

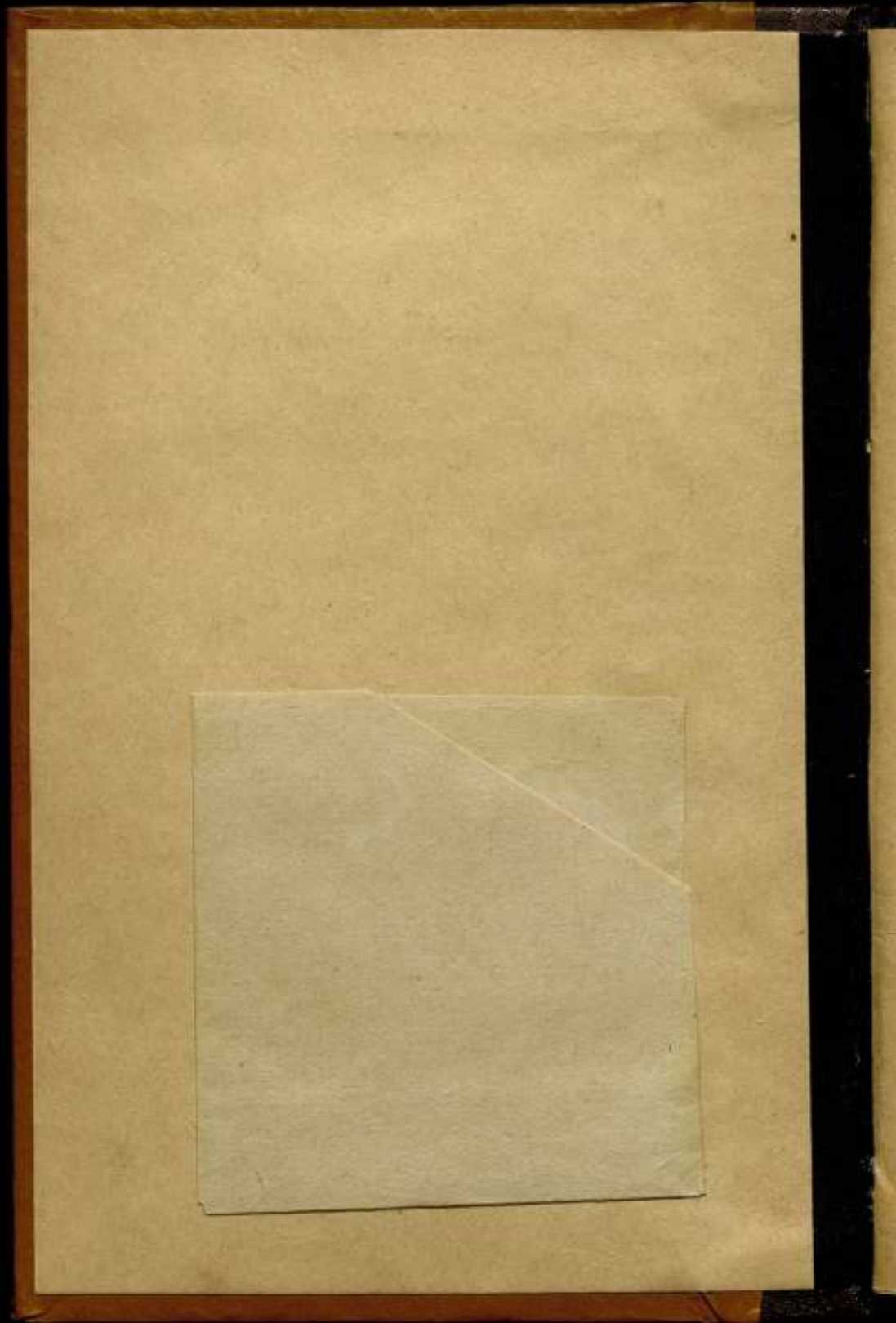
КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СНК СССР

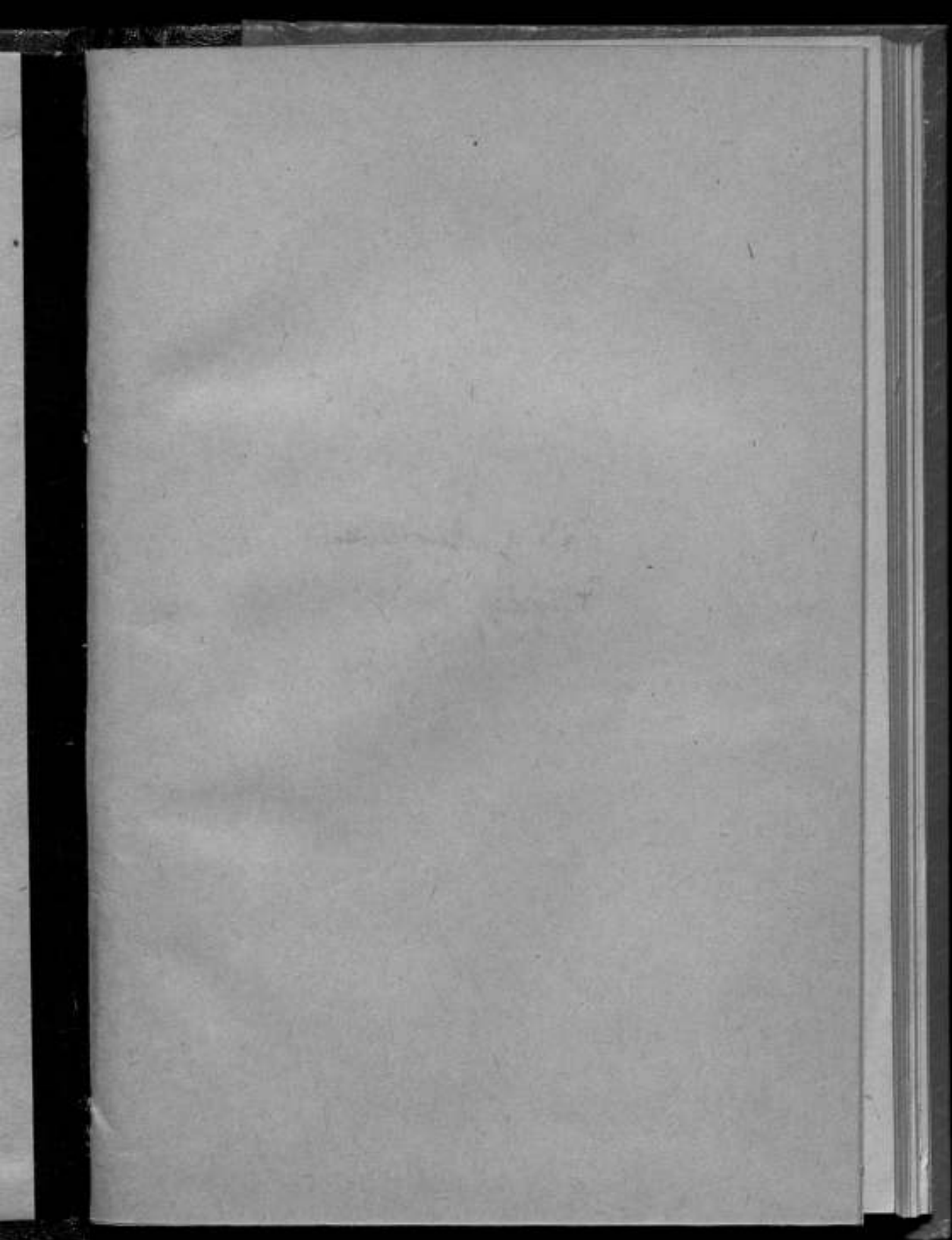
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО - ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ — ВНИИМ

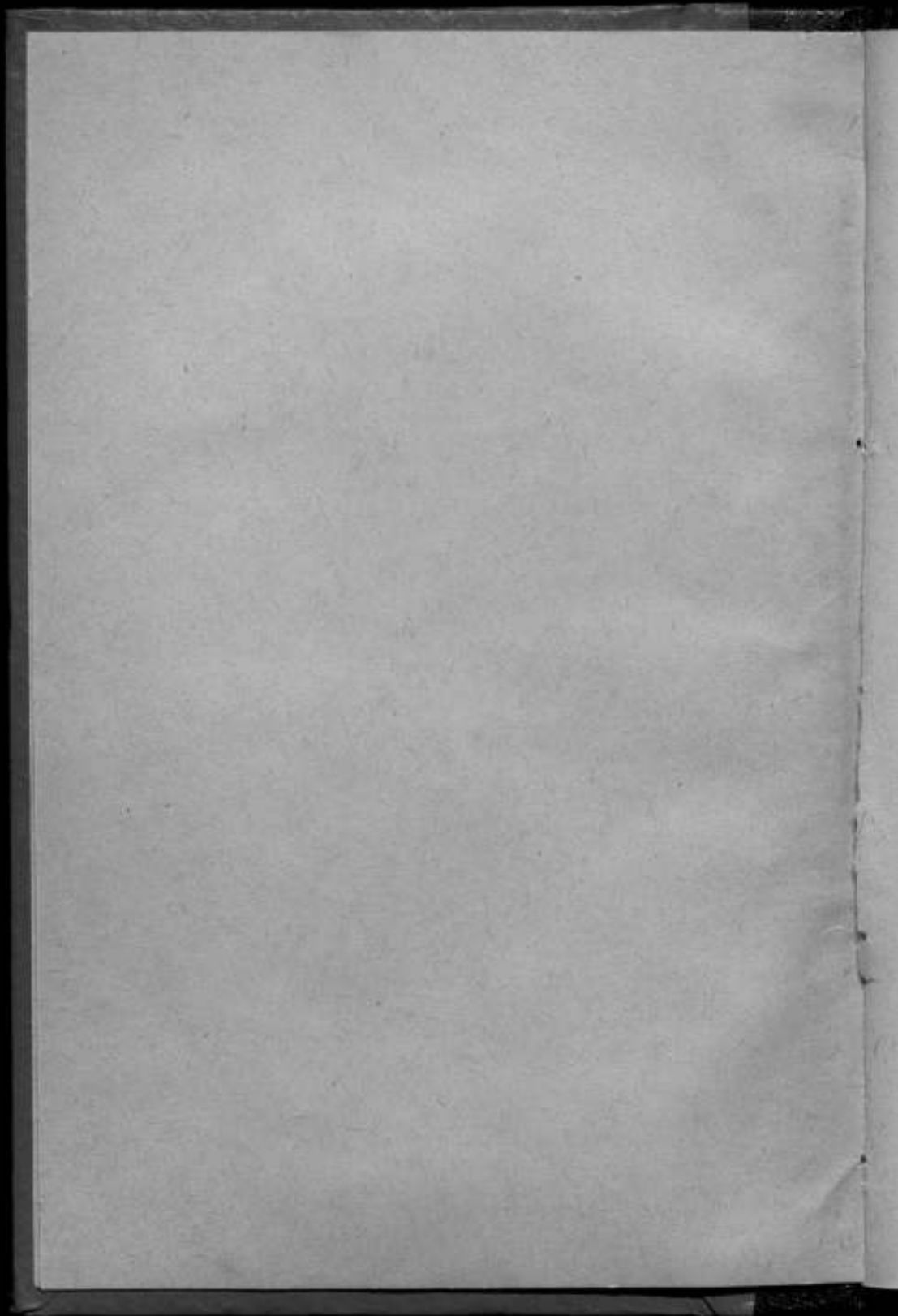
ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИН
И
КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ
ПОВЕРХНОСТЕЙ

1 (410)

ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД—1941







КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СНК СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ — ВНИИМ

Сборник трудов

Выпуск 1 (46)

м. 5/8/53

ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИН
И
КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ
ПОВЕРХНОСТЕЙ

Под редакцией
проф. В. А. БАРИНОВА



ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД — 1941

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. А. А. Поликарпов и П. П. Зубрилин. Исследование концевой измерительной машины в 6 метров	5
2. М. Л. Бржезинский. К вопросу о применении пневматического метода для линейных измерений	45
3. А. А. Юргенс. Регулирование температуры лабораторного помещения с помощью фотоэлектрического терморегулятора	52
4. П. Е. Соловьев. Исследование качества обработки поверхностей на двойном микроскопе Линника	90
5. М. Х. Платонов. Исследование качества поверхностей плоскопараллельных концевых мер при помощи микроинтерферометра Линника	99
6. П. Е. Соловьев. Исследование качества обработки поверхностей на микроскопе Буша	115

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник трудов ВНИИМ содержит шесть статей, частично отражающих научно-исследовательские работы лаборатории концевых мер Института за 1938—1939 гг.

Первые три статьи посвящены вопросам измерения длин и изложению лабораторных условий, в особенности температурных, наилучшим образом обеспечивающих точность измерительных процессов.

В последних трех статьях кратко отражены вопросы практического применения ряда известных оптических методов и приборов к изучению качества обработанных металлических поверхностей.

Начальная статья данного сборника — «Исследование концевой измерительной машины в 6 м», А. А. Поликарпова и П. П. Зубрилина, подробно излагает результаты исследования 6-метровой измерительной машины Цейсса, уделяя особенное внимание методике и погрешностям измерения.

С исчерпывающей полнотой авторы изучили все шкалы этой замечательной измерительной машины. Итоги их работы, как и примененная ими методика, могут быть с успехом использованы в измерительных заводских лабораториях, обладающих не только большими измерительными машинами (4 м, 6 м), но и малыми машинами фирмы Цейсса.

Задача применения пневматического метода, как весьма чувствительного, в процессах метрологической измерительной практики, являлась для лаборатории концевых мер ВНИИМ до 1939 г. новой задачей. Приложение этого метода и специальных пневматических приборов в общей измерительной практике не давало достаточных оснований к применению пневматической аппаратуры в области высокоточных метрологических линейных измерений.

Вторая статья сборника «К вопросу о применении пневматического метода для линейных измерений», М. Л. Бржезинского, в весьма компактной и оригинальной форме излагает теоретическое обоснование принципа пневматического действия прибора «Solex» и устанавливает, на основе экспериментального испытания, достоинства и недостатки прибора в приложении к линейным измерениям. Результаты работы М. Л. Бржезинского могут быть весьма полезными для заводов, выпускающих массовые или серийные детали и обладающих приборами типа «Solex».

Известно, какую важную роль играют нормальные температурные условия, и особенно постоянство температуры, в процессах не только точных измерений, но и изготовления ответственных деталей точного приборостроения. Вопросы учета и регулирования температуры в измерительных лабораториях и в специальных цехах заводов до сих пор до конца не разрешены и, по существу, еще разрабатываются.

Третья статья настоящего сборника — «Регулирование температуры лабораторного помещения с помощью фотоэлектрического терморегу-

латора*, автором которой является научный сотрудник ВНИИМ — А. А. Юргенс, содержит весьма обстоятельное описание способа регулирования температуры лабораторного помещения ВНИИМ, в котором помещается 6-метровая измерительная машина Цейсса.

Автор применил фотоэлектрический терморегулятор с чувствительностью в $0^{\circ},001\text{C}$, управляемый зеркальным гальванометром, включенным в диагональ неуравновешенного моста Витстона.

Статья не претендует на исчерпывающее и вполне законченное установление метода регулирования комнатной температуры и конструкции терморегулятора, однако она дает богатый опытный материал, который может быть использован в метрологических и заводских лабораториях при решении отдельных частных задач автоматического регулирования температуры.

Четвертая статья „Исследование качества обработки поверхности на двойном микроскопе Линника“, П. Е. Соловьева, излагает одну из серий работ по исследованию микрогеометрии поверхностей, проводимых лабораторией концевых мер ВНИИМ, с использованием для этой цели двойного микроскопа типа Линника-Шмальца. Принцип двойного микроскопа автор использовал для исследования качества обработанных поверхностей чисто промышленных деталей, не требующих высоко-точной оценки. Однако, точность, которой добился экспериментатор, а именно $\pm 0,1\mu$, свидетельствует о тщательности выполненных измерений.

Следующая статья М. Х. Платонова — „Исследование качества поверхностей плоскопараллельных концевых мер при помощи микроинтерферометра Линника“, посвящена изложению опытов по наиболее эффективному использованию замечательного оптического прибора академика В. П. Линника для изучения качества обработки поверхностей особенно ответственных калибров — измерительных плиток типа Йогансона, изготовленных заводами зарубежными и советским заводом „КРИН“.

Микроскоп Буша и его метод определения качества отделки поверхностей не являются метрологическими. Однако, принцип Буша может быстро дать богатый опытный материал даже в лабораториях метрологических учреждений. Этот материал может быть полезен для составления классификации поверхностей по их качеству; на основе его лаборатория концевых мер ВНИИМ может дать известные рекомендации промышленным заводским лабораториям в отношении наиболее рационального и эффективного использования указанных прибора и метода.

Последняя статья сборника — „Исследование качества обработки поверхностей на микроскопе Буша“ П. Е. Соловьева, дает описание микроскопа Буша, излагает методику пользования прибором с конкретными примерами ряда опытных исследований изделий различных советских заводов.

Мы полагаем, что весь материал сборника, несомненно, интересен и полезен не только для работников заводских измерительных лабораторий, но и вообще для инженерно-технических работников советской инструментально-приборо-машиностроительной промышленности.

Профессор В. А. Барinov.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ В 6 МЕТРОВ

А. А. ПОЛИКАРПОВ И П. П. ЗУБРИЛИН

Введение

Огромный рост и развитие тяжелой промышленности СССР, изготовление с большой точностью колоссальных по размерам и мощности генераторов, турбин, станков и других машин потребовали в качестве первоисточников при измерении деталей больших размеров соответствующих концевых мер, изготовленных с большой точностью, а для их поверки — измерительных машин.



Рис. 1. Штихмасс со сферическими измерительными поверхностями.

Концевые меры при измерениях больших длин применяются в виде штихмассов, которыми либо непосредственно производятся внутренние измерения, либо поверяются скобы и микрометры при наружных измерениях. Для измерения размеров до 1000 мм обычно применяют цельные, цилиндрической формы, штихмассы со сферическими измерительными поверхностями (рис. 1). С увеличением размеров, во избежание прогибов, штихмассам придают другие формы и, например, при измерении деталей от 4000—12000 мм применялся штихмасс, изготовленный из конических элементов, сваренных из листового железа толщиной в 1 мм с наружным диаметром в середине около 250 мм (рис. 2),¹

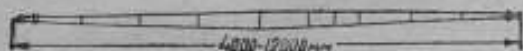


Рис. 2. Штихмасс из конических элементов.

или из железной газовой трубы диаметром в 40—50 мм с системой растяжек из струнной проволоки, обеспечивающих жесткость всей конструкции (рис. 3). Применяют также раздвижные, так называемые телескопические, и составные штихмассы с винтовым микрометром на одном конце.

В задачи метрологических учреждений входит установление точных размеров образцовых измерителей, применяемых машиностроительной промышленностью, чтобы последняя могла пользоваться ими при поверке своих контрольных и рабочих мер и установке скоб и микрометров.

¹ Опыт завода „Электросила“ им. С. М. КИРОВА при измерении гидрогенераторов \varnothing 8500—12000 мм.

В настоящее время заводы крупного машиностроения нередко нуждаются в точном измерении деталей, имеющих габариты в 6000, 8000, 12000 мм и более. Например, статор гидрогенератора для Днепроостроя имеет размер около 14500 мм, а вал — 1070 мм в диаметре и т. д. Поступают в последнее время запросы об измерениях в 24000 мм.

Размеры и конструкции существующих измерительных машин для измерения больших мер и достигаемые на них точности измерения весьма разнообразны. Машины изготавливаются от 1000 до 20000 мм. Но из большого числа имеющихся машин, к сожалению, пока по точности измерений заслуживают внимания только 6-метровая машина фирмы К. Цейсса и 4-метровая машина Женевского общества. Вопрос о конструировании и изготовлении концевых машин в СССР уже в первом приближении решен, и некоторые заводы построили машины простейшего вида до 6 м, и работают на них не без успеха с точностью, достаточной для цеховых измерений, при условии поверки основных заводских мер с большей точностью. Приступлено также к изготовлению машин для размеров 10—12 м.



