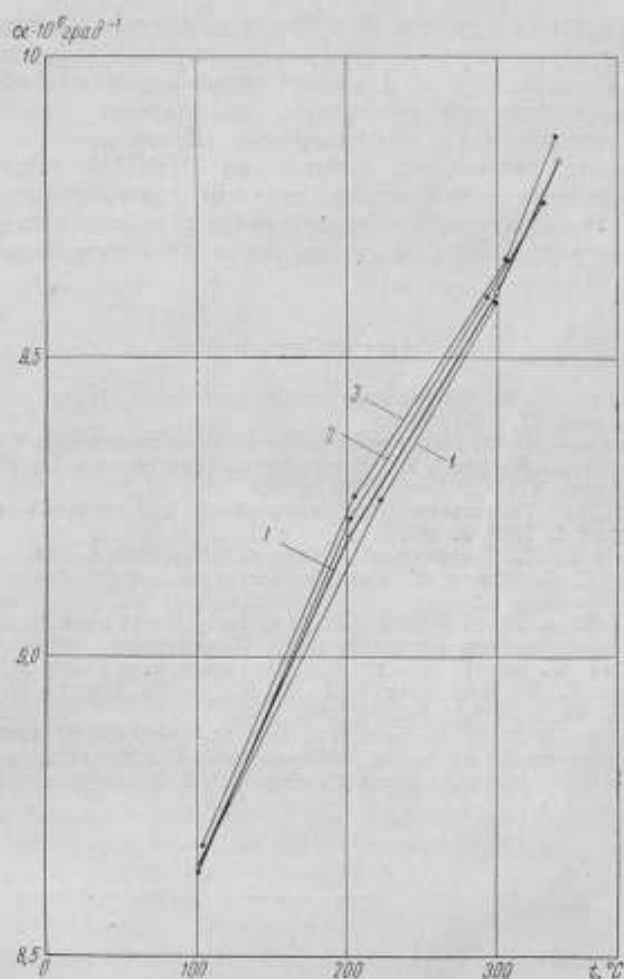


Рис. 6. Зависимость температурного коэффициента удлинения стекла сорта 23 от температуры.

Таблица 3

| Образец № 1                 |                                       |                       | Образец № 6                 |                                       |                       |                             |                                       |
|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| $t_1 = 17,8^\circ \text{C}$ |                                       |                       | $t_1 = 17,8^\circ \text{C}$ |                                       |                       | $t_1 = 18,4^\circ \text{C}$ |                                       |
| $t_2$                       | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ |                       | $t_2$                       | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ |                       | $t_2$                       | $\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$ |
|                             | по методу совпадения                  | по методу счета полос |                             | по методу совпадения                  | по методу счета полос |                             | по методу совпадения                  |
| 100,6                       | 8,63                                  | 8,60                  | 100,2                       | 8,63                                  | 8,64                  | 101,7                       | 8,66                                  |
| 212,3                       | 9,25                                  | 9,25                  | 200,4                       | 9,22                                  | 9,25                  | 206,0                       | 9,26                                  |
| 299,4                       | 9,60                                  | 9,58                  | 294,1                       | 9,59                                  | 9,60                  | 306,0                       | 9,64                                  |
|                             |                                       |                       | 330,0                       | 9,75                                  | 9,76                  | 339,2                       | 9,86                                  |

$t_1, t_2$  — среднее значение измеренной температуры в  $^\circ\text{C}$ .  
 $\alpha$  — средний температурный коэффициент удлинения в интервале температур  $t_2 - t_1$   $^\circ\text{C}$ .

По данным табл. 3 на рис. 6 построены кривые зависимости коэффициента  $\alpha$  от температуры. Кривая 1 построена для образца № 1. Кривые 3 и 2 — для первой и второй серий измерения образца № 6. Кривая 1 построена по значениям, полученным как среднее из результатов измерения  $\alpha_{\text{ср}}$  для различных образцов.

В результате настоящей работы во ВНИИМ впервые произведено определение абсолютным методом с погрешностью не более  $4 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$  температурных коэффициентов плавленого кварца в интервале температур  $20 \div 750^\circ \text{C}$  и стекла сорта 23 в интервале температур  $20 \div 350^\circ \text{C}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Королева А. Н., Интерференционный dilatометр, Труды институтов Комитета стандартов, вып. 71 (131), 1963.
2. Романова М. Ф., Интерференция света и ее применение, ОНТИ, 1937.
3. Sears V. E., Barrel H., Procès-verbaux des Séances, Comité International des Poids et Mesures XVIII, 2 Serie, 1937, p. 94.
4. Moser H., Temperature its measurement and control in science and industry, v. 3, part I, 1963, p. 167.
5. Randall H. M., The physical Review, v. XXX, 1910, p. 216.
6. Peters C. G., Cragoe C. H., Scientific papers of the Bureau of Standards, № 393, 1920.
7. Scheel K.: z. Physik 5, 167 (1921); s. auch Holborn L., Scheel K. u. Henning F., Wärmetabellen, Braunschweig: F. Vieweg Sohn, 1919.
8. Souder W. and Hidnert P., Sci. Papers Bur. Stand, 21, 1, 1926.
9. Beattie Y. A., Blaisdell B. E., Kaye Y., Gerry N. T. and Yonson C. A., Prov. Am. trad. Arts Sci. 74, 1941, p. 371.
10. Saunders Y. B., Y. Research Nat. Bur. Standards 28, 51 1942.
11. Otto Y. und Thomas W., Wissenschaftliche Abhandlungen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Band 15, 1963, Teil 2, Braunschweig, 1964.

Поступила в редакцию  
25/IX 1964 г.

ЦИФРОВОЕ ОТСЧЕТНОЕ УСТРОЙСТВО  
К ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМУ МИКРОСКОПУ

*В статье описывается новое устройство с цифровым отсчетом к инструментальному микроскопу. Погрешность его  $\pm 1$  мкм. Оно облегчает работу оператора, повышает производительность и точность измерений и может быть применено в приборах, станках и других механизмах, где в качестве измерительных устройств применяются микрометрические пары.*

Усовершенствование универсальных измерительных приборов в большинстве случаев направлено на то, чтобы повысить производительность измерения и облегчить работу наблюдателя. В Советском Союзе и за рубежом уже выпускается ряд приборов с экранным наведением и отсчетом, с совмещенными сетками и др. Однако это, несколько облегчая работу наблюдателя, лишь незначительно повышает точность измерения. Так же как и в старых конструкциях приборов, для получения результата измерения наблюдатель должен сделать ряд отсчетов, записей и вычислений. При массовых поверках на универсальных измерительных инструментальных микроскопах на эти операции тратится большая часть времени. Естественно, что при этом от наблюдателя требуется напряженная работа, в результате к концу рабочего дня у него падает производительность и появляются ошибки.

Развитие приборов массового контроля должно идти по пути создания полуавтоматизированных устройств отсчета и вычисления. Наиболее перспективно применение цифрового отсчета со сбросом показаний на нуль. В лаборатории линейно-угловых измерений ВНИИМ разработано такое устройство применительно к инструментальному микроскопу. Его можно использовать в любых приборах, станках и механизмах, где для измерения применяют микрометрические пары.

Действие этого устройства (рис. 1) основано на изменении сопротивления кругового реостата при повороте его относительно неподвижного

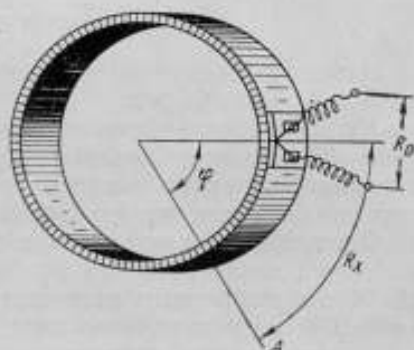


Рис. 1. Круговой реостатный датчик.  
А — неподвижный контактный стержень.

контактного стержня. Обозначим через  $R_0$  сопротивление всего кругового реостата, через  $R_x$  — сопротивление его части, соответствующее повороту реостата на угол  $\varphi$  (рад). Тогда

$$R_x = R_0 \frac{\varphi}{2\pi}.$$

Если такой круговой реостат поместить на барабан микрометрического винта с шагом 1 мм, то при каждом повороте винта он будет перемещаться относительно неподвижной гайки на 1 мм; при этом сопротивление его изменится от 0 до  $R_0$ . При повороте на некоторый угол  $\varphi$  сопротивление реостата, соответствующее линейному перемещению  $l_x$  микровинта относительно гайки, изменится от 0 до  $R_x$ . Перемещение  $l_x$  можно представить как функцию сопротивления реостата, т. е.

$$l_x = F(R_x).$$

Если при вращении микровинта с круговым реостатом сопротивление последнего изменяется по линейному закону, то между сопротивлением  $R_x$  и перемещением  $l_x$  существует прямая пропорциональная зависимость

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{l_x}{l_0},$$

где  $l_x = \frac{\varphi}{2\pi}$ ;

$l_0$  — перемещение микровинта, соответствующее полному обороту (шаг винтовой пары).

Если шаг винтовой пары  $l_0 = 1$  мм, то  $l_x = \frac{R_x}{R_0}$ . При  $R_x = R_0$  перемещение  $l_x = l_0 = 1$  мм.

Принимая  $R_0 = 10\,000$  ом и  $R_x = 260$  ом, получим

$$l_x = \frac{260}{10\,000} = 0,26 \text{ мм.}$$

Изменение сопротивления на каждые 10 ом соответствует перемещению  $l_x$  на 0,001 мм.

Устройство с цифровым отсчетом и сбросом показаний на нуль (рис. 2) состоит из кругового реостатного датчика, механизмов сброса показаний на нуль и отсчета перемещений целых миллиметров и цифрового прибора для отсчета долей миллиметра с дискретностью 0,001 мм.

Основным элементом устройства является реостатный датчик, который представляет собой проволочный реостат 10 с сопротивлением 10 000 ом, выбранным из расчета, что каждые 10 ом будут соответствовать 0,001 мм линейного перемещения.

Конструктивно реостатный датчик представляет собой круглый каркас диаметром около 75 мм из плексигласа, на котором укреплен обмотка сопротивления из манганинового провода диаметром 0,08 мм в эмалевой изоляции, намотанного в один ряд на гетинаксовую пластинку толщиной 0,5–0,8 мм, шириной примерно 26,5 мм, длиной около 235 мм. С очищенной от изоляции поверхностью провода соприкасается контактный стержень. Корпус датчика 2 посажен на барабан микровинта 3 таким образом, что при вращении барабана он также вращается за счет сил трения. Высокоомный датчик выгоден тем, что помехи, связанные с переходным сопротивлением, сопротивлением подводящих проводов и т. д., мало влияют на показания прибора. Обмотка сопротивления установлена на каркас без зазора в стыке и подчиняется линейному

закону изменения сопротивления в зависимости от угла поворота датчика. Допуск на его общее сопротивление составляет 1 ом, т. е. 0,01%. Таким образом, за полный оборот сопротивление датчика относительно контактного стержня меняется от 0 до 10 000 ом.

Для повышения срока службы датчика сопротивление снимают только в момент измерения. Во время поворота датчика контактный стержень не соприкасается с обмоткой сопротивления.

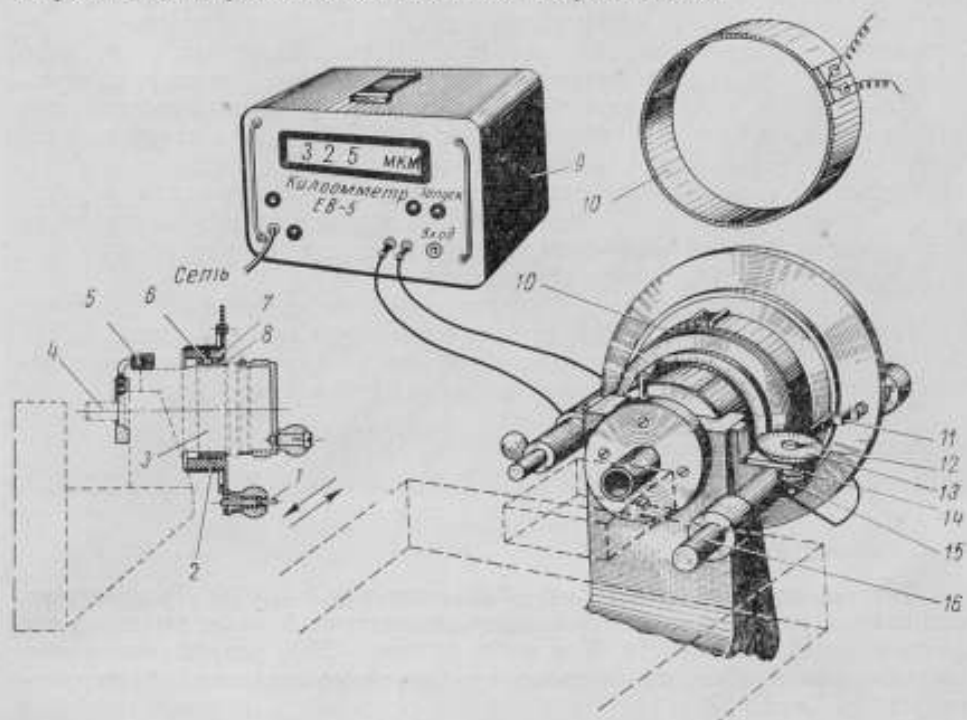


Рис. 2. Схема цифрового отсчетного устройства.