Рис. 3. Штихмасс с растяжками.

ВНИИМ имеет единственную в СССР измерительную машину для исследования концевых мер длиной до 6 м с более высокой точностью.

§ 1. Описание установки 6-метровой машины во ВНИИМ

Для большей устойчивости и устранения влияния внешних колебаний почвы и здания на весь режим во время наблюдений, вначале было решено вывести массивные фундаменты рядом с имеющейся в этом помещении 2-метровой измерительной машиной Женевского общества, но затем эта машина была отнесена в правую часть помещения на 2 м и установлена на фундаментах с глубоким залеганием в грунте. На два освобожденные фундамента А (рис. 4) и оставшийся от старых установок третий массивный фундамент были положены и заделаны в них цементом две, несколько лет пролежавшие на открытом воздухе, двутавровые балки № 200 В (рис. 4). Балки были уложены параллельно одна другой на таком расстоянии, чтобы середины их верхних плоскостей совпали с расстоянием d между противоположными точками опоры измерительной машины (рис. 5). Для большей жесткости всей конструкции и для помещения третьей точки опоры измерительной машины, балки были связаны между собой в поперечном направлении под точками

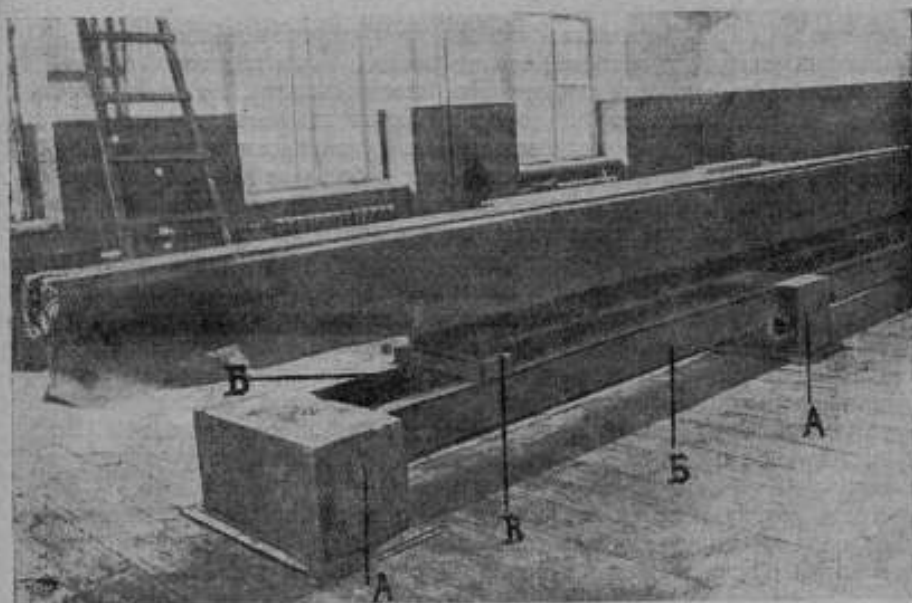


Рис. 4. Машина во время ее установки.

опор машины, т. е. на расстоянии, наиболее благоприятном для устойчивости машины (4000 мм), двумя швеллерами № 160 — В — (рис. 4), укрепленными электросваркой на балках.

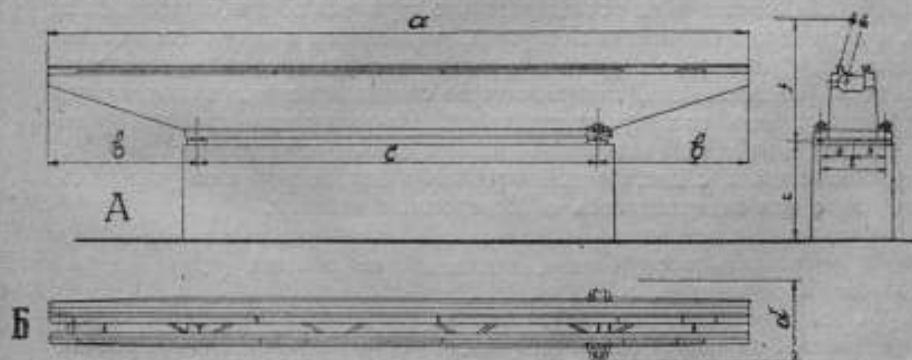


Рис. 5. Схема станины машины.

§ 2. Термостатные условия для помещения машины

Ввиду необходимости соблюдения при измерениях строгого температурного режима в $20^{\circ}\text{C} \pm (0^{\circ},1 - 0^{\circ},2)$, пришлось все помещение (80 м³) сделать термостоянным (константным). Для этого 7 больших окон, по

совету проф. Г. М. Кондратьева, были заделаны изнутри помещения дополнительными рамами, в которые, вместо стекол, были положены в 5 рядов тонкие гофрированные алюминиевые листы (фольга). На имеющийся деревянный пол был настлан второй и покрыт сплошным линолеумом. Чтобы не было передачи колебания полов фундаментам машин, между стенками фундаментов и полами оставлены небольшие (20—25 мм) промежутки, закрытые войлоком во избежание проникания холодного воздуха из подвала. Входные двери снаружи и внутри обиты войлоком и клеенкой; кроме того, устроен внутренний тамбур. Ввиду того, что помещение включено в цепь теплоцентрали и вначале обогревалось семью батареями с регулировкой притока горячей воды, предполагали, что это отопление будет достаточным, но такая грубая регулировка притока теплоты не дала хороших результатов и пришлось изыскивать другие средства для осуществления более чувствительной, безинерционной, автоматической регулировки. Сотрудники электро-измерительной лаборатории ВНИИМ А. А. Юргенс и Д. В. Гутнер взялись разрешить эту трудную задачу.

После долгих исканий благоприятных схем и различных комбинаций приборов, эти сотрудники дали первоначальный вариант установки автоматического контроля обогрева помещения с применением термометров сопротивления и фотоэлементов. Батареи отопления были выключены, и нагревание было полностью переведено на 14 небольших (300 W) электрических печей, расставленных на полу помещения около стен. Для перемешивания воздуха за печами установили небольшие комнатные вентиляторы.

В качестве воспринимающих температуру элементов подвесили на высоте 2 м от пола в шахматном порядке шесть термометров сопротивления и, соединив их последовательно группами по три, присоединили их к двум воспринимающим аппаратам, включенным в одну ветвь мостика Витстона. С помощью зеркальных гальванометров высокой чувствительности и фотоэлементов, аппараты через специальные реле включают или выключают всю систему нагревателей. Из-за плохого качества фотоэлементов и не вполне еще проработанной схемы, поддерживать температуру помещения с достаточной точностью долгое время не удавалось, в связи с чем задерживалось и исследование машины.

Наступивший летний период с высокой температурой заставил временно прекратить исследование, так как не имелось установки для охлаждения помещения.

За это время схема автоматического подогревания была пересмотрена и уточнена, был найден соответствующий режим включения печей, использование наружной и внутренней вентиляции, и с осени 1938 г. уже можно было приступить к исследованию машины с большей уверенностью, так как температура помещения устойчиво держалась в пределах $20^{\circ} \pm (0^{\circ},1 - 0^{\circ},2)$.

¹ См. в настоящем сборнике статью А. А. Юргенса „Регулирование температуры лабораторного помещения с помощью фотоэлектрического терморегулятора“.

Во время исследования велся строгий контроль температуры машины, исследуемой меры и окружающего воздуха, в особенности при размерах от 2 до 6 м.

В процессе исследования было замечено некоторое расслоение температуры по высоте, что заставило поставить вопрос о небольшом (300—400 W) подогреве воздуха непосредственно под машиной, установке там двух-трех дополнительных термометров сопротивления, замене ртутных термометров термопарами, а также совершенной изоляции стояков труб теплоцентрали и обязательной установке охлаждающего приспособления.

Для предупреждения пожара в помещении установлены 4 термосигнала, отрегулированные на 35° и включенные в сигнализацию пожарной охраны ВНИИМа.

Для автоматического выключения всей нагревательной аппаратуры в аварийных случаях, около аппаратов установлены более чувствительные ртутные термометры с контактом на $+25^{\circ}$.

§ 3. Краткое описание конструкции концевой измерительной машины в 6 метров

Основанием концевой измерительной машины в 6 м является отлитая из чугуна массивная станина специальной формы и размеров, указанных

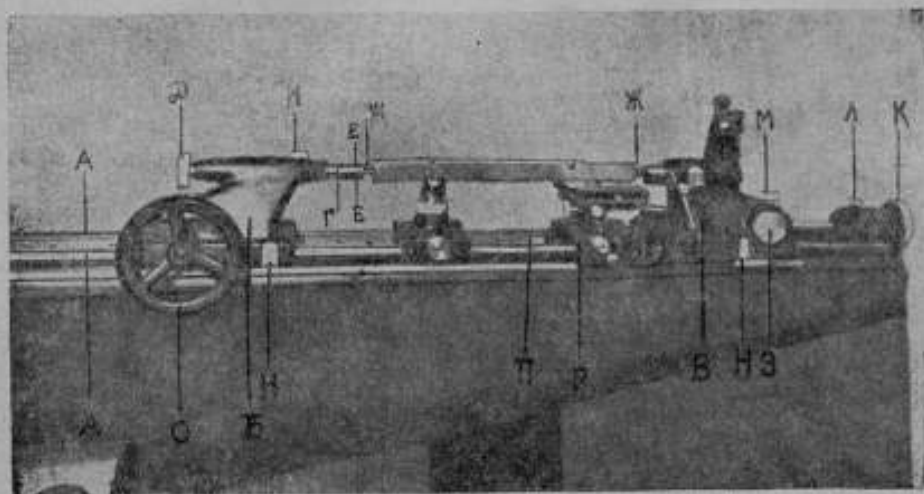


Рис. 6. Часть машины с установленной для измерения плоскопараллельной концевой мерой.

на рис. 5—А, с ребристыми раскосами внутри машины по всей ее длине (рис. 5—Б):

На верхней части станины имеются: а) две направляющие А (рис. 6), служащие для перемещения и установки на них: двух измерительных

бабок — левой *Б* и правой *В*, универсального предметного столика *Р*, двух подставок *А* (рис. 7) для мер; *б*) стальная шкала *Б* (рис. 7), состоящая из 6 расположенных друг за другом метровых линейек. Шкала помещается между направляющими параллельно им и имеет через каждые 100 мм сквозные круглые ($\Phi 10$ мм) отверстия со стеклянными вставками, на которых нанесены двойные, параллельные штрихи и цифры, соответствующие дециметрам от 0 до 59; *в*) стальная цельная линейка, укрепленная на верхней наружной части станины (ближайшей к наблюдателю),

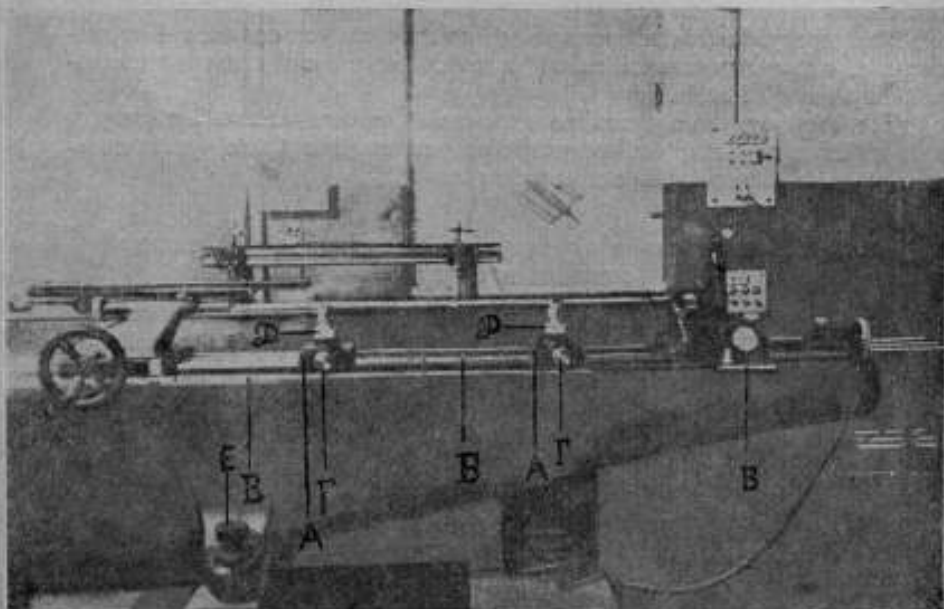


Рис. 7. Часть машины с установленным для измерения штихмасом.

служащая для грубых установок левой бабки и имеющая порядковые обозначения дециметров; *г*) основная стеклянная стомиллиметровая шкала *А* с подразделениями на 0,1 мм (рис. 8), расположенная на одной оси с большой („дециметровой“) шкалой; *д*) малая, вспомогательная 100 мм, стальная линейка *Б* для грубой установки правой бабки. Линейка находится на продолжении большой вспомогательной шкалы (рис. 8) и имеет подразделения на целые миллиметры.

При измерениях мера устанавливается между наконечниками левой и правой бабок *Ж* (рис. 6); левая бабка *Б* (рис. 6) имеет пазы, в которые входят направляющие станины. Передвижение бабки по направляющим производится вращением маховичка *О* (рис. 6), входящего в зацепление с зубчатой рейкой *П*. В верхней части бабки, на измерительной оси машины находится трубка *Г* („пиноль“) установочного стержня с винтами: *Д* для микрометрического передвижения его и *И* — фик-

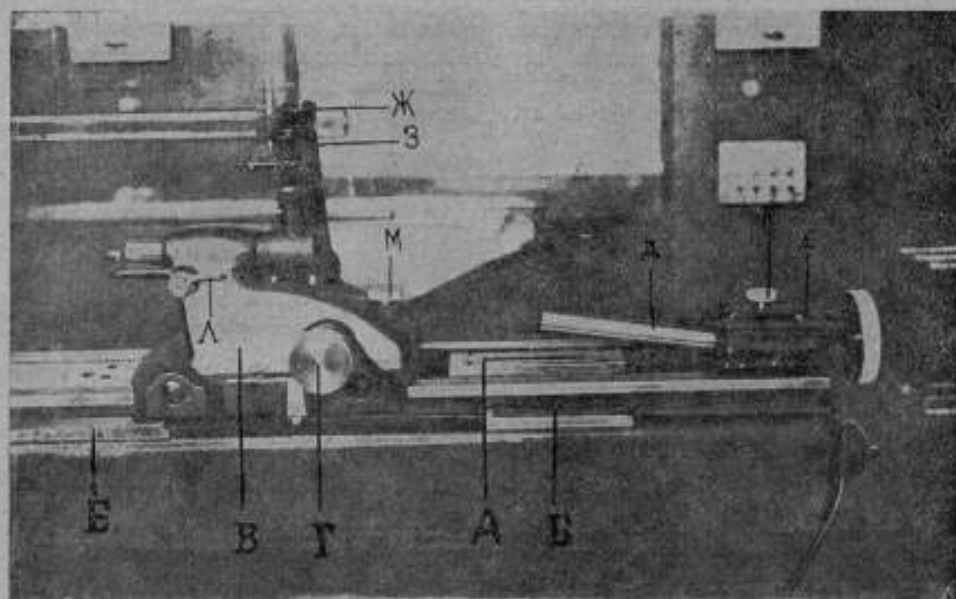


Рис. 8. Часть машины со стеклянной стомиллиметровой шкалой.

спрующим; два регулировочных винта *Е*, дающих возможность установить измерительные наконечники *Ж* правильно по оси машины.

Кронштейн *А* (рис. 9), соединенный с корпусом левой бабки и входящий внутрь станины, несет оптическую систему, состоящую из оборачивающей призмы и объектива *Б*. Объектив дает параллельный световой пучок от электрической лампы малой мощности (4 V, 0,4 A), вмонтированной в боковую сторону корпуса бабки *А* (рис. 10).

Правая бабка *В* (рис. 8) устанавливается над стомиллиметровой стеклянной шкалой и перемещается грубо в этих пределах вращением маховичка *Г* с зубчаткой, входящей в зацепление с рейкой *Д*. Рейка, в свою очередь, связана с микрометрическим винтом мостика *Е*, укрепленного неподвижно в начале станины. Правая бабка, кроме отсчетного

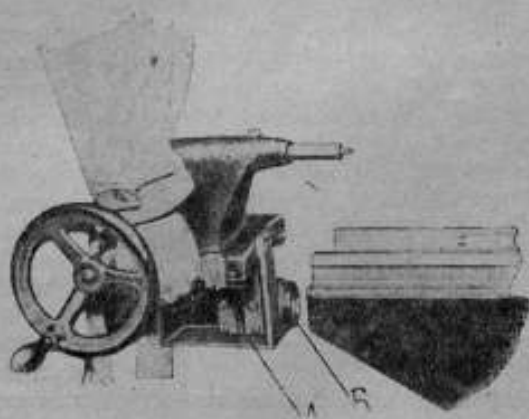


Рис. 9. Левая бабка и ее оптическая часть.

микроскопа *Ж* и оптиметра *З*, армированных в ее корпусе, имеет точно такую же оптическую систему, как левая бабка, что позволяет наблюдать в отсчетном микроскопе расположенное в его фокальной плоскости изображение одного из двойных штрихов большой шкалы, разделенной на дециметры, и стеклянную стомиллиметровую шкалу, разделенную



Рис. 10. Левая бабка с осветителем.

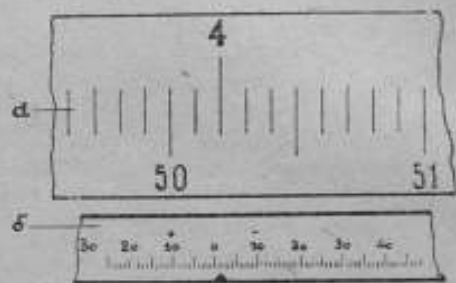


Рис. 11. Вид шкал: стомиллиметровой (верхняя) и оптиметра (нижняя).

на 0,1 мм *А* (рис. 11). Сотые, тысячные, а на глаз и десятитысячные доли миллиметра отсчитываются по оптиметру *Б* (рис. 11).

Приближенная установка обеих бабок по вспомогательным шкалам *В* (рис. 7) и *Б* (рис. 8) производится: левой — маховичком *О* (рис. 6), правой — маховичком *З* (рис. 6) и *Г* (рис. 8). Микрометрически правая бабка перемещается винтом *И* (рис. 8) и фиксируется стопорным винтом *Л* (рис. 6) и *К* (рис. 8).

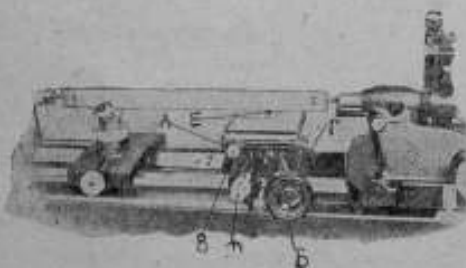


Рис. 12. Предметный (универсальный) стол машины с установленной мерой.

горизонтальное перемещение на шариках, поперечное — кремальерой *А* (рис. 12), по высоте — маховичком *Б* (рис. 12), а также вращательное около горизонтальной и вертикальной осей *В* и *Г* (рис. 12). Два стержня-ограничителя *Д* (рис. 12) позволяют фиксировать в пределах 60 мм опускание и подъем стола.

При измерениях концевых мер с плоскими измерительными поверхностями применяется или только универсальный, предметный стол, или,

если изделие превышает размер в 200 мм — стол и специальная V-образная подставка А (рис. 7) с прямоугольной роликовой призмой. Подставка своими пазами накладывается на направляющие станины и в любом месте ее закрепляется винтом Г (рис. 7). Вращением горизонтального кольца Д (рис. 7) призма подставки регулируется по высоте.

В случаях измерения цилиндрических мер со сферическими или плоскими измерительными поверхностями (штихмассов) применяются две, указанного вида, подставки А (рис. 7).

Установка исследуемых мер на подставках производится непременно в точках Эри, наиболее благоприятных для измерения (расстояние между точками Эри $= 0,57735 L$), где L — длина концевой меры в миллиметрах.

На измерительной машине типа К. Цейсс можно непосредственным и сравнительным методами производить наружные измерения от 0 до 6 м и внутренние, с применением специальных дуг и стола — от 13,5 до 400 мм.

§ 4. Исследование прямолинейности направляющих машины

Перед исследованием машина была установлена по точному уровню в горизонтальное положение. Горизонтальность проверялась в продольном и поперечном направлениях переключением уровня и регулировкой двух опорных винтов машины Е (рис. 7).

Так как на точность измерений на машине большое влияние имеет перекос относительно оси измерительных стержней правой, неподвижной бабки В и левой Б (рис. 6), перемещаемых по всей длине машины, то явилась необходимость, прежде чем приступить к детальному исследованию обеих шкал измерительной машины, исследовать перекос левой бабки и ее измерительного наконечника, происходящий от непрямолинейности направляющих, при перемещении ее по всей длине направляющих.

Исследование прямолинейности направляющих производилось автоколлимационным методом. Автоколлиматор А (рис. 13) представляет собой зрительную трубу, установленную на бесконечность. В фокальной плоскости объектива трубы расположена пластинка с нанесенным на ней прямым крестом, освещенным источником света (электрической лампой), помещенным между пластинкой и окуляром с микрометром. Принцип действия автоколлиматора заключается в следующем. Лучи, идущие от источника света, после прохождения через объектив, превращаются в параллельные между собою лучи. Встретив на своем пути (независимо от расстояния до объектива) зеркало, перпендикулярное к оптической оси автоколлиматора, лучи отражаются от него и, оставаясь параллельными между собою и оптической оси, идут обратно и, после прохождения через объектив, дают в фокальной плоскости совпадающее с крестом пластинки его изображение.

Если отражающее зеркало наклонно, под углом α , к плоскости, перпендикулярной к оптической оси, то параллельные лучи, после отражения от зеркала, отклоняются от оптической оси на угол 2α и, после

прохождения через объектив, в фокальной плоскости получится изображение креста, смещенное относительно креста пластинки на величину

$$d = F \operatorname{tg} 2\alpha, \quad (1)$$

откуда угол наклона зеркала

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{d}{F}$$

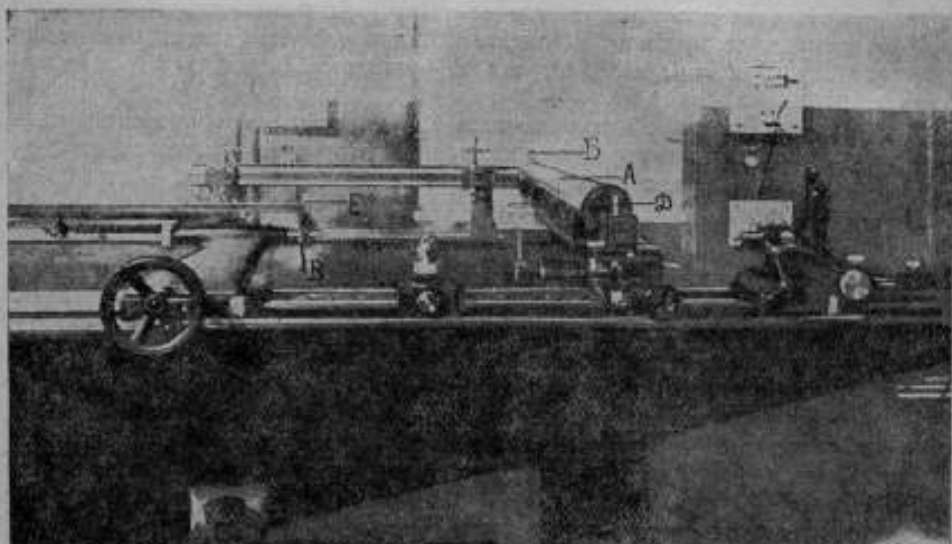


Рис. 13. Установка с автоколлиматором для исследования направляющих машины.

или ввиду незначительности угла α

$$\alpha = \frac{d}{2F}, \quad (2)$$

где F — фокусное расстояние объектива.

Из выражений 1 и 2 видно, что в автоколлиматоре величина d смещения изображения (независимо от расстояния отражающего зеркала до объектива), исключительно зависит от фокусного расстояния F объектива и угла наклона α зеркала к плоскости, перпендикулярной к оптической оси.

Автоколлимационный метод дает возможность исследовать прямолинейность направляющих машины в горизонтальной и в вертикальной плоскостях.

Применявшийся для исследования направляющих машины автоколлиматор снабжен объективом с фокусным расстоянием в 2000 мм и окулярным микрометром B (рис. 13) и A (рис. 14), шаг винта кото-

рого равен 0,5 мм, а барабан разделен на 50 частей, т. е. цена одного деления барабана равна 0,01 мм.

Ввиду того, что после установки машины промежутки между ее концами и стенами помещения не превышали 1650 мм, автоколлиматор пришлось установить у конца машины перпендикулярно к ее направляющим, как подробно указано ниже.

Первоначально для определения перекоса левой бабки от непрямолинейности направляющих было решено поместить, при помощи специального держателя, на трубке установочного стержня *B* (рис. 13) левой бабки круглое зеркало для отражения светового потока, идущего

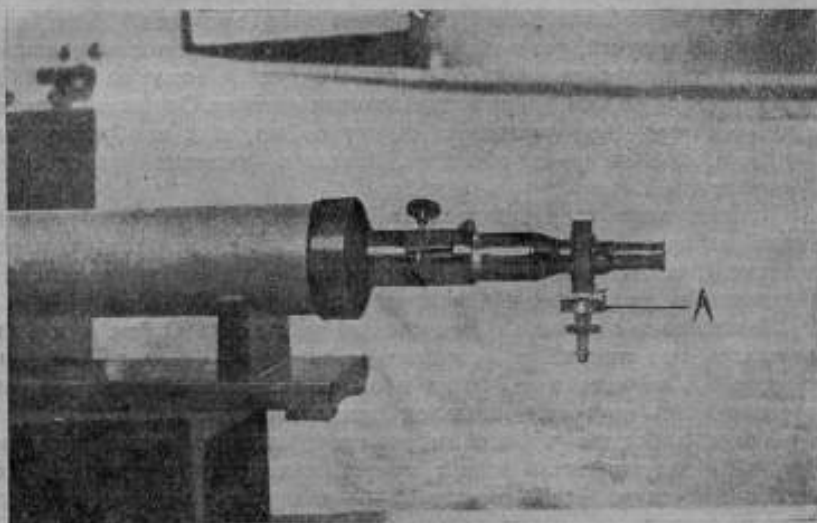


Рис. 14. Окулярный микрометр автоколлиматора.

от электрической лампочки малой мощности (3,5 В, 0,4 А), помещенной в окуляре трубы и освещающей штриховой крест. Но вследствие расположения автоколлимационной трубы перпендикулярно к оси машины, потребовалось поставить еще одно зеркало в конце машины под углом в 45° к ее оси. Для этой цели применили зеркало от гелиостата, диаметром 150 мм в оправе, имеющей наклон и повороты в вертикальной и горизонтальной плоскостях. После предварительных наблюдений оказалось, что оба зеркала, из-за несовершенства поверхностей, не дают возможности получить хорошее автоколлимационное изображение креста и поэтому дальнейшее исследование производить было нельзя. Оба зеркала заменили оптически плоскими стальными плитками фирмы Цейсса размером 40×50 мм. Наблюдения показали, что установка трубы на столе, расположенном на полу, не годится, вследствие передачи ей колебаний всего здания. Установку изменили перестановкой трубы на другой конец машины, положив ее одним концом на подставку, поме-

ценную на фундаменте машины Цейсса, а другим — на направляющие машины Женевского общества Г (рис. 13). Последующие многочисленные наблюдения, давшие очень хорошие результаты, показали, что установка весьма устойчива и свободна от мешающих наблюдениям колебаний.

При исследовании автоколлиматор устанавливался у конца машины перпендикулярно к направляющим. Против него на станине рядом с правой бабкой, установленной на штрих „100“ стомиллиметровой шкалы, помещалось на универсальном столике Р (см. рис. 6) машины металлическое зеркало Д (рис. 13) под углом в 45° к оптической оси автоколлиматора так, чтобы параллельные лучи, идущие из объектива, после отражения от зеркала шли параллельно направляющим. Далее, на станине, на пути лучей, устанавливалось, перпендикулярно к направляющим, второе металлическое зеркало Е (рис. 13), укрепленное на левой бабке, перемещаемой по всей длине направляющих машины. Отраженные зеркалом лучи, оставаясь параллельными между собою, шли в обратном направлении и, пройдя через объектив, давали в фокальной плоскости изображение креста.

Исследование направляющих заключалось в определении углов наклона зеркала, укрепленного на левой бабке, вследствие перекоса последней, происходящего от непрямолинейности направляющих в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Левая бабка с зеркалом, при помощи маховичка О (см. рис. 6) передвигалась по станине от исходного положения 0,3¹ м до 5,8 м через каждые 0,5 м. Установка бабки в определенное положение на машине производилась по вспомогательной шкале станины.

Затем, наблюдая в автоколлиматор, вращением винта микрометра (рис. 14) вертикальный штрих креста приводили в совпадение с его изображением и делали отсчет по барабану микрометра автоколлиматора.

Так как при вращении винта микрометра, вертикальный штрих креста и его изображение перемещаются в противоположном направлении (навстречу друг другу), то отсчет по барабану микрометра показывает половину смещения d изображения относительно штриха. Подставляя в формулу (2) вместо $\frac{d}{2}$ показание микрометра, находим угол α наклона зеркала и, следовательно, перекоса левой бабки. Отсюда угол наклона α , отвечающий цене одного деления (0,01 мм) барабана микрометра автоколлиматора, равен

$$\alpha = \frac{0,01}{2000} \cdot 5 \cdot 10^{-4}$$

в радианах или 1,03'' (секунды). Исследование прямолинейности направляющих производилось отдельно в вертикальной и горизонтальной плоскостях. В первом случае винт микрометра устанавливался вертикально А (рис. 14), во втором — горизонтально.

¹ Так как, при установке автоколлиматора перпендикулярно к направляющим машины, исходным положением левой бабки могла быть только установка ее на штрих 300 вспомогательной шкалы станины.

При исследовании прямолинейности направляющих в каждой плоскости производилось по 5 наблюдений. Одно наблюдение состояло из 12 последовательных установок левой бабки с зеркалом на протяжении длины направляющих от 0,3 до 5,8 м в одну сторону и 12 — в обратную. При этом, после установки бабки в определенное положение на станине, вращением винта *Б* окулярного микрометра автоколлиматора (рис. 13) и *А* (рис. 14) три раза приводили в совпадение вертикальный штрих пластинки с его изображением и делали по барабану микрометра три соответствующих отсчета. Следовательно, одно наблюдение состояло из 24 установок левой бабки на станине и 72 отсчетов по барабану микрометра.

Для определения по данным наблюдений отклонений направляющих от прямолинейности: а) в каждом отдельном наблюдении из 6 отсчетов по барабану микрометра, относящихся к каж-

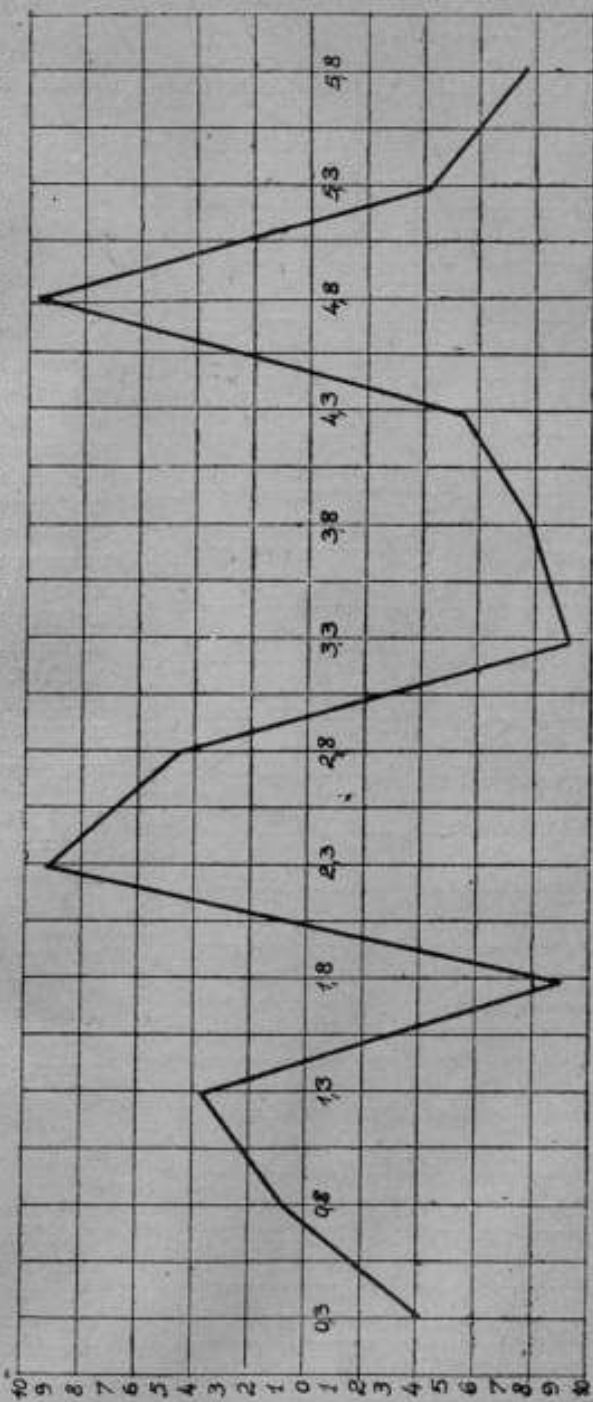


Рис. 15. Кривая исследования направляющих станины в горизонтальной плоскости.

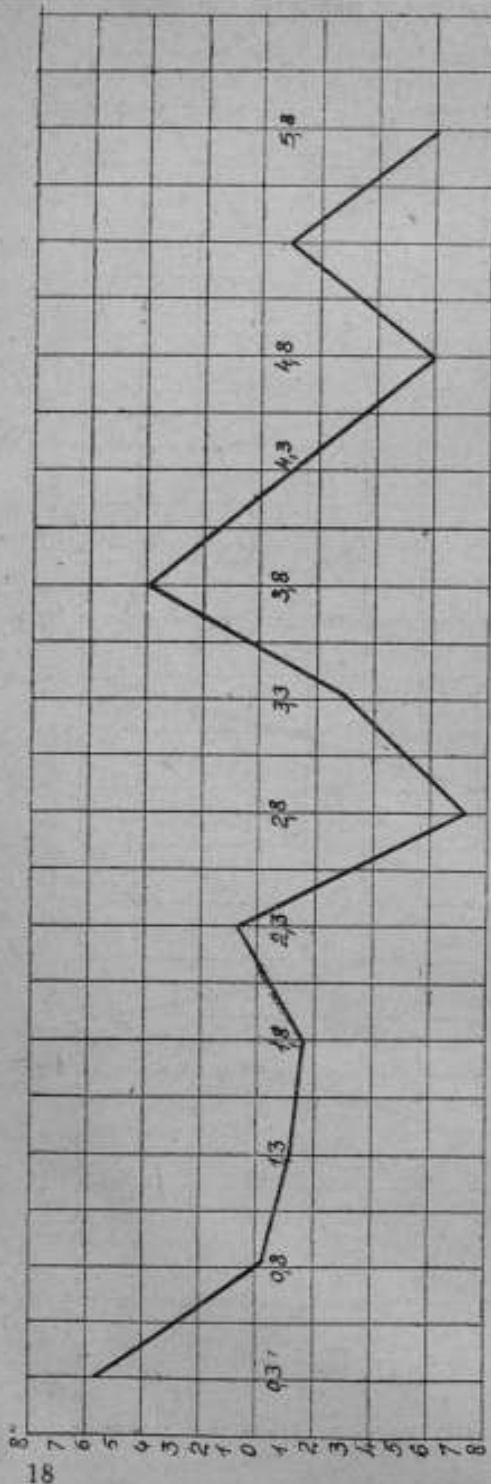


Рис. 15. Кривая исследования направляющих станины в вертикальной плоскости.

дому из положений левой бабки на станине, составляли среднее арифметическое; б) из полученных величин, отвечающих каждому из положений левой бабки на станине во всех 5 наблюдениях, вычисляли среднее арифметическое; в) принимая исходное положение 0,3 м левой бабки на станине за нулевое, определяли показание микрометра для всех остальных ее положений на протяжении от 0,3 до 5,8 м.

Так как поворот винта микрометра на одно деление барабана соответствует углу наклона зеркала в одну секунду ($1''$), то последние найденные величины выражают собою углы наклона зеркала, а, следовательно, и левой бабки, вследствие непрямолинейности направляющих.

Рис. 15 и 16 характеризуют качество прямолинейности направляющих 6-метровой концевой измерительной машины.

В концевой измерительной машине К. Цейсса шкала и измеряемое изделие располагаются параллельно между собою. В измерительных машинах, построенных на этом принципе, погрешность измерения, происходящая от перекоса бабок — величина первого порядка. В исследуемой машине, благодаря особым оптическим системам, соединенным с бабками, и положению измерительной оси — на двойном фокусном расстоянии и шкалы на фокусном расстоянии от объек-

тивов оптических систем бабок, погрешность измерения, происходящая от перекоса бабки, вследствие непрямолинейности направляющих, будет величиной второго порядка и выразится так:

$$2L \sin^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2} L \alpha^2, ^1$$

где L — действительная длина меры, α — угол перекоса в радианах.

Например, при наибольших L и α , т. е. если $L = 6000$ мм и $\alpha = 13''$ (секунд) или $67 \cdot 10^{-6}$ в радианах,

$$\frac{1}{2} L \alpha^2 = 1,3 \cdot 10^{-8} = \approx 0,01 \mu.$$

Это показывает, что погрешность измерения от непрямолинейности направляющих на 6 м настолько незначительна, что может не приниматься во внимание.

§ 5. Исследование шкал 6-метровой концевой измерительной машины

Помещение, где установлена машина, расположено в первом этаже над холодным подвалом. Несмотря на тройной пол с воздушным промежутком и войлочную прокладку между фундаментами машины и полом, оно недостаточно защищено от проникновения холодного воздуха.

Вследствие большой инерции машины и непостоянства теплового режима наблюдалась разница между температурой машины и концевой меры; температура машины на уровне шкал обыкновенно ниже, чем температура концевой меры, помещающейся на машине выше шкал приблизительно на 150 мм. При исследовании оказалось, что разность между их температурами, в зависимости от температуры наружного воздуха, колебалась от 0,1 до 0,5 С, поэтому температуры шкал машины и концевой меры, применяемой при исследовании, определялись отдельно. При концевых мерах свыше одного метра применялись четыре термометра с ценой деления в $1/10^\circ$, поверенные в Термометрической лаборатории ВНИИМа с точностью до $0,01^\circ$ С. Термометры №№ 1625 и 2715 помещались на машине, а №2716 и 2717 — на концевой мере. Поправки для точки 20° С, при которой производилось исследование машины (при горизонтальном положении термометров), оказались следующие:

Номер термометра	Поправка
1625	- 0,15
2715	- 0,11
2716	- 0,14
2717	- 0,20

Исследование 6-метровой шкалы машины, разделенной на дециметры, состояло из следующих операций:

¹ А. М. Княшко — Юстировка концевой машины типа К. Цейсс. „Метрология и поверочное дело“, Август 1939.