Механизм сброса показаний на нуль позволяет производить измерения от нуля. Он состоит из кольца 7, которое по наружному диаметру запрессовано в корпус 2 датчика. Посредине внутренней поверхности кольца имеется круговая выточка шириной 3÷4 мм и глубиной 2 мм. Кольцо вместе с корпусом датчика устанавливается на барабан микровинта 3.

На наружную поверхность барабана запрессовано аналогичное кольцо 8 только с выточкой по наружному диаметру. Датчик с кольцом 7 свободно надевается на кольцо 8. Чтобы датчик мог свободно вращаться вокруг оси барабана микровинта и не перемещался относительно него, имеются три отверстия, равномерно расположенных по окружности над выточками, в которые помещены три шарика 6 удерживаемые пружинами и винтами. При помощи этих винтов можно отрегулировать сопряжение датчика с барабаном микровинта так, чтобы датчик плавно вращался относительно барабана и вместе с тем чтобы не требовалось большого усилия для его вращения. Если при помощи стопора 5 закрепить микровинт, то под действием небольшого усилия датчик сможет легко вращаться относительно неподвижного барабана микровинта. Для сброса показаний на нуль необходимо при помощи стопора 5 зажать микровинт 4 и затем повернуть датчик до упора 11, предварительно

нажав на кнопку 1, затем поставить стопор 5 в исходное положение.

Механизм отсчета перемещений целых миллиметров состоит из зубчатой рейки 15, укрепленной на неподвижном контактном стержне 16, трибки 14, круговой шкалы 13 с 25-мм делениями и стрелки-указателя 12 на оси трибки.

При перемещении микровинта перемещается и постоянный контактный стержень, а вместе с ним и зубчатая рейка, которая при продольном перемещении поворачивает трибку и соответственно стрелку относительно неподвижной круговой шкалы. Показания по миллиметровой шкале сбрасываются поворотом от руки стрелки на нуль.

Для отсчета в интервале 0÷100 мкм долей миллиметра применен стандартный цифровой килоомметр 9 типа Е6-5, завода «Пунане Рэт» который подключается к датчику устройства.

Одним из основных требований, которые предъявляются к реостатному датчику, является возможно меньшее отклонение его линейности от теоретического закона изменения сопротивления. Оно не должно превышать 0,01÷0,02% общего сопротивления.

Выходное сопротивление датчика ступенчатое, а не плавное, так как контактный стержень может соприкасаться с обмоткой только через один виток. Характер ступенчатости зависит от величины полного сопротивления и числа витков на всей длине рабочей части обмотки.

Абсолютная погрешность выходного сопротивления за счет ступенчатости может быть выражена как

$$\Delta R_c \leq \pm \frac{R_0}{2n},$$

где  $n$  — число витков.

Для нашего случая  $\Delta R_c = \pm 2$  ом, так как  $n \approx 2500$ . Теоретически ожидаемая погрешность проволочного реостата составляет половину его разрешающей способности. При числе витков  $\sim 2500$  разрешающая способность равна 4 ом, что в переводе на линейные перемещения соответствует 0,4 мкм.

Для получения более точного реостата туго натянутую проволоку наматывали на специальном станке. Гетинаксовая пластинка, на которую наматывали обмотку сопротивления, отклонялась от параллельности по ширине не более  $\pm 0,01$  мм.

Для повышения стабильности сопротивления с течением времени датчик прошел искусственное старение по технологии, применяемой при изготовлении точных сопротивлений. Обмотку сопротивления зачищали окисью хрома по одной большой образующей пластины, пользуясь фетровым кругом.

После обработки гетинаксовая пластинка с сопротивлением была закреплена в корпусе из органического стекла при помощи специального регулируемого хомутика таким образом, чтобы между первым и последним витком не было зазора.

Устройство смонтировано на инструментальном микроскопе (рис. 3).

Измеряемую деталь устанавливают на предметный стол микроскопа, совмещают вертикальную пунктирную линию сетки окулярной головки с левым краем детали, зажимают микровинт при помощи стопора и поворачивают датчик сопротивления до упора. Затем микровинтом продольной подачи перемещают стол микроскопа до совмещения вертикальной пунктирной линии сетки окулярной головки с правым краем детали. Нажав кнопку подвижного контактного стержня, отсчитывают миллиметры по миллиметровой шкале, а их доли — по экрану цифрового прибора.



При измерениях на микроскопе с цифровым отсчетным устройством со сбросом показаний на нуль нет необходимости производить промежуточные отсчеты, записи и вычисления.



Рис. 3. Общий вид цифрового отсчетного устройства.

#### Погрешности цифрового отсчетного устройства со сбросом показаний на нуль

Суммарная погрешность этого устройства включает в себя следующие погрешности:

- 1) реостатного датчика  $\Delta_1$ ;
- 2) механизма сброса показаний на нуль  $\Delta_2$ ;
- 3) цифрового электроизмерительного прибора  $\Delta_3$ .

Погрешность реостатного датчика

$$\Delta_1 = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2}$$

включает частные погрешности:

- $\delta_1$  — методические;
- $\delta_2$  — технологические;
- $\delta_3$  — связанные с установкой сопротивления.

Методические погрешности  $\delta_1$  обусловлены нелинейностью и ступенчатостью датчика.

Если сопротивление изменяется по линейному закону, то погрешность от нелинейности датчика может быть выражена в виде

$$\delta_i^n = \frac{\Delta R_{1x}^n}{R_x}$$

где  $\Delta R_{1x}^n$  — максимальное отклонение сопротивления датчика от его фактической характеристики;

$R_x$  — текущее сопротивление датчика, соответствующее максимальному отклонению  $\Delta R_{1x}^n$ .

Исследования показали, что погрешность  $\Delta R_{1r}^H$  не превышает 4 ом или, в переводе на линейные перемещения, 0,4 мкм. Измеренное фактическое сопротивление будет отличаться от теоретического, так как проволочный реостат имеет конечное число витков.

Абсолютная погрешность выходного сопротивления из-за ступенчатости его характеристики может быть выражена зависимостью

$$\Delta R_c < \pm \frac{R_0}{2n}.$$

В нашем случае при  $R_0 = 10\,000$  ом и  $n = 2500$  будем иметь

$$\Delta R_c < \frac{10\,000}{2 \cdot 2500} < 2 \text{ ом},$$

или в переводе на линейные перемещения

$$\delta_1^{ст} = \pm 0,2 \text{ мкм}.$$

Технологические погрешности  $\delta_2$  обусловлены непостоянством сопротивления по длине наматываемой проволоки, колебаниями геометрических размеров пластинки, на которой намотана проволока, неравномерностью натяжения при намотке.

Исследования показали, что если весь датчик намотан одним проводом, то погрешность от непостоянства сопротивления по длине сказывается только на общем его сопротивлении.

Так как отклонение от параллельности гетинаксовой пластинки, на которую наматывается проволока, не превышает по ширине 0,02 ÷ 0,03 мм и по толщине 0,01 мм, то максимальная погрешность за счет этого отклонения будет

$$\delta_2^* = 2(0,03 + 0,01) \cdot 10^{-3} \cdot 90 = 0,07 \text{ ом},$$

или в переводе на линейные перемещения

$$\delta_2^* = 0,007 \text{ мкм}.$$

Здесь 90 — сопротивление 1 м наматываемого провода в омах. Погрешностью  $\delta_2^*$  можно пренебречь из-за ее малости.

Погрешности за счет неточностей шага намотки в основном вызваны погрешностями в кинематических цепях механизма станка, на котором наматывается на пластинку проволока.

Обозначив накопленную погрешность кинематической цепи подачи намоточного станка  $\delta_{ст}$ , шаг намотки  $t_i$ , погрешность, вызванную ступенчатостью характеристики,  $\delta_{ст}$ , получим суммарную погрешность

$$\delta_i = \frac{\delta_{ст} \cdot \delta_{ст}}{R_0 \cdot t_i}.$$

Для нашего случая

$$\delta_i = \frac{2 \cdot 0,1}{10\,000 \cdot 0,1} = 0,0002 \text{ мм}, \text{ или } \delta_i = 2 \text{ ом},$$

что соответствует 0,2 мкм.

Неравномерность натяжения проволоки при намотке вызывает изменение ее сопротивления вследствие уменьшения диаметра. Как показали эксперименты, этой погрешностью из-за ее малости можно пренебречь.

Погрешности, связанные с установкой сопротивления на каркас, в основном зависят от отклонения его от формы круга. Допуск на это

отклонение задается в пределах  $0,01 \div 0,02$  мм. Оно вызывает изменения по дуге  $L$  окружности

$$\delta L - \delta L_1 = \alpha \left( \frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2} \right) = \alpha \frac{0,02}{2} = 0,01\alpha,$$

где  $D_1$  и  $D_2$  — диаметры окружности до и после установки каркаса.

Максимальное значение погрешности

$$\delta_{\phi} = 3,14 \cdot 0,01 \approx 0,03 \text{ мм},$$

или в переводе на линейные перемещения

$$\delta_{\phi} = 0,1 \text{ мкм}.$$

Суммарная погрешность реостатного датчика будет равна

$$\Delta_1 = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} = \sqrt{0,4^2 + 0,2^2 + 0,2^2} \approx \pm 0,5 \text{ мкм}.$$

Погрешность механизма сброса показаний на нуль определена опытным путем и не превышает

$$\Delta_2 = \pm 0,3 \text{ мкм}.$$

В качестве цифрового электронизмерительного прибора применен цифровой килоомметр с предельной погрешностью  $0,1\%$  измеряемой величины. Поэтому предельная погрешность измерения при его помощи максимального сопротивления  $10\,000$  ом будет  $10$  ом, или в переводе на линейные перемещения  $\Delta_3 = \pm 1$  мкм.

Суммарная погрешность для цифрового отсчетного устройства со сбросом показаний на нуль, таким образом, не превысит

$$\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,3^2 + 1^2} \approx 1,2 \text{ мкм}.$$

При измерениях на микроскопе с цифровым отсчетным устройством со сбросом показаний на нуль нет необходимости производить промежуточные отсчеты, записи и вычисления.

### Результаты исследований

Для определения стабильности сброса показаний на нуль было проведено по 50 измерений по каждому устройству. При этом оказалось, что предельная погрешность одного сброса не превышала  $0,3$  мкм.

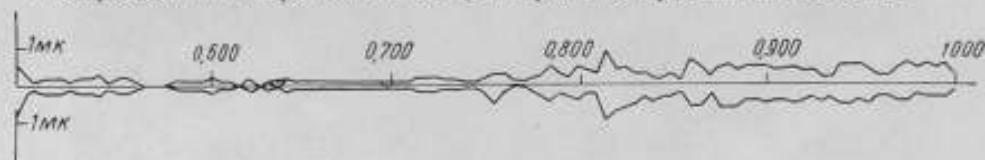


Рис. 4. Результаты исследования датчика.

Сопротивление датчика измерено по окружности через каждые  $1,8^\circ$ , что соответствует  $0,005$  мм. Проведено 5 приемов измерений по 200 в каждом. Результаты даны на графике (рис. 4), где средняя линия соответствует номинальному значению сопротивления. Как видно из рисунка, отклонение от этого значения не превышало  $\pm 0,8$  ом, или  $\pm 0,8$  мкм.

Погрешность отсчетного цифрового устройства со сбросом показаний на нуль равна примерно  $\pm 1$  мкм.

Исследование показало, что это устройство облегчает работу наблюдателя, повышает производительность измерений на микроскопе и может быть применено для отсчета линейных перемещений в приборах, станках и других механизмах с микрометрическими винтами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Маликов М. Ф., Основы метрологии, Изд. 1949.
2. Белевцев А. Т., Потенциометры, Оборонгиз, 1962.
3. Волков А. В., Конструкторский и технологический анализ точности характеристики проволочных функциональных потенциометров, «Приборостроение», № 12, 1962.
4. Электронизмерительные цифровые приборы, ЦИНТИ, 1961.

Поступила в редакцию  
22/IV 1963 г.

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИУСОВ СФЕР

*В статье описана установка для измерения радиусов сфер вогнутых пробных стекол с пределами  $37,5 \div 1000$  мм и с погрешностью до  $\pm 0,01\%$ . В установке используется автоколлимационный микроскоп, связанный с отсчетной системой, по изменению показаний которой определяется измеряемый радиус. Установка смонтирована на измерительной машине типа ИЗМ-10М.*

Во ВНИИ ГК разработана установка для измерения радиусов сфер вогнутых пробных стекол в пределах  $37,5 \div 1000$  мм с погрешностью до  $\pm 0,01\%$  (рис. 1 и 2). В ней используется метод наведения визирного

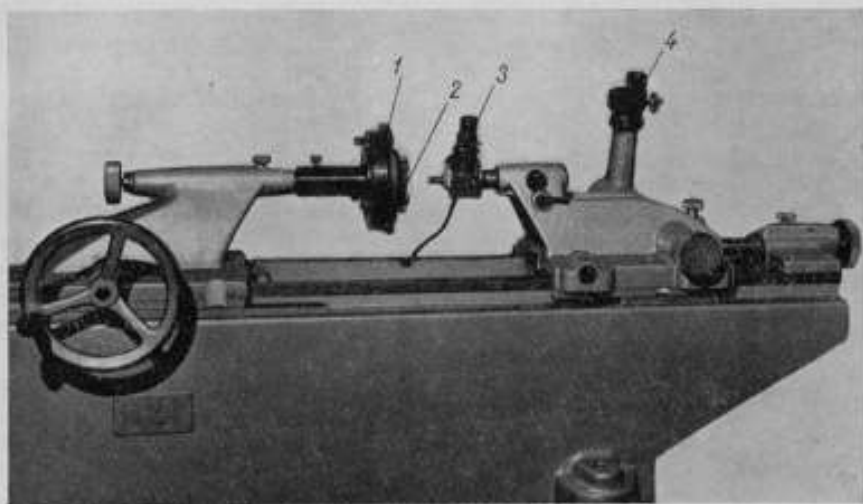


Рис. 1. Внешний вид установки

1 — держатель стекол; 2 — измеряемое стекло; 3 — автоколлимационный микроскоп;  
4 — отсчетный микроскоп со спиральным окулярным микрометром.

микроскопа на поверхность и центр кривизны измеряемой сферы по наибольшей контрастности изображения марки визирного микроскопа [1—4]. Установка смонтирована на измерительной машине типа ИЗМ-10М, в которую внесены следующие изменения:

1) трубка оптиметра передней бабки заменена специально спроектированным автоколлимационным микроскопом с апертурой объектива, равной 0,2;

2) окуляр отсчетного микроскопа машины заменен окулярным спиральным микрометром типа ОМС-7 с номинальной ценой деления круговой шкалы, равной 1 мкм;

3) на пинноли задней бабки машины установлен специальный держатель для измеряемых стекол.

Суммарная погрешность измерений  $\Delta_{\text{сум}}$  на установке включает ряд составляющих погрешностей

$$\Delta_{\text{сум}} = \pm \sqrt{(\Delta_1')^2 + (\Delta_1'')^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2}.$$

Погрешности  $\Delta_1'$  и  $\Delta_1''$  из-за неточного наведения автоколлимационного микроскопа на поверхность и на центр кривизны измеряемой сферы вычисляются по формуле [5]

$$2dx = \frac{nD\epsilon}{NA}.$$

где  $2dx$  — глубина изображаемого пространства;

$n$  — показатель преломления среды;

$D$  — расстояние наилучшего видения;

$\epsilon$  — предельный угол кружка рассеяния;

$N$  — общее увеличение микроскопа;

$A$  — апертура объектива микроскопа.

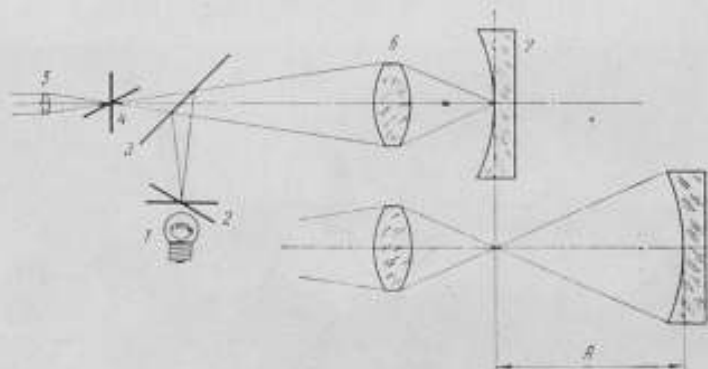


Рис. 2. Оптическая схема установки.

1 — источник света; 2 — марка; 3 — полупросереженное зеркало; 4 — штриховая пластинка; 5 — окуляр; 6 — объектив; 7 — сферическое стекло.

Погрешности:

1)  $\Delta_2$  — из-за параллакса между изображениями марки микроскопа и шкалой окуляра,

2)  $\Delta_3$  — из-за несферичности измеряемого стекла и

3)  $\Delta_4$  — из-за остаточных aberrаций объектива наблюдательного микроскопа могут быть приравнены нулю, так как: 1) обе сетки микроскопа тщательно отъюстированы; 2) метод изготовления пробных стекол обеспечивает получение хорошей сферичности и 3) остаточные aberrации объектива вызовут незначительное, практически незаметное, различие в условиях наведения на поверхность в центр кривизны сферы.

Погрешность  $\Delta_5$  — из-за неточных показаний измерительной машины вычисляется по формулам

$$\Delta_5 = \pm \left( 0,001 + \frac{L}{200\,000} \right) \text{ мм до } 100 \text{ мм}$$

и

$$\Delta_5 = \pm \left( 0,001 + \frac{L}{100\,000} \right) \text{ мм выше } 100 \text{ мм,}$$

где  $L$  — измеряемая длина.

Для радиусов, равных 40 и 1000 мм, эти погрешности соответственно будут  $\pm 1,2$  и 11 мкм.

Погрешность  $\Delta_6$  — из-за отклонений температуры измерения от нормальной, если принять, что температурный коэффициент  $\alpha$  удлинения 100 мм шкалы равен  $10,2 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$  и дециметровой шкалы  $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$  и что  $\Delta t = 3$  и 2 град, то

$$\Delta_6 = \pm 1,2 \text{ мкм для } R = 40 \text{ мм}$$

и

$$\Delta_6 = \pm 23 \text{ мкм для } R = 1000 \text{ мм.}$$

Таким образом,

$$\Delta_{\text{сум}} = \pm 4 \text{ мкм для } R = 40 \text{ мм}$$

и

$$\Delta_{\text{сум}} = \pm 40 \text{ мкм для } R = 1000 \text{ мм,}$$

что не превышает 0,01% измеряемой величины.

При подсчете суммарной погрешности предполагалось десятикратное наведение наблюдательного микроскопа на поверхность и центр кривизны измеряемой сферы. При исследовании установки были измерены радиусы выпуклых и вогнутых стеклянных полусфер малых размеров, а также определены: 1) цена деления спирального окулярного микрометра отсчетного микроскопа, 2) погрешности измерений на установке (для малых размеров), 3) вариация показаний отсчетного микроскопа при многократном наведении автоколлимационного микроскопа на поверхность и центр кривизны больших вогнутых сфер.

Цена деления спирального окулярного микрометра ОМС-7 определялась измерением ряда интервалов 0,1 мм миллиметровой шкалы машины и получилась равной 0,81 мкм.

Вариация показаний при многократном наведении на поверхность и центр кривизны больших сфер определялась для неблагоприятного случая, т. е. для самого большого стекла набора с радиусом 750 мм. Вариация оказалась равной 7,4 мкм при наведении как на поверхность, так и на центр кривизны.

Четыре выпуклые стеклянные полусферы до измерений на новой установке были измерены на интерферометре типа ИКПВ по концевым мерам 3-го разряда. По этим полусферам были проверены интерференционным методом парные вогнутые полусферы. Все четыре пары при наложении выпуклых стекол на вогнутые показали однородный соломенно-желтый цвет, что свидетельствует о совпадении радиусов сфер вогнутых и выпуклых стекол. Затем вогнутые стеклянные полусферы, радиусы которых были точно известны, проверялись на установке. Результаты измерений показали, что расхождения не превышают  $\pm 0,01\%$  (см. таблицу).

| Значение радиуса сферы, мм |                         | Погрешности измерений |        | Вариация показаний при изведении |       |                   |        |
|----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------|----------------------------------|-------|-------------------|--------|
| точное                     | измеренное на установке | мм                    | ‰      | на поверхность                   |       | на центр кривизны |        |
|                            |                         |                       |        | мм                               | ‰     | мм                | ‰      |
| 15,8 141                   | 15,8 157                | +1,6                  | +0,01  | 3,5                              | 0,022 | 4,3               | 0,027  |
| 19,5 475                   | 19,5 485                | +1,0                  | +0,005 | 3,9                              | 0,020 | 3,7               | 0,019  |
| 25,3 530                   | 25,3 533                | +0,3                  | +0,001 | 3,2                              | 0,013 | 3,4               | 0,013  |
| 34,5 166                   | 34,5 166                | 0                     | 0      | 4,4                              | 0,013 | 3,3               | 0,0096 |

Таким образом найдено, что на установке ВНИИ ГК можно измерять радиусы сфер с погрешностью не более  $\pm 0,01\%$ , что вполне достаточно для проверки образцовых пробных стекол, применяемых при проверке сферометров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коломийцов Ю. В., Панайтова Н. Н. и Смирнова Г. Г., Автоколлимационный метод контроля желобов колец подшипников, «Измерительная техника», № 11, 1960.
2. Ариюльф А., Измерение радиусов кривизны сферических поверхностей, применяемых в оптике (перевод с франц.), ОНТИ, 1936.
3. Über die Genauigkeit von optisch gemessenen Krümmungsradien, «Optik», № 1, 1956.
4. Ochman M. H., Ozastosowanie zasady koincencji do pomiarów krzywizn, «Pomiary automatyka kontrola», № 5, 1959.
5. Тудоровский А. Н., Теория оптических приборов, ч. II, изд. АН СССР, 1952.

Поступила в редакцию  
22/IV 1962 г.



## ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ОБРАЗЦОВЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОВЕРКИ ДИОПТРИМЕТРОВ

*В статье описаны методы и результаты исследования образцовых средств, предназначенных для поэлементной поверки универсальных диоптриметров любого типа. Результаты дополнены кратким описанием этих средств и методикой их применения при поверке диоптриметров.*

В последние годы промышленность СССР начала выпускать более сложную и совершенную очковую оптику. Соответственно повысились требования к приборам, которые служат для измерения параметров этой оптики.

Основными измерительными приборами для контроля очковых линз и призм являются диоптриметры, которые должны обеспечить точность измерения, указанную в ГОСТ 4993—57 (для обычных очковых линз и призм) и в инструкции по поверке медицинских наборов очковых линз.

Для поверки всех элементов диоптриметров необходимо было создать образцовые средства, и первым был создан набор линз для поверки шкалы рефракций [1], а затем — линзы, призмы и приспособление для поверки остальных элементов.

### Линзы с маркированным положением оптического центра

Для контроля неастигматических очковых линз нужно знать положение оптических центров. При изготовлении очков неастигматические линзы устанавливаются в оправу так, чтобы оптические оси линз и глаз совпадали. Если децентрация превосходит допустимую, то призматическое действие вызывает излишнее напряжение глазных мышц.

Чтобы установить погрешность диоптриметра при определении положения оптического центра очковых линз, используют образцовые линзы, в которых это положение определено с точностью, превышающей предусмотренную для диоптриметров (табл. 1). Предварительно, однако, должна быть проверена центрировка оптической системы диоптриметра. В правильно отъюстированном приборе центр перекрестия зрительной трубы должен совпадать с центром точечной (в приборе ДО-2) марки коллиматора. При этом перекрестие и марка должны быть четко видны в поле зрения, когда на шкале рефракций нуль диоптрий; при вращении сетки с перекрестием совпадение должно сохраняться.

Установив образцовую линзу и совместив центр марки коллиматора с центром перекрестия зрительной трубки, ставят на плоской поверхности линзы точку, пользуясь маркировочным приспособлением диоптриметра.

Таблица 1

| Задняя вершинная рефракция линз с маркированным центром, диоптр | Измеренное несоответствие оптического центра линз с центром перекрестия, мм | Погрешность определения оптического центра, допускаемая ГОСТ 4993-57, не более, мм |
|---|---|--|
| +0,5<br>-0,5  | 0,5±0,2<br>0,4±0,2  | 2  |
| +1,5<br>-1,5  | 0,3±0,1<br>0,2±0,1  | 0,6  |
| +4<br>-4<br>+8<br>-8  | 0,05±0,02<br>0,12±0,02<br>0,04±0,02<br>0,04±0,02                            | 0,4  |

Смещение этой точки относительно перекрестия линзы даст искомую погрешность. Одновременно можно проверить шкалу механизма для измерения диаметров очковых линз (диаметры образцовых линз 40 мм).

### Призмы

При аномалии конвергенции зрения пользуются очковыми призмами. Значения углов отклонения призм, выраженные в призмных диоптриях ( $\Delta$ ), всегда дают

ся для плоскости симметрии призмы, т. е. для сечения, перпендикулярного ребру призмы: в этом сечении отклонения максимальны. Направление такого сечения называют линией «вершина — основание».