1) Сравнения каждого дециметра первого метра с общей длиной L стомиллиметровой стеклянной шкалы. Сравнение производилось при помощи плоскопараллельных концевых мер фирмы Иоганссона: 100 мм, 200 мм, 300 мм, 400 мм, 500 мм, (400 + 200) мм, (400 + 300) мм, (500 + 300) мм, (500 + 400) мм и 1000 мм (Хоммель-Верке), принимая во внимание только их номинальное значение.

2) Исследования через каждый метр на протяжении 6 м при помощи плоскопараллельных концевых мер фирмы Хоммель-Верке в 1 м и 1^{*} м, 2 м, 3 и 3^{*} м, (1 + 1^{*}) м, (2 + 1) м, (3 + 1) м, (3^{*} + 2) м и (3 + 3^{*}) м.

Метод, применявшийся для определения отклонения $[(n-1) - n]$ дециметра первого метра от L_{100} — общей длины стомиллиметровой шкалы, состоит в следующем.

а) Отсчитав показания термометров, помещенных на станине, устанавливают измерительную машину в нулевое положение, для чего обе бабки, правую — при помощи винта Γ (см. рис. 8) и \mathcal{Z} (см. рис. 6), предварительно освободив винт M (см. рис. 8), левую бабку — маховичком O (см. рис. 6) устанавливают на нулевые штрихи вспомогательных шкал станины. Затем, закрепив винт M (см. рис. 6) и освободив винт L (см. рис. 6), микрометрическим передвижением правой бабки при помощи винта K (см. рис. 6) устанавливают видимый в поле зрения микроскопа нулевой штрих стомиллиметровой стеклянной шкалы на середине между штрихами двойного штриха, обозначенного цифрой „0^{*}“. Наконец, освободив винт H , микрометрическим перемещением наконечника $Ж$ левой бабки при помощи винта D устанавливают оптиметр в нулевое положение и закрепляют винт H . Двойной штрих „0^{*}“ при помощи винта K по крайней мере три раза устанавливают на нулевой штрих стеклянной шкалы, каждый раз делая соответствующие отсчеты по оптиметру. За нулевое положение измерительной машины принимается среднее арифметическое из показаний оптиметра.

б) Определяют отклонения длины концевой меры номинального размера в n дециметров от соответствующих интервалов шкалы машины при установках правой бабки — на штрихи „100^{*}“ и „0^{*}“ стеклянной шкалы, т. е. сравнивают длину концевой меры с интервалами: 1) $[0 - (n-1)] + L_{100}$ от штриха „100^{*}“ стеклянной шкалы до двойного штриха „ $n-1$ “ шестиметровой шкалы и 2) $(0 - n)$ от штриха „0^{*}“ до двойного штриха „ n “ (рис. 17).

Для определения отклонения длины концевой меры от интервала $[0 - (n-1)] + L_{100}$ шкалы, правую бабку при помощи винта \mathcal{Z} (см. рис. 6) устанавливают на штрих „100^{*}“ шкалы станины и закрепляют винтом M (см. рис. 8), левую бабку при помощи маховичка O (см. рис. 6) отодвигают за штрих „ n “ вспомогательной шкалы станины. Между бабками, на универсальном столике P (см. рис. 6) помещают концевую меру, если она меньше 200 мм, и закрепляют специальным зажимом; если концевая мера больше 200 мм, то один конец ее помещают узкой гранью на плитке в 10 мм E (см. рис. 12), расположенной на универсальном столике, а другой конец — на V-образной подставке A (см. рис. 7). Столик и V-образную подставку устанавливают в точках Эри (см. ниже) меры, которую приводят в соприкосновение с наконечником правой бабки.

Затем, при помощи маховичка O (см. рис. 6) левую бабку осторожно устанавливают на штрих „ $n-1$ “ шкалы станины, при этом следят, чтобы изображение двойного штриха „ $n-1$ “ расположилось в середине поля зрения микроскопа; в противном случае установку левой бабки повторяют. Микрометрическим передвижением правой бабки при помощи винта K (см. рис. 6), освободив предварительно винт L , устанавливают штрих „ 100 “ стеклянной шкалы посередине между штрихами двойного штриха „ $n-1$ “. Подъемом и опусканием столика (или V-образной подставки) и вращением его за рукоятку Γ (см. рис. 12) или перемещением в поперечном направлении винтом A находят наименьшее показание оптиметра.

Делают три установки двойного штриха „ $n-1$ “ на штрих „ 100 “, отсчитывая каждый раз показание оптиметра.

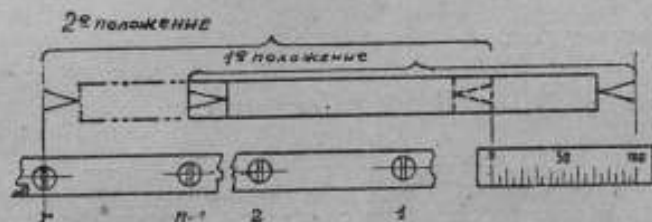


Рис. 17. Схема сравнения лециметров машины со стомиллиметровой стеклянной шкалой.

Для определения отклонения длины концевой меры от интервала шкалы $(0-n)$ левую бабку устанавливают на штрих „ n “ вспомогательной шкалы станины и концевую меру приводят в соприкосновение с ее наконечником. Затем, передвижением правой бабки, при помощи винта Z (см. рис. 6) и микрометрически — винтом K (см. рис. 6), штрих „ 0 “ стеклянной шкалы устанавливают в поле зрения микроскопа в середине двойного штриха „ n “. Далее поступают, как в предыдущем случае, но делают 6 установок двойного штриха „ n “ на штрих „ 0 “ и 6 соответствующих отсчетов по оптиметру.

Среднее арифметическое из отсчетов и будет отклонение δ_n концевой меры от интервала $(0-n)$.

Снова устанавливают правую бабку на штрих „ 100 “ стеклянной шкалы и, как в первом случае, определяют отклонение длины концевой меры от интервала шкалы $[0-(n-1)] + L_{100}$, делая три установки двойного штриха „ $n-1$ “ на штрих „ 100 “ стеклянной шкалы и соответствующие отсчеты по оптиметру. Среднее арифметическое из 6 показаний оптиметра определит отклонение δ_n концевой меры от интервала шкалы $[0-(n-1)] + L_{100}$. Наконец, сняв с машины концевую меру и подставки, снова определяют нулевое положение, для чего обе бабки устанавливают на нулевые штрихи вспомогательных шкал станины и, без установки оптиметра на нуль, микрометрическим перемещением правой бабки производят три наводки двойного штриха „ 0 “ на штрих „ 0 “ стеклянной шкалы и 3 отсчета показаний оптиметра. Отсчитывают пока-

зание термометра машины. За нулевое положение машины принимается среднее арифметическое из нулевых положений в начале и в конце наблюдения.

Таким образом, одно наблюдение состоит из 18 установок двойного штриха и соответствующих отсчетов по оптиметру.

Разность между отклонениями δ_{n-1} и δ_n концевой меры от интервалов шкалы: $[0 - (n-1)] + L_{100}$ и $(0 - n)$, равного $[0 - (n-1)] + [(n-1) - n]$, определит величину отклонения дециметра $[(n-1) - n]$ 6-метровой шкалы от общей длины L_{100} стомиллиметровой стеклянной шкалы.

Действительно длину концевой меры можно выразить так:

$$\begin{aligned} & [0 - (n-1)] + L_{100} + \delta_{n-1} \text{ и} \\ & [0 - (n-1)] + [(n-1) - n] + \delta_n. \end{aligned}$$

Из сравнения этих выражений находим:

$$[(n-1) - n] - L_{100} = \delta_{n-1} - \delta_n. \quad (X)$$

Подставляя в (X) вместо n последовательно 1, 2 ... 10 и соответствующие значения разности $\delta_{n-1} - \delta_n$, выведенные для каждого дециметра из 4 наблюдений, получим следующий ряд уравнений для дециметров первого метра:

Дециметровые интервалы	$[(n-1) - n] - L_{100} = \delta_{n-1} - \delta_n$	Средн. квадратич. погрешн. отклон. $\delta_{n-1} - \delta_n$
(0-1)	$(0-1) - L_{100} = +0,12 \text{ м}$	$\pm 0,04$
(1-2)	$(1-2) - L_{100} = -1,03 \text{ .}$	$\pm 0,03$
(2-3)	$(2-3) - L_{100} = -0,17 \text{ .}$	$\pm 0,05$
(3-4)	$(3-4) - L_{100} = -1,01 \text{ .}$	$\pm 0,05$
(4-5)	$(4-5) - L_{100} = -0,20 \text{ .}$	$\pm 0,03$
(5-6)	$(5-6) - L_{100} = -0,09 \text{ .}$	$\pm 0,06$
(6-7)	$(6-7) - L_{100} = +0,18 \text{ .}$	$\pm 0,05$
(7-8)	$(7-8) - L_{100} = +0,49 \text{ .}$	$\pm 0,04$
(8-9)	$(8-9) - L_{100} = -0,11 \text{ .}$	$\pm 0,01$
(9-10)	$(9-10) - L_{100} = -0,05 \text{ .}$	$\pm 0,03$

Суммируя каждое из уравнений со всеми предыдущими, получаем новую систему уравнений:

$$\begin{aligned} (0-1) - 1L_{100} &= +0,12 \text{ м} \\ (0-2) - 2L_{100} &= -0,91 \text{ .} \\ (0-3) - 3L_{100} &= -1,08 \text{ .} \\ (0-4) - 4L_{100} &= -2,09 \text{ .} \\ (0-5) - 5L_{100} &= -2,29 \text{ .} \\ (0-6) - 6L_{100} &= -2,38 \text{ .} \\ (0-7) - 7L_{100} &= -2,20 \text{ .} \\ (0-8) - 8L_{100} &= -1,71 \text{ .} \\ (0-9) - 9L_{100} &= -1,82 \text{ .} \\ (0-10) - 10L_{100} &= -1,83 \text{ .} \end{aligned}$$

Подставив в уравнения значение L_{100} , равное $100 \text{ мм} \pm 0,59 \text{ м}$, находим для первого метра и его дециметровых интервалов следующие величины:

(0—1) = 100 мм	+	0,71 м	}	(А)
(0—2) = 200	.	0,27		
(0—3) = 300	.	0,89		
(0—4) = 400	.	0,27		
(0—5) = 500	.	0,66		
(0—6) = 600	.	1,16		
(0—7) = 700	.	1,93		
(0—8) = 800	.	3,01		
(0—9) = 900	.	3,49		
(0—10) = 1000	.	4,02		

Отсюда видно, что в интервалах (0—2) и (0—4) дм погрешность не превышает $0,3 \text{ м}$; в остальных интервалах, начиная от (0—1) дм, погрешности возрастают от $0,7$ до 4 м .

§ 6. Исследование шкалы через каждый метр

Исследование шкалы через каждый метр на протяжении 6 м производилось при помощи плоскопараллельных концевых мер (плиток) номинального размера 1, 2 и 3 м; при этом, для составления размеров из двух концевых мер, последние соединялись между собою специальным зажимным приспособлением, устройством которого исключается возможность появления в месте соединения мер изгиба или перекоса. Приспособление состоит из двух пластинок (щек) с отверстиями по краям и зажимными винтами с одной стороны каждой пластинки (рис. 18).

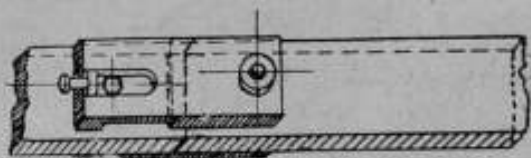


Рис. 18. Схема соединения двух больших концевых мер (плиток) методом Хоммель-Верке.

Концевые меры имеют на концах отверстия таких же диаметров, как и пластинки. При соединении мер между собою они прикладываются друг к другу измерительными поверхностями и стягиваются винтами пластинок, входящими в луночки стержней бочкообразной формы, вкладываемых в отверстия пластинок, которые прикладываются в месте соединения мер (рис. 18).

При соединении мер между собою они прикладываются друг к другу измерительными поверхностями и стягиваются винтами пластинок, входящими в луночки стержней бочкообразной формы, вкладываемых в отверстия пластинок, которые прикладываются в месте соединения мер (рис. 18).

Температура машины на уровне шкал и температура концевой меры, установленной на машине, определялись отдельно. С этой целью на машине и на концевой мере, у концов последней, помещалась по термометру, разделенному на $1/10^{\circ}$, причем отсчеты на них производились с точностью $\pm 0,01$. Для выравнивания температур концевой меры и машины, мера помещалась на ней накануне исследования.

При исследовании концевая мера устанавливалась на машине на двух опорах в точках Эри, т. е. в точках, симметрично расположенных относительно середины меры, при которых концы меры остаются горизон-

тальными и, следовательно, ее измерительные поверхности параллельны между собою. Точки Эри отстоят от концов меры на расстоянии $0,2113 L$, где L — длина меры в миллиметрах. Эти точки на исследуемой мере отмечаются штрихами.

Для определения отклонения концевой меры номинального размера L_n м от соответствующего интервала шкалы машины, поступали так: отсчитав показания термометров на машине, определяли нулевое положение указанным выше способом, делая по крайней мере три наводки двойного штриха „0” на штрих „0” стомиллиметровой стеклянной шкалы и отвечающие им отсчеты по оитметру. Затем, отодвинув при помощи маховичка левую бабку за штрих n и вспомогательной шкалы станины,

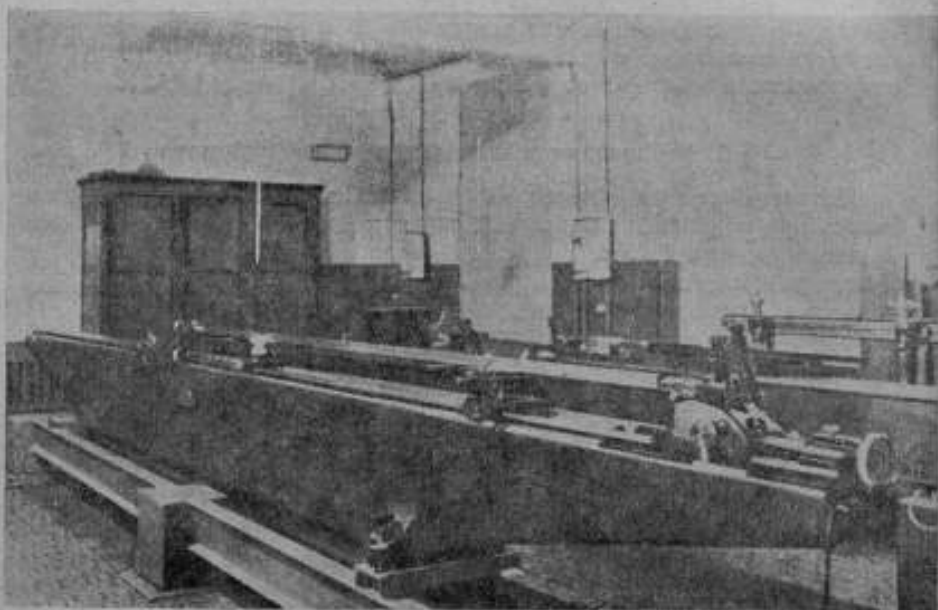


Рис. 19. Машина после установки.

между измерительными наконечниками бабок помещали на столике (на плитке около 10 мм) и V-образной подставке узкой гранью концевую меру с укрепленными на ней двумя термометрами и приводили в соприкосновение с наконечником правой бабки (рис. 19).

Столик и подставку устанавливали так, чтобы нанесенные на меру штрихи, соответственно расположились против середины подставки и плитки на столике, после чего подставки закрепляли на станине при помощи винтов Γ (см. рис. 7). Передвижением левой бабки ее наконечник приводили в соприкосновение с мерой, при этом следили в микроскоп, чтобы изображение двойного штриха с цифрой „n” было в середине поля зрения микроскопа, чего достигали более точной установкой указателя H (см. рис. 6) бабки на штрих „n” вспомогательной шкалы станины.

Микрометрическим перемещением правой бабки при помощи винта *K* (см. рис. 6) изображение двойного штриха *n* устанавливали на нулевой штрих стеклянной шкалы. Перемещением столика в вертикальном направлении маховичком *B* (рис. 12) и в поперечном направлении — винтом *A* (рис. 12) находили минимальное показание оптиметра. Наблюдали за изменением показаний оптиметра и, если в течение 20—30 мин. не происходило заметных изменений¹, производили 6 отсчетов по оптиметру, устанавливая каждый раз двойной штрих „*n*“ на нулевой штрих стеклянной шкалы.

После этого (непосредственно), отсчитав термометры на мере, снимали с машины меру и подставки и снова определяли нулевое положение (без установки оптиметра на нуль), делая 3 наводки изображения двойного штриха „0“ на штрих „0“ стеклянной шкалы и 3 отсчета по оптиметру. Снова отсчитывали показания термометров машины.

Разность между средними арифметическими из показаний оптиметра, отвечающих концевой мере и нулевому положению, определяла отклонение концевой меры от соответствующего метрового интервала шкалы машины при температуре наблюдения.

Средние арифметические из исправленных показаний термометров отдельно на мере и машине принимались за их температуры.

Так были определены отклонения от соответствующих интервалов шкалы следующих 10 концевых мер: 1 м; 1° м; (1 + 1°) м; 2 м; (1 + 2) м; 3 м; 3° м; (3 + 1) м; (3° + 2) м и (3 + 3°) м. Каждая из них сравнивалась с интервалом шкалы 6 раз. При этом меры, составленные из двух мер, измерялись с поворотом их около оси на 180° с целью установить влияние их соединения на общую длину меры. Заметных удлинений в длине составной меры, в зависимости от ее положения, обнаружить не удалось.

Найденные величины отклонений каждой концевой меры приводили к температуре 20°С по формуле:

$$b_{20} = b + L_n \alpha (t_1 - t) 10^{-6},$$

где *b* — найденное отклонение; *L_n* — номинальный размер концевой меры; $\alpha = 10,8 \cdot 10^{-6}$ — средний коэффициент расширения меры и шкалы; *t₁* — температура шкалы (машины); *t* — температура меры.

Для меры и шкалы приняли коэффициент расширения, который был определен в Лаборатории штриховых мер ВНИИМа для метровой концевой меры из набора мер Лаборатории концевых мер, которыми пользовались при исследовании машины; он оказался очень близким коэффициенту расширения стеклянных шкал, изготовленных К. Цейссом (по Берниту он равен: $10,9 \cdot 10^{-6}$). За отклонение концевой меры от соответствующего интервала шкалы принималось среднее арифметическое из результатов шести отдельных наблюдений, приведенных к температуре 20°С.

Результаты наблюдений до и после приведения к 20°С и средние арифметические из них помещены в следующих 10 таблицах:

¹ Для мер свыше 3 м ожидать теплового равновесия приходилось иногда около 4—5 час.