Согласно ГОСТ 4993—57 при измерении на диоптриметре погрешности определения положения линии «вершина — основание» не должны превышать:  $2^\circ$  — для призм  $0,25 \div 0,75\Delta$ ,  $1,5^\circ$  — для призм  $0,75 \div 3\Delta$  и  $1^\circ$  — для призм  $3\Delta$  и более. Погрешность измерения призматического действия не должна превышать  $0,12\Delta$  для призм  $0,25 \div 3\Delta$  и  $0,18\Delta$  для призм свыше  $3\Delta$ .

Разработанные и изготовленные во ВНИИМ из стекла К8 образцовые призмы имеют прямоугольную форму, что позволило технологически обеспечить высокую точность

в обозначении направления линии «вершина — основание» штрихом, параллельным этой линии. Углы отклонения образцовых призм определены на гониометре типа ГС-5 для желтой линии дублета натрия ( $\lambda = 589,3$  мкм). Измерения показали (табл. 2), что эти углы также выдержаны с большой точностью. В табл. 2 даны для справок также значения преломляющих углов призм.

Образцовые призмы применяют для проверки шкалы призматического действия, параллельности планки диоптриметра (являющейся опорной плоскостью для очковой оправы), линии штрихов  $0-180^\circ$  его угломерной шкалы и для исследования диоптриметра на точность определения линии «вершина—основание».

Погрешность определения линии «вершина—основание» зависит (при прочих равных обстоятельствах) от конструкции и качества оптической системы прибора и от точности его приспособления для маркировки

Таблица 2

| Призматическое действие $\Delta$ образцовой призмы для $\lambda = 589,3$ мкм | Отклонения штрихов от параллельности линии «вершина — основание» | Преломляющие углы призмы |
|--|--|--------------------------|
| 6,02±0,01  | 3'±1'  | 6°39'00"                 |
| 3,00±0,01  | 5'±1'  | 3 19 43                  |
| 1,00±0,01  | 5'±1'  | 1 06 34                  |
| 0,50±0,01  | 4'±1'  | 0 33 14                  |

очковых стекол. Обычно линия «вершина—основание» в очковых стеклах намечается штифтами маркировочного приспособления диоптриметра с погрешностью, определяемой указанными выше факторами. При исследовании диоптриметра с помощью образцовых призм составляющие погрешности можно определять отдельно.

В первом случае (без применения маркировочного приспособления) образцовую призму устанавливают в оправу угломерного приспособления [2] и поворачивают последнюю на заданный угол, отсчитывая его по шкале.

Во втором случае призму устанавливают непосредственно на опорной гильзе так, чтобы ее гипотенуза с нанесенным на ней штрихом была обращена в сторону зрительной трубы диоптриметра (рис. 1). Получив в поле зрения резкое изображение марки коллиматора и установив перекрестие в положение, когда ось шкалы призматического действия совпадает со штрихами 0—180° угломерной шкалы, совмещают центр изображения марки с этой осью. Затем с помощью маркировочного приспособления диоптриметра ставят на поверхности призмы три точки. Линия, на которой будут находиться центры крайних точек, должна быть параллельна штриху призмы, обозначающему направление линии «вершина—основание», с погрешностью, не превышающей указанную в стандарте. Параллельность линий можно проверить на инструментальном микроскопе (например, типа БМИ). Эту методику можно применить и для исследования погрешности определения на диоптриметре линии «вершина—основание» для любого заданного направления.

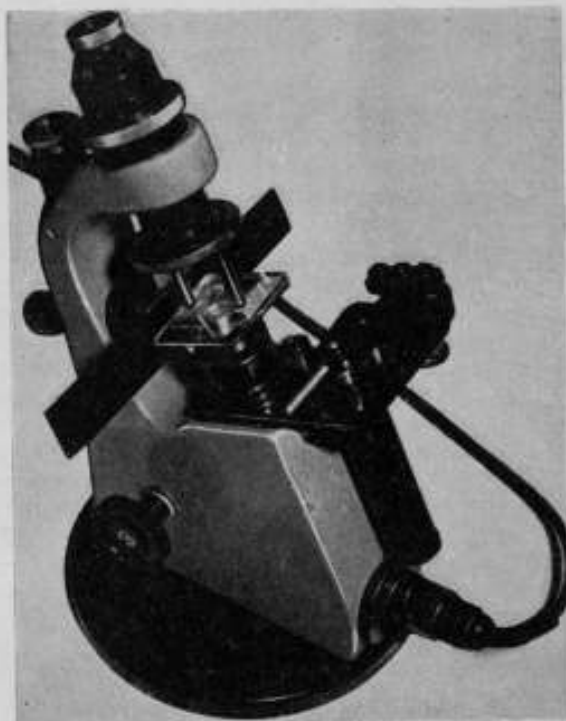


Рис. 1. Проверка диоптриметра с помощью образцовой призмы.

### Цилиндрические линзы

Цилиндрические очковые линзы, а также более сложные и совершенные типы астигматических очковых линз (торические и др.) служат для коррекции астигматизма глаза, у которого роговица (или, реже, поверхность хрусталика) имеет несферическую (торическую) форму. Такой дефект приводит к тому, что в различных меридиональных сечениях преломляющая сила глаза различна. В одном из меридианов она обычно имеет наибольшее значение, а в другом, расположенном перпендикулярно к первому, наименьшее. Такие меридианы, равно как и сечения, проходящие через них, именуется главными. Степень астигматизма выражается разностью рефракций в двух главных сечениях. Соответ-

ственно корригирующую очковую астигматическую линзу характеризуют значением рефракции в главных сечениях и направлением главного сечения с наименьшей рефракцией, которое отмечают тремя точками на поверхности линзы, поверяемой на диоптриметре.

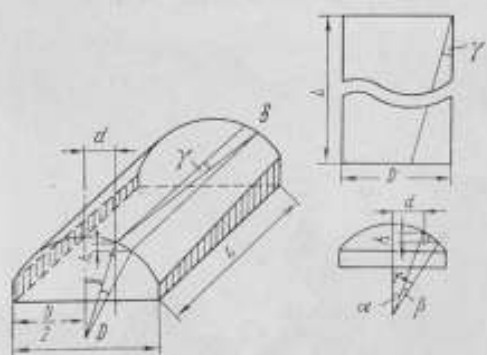


Рис. 2. Цилиндрическая линза (общий случай).

$\gamma$  — угол перекоса образующей цилиндрической поверхности;  $h$  — разность высот точек  $a$  и  $b$ , характеризующая перекоз образующей;  $d$  — расстояние изображения шпала микроскопа МИС-11 от середины линзы;  $D$  — ширина линзы;  $L$  — длина линзы;  $r$  — радиус;  $a - b$  — линия, показывающая фактическое направление образующей.

ских линз возможны такие искажения формы, как перекоз образующей при отсутствии клиновидности, наличие одной лишь клиновидности вдоль образующей без перекоса и сочетание перекоса образующей с клиновидностью. Последний (наиболее общий) случай показан на рис. 2, где изображена в различных проекциях цилиндрическая линза и даны обозначения параметров, необходимых для вычисления угла  $\gamma$  перекоса образующей по измеренной на двойном микроскопе МИС-11 величине  $h$ . Исследование на микроскопе МИС-11 наиболее удобно в процессе изготовления линз, длина которых в несколько раз превышает их ширину. Это дает возможность изучить форму линзы и выделить из всех возможных ошибок изготовления наиболее существенную — перекоз образующей. Метод исследования формы цилиндрической поверхности на МИС-11 (рис. 3) состоит в том, что об ориентации этой поверхности относительно краев линзы, являющихся базой, и относительно плоской поверхности

Для проверки диоптриметров на точность определения положения главных сечений в астигматических линзах изготовлены плоско-выпуклые и плоско-вогнутые цилиндрические линзы с нанесенными на их плоских поверхностях штрихами, обозначающими сечения с рефракцией, равной нулю. Соответственно в других главных сечениях, перпендикулярных первым, рефракция будет иметь максимальное значение, определяемое, как в обычных сферических линзах с одной плоской поверхностью.

При изготовлении цилиндрических линз возможны такие искажения формы, как перекоз образующей при отсутствии клиновидности, наличие одной лишь клиновидности

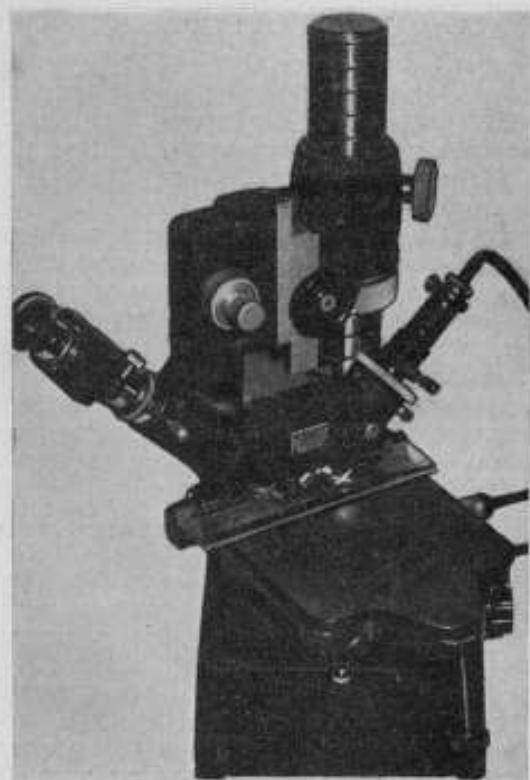


Рис. 3. Цилиндрическая линза при измерении ее на микроскопе МИС-11.

судят по величине и направлению перемещения изображения щели в поле зрения визуального микроскопа. Если изготовленная линза отклоняется от заданной формы, то изменится и расстояние между объективом осветительного тубуса и тем участком цилиндрической поверхности, на который объектив проектирует щель, находящуюся в этом тубусе. В связи с этим переместится изображение щели, которое можно измерить с помощью механизма точной фокусировки. Например, если для перемещения изображения щели (в направлении ее ширины) относительно центра перекрестия окулярного микрометра требуется перефокусировать микроскоп на 15 делений по барабану микромеханизма, то при цене наименьшего деления барабана 0,002 мм ширина изображения щели будет равна 0,03 мм.

Для измерения величины  $h$  на координатный столик МИС-11 устанавливают приспособление, имеющее площадку с хорошо доведенной плоской поверхностью и с закрепленной на этой поверхности направляющей планкой. На этой площадке располагают поверяемую цилиндрическую линзу так, чтобы ее плоская поверхность плотно соприкасалась с плоскостью площадки, а один из краев — с направляющей планкой (рис. 3). Отъюстировав положение площадки по плоскопараллельной концевой мере длины, изображение щели устанавливают так, чтобы оно проектировалось на участок линзы, близкий к ее краю, удаленному от направляющей планки. Получив в поле зрения окуляра визуального тубуса микроскопа резкое изображение щели, определяют расстояние  $d$  от середины линзы до места изображения щели (см. рис. 2). Исследуемую линзу продвигают в сторону наблюдателя до ее края и устанавливают центр перекрестия окулярного микрометра на край изображения щели с таким расчетом, чтобы при последующем движении линзы от наблюдателя противоположный край щели двигался по направлению к центру перекрестия. Затем, прижимая к поверхности площадки и к направляющей планке, линзу смещают до тех пор, пока перед объективами МИС-11 не будет установлен ее противоположный край. Отсчитав число целых и дробных частей ширины изображения полосы, перемещающейся в поле зрения окуляра при движении линзы на всю длину, линзу переворачивают на  $180^\circ$  и, прижимая к направляющей другим краем, повторяют такую же операцию. Как уже было сказано, форму цилиндрической поверхности линзы и ее положение по отношению к плоской определяют не только по величине  $h$ , но и по характеру перемещения изображений щели в каждом из проверяемых направлений. Так, например, если при движении линзы от наблюдателя изображение щели смещается вверх на расстояние, равное ее ширине, а при повороте линзы на  $180^\circ$  это изображение идет вниз на то же расстояние, то перекос образующей в такой линзе равен нулю ( $\gamma = 0$ ) и имеется лишь клиновидность вдоль образующей. В линзе, при измерении которой на МИС-11 получилось равное число изображений щели, прошедших в поле зрения, но при этом направление их движения было одинаковым в обоих положениях линзы, имеется только перекос образующей. Разное число изображений, прошедших в поле зрения (различное  $h$ ), при одном и том же направлении их движения в первом и во втором положениях линзы, означает наличие перекоса и клиновидности одновременно.

Линзы были исследованы также на установке, состоящей из коллиматора с вертикальной линией (отвес) в фокальной плоскости объектива, приспособления с уровнем и диоптрийной трубки с перекрестием, установленным по отвесу коллиматора. На приспособлении линзу прижимали одним из краев к его направляющей пластине. Предварительно положение пластины выверяли по уровню. Наблюдая в диоптрийную

трубку изображение отвеса и разворачивая (при наличии перекоса образующей) приспособление в плоскости, перпендикулярной оптической оси системы «коллиматор—трубка», измеряли угол наклона образующей.

Таблица 3

| Задняя вершина рефракция цилиндрических линз, <i>дптр</i> | Отклонения штрихов от параллельности линзы сечения с рефракцией, равной нулю | Погрешность определения положения сечений с наименьшей рефракцией по ГОСТ 4993—57 |
|---|--|---|
| +1,5<br>-1,5  | 20 ± 10'<br>25 ± 10'   | 90'   |
| +4<br>-4  | 5 ± 3'<br>6 ± 3'   | 60'   |
| +8<br>-8  | 8 ± 2'<br>5 ± 2'   | 60'   |

В табл. 3 даны отклонения от параллельности штрихов, обозначающих направление сечений с рефракцией, равное нулю, и требования к точности определения положения этих сечений на диоптриметре, соответствующие ГОСТ 4993—57.

Погрешности определения диоптриметром главного сечения с наименьшей по абсолютной величине рефракцией проверяют с помощью линз  $\pm 1,5$  и  $\pm 8$  *дптр* в таком же порядке, как и определение положения ли-

нии «вершина — основание» в призмах. Для исследования точности определения линии сечения с наибольшей рефракцией служат линзы  $\pm 4$  *дптр*.

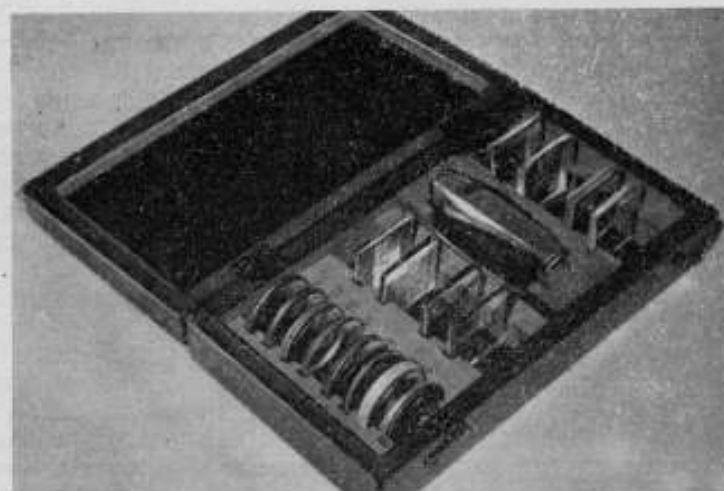


Рис. 4. Набор образцовых линз и призм для поэлементной проверки и исследования диоптриметров.

Все образцовые линзы и призмы, составляющие набор, показанный на рис. 4, а также угломерное приспособление для установки в него призм (подробное описание см. [2]) применяются при государственных испытаниях и сравнительных исследованиях диоптриметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стракуи Г. И., Некоторые вопросы контроля очковой оптики, «Измерительная техника», № 4, 1958.
2. Стракуи Г. И., Образцовые средства для поэлементной проверки и исследования диоптриметров, «Измерительная техника», № 1, 1962.

Поступила в редакцию  
20/IV 1963 г.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ НАПРАВЛЯЮЩИХ СТАНИНЫ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

*В статье изложена методика обработки результатов измерения прямолинейности в соответствии с требованиями ГОСТ 10356—63, проверенная на практике во ВНИИМ и не требующая большой затраты времени.*

В соответствии с ГОСТ 10356—63, непрямолинейностью, или отклонением от прямолинейности, называется наибольшее расстояние от точек реального профиля до прилегающей прямой (рис. 1), т. е. до прямой, соприкасающейся с реальным профилем вне материала детали и расположенной на наименьшем расстоянии от наиболее удаленной точки реального профиля.

Имеющиеся средства и методы измерения прямолинейности позволяют проверять отклонения от прямолинейности в линейных или угловых величинах. Применяя автоколлимационный и коллимационный методы или метод измерения с уровнем, измеряют углы наклона отдельных участков направляющей относительно исходной прямой линии — линии визирования автоколлиматора, зрительной трубы или линии горизонта.

С помощью зрительной трубы с маркой или струны с микроскопом и другими методами измеряют линейные отклонения, относящиеся к небольшим площадкам поверхности направляющей независимо от измерения таких отклонений для соседних или каких-либо других площадок, за исключением крайних, относительно которых обычно определяется положение исходной прямой.

Таким образом, отклонения от прямолинейности практически измеряют не относительно прилегающей прямой, а относительно исходной.

При измерении прямолинейности автоколлимационным методом определяют с помощью автоколлиматора и зеркала на подвижной каретке взаимные положения всех точек (или небольших площадок) проверяемой направляющей. Автоколлиматор устанавливают на проверяемую направляющую или на подставку, расположенную у одного из концов станины, а зеркало в специальном приспособлении с юстировочными

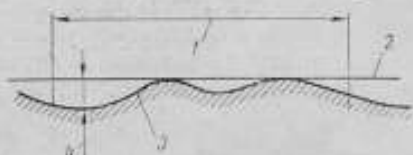


Рис. 1. Определение непрямолинейности.

1 — заданная длина; 2 — прилегающая прямая;  
3 — реальный профиль; 4 — непрямолинейность.

винтами — на каретку. Каретка должна иметь две опорные площадки по профилю проверяемых направляющих; зеркало должно устанавливаться перпендикулярно оси визирования автоколлиматора. Расстояние между опорами площадок называют базой прибора. Базу каретки с зеркалом выбирают в зависимости от длины проверяемой поверхности и требуемой точности проверки.

Предварительно на проверяемой направляющей размечают участки, равные длине базы каретки, затем каретку перемещают от участка к участку, и по отсчетному устройству автоколлиматора определяют

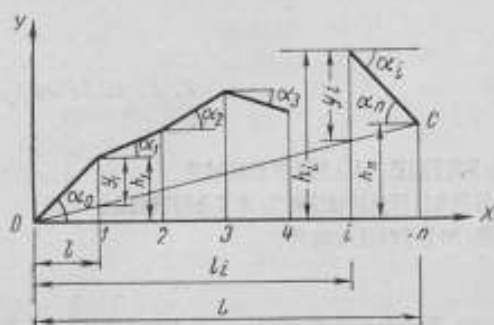


Рис. 2. Влияние наклона оси визирования на результаты измерения.

смещение автоколлимационного изображения марки относительно первоначального положения. Автоколлиматор устанавливают так, чтобы изображение марки было видно примерно в центре его поля зрения при положениях зеркала в ближней и дальней точках станины. Показания отсчетного устройства, соответствующие первой и последней точкам станины, могут отличаться. Наклон оси визирования относительно проверяемой направляющей (рис. 2), а также смещение нуля отсчетного устройства прибора

влияют на результаты измерения. Поэтому измеренные смещения изображения марки не дают еще представления о действительной форме направляющей, их необходимо специально обработать.

Непараллельность оси визирования автоколлиматора и направляющей станины учитывают при обработке результатов измерений.

Результаты измерений непрямолинейности автоколлимационным и коллимационным методами или с помощью уровня получают в угловых величинах (углы  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$  между направлением исходной прямой и отдельных участков направляющей).

Ординату  $h_1$  в точке 1 (превышение одной точки относительно другой) можно вычислить по формуле

$$h_1 = l \operatorname{tg} \alpha_0.$$

Приняв из-за малой величины угла  $\operatorname{tg} \alpha_0 \approx \alpha_0$ , получим

$$h_1 = l \alpha_0,$$

где  $l$  — длина базы прибора;

$\alpha_0$  — угол наклона, выраженный в радианах.

Так как отсчеты обычно производят в делениях шкалы, то ордината  $h_1$  будет равна

$$h_1 = l \alpha_1 = l m_1 \tau,$$

где  $\tau$  — цена деления шкалы прибора;

$m_1$  — отсчет в делениях.

По результатам измерений получают превышения точки (или площадки) относительно предыдущей, поэтому ордината  $h_i$  относительно нулевой точки будет равна

$$h_i = l \sum_{j=1}^i \alpha_{j-1} = l \sum_{j=1}^i \tau m_j = \tau l \sum_{j=1}^i m_j.$$



Чтобы исключить влияние наклона линии визирования, через начальную и конечную точки проверяемой направляющей проводят прямую линию  $OC$ . Отклонения  $y_i$  от нее вычисляют по формуле

$$y_i = h_i - \Delta,$$

$$\text{где } \Delta = h_n \cdot \frac{l_i}{L}, \text{ * или } y_i = l \left( \sum_1^i z_{i-1} - \frac{l_i}{L} \sum_1^n z_n \right) = l \left( \sum_1^i m_i - \frac{l_i}{L} \sum_1^n m_n \right).$$

При обработке результатов измерений можно пользоваться приведенной таблицей или графиком.

| Проверяемые интервалы | Отсчеты по шкале автоколлиматора, дел |              | Среднее | Отсчеты, приведенные |        |                       | Поправки за наклон оси визирования, мм | Отсчеты, исправленные за наклон оси визирования, мм | Ординаты прямой $O, C$ |                                | Действительные отклонения направляющей от прямой, мм |
|-----------------------|---------------------------------------|--------------|---------|----------------------|--------|-----------------------|--|---|------------------------|--------------------------------|--|
|                       | прямой ход                            | обратный ход |         | к нулю               |        | к исходной прямой, мм |  |   | до оси $X$ , мм        | до точек реального профиля, мм |  |
|                       |                                       |              |         | дел                  | мм     |                       |  |   |                        |                                |  |
| 1                     | 2                                     | 3            | 4       | 5                    | 6      | 7                     | 8                                      | 9   | 10                     | 11                             | 12   |
| 0—1                   | 5'36,8                                | 5'37,0       | 5'36,9  | 0                    | 0      | 0                     | -2,4                                   | -2,4  | -7,50                  | +7,5                           | -17,6  |
| 1—2                   | 36,9                                  | 35,3         | 36,1    | -0,8                 | -1,28  | -1,28                 | -4,7                                   | -6,0  | -6,0                   | 0                              | -25,2  |
| 2—3                   | 41,9                                  | 41,5         | 41,7    | +4,8                 | +7,68  | +6,40                 | -7,1                                   | -0,7  | -5,25                  | +4,55                          | -20,6  |
| 3—4                   | 43,5                                  | 42,9         | 43,2    | +6,3                 | +10,08 | +16,48                | -9,5                                   | +7,0  | -4,50                  | +11,50                         | -13,6  |
| 4—5                   | 42,3                                  | 42,0         | 42,2    | +5,3                 | +8,48  | +24,96                | -11,8                                  | +13,1   | -3,75                  | +13,89                         | -11,3  |
| 5—6                   | 43,0                                  | 42,8         | 42,9    | +6,0                 | +9,60  | +34,56                | -14,2                                  | +20,3   | -3,0                   | +23,30                         | -1,8   |
| 6—7                   | 39,9                                  | 40,0         | 40,0    | +3,1                 | +4,96  | +39,52                | -16,6                                  | +22,9   | -2,25                  | +25,15                         | 0  |
| 7—8                   | 36,8                                  | 36,9         | 36,8    | -0,1                 | -0,16  | +39,36                | -19,0                                  | +20,4   | -1,50                  | +21,90                         | -3,2   |
| 8—9                   | 29,9                                  | 28,9         | 29,4    | -7,5                 | -12,0  | +27,36                | -21,3                                  | +6,0  | -0,75                  | +6,75                          | -18,4  |
| 9—10                  | 35,1                                  | 34,0         | 34,6    | -2,3                 | -3,68  | +23,68                | -23,7                                  | 0   | 0                      | 0                              | -25,2  |

В таблицу записывают результаты измерений в делениях отсчетного устройства при прямом и обратном ходах. В 5-й и 6-й графах результаты приводят к нулевому отсчету. Для этого отсчет в первой точке последовательно вычитают из всех показаний и переводят в микрометры. Далее в 7-й графе последовательно суммируют отсчеты 6-й графы, что необходимо для определения положения проверяемых точек (площадок) относительно исходной прямой. В 8-й графе вводят поправки на наклон оси визирования автоколлиматора, а в 9-й — отсчеты, исправленные на наклон оси визирования в микрометрах. Благодаря такой обработке результаты измерения будут приведены к прямой, соединяющей начальную и конечную точки направляющей станины. В нашем примере нуль в 8-й графе соответствует нулевой точке проверяемой направляющей.

Графически отклонение от прямолинейности определяется в следующем порядке (рис. 3). По оси  $X$  размечают проверяемые интервалы направляющей, а по оси  $Y$  в проверяемых точках наносят ординаты из 7-й графы таблицы, и их концы соединяют последовательно

\* Для удобства подсчета отношение  $l_i/L$  можно заменить отношением  $i/n$ , где  $i$  — количество интервалов между точками  $i$  и начальной;  $n$  — общее количество измеряемых интервалов.