Таблица 1

1. Концевая мера „1“ метр

Температура		Отклонения, в μ	
шкалы t_1 °	меры l °	при темпер. наблюд.	при 20° С
19,58	19,80	+ 0,92	- 1,46
19,67	19,88	+ 1,04	- 1,23
19,82	19,92	- 0,15	- 1,23
19,74	19,91	+ 0,68	- 1,16
19,73	19,90	+ 0,33	- 1,51
19,72	19,88	+ 0,78	- 0,95

Средняя арифметическая — 1,26

Средняя квадрат. погрешность $\pm 0,08$

Таблица 2

1° метр

Температура		Отклонения, в μ	
шкалы t_1 °	меры l °	при темпер. наблюд.	при 20° С
19,86	20,04	- 1,72	- 3,66
19,92	20,07	- 1,83	- 3,45
19,76	20,01	- 1,15	- 3,85
19,07	20,00	- 0,53	- 4,11
19,64	19,99	+ 0,01	- 3,74
19,75	20,10	- 0,42	- 4,20

Средняя арифметическая — 3,83

Средняя квадрат. погрешность $\pm 0,12$

Таблица 3

„0 + 1“ метр

Температура		Отклонения, в μ	
шкалы t_1 °	меры l °	при темпер. наблюд.	при 20° С
20,04	20,24	- 4,20	- 8,52
19,97	20,14	- 4,38	- 8,05
19,85	20,04	- 4,28	- 8,38
19,51	19,86	- 0,35	- 8,11
19,68	20,03	- 1,24	- 8,80
19,79	20,01	- 3,78	- 8,53

Средняя арифметическая — 8,40

Средняя квадрат. погрешность $\pm 0,12$

Таблица 4

„2“ метр

Температура		Отклонения, в μ	
шкалы t_1 °	меры l °	при темпер. наблюд.	при 20° С
19,43	19,94	+ 5,16	- 5,86
19,32	20,02	+ 5,63	- 5,77
19,19	19,73	- 7,26	- 4,40
19,64	20,18	+ 5,91	- 5,75
19,61	19,97	+ 3,23	- 4,55
19,67	20,08	+ 3,60	- 5,26

Средняя арифметическая — 5,26

Средняя квадрат. погрешность $\pm 0,26$

Таблица 7

3° метра

Температура		Отклонения, в μ	
шкалы t_1^*	меры t^*	при темп. наблюд.	при 20° С
19,52	19,90	+ 18,10	+ 5,79
19,34	19,81	+ 21,23	+ 6,00
19,41	19,88	+ 20,34	+ 5,11
19,42	19,90	+ 21,98	+ 6,43
19,52	19,96	+ 20,35	+ 6,09
19,51	19,88	+ 17,85	+ 5,86

Средняя арифметическая $\pm 5,88$ Средняя квадр. погрешность $\pm 0,18$

Таблица 8

„(1+3)° метра

Температура		Отклонения, в μ	
шкалы t_1^*	меры t^*	при темп. наблюд.	при 20° С
19,51	19,99	+ 15,75	+ 3,69
19,55	19,97	+ 14,18	+ 3,96
20,05	20,32	+ 6,95	+ 4,71
20,22	20,51	+ 8,40	+ 4,13
20,47	20,74	+ 8,17	+ 3,49
21,14	21,43	+ 7,85	+ 4,68

Средняя арифметическая $\pm 4,11$ Средняя квадр. погрешность $\pm 0,21$

Таблица 5

„(1+2)° метра

Температура		Отклонения, в μ	
шкалы t_1^*	меры t^*	при темп. наблюд.	при 20° С
19,89	20,15	+ 3,75	+ 4,67
19,56	19,86	+ 4,15	+ 5,57
19,61	19,95	+ 4,69	+ 6,33
19,79	20,11	+ 4,03	+ 6,34
19,65	19,92	+ 3,00	+ 5,75
19,90	20,00	+ 2,14	+ 5,38

Средняя арифметическая $\pm 5,67$ Средняя квадр. погрешность $\pm 0,26$

Таблица 6

„3° метра

Температура		Отклонения, в μ	
шкалы t_1^*	меры t^*	при темп. наблюд.	при 20° С
19,81	20,02	+ 13,27	+ 6,47
19,61	19,92	+ 15,09	+ 5,05
19,46	19,89	+ 18,96	+ 5,03
19,54	19,88	+ 17,76	+ 6,75
19,56	19,92	+ 16,97	+ 5,31
19,72	19,98	+ 14,65	+ 6,23

Средняя арифметическая $\pm 5,81$ Средняя квадр. погрешность $\pm 0,31$

„(2+3)^а“ метров

Таблица 9

Температура		Отклонения, в μ	
шкалы t_1°	меры t°	при темп. наблюд.	при 20° С
19,58	19,94	+ 15,55	- 3,89
19,68	20,01	+ 14,37	- 3,45
19,79	19,89	- 1,49	- 3,91
19,42	19,54	- 2,80	- 3,68
19,53	19,67	+ 3,50	- 4,06
19,30	19,37	+ 0,77	- 3,01

Средняя арифметическая — 3,67
Средняя квад. погрешность $\pm 0,16$

„(3+3^а)“ метров

Таблица 10

Температура		Отклонения, в μ	
шкалы t_1°	меры t°	при темп. наблюд.	при 20° С
19,71	19,87	+ 5,82	- 4,55
19,54	19,87	+ 15,82	- 5,56
19,36	19,68	- 15,84	- 4,90
19,54	19,83	- 13,73	- 5,06
19,96	20,11	+ 4,19	- 5,58
20,04	20,26	+ 7,82	- 6,44

Средняя арифметическая — 5,35
Средняя квад. погрешность $\pm 0,27$

Пользуясь данными (средними арифметическими) таблиц и обозначив через (0—10), (0—20), (0—30), (0—40), (0—50) и (0—60) дм интервалы шкалы через каждый метр (10 дм), получим следующую систему уравнений, выражающих отклонения концевых мер от соответствующих интервалов шкалы:

$$\left. \begin{aligned} \cdot 1^{\circ} \text{ м} - (0-10) \text{ дм} &= -1,26 \mu \\ \cdot 1^{\circ\text{а}} \text{ м} - (0-10) \text{ м} &= -3,84 \mu \\ \cdot (1+1^{\circ})^{\circ} \text{ м} - (0-20) \text{ м} &= -8,40 \mu \\ \cdot 2^{\circ} \text{ м} - (0-20) \text{ м} &= -5,26 \mu \\ \cdot (1+2^{\circ})^{\circ} \text{ м} - (0-30) \text{ м} &= -5,67 \mu \\ \cdot 3^{\circ} \text{ м} - (0-30) \text{ м} &= +5,81 \mu \\ \cdot 3^{\circ\text{а}} \text{ м} - (0-30) \text{ м} &= +5,88 \mu \\ \cdot (1+3^{\circ})^{\circ} \text{ м} - (0-40) \text{ м} &= -4,11 \mu \\ \cdot (2+3^{\circ})^{\circ} \text{ м} - (0-50) \text{ м} &= -3,67 \mu \\ \cdot (3+3^{\circ})^{\circ} \text{ м} - (0-60) \text{ м} &= -5,35 \mu \end{aligned} \right\} (A.)$$

Исключая из 1, 2 и 3 уравнений $\cdot 1^{\circ}$ м, $\cdot 1^{\circ\text{а}}$ м и $\cdot (1+1^{\circ})^{\circ}$ м, из 1, 4 и 5 — $\cdot 1^{\circ}$ м, $\cdot 2^{\circ}$ м и $\cdot (1+2^{\circ})^{\circ}$ м, из 1, 6 и 8 — $\cdot 1^{\circ}$ м, $\cdot 3^{\circ}$ м

и $\cdot(1+3)^*$ м, из 4, 7 и 9 — $\cdot 2^*$ м, $\cdot 3^{**}$ м и $\cdot(2+3^*)^*$ м и из 6, 7, и 10 — $\cdot 3^*$ м, $\cdot 3^{**}$ м и $\cdot(3+3^*)^*$ м, находим интервалы шкалы:

$$\begin{aligned} (0-20) \text{ дм} &= 2(0-10) \text{ дм} + 3,30 \text{ р.} \\ (0-30) \text{ " } &= (0-10) \text{ " } + (0-20) \text{ дм} - 0,85 \text{ р.} \\ (0-40) \text{ " } &= (0-10) \text{ " } + (0-30) \text{ " } + 8,66 \text{ " } \\ (0-50) \text{ " } &= (0-20) \text{ " } + (0-30) \text{ " } + 4,29 \text{ " } \\ (0-60) \text{ " } &= 2(0-30) \text{ " } + 17,04 \text{ р.} \end{aligned}$$

Заменяя в правых частях интервалы (0—20) и (0—30) дм их выражениями через (0—10) дм, находим:

$$\begin{aligned} (0-20) \text{ дм} &= 2(0-10) \text{ дм} + 3,30 \text{ р.} \\ (0-30) \text{ " } &= 3(0-10) \text{ " } + 2,45 \text{ " } \\ (0-40) \text{ " } &= 4(0-10) \text{ " } + 11,11 \text{ " } \\ (0-50) \text{ " } &= 5(0-10) \text{ " } + 10,04 \text{ " } \\ (0-60) \text{ " } &= 6(0-10) \text{ " } + 21,94 \text{ " } \end{aligned}$$

Подставляя вместо (0—10) дм его значение (0—10) дм = 1 м + 4,02 р., получаем величины интервалов шкалы:

$$\left. \begin{aligned} (0-20) \text{ дм} &= 2 \text{ м} + 11,34 \text{ р.} \\ (0-30) \text{ " } &= 3 \text{ " } + 14,51 \text{ " } \\ (0-40) \text{ " } &= 4 \text{ " } + 27,19 \text{ " } \\ (0-50) \text{ " } &= 5 \text{ " } + 30,14 \text{ " } \\ (0-60) \text{ " } &= 6 \text{ " } + 46,06 \text{ " } \end{aligned} \right\} (Б)$$

Из 1, 2, 4, 6 и 7 уравнений (А), принимая во внимание величины (Б), определим длины концевых мер $\cdot 1^*$ м, $\cdot 1^{**}$ м, $\cdot 2^*$ м, $\cdot 3^*$ м и $\cdot 3^{**}$ м

$$\begin{aligned} \cdot 1^* \text{ м} &= 1 \text{ м} + 2,76 \text{ р.} \\ \cdot 1^{**} \text{ " } &= 1 \text{ " } + 0,18 \text{ " } \\ \cdot 2^* \text{ " } &= 2 \text{ " } + 6,08 \text{ " } \\ \cdot 3^* \text{ " } &= 3 \text{ " } + 20,32 \text{ " } \\ \cdot 3^{**} \text{ " } &= 3 \text{ " } + 20,39 \text{ " } \end{aligned}$$

Из равенств (Б) видно, что с увеличением интервалов шкалы их отклонения от номинального значения возрастают и в интервале (0—60) дм достигают 46 р.

Из изложенного выше следует, что в принятом нами методе первый метр (0—10) дм 6-метровой шкалы машины определяется, как сумма первых десяти дециметров. Действительные значения последних получаются путем сравнения с общей длиной стомиллиметровой стеклянной шкалы, которая определяется (см. ниже) при помощи стомиллиметровой концевой меры (плитки), поверенной абсолютным интерференционным методом. Значения концевых мер $\cdot 1^*$ м, $\cdot 1^{**}$ м, $\cdot 2^*$ м, $\cdot 3^*$ м и $\cdot 3^{**}$ м, при помощи которых производится исследование шкалы, и интервалы шкалы (0—20), (0—30) ... (0—60) дм через каждый метр (10 дм) определяются по отклонениям концевых мер от соответствующих интервалов шкалы и по действительной длине первого метра шкалы. Таким образом, в этом методе дециметры и метровые интервалы шкалы и значения концевых мер определяются по длине стомиллиметровой плоскопараллельной концевой меры (плитки), поверенной с наивысшей метрологической точностью. При этом, с целью повышения точности определения первого метра 6-метровой шкалы, общая длина стомиллиметровой стеклянной шкалы выведена из 12 сравнений с концевой мерой (см. ниже).

§ 7. Исследование стомиллиметровой стеклянной шкалы.

Исследование стомиллиметровой стеклянной шкалы производилось: 1) на всем протяжении шкалы — через 10 мм, 2) первого сантиметра — через 1 мм и 3) первого миллиметра — через 0,1 мм и состояло в сравнении с плоскопараллельными концевыми мерами, поверенными абсолютным интерференционным методом.

Обозначим интервалы шкалы через 10 мм, — (0—10) мм, (0—20) мм ... (0—100) мм; через 1 мм, — (0—1) мм, (0—2) мм ... (0—9) мм, через 0,1 мм — (0—0,1) мм, (0—0,2) мм ... (0—0,9) мм.

Для определения интервала (0— n) мм шкалы, находили отклонение δ_n длины L_n плоскопараллельной концевой меры от длины интервала, т. е.

$$A_n - (0 - n) \text{ мм} = \delta_n,$$

откуда

$$(0 - n) \text{ мм} = A_n - \delta_n. \quad (\text{а})$$

Метод определения отклонения δ_n заключается в следующем.

Отсчитывают показание термометра, помещенного на машине. Определяют нулевое положение, для чего, при исследовании шкалы через 10 мм и 1 мм поступают, как выше указано, и делают три установки двойного штриха „0“ на штрих „ n “ стеклянной шкалы и соответствующие отсчеты по оптиметру. Затем устанавливают правую бабку на штрих „ n “ вспомогательной шкалы станины и концевую меру свыше 10 мм (10, 20 ... 100 мм) помещают между бабками на столике P (см. рис. 6) и закрепляют специальным зажимом. После приведения ее в соприкосновение с наконечниками бабок, двойной штрих „0“ передвижением правой бабки B (см. рис. 6) при помощи винта K устанавливают в поле зрения микроскопа на штрих „ n “ стеклянной шкалы. Перемещением столика маховичком B (см. рис. 12) в вертикальном направлении и вращением его за рукоятку G находят наименьшее показание оптиметра. Концевые меры, меньшие 10 мм (1, 2 ... 9 мм), после установки двойного штриха „0“ на штрих „ n “ стеклянной шкалы, помещают непосредственно между наконечниками бабок, предварительно отведя рычажек L (см. рис. 8) оптиметра и, после установки меры, отпустив его.

Делают 6 установок двойного штриха „0“ на штрих „ n “ шкалы и отсчеты по оптиметру. Отсчитывают показание термометра на мере. Снова определяют нулевое положение (без установки оптиметра на нуль), делая три установки двойного штриха „0“ на штрих „ n “ стеклянной шкалы и отсчеты по оптиметру. Отсчитывают показание термометра на машине.

Среднее арифметическое из 6 отсчетов по оптиметру, отвечающих концевой мере, исправленное на нулевое положение (выведенное из определений в начале и в конце наблюдения), дает отклонение δ_n .

При исследовании первого миллиметра шкалы через 0,1 мм, для определения нулевого положения, правую бабку устанавливают на конечный штрих (обозначим его через „1“) дополнительного миллиметра шкалы, расположенного слева относительно нулевого штриха. Затем

определяют отклонение δ_n' концевой меры A_n от интервала $[(-1) - n]$, т. е.

$$A_n - [(-1) - n] = \delta_n'$$

Отсюда интервал

$$[(-1) - n] = A_n - \delta_n' \quad (6)$$

где $n = 0; 0,1; 0,2; \dots; 0,9$ и соответствующая концевая мера —

$$A_n = {}_n 1^* \text{ мм}; {}_n 1,1^* \text{ мм}; {}_n 1,2^* \text{ мм} \dots {}_n 1,9^* \text{ мм}.$$

Вычитая из (6) значение интервала $[(-1) - 0]$:

$$[(-1) - 0] = A_0 - \delta_0'$$

находим величину интервала $(0 - n)$ первого миллиметра:

$$(0 - n) = A_n - A_0 - (\delta_n' - \delta_0') \quad (в)$$

Для определения интервала $(0 - 100)$ мм стеклянной шкалы производилось 12 наблюдений, для каждого из остальных — по 5 наблюдений, причем одно наблюдение состояло из 12 установок двойного штриха „О“ на штрихи (по 6 — на „О“ и n) стеклянной шкалы и 12 отсчетов по оптиметру.

Так как наблюдения обыкновенно происходили при температурах, отличающихся от 20°C , то полученные величины отклонений δ_n приводились к 20°C по формуле:

$$\delta_n + A_n [\alpha' (t' - 20) - \alpha (t - 20)] \cdot 10^{-6},$$

где A_n — номинальный размер концевой меры, α' — коэффициент расширения шкалы, t' — температура шкалы (машины), α — коэффициент расширения концевой меры, t — ее температура.

При исследовании стеклянной шкалы применялись плоскопараллельные концевые меры (плитки) фирмы Иоганссон и К. Цейсс. На основании исследования в Лаборатории концевых мер ВНИИМа, для концевых мер фирмы Иоганссон принят коэффициент расширения $\alpha = 12,2 \cdot 10^{-6}$, фирмы К. Цейсс — $\alpha = 12,0 \cdot 10^{-6}$. Коэффициент расширения для плоскопараллельных концевых мер фирмы Иоганссон согласуется с коэффициентом расширения при 20°C , определяемым по формуле:

$$\alpha_s = (12,0543 + 0,007416t) \cdot 10^{-6},$$

установленной в Международном бюро мер и весов в Севре, на основании исследования плоскопараллельных концевых мер Иоганссона интерференционным методом Физо [7].

Для стеклянной шкалы, как указано выше, коэффициент расширения принят равным $\alpha' = 10,8 \cdot 10^{-6}$.

В приводимых ниже таблицах помещены отклонения δ_n концевых мер A_n от соответствующих интервалов шкалы через 10 мм в отдельных наблюдениях и средние арифметические из них.