прямыми линиями. Через начальную и конечную точки графика проводят прямую  $OC$ , составляющую с осью  $X$  некоторый угол, который можно рассматривать как угол между направляющей и осью визирования автоколлиматора. Угол наклона определяют из отношения смещения конечной площадки к длине направляющей  $L$ . В результате такого построения направляющая получается в искаженном виде. Поэтому по ординатам, отсчитанным от прямой  $OC$ , дополнительно строят профиль направляющей, исправленный на наклон линии визирования.

В соответствии с ГОСТ 10356—63 на графике необходимо определить положение прилегающей прямой и затем вычислить отклонение от прямолинейности относительно нее.

Рассмотрим некоторые случаи расположения кривых профиля на графике.

1. Кривая профиля расположена по обе стороны относительно оси  $X$  (рис. 3а).

Чтобы провести прилегающую прямую  $O_1C'$ , проводят прямую  $O_1C$  через находящиеся на оси  $X$  на наибольшем расстоянии друг от друга точки 2 и 10. Затем через точку профиля с максимальной положительной ординатой проводят параллельно линии  $O_1C$  прилегающую прямую  $O_1C'$ . Отклонения от точек профиля до прямой  $O_1C'$  находят по таблице. Так, например, отклонение  $(-6,0)$  в точке 2 пропорционально распределяют по всем точкам и в 10-й графе таблицы вычисляют ординаты прямой  $O_1C$  до оси  $X$ . Полученные значения вычитают из 9-й графы и находят значения ординат прямой  $O_1C$  до точек реального профиля.

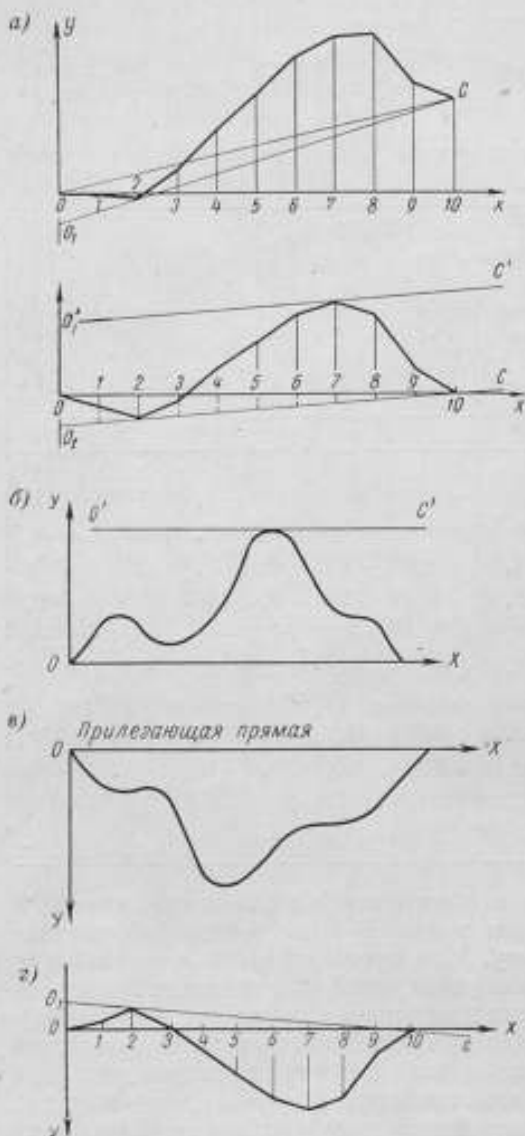


Рис. 3. Случаи определения прилегающей прямой.

а — кривая профиля расположена по обе стороны относительно оси  $X$ ; б — то же по одну сторону оси  $X$ ; в — прилегающая кривая совпадает с осью  $X$ ; г — проходит через точки с нулевой и максимальной ординатами.

В 12-й графе вычисляют отклонения точек реального профиля от прилегающей прямой как сумму значений между максимальной отрицательной ординатой 25,15 (в точке 7) и ординатами точек профиля, вычисленными от прямой  $O_1C$ .

2. Кривая профиля расположена по одну сторону оси  $X$ . На рис. 3 б прилегающая прямая  $O'S'$  проведена параллельно оси  $X$  через наиболее удаленную от нее точку профиля. Отклонения от прилегающей прямой до точек профиля равны разности ординат профиля — максимальной и данной точки.

На рис. 3 в прилегающая прямая проходит через начальную и конечную точки профиля и совпадает с осью  $X$ . На рис. 3 г прилегающую прямую  $O_1C$  проводят через нулевую точку профиля 10 и точку 2 с максимальной положительной ординатой.

При коллимационном методе измерений непрямолинейности углы наклона оси коллиматора измеряют относительно оси неподвижной зрительной трубы.

Результаты измерений коллимационным методом при помощи уровня, зрительной трубы и марки обрабатываются так же, как при автоколлимационном методе. При проверке со зрительной трубой и маркой не нужно лишь суммировать данные 7-й графы таблицы.

Нельзя ограничиться независимой проверкой прямолинейности отдельных направляющих. Необходимо проверять также винтообразность их формы, т. е. прямолинейность движения подвижной части станка в плоскости, перпендикулярной к направлению движения. Винтообразность можно проверить с помощью уровня.

Методика проверки винтообразности форм направляющих заключается в определении углов поворота каретки в поперечном направлении, когда она установлена на двух направляющих и перемещается вдоль них от участка к участку (рис. 4).

Винтообразность находят по наибольшей разности показаний уровня. Отклонения последнего указывают на превышение  $h$  одной направляющей относительно другой, которое определяют в линейных единицах (для малых углов) по формуле

$$h = l\alpha,$$

где  $l$  — длина базы уровня, равная расстоянию между серединами опорных площадок каретки;

$\alpha$  — угол поворота каретки, измеренный по уровню.

Для каждой из направляющих, связанных между собой условием винтообразности, строят график: для одной — по результатам независимого измерения отклонений от прямолинейности, для второй — по координатам, представляющим алгебраическую сумму координат первой направляющей и значения превышения второй направляющей относительно первой.

График второй направляющей можно построить или отдельно, или на графике первой направляющей.

Обработка результатов измерения прямолинейности методами, указанными в статье, проверена на практике во ВНИИМ и не требует большой затраты времени.

Поступила в редакцию  
5/III 1963 г.

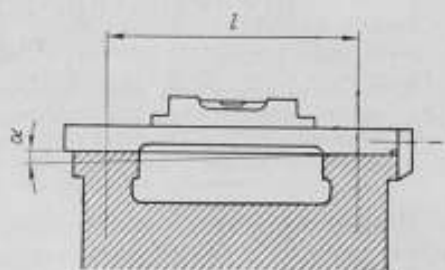


Рис. 4. Проверка винтообразности направляющих.

ИССЛЕДОВАНИЕ БЛОКОВ КОНЦЕВЫХ МЕР  
до 4000 мм

*В статье приводятся результаты экспериментального определения погрешностей, возникающих при соединении концевых мер в блоки до 4000 мм с помощью существующих струбцин за счет нежесткости больших блоков и погрешностей установки высокоточных деревянных скоб по блокам. Даны рекомендации по применению больших блоков концевых мер.*

Блоки концевых мер большого размера применяются для поверки и установки некоторых универсальных измерительных инструментов (штангенинструментов до 4000 мм, диаметральных и линейных скоб высоких точностей и т. д.), а также при линейных измерениях высокой точности. До сих пор ограничивались исследованием блоков размерами лишь до 300 мм. Однако значительное повышение точности изготовления крупногабаритных деталей и узлов машин и отсутствие для их измерения универсальных инструментов необходимой точности требуют более широкого использования больших блоков концевых мер.

В Свердловском филиале ВНИИМ экспериментально определены погрешности, возникающие при соединении концевых мер в блоки длиной до 4000 мм с помощью струбцин-стяжек, а также найдена погрешность измерения блоков. Блоки длиной 1000–4000 мм были исследованы с помощью концевой измерительной машины, причем во всех случаях температурный режим выдерживался в пределах  $20 \pm 0,5^\circ \text{C}$ .

При определении погрешности, возникающей при соединении концевых мер в блоки с помощью струбцин-стяжек (ГОСТ 4119–49), создавали нормированное усилие стягивания при помощи специальной отвертки с трещоткой, ограничивающей усилие значением 0,5 кг.

Точки опоры блока, установленного на концевой измерительной машине, располагались от измерительных поверхностей на расстоянии  $\frac{1}{5}$  длины блока.

Экспериментами установлено, что длина блока большого размера при стягивании с указанным нормированным усилием уменьшается за одну стяжку на 1 мкм, а при стягивании от руки обычной отверткой — до 5 мкм.

При пользовании блоками длиной до 2000 мм уменьшение их длины в результате стягивания струбцинами необходимо учитывать как систематическую погрешность. В блоках длиной свыше 2000 мм эту погрешность можно не учитывать как весьма малую.

Погрешность за счет нежесткости больших блоков является следствием двух причин: 1) укорочения длины блока из-за прогиба и 2) отклонения от плоскопараллельности.

Укорочение из-за прогиба определялось как разность между длинами соответствующих блоков, расположенных на опорах на их концах и в точках Эри.

При переносе точек опоры из точек Эри на конец блока длина  $L$  последнего уменьшается на величину, которую можно подсчитать по полученной нами в результате опытных исследований формуле

$$\Delta L = 0,05e^{2f} \text{ мм} \quad (L \text{ в метрах}),$$

причем величина  $\Delta L$  практически не зависит от количества стяжек в блоке.

Сравнение жесткости блоков концевых мер и микрометрических нутромеров разных типов показывает, что жесткость блоков концевых мер наименьшая.

При определении отклонения от плоскопараллельности блоков концевых мер длиной свыше 1000 мм, лежащих на опорах узкой гранью, длина блока измерялась в трех точках, расположенных на средней линии, параллельной длинному ребру измерительной поверхности мер. При этом две крайние точки находились на расстоянии примерно 2 мм от коротких ребер измерительных поверхностей и одна посередине.

Отклонение от плоскопараллельности вычисляли как наибольшую по величине разность между длиной блока в одной из крайних и средней точках.

Исследования показали, что отклонения от плоскопараллельности блоков концевых мер длиной 4000 мм при расположении опор в точках Эри достигают 0,02 мм и при опорах у концов блока 0,28 мм. Поэтому при пользовании блоками больших размеров необходимо строго соблюдать правило установки опор в точках Эри и следить за тем, чтобы измерительные наконечники концевой машины или индикаторов (при установке скоб) касались середины измерительных поверхностей блока.

Предельные погрешности измерения длины блоков больших размеров определялись двумя способами: квадратичным суммированием отдельных составляющих погрешностей и путем непосредственного эксперимента с учетом погрешности аттестации мер блока на образцовом оборудовании. Результаты, полученные этими способами, удовлетворительно согласовались между собой.

Предельная погрешность определения действительной длины больших блоков на концевой измерительной машине оказалась равной

$$\Delta z = \pm (-0,0006 + 6 \cdot 10^{-6} L) \text{ мм} \quad (L \text{ в метрах}),$$

что примерно соответствует точности поверки мер 5-го разряда или класса 3.

Результаты экспериментальных исследований показали:

1. Погрешности, блоков длиной 1000 и 1500 мм, вызываемые нежесткостью, невелики и не превышают погрешности измерения длины блока; нежесткость блоков длиной от 2000 до 4000 мм значительно увеличивает их общую погрешность.

2. Для того чтобы блоки концевых мер длиной 3000 и 4000 мм по своей точности соответствовали концевым мерам класса 3, их нужно составлять из концевых мер класса 1. При составлении блоков меньшей длины той же точности можно использовать концевые меры класса 2.

3. Блоки больших размеров можно применять в качестве мер при установке на соответствующий размер деревянных диаметральных и линейных скоб, предназначенных для измерений больших деталей, изготовленных с точностью выше 3-го класса по ГОСТ 2689—54.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ ДИАМЕТРАЛЬНЫХ  
И ЛИНЕЙНЫХ СКОБ БОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ

*В статье приведены результаты работ по конструированию, изготовлению и исследованию деревянных диаметральных и линейных скоб, а также установочных мер больших размеров оригинальной конструкции. Новые измерительные средства по жесткости и точности значительно превосходят существующие металлические средства измерений тех же пределов измерения.*

В Свердловском филиале ВНИИМ совместно с Уралмашзаводом созданы и экспериментально исследованы новые высокоточные измерительные инструменты больших размеров:

- а) набор деревянных диаметральных индикаторных скоб с пределами измерения  $1000 \div 4000$  мм;  
б) набор деревянных линейных индикаторных скоб с пределами измерений  $1000 \div 6000$  мм;

в) набор установочных мер новой конструкции размерами  $1000 \div 4000$  мм.

Для исследования этих инструментов на Уралмашзаводе на базе измерительной машины типа ИЗМ-10 смонтирована оптическая концевая машина с пределами измерения  $0 \div 6000$  мм. Станина машины удлинена, и на ней дополнительно установлены 100-миллиметровые стеклянные шкалы через 1 м.

Модернизированная машина проверена, аттестована и успешно эксплуатируется на заводе.

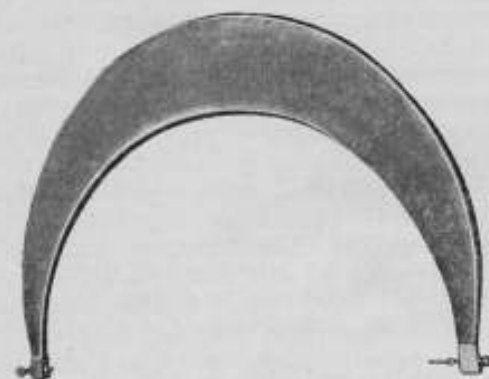


Рис. 1. Диаметральная индикаторная скоба.

Деревянная диаметральная индикаторная скоба (рис. 1) представляет собой пустотелую коробчатую трапецевидного сечения конструкцию из пихтовых досок 1,5-годовалой сушки толщиной 8 мм, склеенных с различным направлением волокон. Внутри ее корпуса имеются деревянные растяжки. Для предохранения от влаги скобу покрывают шестью слоями перхлорвиниловой эмали ПХВ-715.

Пределы измерения и размеры сечения (высота корпуса  $H$ ) скоб приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Пределы измерения и тип диаметральной скобы, мм | 1000 ÷ 1250,<br>I | 2000 ÷ 2250,<br>II | 3000 ÷ 3250,<br>III | 3750 ÷ 4000,<br>IV |
|---|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Сечение $H$ , мм                                | 180               | 180, 350 и 500     | 350                 | 500                |

Скоба оснащена индикаторным измерительным узлом, который помещен во втулках со сферическими гнездами, позволяющими с высокой точностью устанавливать соосность отверстия для индикаторов при помощи специального приспособления конструкции М. В. Трушкова.

Измерительные инструменты большого размера целесообразно изготавливать из древесины [1], так как наиболее важные ее физико-химические свойства (при относительной влажности 12%) лучше аналогичных свойств инструментальной стали. Индикаторные скобы служат для измерения изделий относительным методом и являются компарирующими инструментами. Поэтому изменения температуры и влажности окружающего воздуха в процессе измерения практически не будут оказывать значительного влияния на размер скоб.

Исследование всех диаметральных индикаторных деревянных скоб велось по специальным установочным мерам. Эти меры были применены также в качестве прецизионных макетов вала и отверстия для определения действительной точности микрометров, нутромеров, диаметральных и ливейных скоб при разном их положении в пространстве.

За исходное принималось горизонтальное положение скобы на роликах, когда на нее не воздействовали растягивающие или сжимающие усилия. Установившиеся при этом размеры скоб поверяли во всех возможных при эксплуатации положениях.

При исследовании диаметральных скоб по установочным мерам за предельную погрешность принимали максимальную разность показаний в наиболее неблагоприятных положениях их.

Деревянная скоба типа I (масса 7,2 кг) оказалась недостаточно жесткой, так как при вертикальном положении измерительной оси ее наибольшая погрешность достигала 223 мкм. При измерении изделий того или иного класса точности предельная погрешность измерительного инструмента должна быть не более  $\frac{1}{3}$  допуска на изделие. Значит, эта скоба пригодна лишь для контроля изделий, начиная с 5-го класса точности.

Сравнение деревянных диаметральных индикаторных скоб типа II высотой корпуса  $H$ , равной 350 мм (масса 15,2 кг) и 500 мм (масса 20 кг) с микрометром завода «Калибр», пределы измерения которого 1800 ÷ 2000 мм (масса 15,1 кг), показало, что по жесткости скобы с  $H = 500$  мм лучше микрометров. Так, например, погрешность

|                                       |         |
|---------------------------------------|---------|
| микрометра (1800 — 2000 мм) . . . . . | 178 мкм |
| деревянной скобы типа II              |         |
| с $H = 350$ мм . . . . .              | 168 мкм |
| с $H = 500$ мм . . . . .              | 44 мкм  |

Следовательно, микрометр завода «Калибр» обеспечивает контроль валов 4-го класса точности, скоба типа II с  $H = 350$  мм — 3а класса точности, с  $H = 500$  мм — 2а класса точности. Эти скобы находятся в эксплуатации в цеховых условиях Уралмашзавода уже несколько лет и по отзывам работников завода зарекомендовали себя весьма положительно.

Наши исследования деревянных диаметральных скоб дают возможность производить расчет их точности при конструировании и изготовлении.

Точность и жесткость деревянных диаметральных скоб в основном зависит от высоты корпуса  $H$ . Поэтому для скоб, изготавливаемых для измерений изделий 2-го и 3-го классов точности по ГОСТ 2689—54, вычислены значения  $H_{\max}$  (табл. 2) по известной формуле

$$H_{\max} = L \sqrt[3]{\frac{P}{2Ebf}}$$

где  $L$  — длина оси корпуса скобы (м);

$P$  — нагрузка 2 кг, прикладываемая к одному из концов скобы при зажатом втором конце и вызывающая погрешность  $f$  (м) показания скобы (именно такую нагрузку вдоль оси измерения можно ожидать при измерениях в производстве);

$b$  — средняя толщина корпуса скобы (м);

$E$  — модуль упругости, принятый для деревянных скоб равным  $0,4 \text{ н/м}^2$ .



Рис. 2. Линейная индикаторная скоба.

Таблица 2

| Пределы измерения деревянных диаметральных скоб, мм | $L$ , мм | $b_{\text{ср}}$ , мм | $f$ мм, соответствующая данному классу точности | $H_{\max}$ , мм | Класс точности по ГОСТ 2689—54 | Пределы измерения деревянных диаметральных скоб, мм | $L$ , мм | $b_{\text{ср}}$ , мм | $f$ мм, соответствующая данному классу точности | $H_{\max}$ , мм | Класс точности по ГОСТ 2689—54 |
|---|----------|----------------------|---|-----------------|--------------------------------|---|----------|----------------------|---|-----------------|--------------------------------|
| 1000—1250   | 2440     | 40                   | 0,020   | 355             | 2                              | 2000—2250   | 4300     | 60                   | 0,028   | 490             | 2                              |
|   |          |                      | 0,067   | 240             | 3                              |   |          |                      | 0,092   | 330             | 3                              |
| 1250—1500   | 2900     | 45                   | 0,022   | 395             | 2                              | 2250—2500   | 4600     | 60                   | 0,029   | 520             | 2                              |
|   |          |                      | 0,073   | 265             | 3                              |   |          |                      | 0,093   | 350             | 3                              |
| 1500—1750   | 3400     | 50                   | 0,024   | 430             | 2                              | 2500—2750   | 4900     | 65                   | 0,032   | 520             | 2                              |
|   |          |                      | 0,080   | 290             | 3                              |   |          |                      | 0,100   | 355             | 3                              |
| 1750—2000   | 3900     | 55                   | 0,025   | 475             | 2                              | 2750—3000   | 5300     | 70                   | 0,033   | —               | 2                              |
|   |          |                      | 0,083   | 320             | 3                              |   |          |                      | 0,100   | 375             | 3                              |

Линейные деревянные индикаторные скобы (рис. 2) имеют пустотелый корпус шириной 33 мм и, в зависимости от размера, высотой 120÷220 мм, внутри которого находятся фанерные растяжки. По кон-



цам в корпусе вклеены на глубину примерно 180 мм деревянные направляющие сплошного сечения  $25 \times 80 \times 600$  мм, имеющие П-образные металлические накладки. Скобы оснащены передвигающимися по направляющим кронштейнами с индикаторными узлами и ножками с вылетом 125 и 250 мм.

Исследования скоб с пределами измерения 1000–6000 мм по установочным мерам показали, что они имеют недостаточно жесткую конструкцию и не обеспечивают измерения изделий выше 5-го класса точности, хотя и превосходят по точности и жесткости металлические линейные скобы тех же пределов измерения. Погрешности в основном возникают из-за нежесткости направляющих.

Линейные скобы, так же как и диаметральные, являются, как уже отмечалось выше, лишь компарирующим инструментом, настраиваемым на соответствующий размер по установочным мерам. Деревянные скобы, имея очень малый коэффициент теплопроводности, выгодно отличаются от металлических своей весьма малой зависимостью от изменения температуры воздуха в процессе измерения.

Линейные деревянные скобы легкие, например, скоба с пределами измерения 3000–4000 мм, оснащенная кронштейном и измерительным узлом, имеет массу 12 кг. Поэтому есть возможность значительно усилить конструкцию таких скоб даже за счет некоторого увеличения веса.

Установочные меры новой конструкции (рис. 3) состоят из двух тонкостенных сигарообразных удлинителей («сигар»), расположенных на расстоянии 260 мм друг от друга и соединенных между собой по концам поперечными мостиками («основаниями»). В «основаниях» укреплены вставки с внутренними и наружными цилиндрическими измерительными поверхностями, имеющими радиус кривизны, равный половине длины меры. Установочные меры такой конструкции отвечают всем требованиям, предъявляемым к цилиндрическим изделиям.

Сигарообразные удлинители изготовлены из листовой стали толщиной 0,5 мм марки 15 КП одной плавки. Эта сталь хорошо вытягивается и сваривается, что позволяет придавать конусу нужную форму без трещин и надрывов и соединять отдельные элементы «сигары» между собой при помощи электро- или газосварки. Температурный коэффициент удлинения этой стали определен во ВНИИМ и оказался равным  $11,52 \text{ мкм/град}$ .

Конструкция установочных мер позволяет измерять их внутренние и наружные размеры на концевой измерительной машине с высокой точностью: предельная погрешность их  $\pm (1 + 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot L) \text{ мкм}$ , где  $L$  — длина меры.

Установочные меры размерами 1000–4000 мм имеют массу 7,5–13,0 кг.

Меры исследованы на жесткость, на изгиб и сжатие, а также на влияние изменений температуры. В результате установлено следующее.



Рис. 3. Установочная мера новой конструкции размером 1000 мм.

Новые установочные меры вследствие особенностей конструкции не могут быть исследованы на жесткость обычными методами, предписанными ГОСТ 10—58 для микрометрических нутромеров. Поэтому нами введена новая методика, при которой определяется изменение длины меры в зависимости от величины нагрузки, создаваемой в средней ее части. Для сравнения жесткости новых установочных мер и существующих нутромеров последние были исследованы также и по этой методике.

Результаты показали, что установочные меры типа двухсигарной рамы очень жесткие (рис. 4).

Новая методика испытания на жесткость может быть использована, например, при государственных испытаниях и в последующем — при поверках новых установочных мер.

Жесткость конструкции установочных мер в осевом направлении исследована сжатием вдоль оси с различным усилием, соответственно массе. Результаты исследований сведены в табл. 3, где приведены данные (в мкм) о сокращении размеров измерительных инструментов и уменьшении длины нутромера при сжатии его вдоль оси с усилием, равным половине собственного веса нутромера.

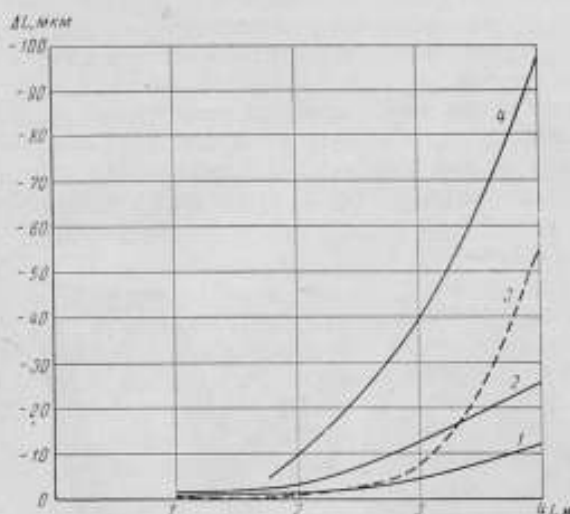


Рис. 4. Характеристика жесткости нутромеров и установочных мер.

1 — установочные меры новой конструкции; 2 — сигарообразные удлинители УЗТМ; 3 — микрометрические нутромеры ЧИЗ 150—4000 м.м.; 4 — раздвижные микрометрические нутромеры фирмы Карл Маэр с пределами измерений 1700 ± 2500 и 2500—4000 м.м.  
L — размеры мер;  $\Delta L$  — изменения мер при нагрузке в средней их части 5 кг.

Высокая жесткость установочных мер позволяет применять их при различном положении в пространстве (например, при измерении вертикальных размеров [2]), что дает возможность исследовать измерительные инструменты при любых положениях, которые они могут принимать во время измерений.