Таблица 11

Интервал (0—10) мм
Концевая мера $A_{10} = 10 \text{ мм} - 0,17 \mu$

Температура		Отклонения δ_{10} , в μ	
шкалы t_1°	меры μ	при темп. наблюд.	при 20°C
19,84	19,94	- 0,02	- 0,03
19,94	20,04	- 0,04	- 0,05
19,94	20,04	+ 0,01	0,00
20,29	20,39	+ 0,03	+ 0,01
20,37	20,46	- 0,06	- 0,08
Ср. арифм. 20,68	20,17	- 0,02	- 0,03
Средний квадрат погрешности $\pm 0,02$			

Таблица 12

Интервал (0—20) мм
Концевая мера $A_{20} = 20 \text{ мм} + 0,70 \mu$

Температура		Отклонения δ_{20} , в μ	
шкалы t_1°	меры μ	при темп. наблюд.	при 20°C
20,14	20,24	+ 0,61	+ 0,58
20,17	20,27	+ 0,63	+ 0,60
20,15	20,23	+ 0,50	+ 0,48
20,13	20,25	+ 0,62	+ 0,59
20,18	20,26	+ 0,50	+ 0,48
Ср. арифм. 20,15	20,25	+ 0,57	+ 0,55
Средний квадрат погрешности $\pm 0,03$			

Таблица 13

Интервал (0—30) мм
Концевая мера $A_{30} = 30 \text{ мм} - 0,28 \mu$

Температура		Отклонения δ_{30} , в μ	
шкалы t_1°	меры μ	при темп. наблюд.	при 20°C
17,87	18,06	- 0,40	- 0,39
17,95	18,10	- 0,52	- 0,52
18,75	18,84	- 0,54	- 0,53
18,89	19,00	- 0,54	- 0,54
18,89	19,02	- 0,37	- 0,38
Ср. арифм. 18,47	18,60	- 0,47	- 0,47
Средний квадрат погрешности $\pm 0,035$			

Таблица 14

Интервал (0—40) мм
Концевая мера $A_{40} = 40 \text{ мм} - 0,08 \mu$

Температура		Отклонения δ_{40} , в μ	
шкалы t_1°	меры μ	при темп. наблюд.	при 20°C
19,46	19,56	- 0,30	- 0,32
19,43	19,57	- 0,22	- 0,25
19,51	19,51	- 0,23	- 0,26
19,51	19,62	- 0,19	- 0,22
19,45	19,57	- 0,19	- 0,22
Ср. арифм. 19,46	19,57	- 0,23	- 0,25
Средний квадрат погрешности $\pm 0,02$			

Таблица 15

Интервал (0—50) мм
Концевая мера $A_{50} = 50 \text{ мм} \pm 1,0 \mu$

Температура		Отклонения δ_{50} , в μ	
шкалы t_1°	меры l°	при темп. наблюд.	при 20° С
19,54	19,64	+ 0,47	+ 0,44
19,53	19,64	+ 0,52	+ 0,50
19,56	19,68	+ 0,46	+ 0,42
19,67	19,78	+ 0,56	+ 0,52
19,66	19,80	+ 0,58	+ 0,52
Ср. арифм. 19,60	19,71	+ 0,52	+ 0,48
Средняя квадрат. погрешность $\pm 0,02$			

Таблица 16

Интервал (0—60) мм
Концевая мера $A_{60} = 60 \text{ мм} \pm 0,05 \mu$

Температура		Отклонения δ_{60} , в μ	
шкалы t_1°	меры l°	при темп. наблюд.	при 20° С
20,51	20,60	- 0,71	- 0,81
20,50	20,60	- 0,57	- 0,68
20,51	20,63	- 0,42	- 0,54
20,48	20,58	- 0,54	- 0,65
20,53	20,64	- 0,53	- 0,65
Ср. арифм. 20,51	20,61	- 0,55	- 0,67
Средняя квадрат. погрешность $\pm 0,04$			

Таблица 17

Интервал (0—70) мм
Концевая мера $A_{70} = 70 \text{ мм} \pm 0,40 \mu$

Температура		Отклонения δ_{70} , в μ	
шкалы t_1°	меры l°	при темп. наблюд.	при 20° С
19,36	19,58	- 0,88	- 1,02
19,35	19,53	- 0,87	- 0,97
19,35	19,54	- 0,92	- 1,02
19,22	19,40	- 0,88	- 0,97
19,26	19,46	- 0,92	- 1,02
Ср. арифм. 19,31	19,50	- 0,89	- 1,00
Средняя квадрат. погрешность $\pm 0,01$			

Таблица 18

Интервал (0—80) мм
Концевая мера $A_{80} = 80 \text{ мм} \pm 0,09 \mu$

Температура		Отклонения δ_{80} , в μ	
шкалы t_1°	меры l°	при темп. наблюд.	при 20° С
18,98	19,26	- 0,60	- 0,77
19,01	19,33	- 0,56	- 0,77
19,06	19,35	- 0,54	- 0,73
19,08	19,36	- 0,53	- 0,73
19,09	19,36	- 0,54	- 0,71
Ср. арифм. 19,01	19,33	- 0,56	- 0,74
Средняя квадрат. погрешность $\pm 0,01$			

Таблица 19

Интервал (0—90) мм
Концевая мера $A_{90} = 90 \text{ мм} - 0,50 \mu$

Температура		Отклонения δ_{90} , в μ	
шкалы t_1 , °	меры t'	при темп. наблюд.	при 20° С
19,48	19,70	- 0,97	- 1,15
19,16	19,45	- 0,88	- 1,10
19,19	19,51	- 0,93	- 1,19
19,18	19,46	- 0,90	- 1,11
19,19	19,47	- 0,90	- 1,11
Ср. арифм. 19,24	19,52	- 0,92	- 1,13

Средняя квадр. погрешность $\pm 0,02$

Таблица 20

Интервал (0—100) мм = L_{100}
Концевая мера $A_{100} = 100 \text{ мм} + 2,35 \mu$

Температура		Отклонения δ_{100} , в μ	
шкалы t_2 , °	меры t'	при темп. наблюд.	при 20° С
19,01	19,26	+ 1,87	+ 1,70
19,08	19,33	1,89	1,71
19,09	19,35	1,97	1,78
19,21	19,39	1,84	1,73
18,96	19,24	1,98	1,80
19,09	19,38	2,06	1,83
19,10	19,38	1,94	1,72
19,10	19,40	2,02	1,78
19,11	19,40	1,98	1,76
19,01	19,29	1,95	1,75
19,06	19,37	1,98	1,73
19,08	19,40	2,11	1,85
Ср. арифм. 19,08	19,35	+ 1,97	+ 1,76

Средняя квадр. погрешность $\pm 0,01$

Подставляя в уравнении (а) данные таблиц, находим для интервалов шкалы через каждые 10 мм следующие значения при 20° С:

(0—10) мм = 10 мм	- 0,14 μ
(0—20) " = 20 "	+ 0,15 "
(0—30) " = 30 "	- 0,19 "
(0—40) " = 40 "	- 0,17 "
(0—50) " = 50 "	- 0,52 "
(0—60) " = 60 "	- 0,62 "
(0—70) " = 70 "	- 0,00 "
(0—80) " = 80 "	+ 0,83 "
(0—90) " = 90 "	+ 0,63 "
(0—100) " = 100 "	+ 0,59 "

(В)

Из таблицы видно, что погрешности шкалы распределяются так: в интервалах до (0—40) мм они колеблются от 0,1 до 0,2 м; в интервалах от (0—50) до (0—70) мм увеличиваются от 0,5 до 0,6 м. Затем, достигнув в интервалах (0—80) мм наибольшей величины 0,8 м, в интервалах (0—90) мм и (0—100) мм уменьшаются до 0,6 м.

Исследование первого сантиметра через 1 мм производилось при помощи плоскопараллельных концевых мер в 1 мм, 2 мм . . . 9 мм. Отклонение δ_n концевой меры A_n от интервала (0— n) шкалы определялось, как среднее арифметическое из результатов 5 отдельных наблюдений, приведенное к 20° С по формуле:

$$\delta_{20^\circ} = \delta_n + A_n(\alpha_1 - \alpha)(t - 20^\circ) \cdot 10^{-6},$$

где A_n — номинальный размер концевой меры, α_1 — коэффициент расширения шкалы, α — коэффициент расширения меры, t — температура машины.

Результаты наблюдений приводятся в следующих девяти таблицах.

Таблица 21

Интервал (0—1) мм
Концевая мера $A_1 = 1$ мм — 0,44 м

Температура наблюдения t°	Отклонения δ_1 , в м
20,36	— 0,49
20,37	— 0,39
20,40	— 0,39
19,88	— 0,40
19,35	— 0,45

Ср. арифм. 20,07 — 0,42
При 20° С — 0,42
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,02$

Таблица 22

Интервал (0—2) мм
Концевая мера $A_2 = 2$ мм — 0,40 м

Температура наблюдения t°	Отклонения δ_2 , в м
20,40	— 0,47
20,41	— 0,45
20,42	— 0,47
19,77	— 0,48
19,87	— 0,37

Ср. арифм. 20,17 — 0,45
При 20° С — 0,45
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,02$

Таблица 23

Интервал (0—3) мм
Концевая мера $A_3 = 3$ мм — 0,66 м

Температура наблюдения t°	Отклонения δ_3 , в м
20,43	— 0,84
20,45	— 0,76
20,43	— 0,78
19,87	— 0,65
19,91	— 0,68

Ср. арифм. 20,22 — 0,74
При 20° С — 0,74
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,03$

Таблица 24

Интервал (0—4) мм
Концевая мера $A_4 = 4$ мм — 0,22 м

Температура наблюдения t°	Отклонения δ_4 , в м
20,46	— 0,45
20,47	— 0,46
20,50	— 0,42
20,45	— 0,44
20,47	— 0,45

Ср. арифм. 20,47 — 0,44
При 20° С — 0,44
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,01$

Таблица 25
Интервал (0—5) мм
Концевая мера $A_5 = 5$ мм — 0,05 μ

Температура наблюдения t°	Отклонения δ_5 , в μ
20,35	— 0,60
20,37	— 0,51
20,40	— 0,54
19,91	— 0,62
19,91	— 0,68

Ср. арифм. 20,19 — 0,61
При 20° С — 0,61
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,02$

Таблица 27
Интервал (0—7) мм
Концевая мера $A_7 = 7$ мм — 0,24 μ

Температура наблюдения t°	Отклонения δ_7 , в μ
19,89	— 0,48
19,93	— 0,39
19,95	— 0,50
19,85	— 0,53
19,85	— 0,53

Ср. арифм. 19,89 — 0,49
При 20° С — 0,49
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,03$

Таблица 26
Интервал (0—6) мм
Концевая мера $A_6 = 6$ мм — 0,06 μ

Температура наблюдения t°	Отклонения δ_6 , в μ
19,56	— 0,10
19,57	— 0,02
19,57	— 0,08
19,57	— 0,04
19,76	— 0,10

Ср. арифм. 19,61 — 0,07
При 20° С — 0,07
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,02$

Таблица 28
Интервал (0—8) мм
Концевая мера $A_8 = 8$ мм — 0,11 μ

Температура наблюдения t°	Отклонения δ_8 , в μ
18,40	— 0,04
18,55	— 0,09
18,67	— 0,04
18,73	0,00
18,91	— 0,13

Ср. арифм. 18,65 — 0,06
При 20° С — 0,05
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,02$

Таблица 29
Интервал (0—9) мм
Концевая мера $A_9 = 9$ мм — 0,19 μ

Температура наблюдения t°	Отклонения δ_9 , в μ
18,85	— 0,11
18,88	— 0,08
18,91	+ 0,05
18,95	— 0,04
18,97	— 0,02

Ср. арифм. 18,91 — 0,04
При 20° С — 0,03
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,03$

Заменяя $(0-n)$, A_n и δ_n в уравнении (а) указанными в таблицах величинами, для интервалов через 1 мм первого сантиметра шкалы, получим следующие значения:

$$\left. \begin{array}{l} (0-1) \text{ мм} = 1 \text{ мм} - 0,02 \text{ м} \\ (0-2) \text{ " } = 2 \text{ " } + 0,05 \text{ " } \\ (0-3) \text{ " } = 3 \text{ " } + 0,08 \text{ " } \\ (0-4) \text{ " } = 4 \text{ " } + 0,22 \text{ " } \\ (0-5) \text{ " } = 5 \text{ " } + 0,56 \text{ " } \\ (0-6) \text{ " } = 6 \text{ " } + 0,01 \text{ " } \\ (0-7) \text{ " } = 7 \text{ " } + 0,25 \text{ " } \\ (0-8) \text{ " } = 8 \text{ " } - 0,06 \text{ " } \\ (0-9) \text{ " } = 9 \text{ " } - 0,16 \text{ " } \end{array} \right\} (\Gamma)$$

Погрешности в интервалах первого сантиметра через 1 мм наибольшей величины достигают в интервале $(0-5)$ мм, а именно почти 0,6 м, затем в интервалах $(0-4)$ мм, $(0-7)$ мм и $(0-9)$ мм — в пределах 0,2 м, в остальных интервалах — от 0 до 0,1 м.

Исследование первого миллиметра стеклянной шкалы заключалось в сравнении интервалов, последовательно отличающихся друг от друга на 0,1 мм, с плоскопараллельными концевыми мерами в 1 мм, 1,1 мм, 1,2 мм, ... 1,9 мм. Отклонение δ_n определяли по отклонениям: δ_n' — концевой меры A_n от интервала $[(-1)-n]$ и δ_n'' — концевой меры в 1 мм от интервала $[(-1)-0]$ при $n=0; 0,1; 0,2; \dots 0,9$. За δ_n' и δ_n'' принимали средние арифметические из 5 наблюдений. Интервал $(0-n)$ определяли из уравнения (в) — см. стр. 31.

Результаты отдельных наблюдений и средние арифметические из них помещены в следующих 10 таблицах:

Таблица 30

Интервал $[(-1)-0]$ мм
Концевая мера $A_n = 1 \text{ мм} - 0,41 \text{ м}$

Температура наблюдения $t^\circ \text{C}$	Отклонение δ_n' , в м
19,38	-0,62
19,43	-0,55
19,45	-0,59
19,46	-0,48
19,48	-0,61
Ср. арифм. 19,44	-0,57
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,02$	

Таблица 31

Интервал $[(-1)-0,1]$ мм
Концевая мера $A_{n,1} = 1,1 \text{ мм} - 0,35 \text{ м}$

Температура наблюдения $t^\circ \text{C}$	Отклонение $\delta_{n,1}'$, в м
19,48	-0,62
19,50	-0,62
18,78	-0,55
18,85	-0,55
18,87	-0,50
Ср. арифм. 19,10	-0,57
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,02$	

¹ Под температурой наблюдения понимается температура шкалы машины.

Таблица 32

Интервал $[(-1) - 0,2]$ мм
Концевая мера $A_{0,2} = 1,2$ мм $- 0,69$ м

Температура наблюдения t°	Отклонения $\delta'_{0,2}$, в м
18,95	- 1,12
19,00	- 0,99
18,98	- 1,06
19,05	- 1,05
19,06	- 1,05

Ср. арифм. 19,01 - 1,05
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,02$

Таблица 34

Интервал $[(-1) - 0,4]$ мм
Концевая мера $A_{0,4} = 1,4$ мм $- 0,38$ м

Температура наблюдения t°	Отклонения $\delta'_{0,4}$, в м
19,07	- 0,92
19,09	- 0,80
19,15	- 0,83
19,11	- 0,95
18,67	- 0,95

Ср. арифм. 19,02 - 0,89
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,03$

Таблица 36

Интервал $[(-1) - 0,6]$ мм
Концевая мера $A_{0,6} = 1,6$ мм $+ 0,04$ м

Температура наблюдения t°	Отклонения $\delta'_{0,6}$, в м
19,16	- 0,18
19,16	- 0,08
19,13	- 0,14
19,15	- 0,12
19,10	- 0,11

Ср. арифм. 19,14 - 0,13
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,02$

Таблица 33

Интервал $[(-1) - 0,3]$ мм
Концевая мера $A_{0,3} = 1,3$ мм $- 0,17$ м

Температура наблюдения t°	Отклонения $\delta'_{0,3}$, в м
18,95	- 0,35
18,95	- 0,40
19,15	- 0,46
19,15	- 0,40
19,15	- 0,49

Ср. арифм. 19,07 - 0,42
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,02$

Таблица 35

Интервал $[(-1) - 0,5]$ мм
Концевая мера $A_{0,5} = 1,5$ мм $+ 0,09$ м

Температура наблюдения t°	Отклонения $\delta'_{0,5}$, в м
19,35	- 0,06
19,35	- 0,09
19,39	- 0,06
19,45	- 0,08
19,50	- 0,12

Ср. арифм. 19,41 - 0,08
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,01$

Таблица 37

Интервал $[(-1) - 0,7]$ мм
Концевая мера $A_{0,7} = 1,7$ мм $+ 0,01$ м

Температура наблюдения t°	Отклонения $\delta'_{0,7}$, в м
19,15	- 0,10
19,21	- 0,08
19,22	- 0,05
19,25	- 0,10
19,27	- 0,10

Ср. арифм. 19,22 - 0,09
Ср. квадр. погрешность $\pm 0,01$

Таблица 38

Интервал $[(-1) - 0,8]$ мм
 Концевая мера $A_{n,n} = 1,8 \text{ мм} \pm 0,12 \mu$

Температура наблюдения t°	Отклонения $\delta'_{n,n}$ в μ
19,35	-0,20
19,25	-0,19
19,31	-0,08
19,33	-0,10
19,35	-0,13

Ср. арифм. 19,32 -0,14
 Ср. квадр. погрешность $\pm 0,02$

Таблица 39

Интервал $[(-1) - 0,9]$ мм
 Концевая мера $A_{n,n} = 1,9 \text{ мм} \pm 0,06 \mu$

Температура наблюдения t°	Отклонения $\delta'_{n,n}$ в μ
19,75	-0,13
19,81	-0,05
19,77	-0,13
19,85	-0,11
19,85	-0,09

Ср. арифм. 19,81 -0,10
 Ср. квадр. погрешность $\pm 0,01$

Подставив в уравнение (б) вместо A_n и δ'_n величины, приведенные в таблицах, получим для интервалов вида $[(-1) - n]$ следующие значения:

$$\left. \begin{array}{l} [(-1) - 0] \text{ мм} = 1 \text{ мм} \pm 0,13 \mu \\ [(-1) - 0,1] \text{ " } = 1,1 \text{ " } \pm 0,22 \text{ " } \\ [(-1) - 0,2] \text{ " } = 1,2 \text{ " } \pm 0,36 \text{ " } \\ [(-1) - 0,3] \text{ " } = 1,3 \text{ " } \pm 0,25 \text{ " } \\ [(-1) - 0,4] \text{ " } = 1,4 \text{ " } \pm 0,51 \text{ " } \\ [(-1) - 0,5] \text{ " } = 1,5 \text{ " } \pm 0,17 \text{ " } \\ [(-1) - 0,6] \text{ " } = 1,6 \text{ " } \pm 0,17 \text{ " } \\ [(-1) - 0,7] \text{ " } = 1,7 \text{ " } \pm 0,10 \text{ " } \\ [(-1) - 0,8] \text{ " } = 1,8 \text{ " } \pm 0,26 \text{ " } \\ [(-1) - 0,9] \text{ " } = 1,9 \text{ " } \pm 0,18 \text{ " } \end{array} \right\} \text{(Д)}$$

Вычитая первое равенство из всех остальных, находим значения интервалов $(0 - n)$, [см. уравнение (в)] первого миллиметра через 0,1 мм:

$$\left. \begin{array}{l} (0 - 0,1) \text{ мм} = 0,1 \text{ мм} \pm 0,09 \mu \\ (0 - 0,2) \text{ " } = 0,2 \text{ " } \pm 0,23 \text{ " } \\ (0 - 0,3) \text{ " } = 0,3 \text{ " } \pm 0,12 \text{ " } \\ (0 - 0,4) \text{ " } = 0,4 \text{ " } \pm 0,38 \text{ " } \\ (0 - 0,5) \text{ " } = 0,5 \text{ " } \pm 0,04 \text{ " } \\ (0 - 0,6) \text{ " } = 0,6 \text{ " } \pm 0,04 \text{ " } \\ (0 - 0,7) \text{ " } = 0,7 \text{ " } \pm 0,03 \text{ " } \\ (0 - 0,8) \text{ " } = 0,8 \text{ " } \pm 0,13 \text{ " } \\ (0 - 0,9) \text{ " } = 0,9 \text{ " } \pm 0,05 \text{ " } \end{array} \right\} \text{(Е)}$$

Погрешности шкалы в интервалах до $(0 - 0,3)$ мм и в $(0 - 0,8)$ мм колеблются в пределах $0,1 - 0,2 \mu$; в интервале $(0 - 0,4)$ мм она достигает наибольшей величины $(0,4 \mu)$; в интервалах от $(0 - 0,5)$ до $(0 - 0,7)$ мм и в $(0 - 0,9)$ мм уменьшаются почти до 0.

§ 8. Исследование шкалы оптиметра

Исследование шкалы оптиметра происходило: 1) на всем протяжении шкалы от -100μ до $+100 \mu$ — через 10μ , 2) в пределах -10μ

до $+10 \mu$ — через 1μ . Для исследования применяли следующие плоскопараллельные концевые меры, поверенные абсолютным интерференционным методом:

$\cdot 1,00^*$	мм = 1	мм — 0,18 μ	$\cdot 1,10^*$	мм = 1,10	мм — 0,35 μ
$\cdot 1,01^*$	" = 1,01	" — 0,07 "	$\cdot 1,009^*$	" = 1,009	" — 0,14 "
$\cdot 1,02^*$	" = 1,02	" — 0,07 "	$\cdot 1,008^*$	" = 1,008	" — 0,16 "
$\cdot 1,03^*$	" = 1,03	" — 0,19 "	$\cdot 1,007^*$	" = 1,007	" — 0,11 "
$\cdot 1,04^*$	" = 1,04	" — 0,27 "	$\cdot 1,006^*$	" = 1,006	" — 0,09 "
$\cdot 1,05^*$	" = 1,05	" — 0,21 "	$\cdot 1,005^*$	" = 1,005	" — 0,09 "
$\cdot 1,06^*$	" = 1,06	" — 0,16 "	$\cdot 1,004^*$	" = 1,004	" — 0,01 "
$\cdot 1,07^*$	" = 1,07	" — 0,31 "	$\cdot 1,003^*$	" = 1,003	" — 0,18 "
$\cdot 1,08^*$	" = 1,08	" — 0,89 "	$\cdot 1,002^*$	" = 1,002	" — 0,10 "
$\cdot 1,09^*$	" = 1,09	" — 0,12 "	$\cdot 1,001^*$	" = 1,001	" — 0,17 "

Результаты исследования, выведенные из трех рядов наблюдений, помещены в нижеследующих таблицах:

Таблица 40

Результаты исследования шкалы от -100μ до $+100 \mu$ через 10μ

Интервалы шкалы в μ	Действительные значения, в μ
$-(0-100)$	$-100,0$
$-(0-90)$	$-90,2$
$-(0-80)$	$-80,2$
$-(0-70)$	$-70,1$
$-(0-60)$	$-60,1$
$-(0-50)$	$-50,0$
$-(0-40)$	$-40,0$
$-(0-30)$	$-30,0$
$-(0-20)$	$-20,0$
$-(0-10)$	$-10,0$
0	0
$+(0-10)$	$+10,1$
$+(0-20)$	$+20,0$
$+(0-30)$	$+30,0$
$+(0-40)$	$+40,0$
$+(0-50)$	$+50,0$
$+(0-60)$	$+60,0$
$+(0-70)$	$+70,0$
$+(0-80)$	$+80,0$
$+(0-90)$	$+90,1$
$+(0-100)$	$+100,1$

(Ж)

Таблица 41

Результаты исследования шкалы от -10μ до $+10 \mu$ через 1μ

Интервалы шкалы в μ	Действительные значения, в μ
$-(0-10)$	$-10,0$
$-(0-9)$	$-9,1$
$-(0-8)$	$-8,1$
$-(0-7)$	$-7,1$
$-(0-6)$	$-6,0$
$-(0-5)$	$-5,0$
$-(0-4)$	$-4,0$
$-(0-3)$	$-3,1$
$-(0-2)$	$-2,1$
$-(0-1)$	$-1,0$
0	0
$+(0-1)$	$+1,0$
$+(0-2)$	$+2,1$
$+(0-3)$	$+3,0$
$+(0-4)$	$+4,1$
$+(0-5)$	$+5,0$
$+(0-6)$	$+6,1$
$+(0-7)$	$+7,1$
$+(0-8)$	$+8,0$
$+(0-9)$	$+9,0$
$+(0-10)$	$+10,1$

(Ж₂)

На протяжении всей шкалы от -100μ до $+100 \mu$ интервалы через 10μ от $-(0-10)$ до $-(0-50)$, $-(0-100)$ и от $+(0-20)$ до $+(0-80)$ — без заметной погрешности. В интервалах $-(0-60)$, $-(0-70)$, $+(0-10)$, $+(0-90)$ и $+(0-100)$ погрешность не превышает $0,1 \mu$; в интервалах $-(0-80)$ и $-(0-90)$ она достигает $0,2 \mu$.

В пределах шкалы от -10μ до $+10 \mu$ в интервалах через 1μ наибольшая погрешность равна $0,1 \mu$, т. е. точности отсчета.

§ 9. Точность измерения концевых мер непосредственным методом на концевой измерительной машине К. Цейсс

Для определения наибольшей возможной погрешности измерения концевых мер непосредственным методом, пользовались формулой вида

$$\pm (a + bL),$$

где a — сумма постоянных погрешностей, bL — сумма погрешностей, пропорциональных длине L меры.

В предположении, что измерительная машина отъюстирована, погрешность измерения зависит от:

1) дефектов в конструкции машины: а) непрямолинейности направляющих машины, б) погрешностей шкал машины, в) погрешностей шкалы оптиметра;

2) а) погрешности отсчета по шкале оптиметра при нулевом положении машины, б) погрешности отсчета по шкале оптиметра, включая погрешность установки концевой меры на машине;

3) погрешности наводки изображения двойного штриха в микроскопе на штрихи 100-миллиметровой стеклянной шкалы;

4) погрешности, зависящие от температурных условий: а) погрешности поверки термометров в горизонтальном положении, б) погрешности отсчета термометров, в) отклонения температуры концевой меры от температуры шкалы машины, г) отклонения температуры измерения от нормальной (20°C).

Погрешностью $1a_{\text{ш}}$ можно пренебречь в виду того, что, по исследованиям в лаборатории концевых мер ВНИИМа, наибольшая величина непрямолинейности направляющих в машинах К. Цейсс не превышает $15''$ (секунд), что не влияет заметно на точность измерения.

В предположении, что отсчеты по шкалам машины исправлены введением соответствующих поправок, погрешность измерения складывается из следующих погрешностей:

I. Постоянные погрешности

1в) не превышает $\pm 0,3 \mu$. 2а) при нулевом положении машины — $\pm 0,1 \mu$. 2б) при измерении концевой меры — $\pm 0,2 \mu$.

Для определения наибольшей погрешности наводки изображения двойного штриха (3) было произведено исследование штрихов 100-миллиметровой стеклянной шкалы и двойных штрихов, а также несколько рядов наводок двойного штриха на штрихи стеклянной шкалы. Исследование показало, что: а) штрихи 100-миллиметровой стеклянной шкалы — ровные, отчетливые, черного цвета, шириною около 6μ ; б) штрихи двойных штрихов 6-метровой шкалы, нанесенные на стеклянных пластинках — ровные, бледные; расстояние между штрихами двойного штриха — $14,0 \mu$.

Из 9 рядов наводок, считая в каждом ряде по 6 наводок двойного штриха на штрих стеклянной шкалы, в 4 рядах наибольшие отклонения отдельных наводок от соответствующего среднего арифметического из 6 наводок достигали $\pm 0,12 \mu$, в остальных 5 они не

превышали $\pm 0,08 \mu$. Таким образом, наибольшие погрешности наводок составляли от $\frac{1}{117}$ до $\frac{1}{175}$ расстояния между штрихами двойного штриха. За наибольшую погрешность наводки принято: $\pm 0,1 \mu$.

II. Погрешности, пропорциональные длине концевой меры

При определении этих погрешностей принят средний коэффициент расширения стали $11,5 \cdot 10^{-6}$ с отклонением $\pm 1 \cdot 10^{-6}$.

Принимая погрешности (при наблюдениях во ВНИИМет) — 4а) проверки термометров $\pm 0,01$, 4б) отсчета термометра $\pm 0,02$, 4в) разницу между температурами концевой меры и шкалы машины $\pm 0,3$ и суммируя их, получим погрешность измерения:

$$\pm 0,33 \cdot 11,5 \cdot 10^{-6} L = \pm 3,8 \cdot 10^{-6} L \mu.$$

4г) при отклонении температуры измерения от нормальной (20°C) на $\pm 0,5$, и разнице между коэффициентами расширения концевой меры и шкалы $\pm 2 \cdot 10^{-6}$, погрешность измерения будет:

$$\pm 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} L = \pm 1 \cdot 10^{-6} L \mu.$$

Суммируя все указанные I и II погрешности, находим наибольшую возможную погрешность измерения:

$$\pm 0,7 \mu \pm 4,8 \cdot 10^{-6} L \mu.$$

Что касается погрешности, происходящей от наклона микроскопа в направлении измерения и поправки на измерительное усилие, то:

1) в концевой измерительной машине наклон микроскопа в направлении измерения не имеет заметного влияния на точность измерения. Микроскоп неподвижно закреплен в правой бабке и вместе с нею перемещается по всей длине 100-миллиметровой стеклянной шкалы. Его наклон происходит: а) от неправильной установки в бабке и б) от перекоса бабки при ее передвижении вследствие непрямолинейности направляющих машины.

При неподвижном положении правой бабки во время измерения, наклон микроскопа остается одинаковым при нулевом положении машины и при измерении концевой меры; следовательно, погрешность измерения от наклона микроскопа исключается. В случае же перемещения бабки при измерении концевой меры, наклон микроскопа может измениться от перекоса бабки, но возникающая от этого погрешность измерения будет величиной 2-го порядка.

2) При контактном методе измерения от измерительного усилия происходит укорачивание концевой меры на величину, определяемую по формуле Гука:

$$\Delta L = \frac{L \cdot P}{E \cdot Q},$$

где ΔL — укорачивание концевой меры; L — ее длина; P — измерительное усилие в килограммах; Q — поперечное сечение меры; E — модуль упругости, для стали, равный $2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$.

В концевой измерительной машине К. Цейсс $P = 200 \text{ г} = 0,2 \text{ кг}$;
у плоскопараллельных концевых мер (плиток) $Q = 35 \times 9 \text{ мм} = 315 \text{ мм}^2$;
у штихмассов $Q = \frac{1}{4} \pi d^2 = 100 \pi \text{ мм} = 314 \text{ мм}^2$, при $d = 20 \text{ мм}$.

Следовательно, укорачивание

$$\Delta L = \frac{0,2L}{2 \cdot 10^7 \cdot 3,15} = \frac{L}{3,15 \cdot 10^7} = 0,032 \cdot 10^{-6} L \mu,$$

при $L = 1 \text{ м}$ $\Delta L = 0,03 \mu$
 $L = 6 \text{ м}$ $\Delta L = 0,19 \mu$.

Отсюда видно, что поправка ΔL , которую нужно прибавить к результату измерения, очень незначительна (даже при 6 м достигает только 0,2 μ).

Заключение

I. Общее исследование показало, что установленная во ВНИИМе машина очень хорошо выполнена конструктивно, может давать высокую точность измерения концевых мер размером до 6 м, и является основным прибором лаборатории концевых мер.

II. Исследование метровых и дециметровых интервалов большой шкалы машины производилось не обычным способом, по основным мерам, точное значение которых не было известно Лаборатории концевых мер ВНИИМа до исследования всей машины, а путем сличения с общей длиной стеклянной 100 мм шкалы машины, исследованной, в свою очередь, с помощью основных концевых мер, предварительно поверенных абсолютным интерференционным методом.

III. Благодаря примененному выше методу, были попутно определены размеры вновь полученных из-за границы основных концевых мер в 1 м, 1^а м, 2 м, 3 м и 3^а м, служивших для исследования шкалы машины.

IV. Произведенное исследование направляющих машины обнаружило высокое качество изготовления ее фирмой К. Цейсс, так как наибольшее отклонение направляющих машины от прямолинейности на протяжении 6 м составило всего 13^а,8 (секунд), что может вызвать погрешность в измерении мер длиной в 6 м только $1 \cdot 10^{-8} \text{ м}$.

V. Точность исследования была повышена благодаря тому, что в Лаборатории штриховых мер длины и в Лаборатории концевых мер длины были определены линейные коэффициенты расширения для плоскопараллельных концевых мер, применявшихся при исследовании 6-метровой и стеклянной 100-миллиметровой шкалы машины.

VI. Значительно способствовало повышению точности исследования определение разницы температур машины и меры до 0,001.

VII. Результаты исследования шкал 6-метровой концевой измерительной машины приведены в нижеследующих таблицах: а) 6-метровой шкалы в таблицах (А) стр. 23 и (Б) стр. 29, б) стомиллиметровой стеклянной шкалы — в таблицах (В) стр. 34; (Г) стр. 37; (Д) стр. 39 и (Е) стр. 39 в) шкалы оптиметра — в таблицах (Ж) и (Ж₁) стр. 40.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Кабанов. Контроль производства электрических машин. 1935. Л.—М.
2. Prof. G. Berndt. Grundlagen und Geräte Technischer Längenmessungen. II Auflage. 1929. Berlin.
3. F. H. Rolt. Gauges and fine measurements. Vol. 1, 1929. London.
4. Ф. Г. Ролт. Каалбры и точные измерения. Том I. ГОНТИ. 1933.
5. Prof. G. Berndt. Die Gewinde (Nachtrag).
6. F. H. Rolt. Tests for straightness by inclination method. Engineer. 1937. (t. 163, № 4236).
7. A. Pérard et L. Maudet. Études sur les étalons à bouts. Travaux et mémoires du Bureau international des poids et mesures. Tome XVII. 1927.
8. В. Г. Махровский. Статья „К вопросу о погрешностях измерения“. Сборник „Точные измерения в приборо- и машиностроении“. Изд. ВНИИМ. Л. 1941
9. C. Zeiss. Gebrauchs—Anweisung für die Längenmessmaschine. Fe 506. Jena.
10. А. М. Кияшко. Юстировка концевой машины типа ф. Цейсс. „Метрология и поверочное дело“. 1939.
11. Проф. В. А. Баранов. Современное состояние эталонов длины и методы точного измерения длины*. (ВНИИМ, 1941).
12. Х. Бэкстрем. Ошибки наблюдателя при отсчитывании по шкалам измерительных приборов. Перев. с нем. Ниж. Вахрамеева. 1935.

М. Л. БРЖЕЗИНСКИЙ

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

§ 1. Введение

Сущность пневматического метода измерения линейных величин заключается в следующем: если через два отверстия, расположенные одно за другим, f_1 и f_2 (рис. 1), пропускать воздух под постоянным давлением P_1 , то давление P_2 между двумя отверстиями будет зависеть от отношения их сечений.

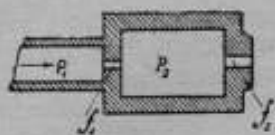


Рис. 1.

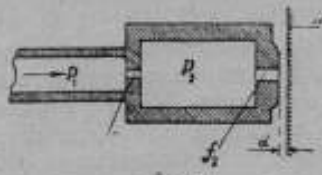


Рис. 2.

Если одно из отверстий, например, f_1 , будет постоянным, а отверстие f_2 переменное, то давление P_2 будет функцией от сечения f_2 . Таким образом, изменение давления P_2 может служить мерой для измерения отверстия f_2 .

Если перед отверстием f_2 поместить плоскость N измеряемого объекта на некотором расстоянии d (рис. 2), то между плоскостью и отверстием образуется кольцевой зазор, с изменением которого будет изменяться и скорость истечения воздуха, а следовательно и давление P_2 ; в этом случае, изменение P_2 может служить мерой для линейной величины d .

Приборы, основанные на этом принципе, должны всегда иметь устройство для обеспечения подачи воздуха постоянного давления P_1 и манометр для измерения давления P_2 .

Первые приборы, основанные на этом принципе, выпущены французской фирмой „La précision mécanique“.

§ 2. Устройство прибора „Солекс“

Прибор состоит из цилиндрического балона R (рис. 3), наполненного водой; через верхнее отверстие в крышке балона в воду погружается трубка T . Через отверстие a в верхней части трубки подается компрессором воздух под давлением от 1,5 до 2 атмосфер.

В этом случае в трубке T будет автоматически поддерживаться практически постоянное давление, определяемое высотой столба воды H . Некоторое колебание давления воздуха, подаваемого через отверстие a , не будет оказывать сильного влияния, так как излишний воздух будет выходить через воду в сосуд, сообщающийся с атмосферой. С трубкой T соединена камера B , имеющая входное отверстие f_1 , и сообщающаяся

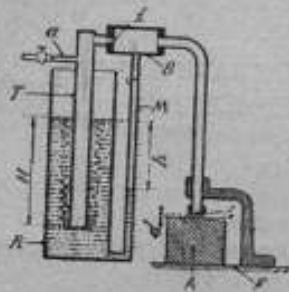


Рис. 3.

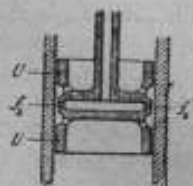


Рис. 4.

с атмосферой, выходное отверстие f_2 . Для измерения давления в камере B применен водяной манометр в виде стеклянной трубки M , которая одним концом присоединена к камере, а другим соединена с баллоном R . Давление в камере B будет определяться высотой столба воды h , являющейся разностью высот уровней в баллоне R и трубке M .

Воздух под постоянным давлением из трубки T , через входное отверстие f_1 , поступает в камеру B , откуда в выходное отверстие f_2 .

В зависимости от размеров и формы измеряемых объектов применяются различного рода приспособления.

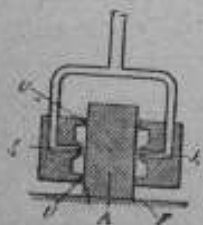


Рис. 5.

Неглубокие отверстия малых диаметров (до 2 мм) могут измеряться методом непосредственного пропускания воздуха через измеряемое отверстие; в этом случае прибор должен быть проградуирован по образцовым кольцам соответствующих размеров. Для измерения отверстий больших диаметров применяют специальные пробки с двумя выходными отверстиями f_2 (рис. 4). Наличие двух диаметрально противоположных отверстий необходимо для измерения двухстороннего зазора между пробкой и отверстием. Такое же устройство применяют для измерения плоских мер без контакта с измерительными поверхностями (рис. 5).

Прибор был получен от фирмы без всяких приспособлений, за исключением цилиндрических пробок и установочных колец к ним.

§ 3. Градуировка прибора

Для градуировки прибора были изготовлены две специальные плитки (рис. 6) с выходным отверстием на измерительной поверхности диамет-

ром 2 мм. Плитки были притерты поверхностями без отверстий к плоской концевой мере длиной 5 мм. Размер блока с боковыми плитками был точно измерен на оптиметре. Из концевых мер с боковинками составлялась скоба соответствующего размера; блок, соединенный с прибором при помощи резинового шланга, вводился в скобу, и в этом положении фиксировалась высота столба h по миллиметровой шкале (рис. 7).

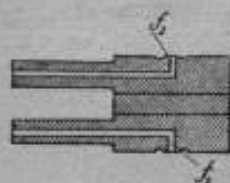


Рис. 6.

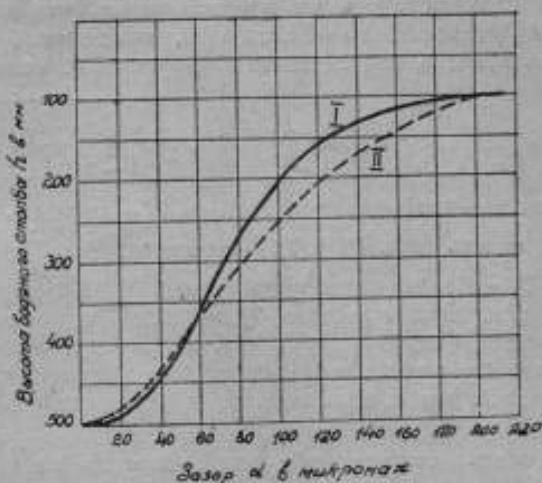


Рис. 7. I — кривая, полученная опытным путем; II — кривая, вычисленная по формуле.

Зависимость между зазором d и давлением выражена кривой, представленной на рис. 7, где по горизонтали отложены зазоры d (в микронах), а по вертикали давление, выраженное высотой водяного столба h (в миллиметрах).

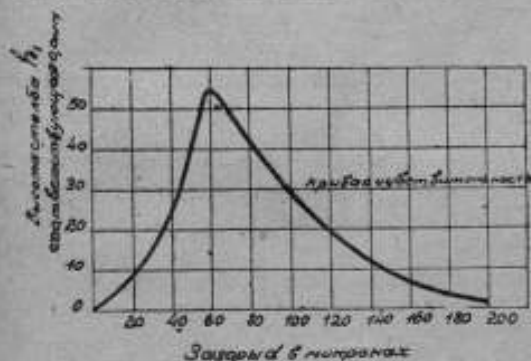


Рис. 8. Кривая чувствительности.

соответствующую изменению зазора 0,01 мм, то изменение чувствительности прибора, в зависимости от величины зазора d , может быть представлено кривой (рис. 8).

Кривая показывает, что в определенном интервале зазоров давление будет меняться очень резко, т. е. в этом диапазоне прибор будет обладать наиболее высокой чувствительностью; начиная же с некоторого диапазона зазоров в сторону их увеличения, чувствительность прибора резко падает.