Таблица 3

| Средства измерения  | Пределы измерения, м.м |      |      |      |      |
|---|------------------------|------|------|------|------|
|   | 1000                   | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |
| Новые установочные меры . . . . .                         | 2,5                    | 3,5  | 5    | 8    | —    |
| Сигарообразные удлинители типа УЗТМ . . . . .             | 1                      | 2    | 3    | 5    | 8    |
| Микрометрический нутромер типа ЧИЗ, 150—4000 м.м. . . . . | 3                      | 6,5  | 13,5 | 21   | —    |

С целью выяснения возможности использования установочных мер при изготовлении микрометрическо-индикаторных нутромеров высокой точности отдельно были исследованы (до сборки мер) сигарообразные удлинители размерами 1000 ± 5500 мм и массой 2 ± 7 кг. Исследования

дали хорошие результаты, и для контроля крупных изделий абсолютным методом были изготовлены нутромеры с подобными удлинителями сварной конструкции, имеющими конусность 1/36.

Исследования показали, что жесткость сигарообразных удлинителей размером до 4000 мм вполне удовлетворительна, и при любом изменении точек опоры и повороте их вокруг своей оси изменение длины не превышает 6 мкм. Удлинители размером 5000 мм изменяют длину до 12 мкм, а размером 5500 мм — до 47 мкм.

Для сравнения укажем, что перенос точек опоры от концов цилиндрических микрометрических нутромеров в точки Бесселя сокращает их длину до нескольких десятых долей и даже целых миллиметров (например, для раздвижных нутромеров с пределами измерения 4000 ÷ 6000 мм фирмы Гоммельверке — до 3,4 мм); при повороте вокруг своей оси нутромеров с пределами свыше 4000 мм и с цилиндрическими удлинителями их длина сокращается на 0,01 ÷ 0,1 мм. Из табл. 3 видно, что сигарообразные удлинители также и по данному параметру жесткости значительно превосходят микрометрические нутромеры.

Достаточная жесткость сигарообразных удлинителей подтверждается также результатами исследования изменения длины их в зависимости от величины нагрузки посредине, при повороте удлинителя вокруг оси и при положении точек опоры на концах и на расстоянии  $\frac{1}{5}$  от концов. Так, например, при нагрузке 4 кг длина удлинителей до 2500 мм сокращается на 3 мкм, 2500 ÷ 4000 мм — на 20 мкм, 4000 ÷ 5500 мм — на 45 мкм, нутромеров типа ЧИЗ для пределов измерения 150 ÷ 4000 мм — на 42 мкм.

Для определения погрешностей сигарообразных удлинителей при нагревании от рук были проведены специальные опыты. Для этого удлинители устанавливали на измерительную машину и концы их (в местах прихвата) поддерживали руками, изолируя при этом станину измерительной машины от воздействия тепла контролера. Испытания показали, что независимо от размера, длина сигарообразных удлинителей, не имеющих теплоизоляционных накладок, в первые 6—8 мин увеличивается скачкообразно в среднем на 80 мкм. При этом в дальнейшем длина удлинителей не изменяется.

Одновременно с исследованием удлинителей проведены аналогичные исследования сборного микрометрического нутромера типа ЧИЗ с пределами измерения 3000 мм. При нагревании нутромера руками с двух концов выявилось, что со временем его размер непрерывно изменяется. Например, за 40 мин длина нутромера увеличилась на 98 мкм. Внутри корпуса нутромера длительное время продолжается повышение температуры и соответственное увеличение длины измерительных стержней.

После опытов сигарообразные удлинители возвращаются в исходное (нулевое) положение независимо от их длины в среднем за 24 мин, а сборный микронутромер, удлинившийся при нагревании за 40 мин на 98 мкм, принял начальную длину за 2 ч 10 мин.

Нагревание в течение 5 мин руками микрометра (завода «Калибр») с пределами измерения 1800 ÷ 2000 мм удлиняет его на  $\pm 0,55$  мм («плюс» соответствует нагреванию внутренней дуги корпуса микрометра, «минус» — внешней дуги). При остывании микрометры возвращаются к первоначальному (нулевому) размеру в среднем через 50 мин.

Применение теплоизолирующих накладок снижает нагревание от рук, так, например, трехслойные полотняные накладки снижают его на 25%, пятислойные — на 40%, резиновые накладки — на 50% и накладки из кошмы — на 80—90%.

## Выводы

Экспериментальные исследования и производственные испытания опытных образцов деревянных скоб Уралмашзавода показали, что деревянные диаметральные индикаторные скобы с высотой корпуса  $H = 500$  мм и пределами измерений  $2000 \div 3000$  мм вполне возможно применять для измерения изделий, начиная с класса точности 2а, при любом положении скобы в пространстве.

Деревянные диаметральные скобы с  $H = 350$  мм (облегченной конструкции) могут применяться в указанном интервале для измерений, начиная с класса точности 3а.

Устанавливать скобы следует либо по специальным установочным мерам новой конструкции, либо по сигарообразным нутромерам или по сборным микрометрическим нутромерам типа ЧИЗ с пределами измерений  $150 \div 4000$  мм, с учетом действительных размеров, аттестованным в собранном виде на концевой измерительной машине.

Исследования деревянных диаметральных скоб дали возможность конструировать и изготавливать их по заранее рассчитанным параметрам для измерения изделий того или иного класса точности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ваганов И. П., Применение древесины для изготовления средств измерения больших размеров, «Измерительная техника», № 8, 1961.
2. Ваганов И. П., Поправки к показаниям нутромеров для измерения больших вертикальных размеров, «Измерительная техника», № 8, 1960.

Поступила в редакцию  
20/VII 1961 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| Предисловие . . . . .   | 3   |
| Л. К. Каяк. Эталоны метра . . . . .   | 5   |
| М. Л. Бржезинский. Интерференционные компараторы для измерения длины штриховых мер . . . . .  | 15  |
| Л. А. Егорова, С. Н. Ивашевский, Г. Н. Харламова. Испытание спектральных ламп с естественным криптоном . . . . .  | 29  |
| Д. И. Зорин, Н. В. Трофимова, Ю. Н. Шестопалов. Измерение длины штриховых мер счетом интерференционных полос . . . . .                                      | 32  |
| М. Л. Бржезинский, Д. И. Зорин, В. Д. Смердличенко. Фотометрический фотоэлектрический микроскоп . . . . .   | 43  |
| Л. К. Каяк, С. И. Торопин, Н. В. Тришин, О. В. Ячменцев. Двойной фотоэлектрический микроскоп для компарирования подразделений штриховых мер длины . . . . . | 49  |
| Н. В. Тришин. Измерительное устройство к двойному фотоэлектрическому микроскопу . . . . .   | 64  |
| Н. В. Трофимова. Калибровка шкалы по эталону Фабри—Перо . . . . .   | 70  |
| С. И. Торопин. Наиболее точные точки опор кварцевого жезла интерференционного компаратора . . . . .   | 76  |
| Л. К. Каяк, С. И. Торопин. Установка для определения температурных коэффициентов ленточных и проволочных мер длиной до 24 м . . . . .                       | 82  |
| А. Н. Королева, Е. Б. Шевченко. Результаты исследования температурного коэффициента удлинения плавленого кварца и стекла сорта 23 . . . . .                 | 90  |
| М. Г. Богуславский. Цифровое отсчетное устройство к инструментальному микроскопу . . . . .  | 99  |
| А. Н. Александрова, Н. А. Пеликс. Установка для измерения радиусов сфер . . . . .   | 107 |
| Г. И. Стракув. Исследование и применение образцовых средств для поверки диоптриметров . . . . .   | 111 |
| Е. Е. Шарова. Обработка результатов измерения прямолинейности направляющих станин различными методами . . . . .   | 117 |
| И. П. Ваганов, Н. М. Щипачева. Исследование блоков концевых мер до 4000 мм . . . . .  | 122 |
| И. П. Ваганов, И. В. Деева. Исследование деревянных диаметральных и линейных скоб больших размеров . . . . .  | 124 |

Главный редактор *Н. Н. Александрова*

Техн. редактор *К. М. Волчок*

Корректор *Э. Г. Вазер*

Сдано в набор 26/11 1965 г. М-27055. Подписано к печати 15/IX 1965 г.  
Бумага 70×100<sup>1/2</sup> мм. Печ. л. 8,25. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 2000 экз. Цена 80 коп. Заказ № 941.

Картфабрика ВМФ

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

| Стр. | Строка | Напечатано        | Следует читать    |
|------|--------|-------------------|-------------------|
| 11   | 23 св. | $\pm 0,02l$       | $+ 0,02l$         |
| 52   | 4 св.  | —                 | на                |
| 92   | 15 св. | $2 \cdot 10^{-7}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ |
| 92   | 15 св. | $5 \cdot 10^{-8}$ | $5 \cdot 10^{-7}$ |

ВНИИМ, вып. 78. Знач. 90.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА

| Год         | 1964 | 1965 | 1966 |
|-------------|------|------|------|
| 1. Число    | 100  | 100  | 100  |
| 2. Среднее  | 100  | 100  | 100  |
| 3. Максимум | 100  | 100  | 100  |
| 4. Минимум  | 100  | 100  | 100  |

Главный редактор *Н. Н. Александрова*

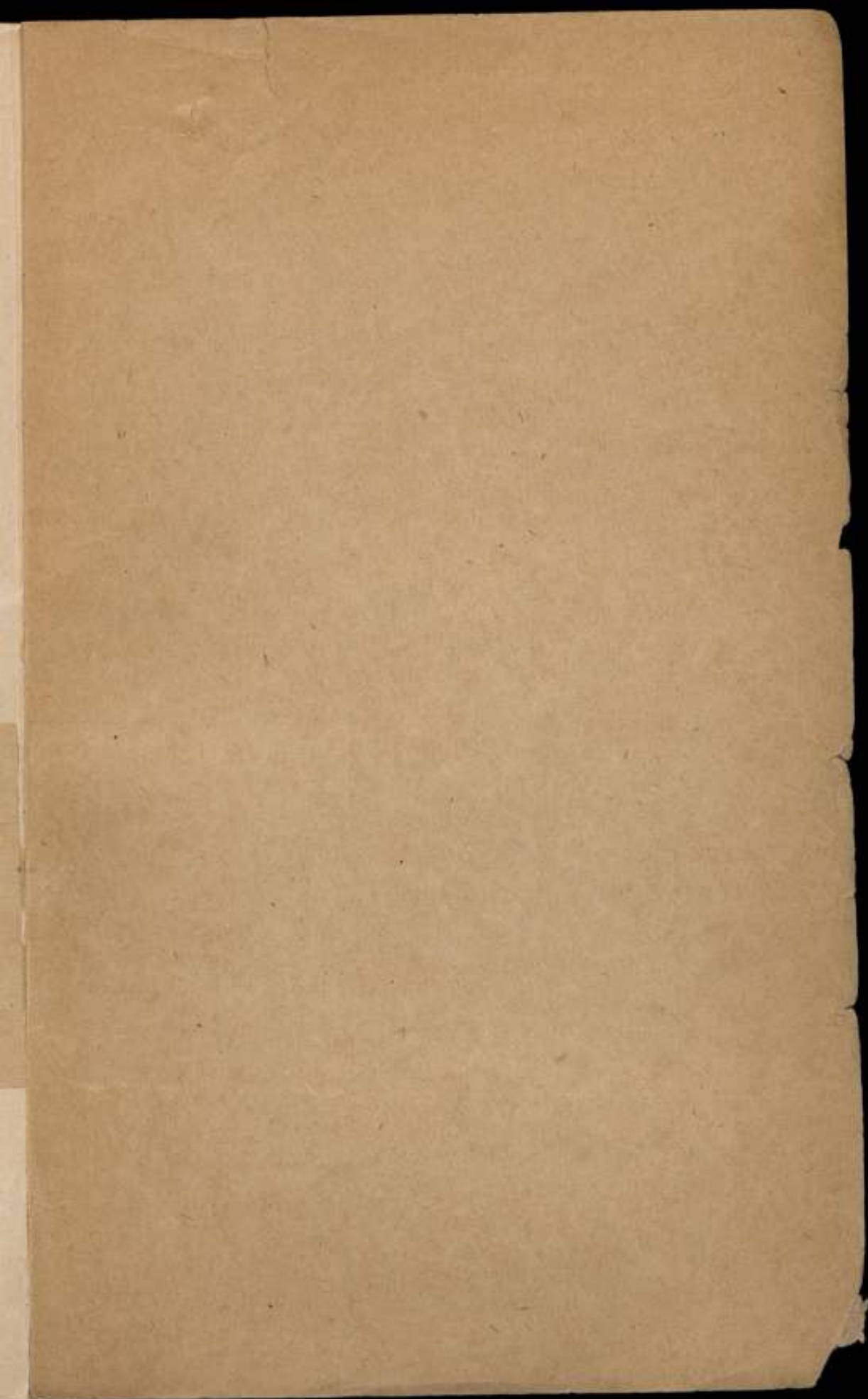
Техн. редактор *К. М. Волчок*

Корректор *Э. Г. Вазер*

Сдано в набор 26/II 1965 г. М-27065. Подписано к печати 13/IX 1965 г.  
 Бумага 70×108<sup>1/2</sup>. Печ. л. 8,25. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 2000 экз. Цена 80 коп. Заказ № 941.

Карафабрика ВМФ





Цена 80 коп.