Если по горизонтали откладывать зазоры d , а по вертикали высоту столба h ,

§ 4. Математическая зависимость между изменением зазора и давлением

Если исходить из предположения, что истечение газа происходит адиабатически, то вес газа G , проходящий в единицу времени через отверстие f , определяется формулой (St. Venant и. Wantzel-Weissbach):

$$G = \tau_f \rho \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]},$$

где τ_f — коэффициент истечения, f — площадь сечения отверстия, ρ — плотность газа, P_1 и P_2 — давления, $K = \frac{C_p}{C_v}$, R — газовая постоянная и T — абсолютная температура.

Для двух отверстий будем иметь, что несомые количества газа, проходящего через отверстия f_1 и f_2 , будут равны; кроме того, если считать, что воздух теряет всю свою кинетическую энергию между двумя отверстиями и возвращается к первоначальной температуре, то можно

написать (сократив обе части равенства на $\sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT}$)

$$\tau_{f1} \rho_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}} = \tau_{f2} \rho_2 \left(\frac{P_2}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_2}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}}$$

или

$$\frac{\tau_{f2}}{\tau_{f1}} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \left(\frac{P_2}{P_2} \right)^{-\frac{1}{k}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{-\frac{1}{2}}.$$

Вместо отношения плотностей $\frac{\rho_1}{\rho_2}$, подставив отношение давлений $\frac{P_1}{P_2}$, получим:

$$\frac{\tau_{f2}}{\tau_{f1}} = \frac{P_1}{P_2} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \left(\frac{P_2}{P_2} \right)^{-\frac{1}{k}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Выражения $\frac{P_2}{P_1}$ и $\frac{P_2}{P_2}$ могут быть представлены в таком виде:

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{P_1 - P_2}{P_1} \quad \text{и} \quad \frac{P_2}{P_2} = 1 - \frac{P_2 - P_2}{P_2}, \quad (2)$$

в дальнейших выводах ограничимся первыми двумя членами номеномод

$$\left(1 - \frac{P_1 - P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \text{и} \quad \left(1 - \frac{P_2 - P_2}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Как будет видно из дальнейших рассуждений, это даст достаточное приближение.

Подставив в (1) уравнение вместо $\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ и $\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ значение из уравнения (2), после преобразования получим:

$$\begin{aligned} \frac{v_2 f_2}{v_1 f_1} &= \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{k}-1} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-\frac{1}{k}} \left(\frac{P_1-P_2}{P_1}\right)^2 \left(\frac{P_1-P_2}{P_2}\right)^{-\frac{1}{k}} = \\ &= \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{k}-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-\frac{1}{k}} \left(\frac{P_1-P_2}{P_1}\right)^2 \left(\frac{P_1-P_2}{P_2}\right)^{-\frac{1}{k}} = \\ &= \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{k}-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-\frac{1}{k}} \left(\frac{P_1-P_2}{P_1}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_1-P_2}{P_2}\right)^{\frac{1}{2}} = \\ &= \left(\frac{P_1-P_2}{P_2-P_2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{k}} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-\frac{1}{k}}. \end{aligned}$$

Подставим вместо $\frac{P_2}{P_1}$ и $\frac{P_2}{P_2}$ их значение из (2), ограничиваясь так же первыми двумя членами полинома.

Получим:

$$\frac{v_2 f_2}{v_1 f_1} = \sqrt{\frac{P_1-P_2}{P_2-P_2}} \left(1 - \frac{1}{k} \frac{P_1-P_2}{P_1}\right) \left(1 + \frac{1}{2} \frac{P_1-P_2}{P_1}\right) \left(1 + \frac{1}{k} \frac{P_2-P_2}{P_2}\right).$$

Отбрасывая члены 2-го и 3-го порядка, получим

$$\frac{v_2 f_2}{v_1 f_1} = \sqrt{\frac{P_1-P_2}{P_2-P_2}} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{P_1-P_2}{P_1} - \frac{1}{k} \frac{P_1-P_2}{P_1} + \frac{1}{k} \frac{P_2-P_2}{P_2}\right). \quad (1)$$

Обозначим

$$\frac{1}{2} \frac{P_1-P_2}{P_1} - \frac{1}{k} \frac{P_1-P_2}{P_1} + \frac{1}{k} \frac{P_2-P_2}{P_2} = E \quad \text{и} \quad \frac{v_2}{v_1} = m,$$

получим

$$m \frac{f_2}{f_1} = \sqrt{\frac{P_1-P_2}{P_2-P_2}} (1 + E).$$

Рассмотрим, чем определяются давления P_1 и P_2 у исследуемого нами прибора. Абсолютное давление P_1 в трубке T будет складываться из атмосферного давления P_a и давления водяного столба H ; таким образом $P_1 = P_a + H$.

Абсолютное давление между двумя отверстиями P_2 будет равно атмосферному давлению плюс давление высоты столба h , т. е.

$$P_2 = P_a + h.$$

Если подставим значения P_1 и P_2 в формулу (1), то получим

$$m \frac{f_2}{f_1} = \sqrt{\frac{H-h}{h}} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{H-h}{P_a+H} - \frac{1}{k} \frac{H-h}{P_a+H} + \frac{1}{k} \frac{h}{P_a+h}\right). \quad (1)$$

У рассматриваемого нами прибора $H=500$ мм, h может изменяться в пределах от 0 до 500 мм, значение k для воздуха можно принять 1,4. При этих значениях H и h , три последних члена, обозначенных нами выше через E , будут иметь значение порядка 0,1 мм водяного столба. Следовательно, для практических расчетов его значением можно пренебречь, тогда уравнение (1) напишется в таком виде:

$$m \frac{f_2}{f_1} = \sqrt{\frac{H-h}{h}}$$

Будем считать, что коэффициент истечения в отверстиях f_1 и f_2 — один и тот же, тогда $m=1$.

Кольцевой зазор между отверстием f_2 и плоскостью измеряемого объекта определится формулой $f_2=2\pi rd$, где r — радиус выходного отверстия, а d — расстояние от отверстия до плоскости.

Выражая h в функции от f_1 и f_2 , получим:

$$h = \frac{H}{\frac{f_2^2}{f_1^2} + 1} \quad (3)$$

Эта формула дает возможность с достаточным приближением установить зависимость между h , площадью постоянного отверстия f_1 и линейным размером d .

На рис. 7 с кривой, полученной опытным путем, приведена кривая, вычисленная по формуле (3) для тех же значений f_1 и f_2 . Само собой понятно, что градуировку прибора необходимо производить опытным путем, так как учесть при теоретических расчетах все факторы, могущие иметь место в каждом отдельном случае, не представляется возможным.

§ 5. Недостатки и преимущества пневматического метода

При рассмотрении недостатков пневматического метода, как и всякого другого метода, воплощенного в приборе определенной конструкции, необходимо рассмотреть отдельно: 1) устранимые недостатки, вызванные упрощением конструкции или ее несовершенством, и 2) недостатки, заложенные в самом принципе, в большинстве случаев неустраняемые.

Существенный недостаток исследованного прибора „Солекс“ заключается в том, что в процессе измерения высота столба в стеклянной трубке колеблется и особенно сильно на малых зазорах, что затрудняет отсчет по шкале и создает неуверенность в результатах. Это вызвано тем, что водяной манометр, служащий для измерения h , присоединен к резервуару с водой; уровень же воды H в резервуаре незначительно изменяется вследствие попадания в воду воздуха, подаваемого из компрессора. Так как размеры резервуара велики сравнительно с размерами стеклянной трубки, то незначительные изменения высоты H вызывают заметные колебания уровня h . Этот недостаток может быть устранен, если водяной манометр не связывать с резервуаром.

К недостаткам, заложенным в самом принципе действия, необходимо отнести: а) резко выраженную неравномерную шкалу и б) зависимость изменения давления от отношения f_2 и f_1 .

Это требует отдельной градуировки для каждого отдельного случая в зависимости от требуемых пределов измерения и формы измеряемых объектов.

К преимуществам пневматического метода необходимо отнести следующее: а) возможность достигнуть весьма высокой чувствительности, а следовательно и применение метода для высокоточных относительных измерений и б) возможность применения метода для бесконтактных измерений, что также является весьма ценным при высокоточных измерениях и автоматических измерениях.

В зарубежной литературе уже имеются указания на успешное применение пневматического метода для контроля размеров изделий на металлообрабатывающих станках без остановки процесса.

Этот метод нашел применение для исследования качества металлических и стеклянных поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Nicolou. Quelques récents progrès de la microgéométrie des surfaces usinées et de l'intégration pneumatique des rugosités superficielles. *Mécanique*, 1939 (июль — август, т. 23, № 285 С. 152—5).
2. „Engineering“, 39. Vol. 148.
3. J. Outin. La métrologie pneumatique. Journées internationales de Chronométrie et de métrologie. Paris, Juillet, 1937. P. 305.
4. Бывков. Термодинамика 1928, стр. 339.
5. Инж. Сердюков. Пневматический микрометр. „Станки и инструмент“, 1938, № 6, стр. 31.

Каталоги фирмы

6. Le micromètre pneumatique solex. Notice explicative.
7. Le micromètre pneumatique solex. Calculs annexes.
A la notice explicative.

А. А. ЮРГЕНС

РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛАБОРАТОРНОГО ПОМЕЩЕНИЯ (КОМНАТЫ) С ПОМОЩЬЮ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕРМОРЕГУ- ЛЯТОРА

Введение

В 1938 г. Лаборатория мер длины ВНИИМ получила измерительную машину Цейсса для измерения концевых мер длиной до 6 м. Для обеспечения достаточной точности измерений надо было поддерживать постоянную температуру в помещении, где была установлена машина.

Требовалось, чтобы: а) температура помещения равнялась $20^{\circ}\text{C} \pm \pm 1^{\circ}\text{C}$; б) в процессе измерения (1—6 час.) температура не изменялась от начального значения на величину, большую $\pm 0^{\circ},1\text{C}$; в) максимальная разность температур любых двух участков машины не превышала $0^{\circ},2\text{C}$.

Для выполнения этих условий необходимо было создать, специально для данной машины, термостатную комнату с отопительно-вентиляционной системой для кондиционирования воздуха [23].

Однако, этот путь требовал затрат очень больших средств и, что особенно важно, времени, и от него пришлось отказаться.

Измерительная машина была установлена в обычном лабораторном помещении, не рассчитанном на создание термостатных условий. План комнаты изображен на рис. 1. Размеры комнаты: площадь пола 700×1000 см, высота 450 см. Комната находится в первом этаже. Все стены капитальные, причем одна из них выходит на неотапливаемую лестницу, остальные три на улицу. Под комнатой находится неотапливаемый подвал. В комнате шесть окон. Солнечный свет, проникая через них, мог вызвать значительную неравномерность нагрева различных частей комнаты, поэтому оконные ниши были закрыты наглухо фанерными щитами с внутренними прокладками из волнообразно изогнутых листов алюминиевой фольги.

Весной 1938 г., после выключения водяного отопления, производилась запись температуры воздуха комнаты и фундамента машины. Результаты, в виде графиков, приведены на рис. 2 и 3. Ломаная линия 1 соединяет точки, соответствующие температуре воздуха, измеренного термометром, подвешенным на высоте 1,5 м от пола; в плане комнаты (рис. 1) положение этого термометра отмечено точкой 5. Линия (рис. 2) соединяет точки, соответствующие температуре фундамента машины (рис. 1, точка 3). На рис. 2 и 3 приведены результаты только для двух точек комнаты, так как температура комнатного воздуха,

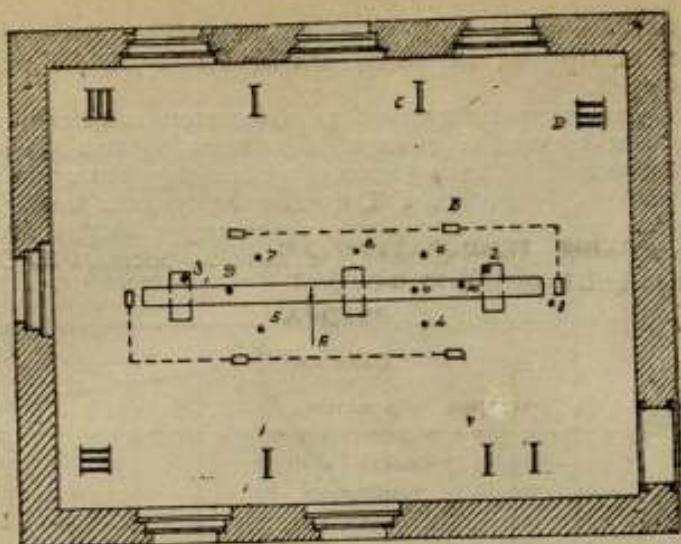


Рис. 1. План лабораторного помещения.

А — измерительная машина, В — термометры сопротивления, С — односекционный нагреватель, Д — трехсекционный нагреватель.

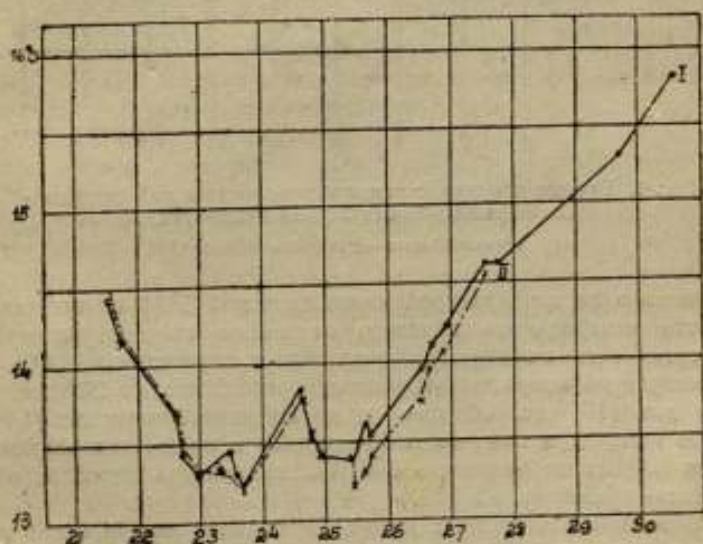


Рис. 2. Графики изменения температуры воздуха лабораторного помещения при отсутствии отопления.

По оси абсцисс — дни (май 1938 г.).

измерения в точках 4, 6, 7, 9, 10 (рис. 1) отличалась от значений, указанных на графике, не более, чем на $0,1-0,2^{\circ}\text{C}$ (подробнее см. в конце статьи).

В результате этих наблюдений за изменением комнатной температуры, сделаны следующие выводы: а) комната хорошо защищена от солнечной радиации, поскольку изменения температуры за сутки в мае — июне ни разу не превысили 1°C , и различные участки комнаты имели (с точностью до $0,2^{\circ}\text{C}$) одинаковую температуру; б) при отсутствии искусственного подогрева температура комнаты достигла 20°C только к середине июня.

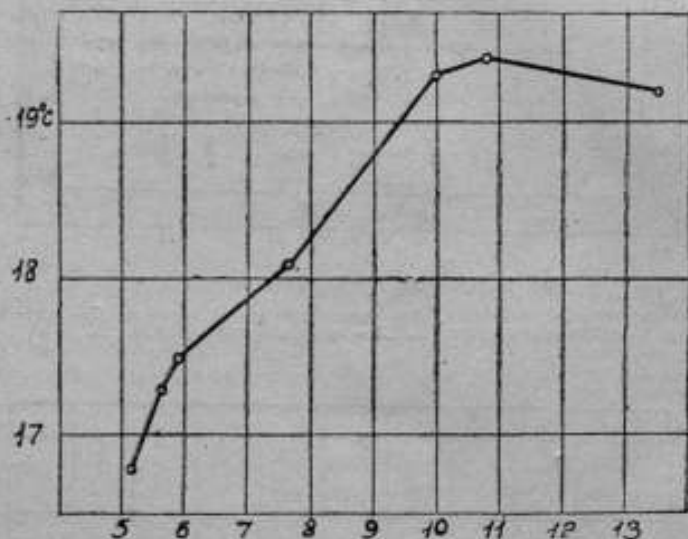


Рис. 3. График изменения температуры воздуха лабораторного помещения при отсутствии отопления.

По ось абсцисс — дни (июнь 1938 г.).

Наблюдения за температурой комнаты зимой 1938 г. показало, что при работе центрального водяного отопления температура претерпевает за сутки весьма значительные колебания, порядка $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Кроме того, температура комнаты значительно отличалась от 20°C . С начала рабочего дня (10 час. 30 мин.) и до конца рабочего дня (14 час.), вследствие наличия в комнате наблюдателей и включения верхних светильников (общая их мощность 600 W), температура комнаты, обычно, поднималась, примерно, на 1°C .

На основании изложенных выше наблюдений можно было предполагать, что при наличии в комнате автоматически действующего нагревательного устройства (при условии выключения центрального водяного отопления, создающего неравномерный и непостоянный нагрев), вполне возможно будет получить достаточное постоянство комнатной

температуры в течение всего года, за исключением наиболее жарких дней летних месяцев.

Опыт устройства небольшой термостатной комнаты, созданной раньше в той же лаборатории, показал, что при работе с оптико-механическими приборами, обладающими большой массой, измеряющейся десятками, а в некоторых случаях даже сотнями килограммов, обычные приемы термостатирования оказываются мало пригодными. Например, если утром, до прихода сотрудников на работу, температура комнаты будет ниже требуемой на 2°C , то как бы быстро, при включении автоматически действующих нагревательных устройств, температура ни поднялась до требуемого значения, измерительный прибор, вследствие большой тепловой инерции, принимает нужную температуру, с требуемой степенью точности ($0^{\circ},1\text{C}$), через столь большой промежуток времени (от 4 до 10 час., в зависимости от размеров прибора), что к производству измерений можно приступить только в конце рабочего дня. Поэтому, если бы терморегулирующее устройство работало, как это обычно практикуется, только в течение рабочего дня, то значительная часть этого дня пропала бы из-за невозможности производить наблюдения до установления стационарного температурного режима.

Это важное обстоятельство, естественно, вызывало необходимость непрерывной круглосуточной работы регулятора комнатной температуры. При этом большое внимание следовало обратить на то, чтобы установка была абсолютно безопасна в пожарном отношении.

В практике работы одной из измерительных лабораторий был случай, когда оставленный на работу на ночь вентилятор самопроизвольно застыл и вследствие этого настолько сильно перегрелся, что сгорела изоляция его обмоток и дым, через вентиляционный канал попавший в лабораторию, закоптил значительную часть оптических поверхностей в измерительной аппаратуре.

Чтобы полностью обеспечить нормальный температурный режим работы и обезопасить измерительную аппаратуру, расположенную в комнате, от разного рода аварийных случайностей, к непрерывно действующему регулятору и всей нагревательной установке в целом следовало предъявить ряд специфических требований.

§ 1. Требования пожарной безопасности

а) Терморегулятор не должен содержать сильно нагревающихся или легко воспламеняющихся частей и электрических контактов, замыкающихся в воздухе с искрением.

б) Нагревательная система (нагреватели) не должна в процессе работы нагреваться выше 200°C .

в) В случае отказа регулятора от работы температура комнаты не должна подниматься (при условии непрерывной работы нагревателей) выше $10-15^{\circ}\text{C}$ от нормальной температуры 20°C (т. е. запас мощности регулируемых нагревателей не должен превышать некоторого предела, зависящего от размеров комнаты, ее тепловой изоляции и условий охлаждения).

г) В самом приборе при изготовлении должно быть продумано расположение деталей и монтажных проводов, чтобы исключить или сделать безопасным короткие замыкания проводов (за счет прямого касания) при монтаже голым проводом или при пробое изоляции.

д) Все электрические цепи в самом приборе и вне его должны включать в себя плавкие предохранители. Это требование хотя и является безусловным во всех случаях, но очень часто не соблюдается в лабораторной практике.

е) Внутри комнаты обязательно наличие автоматических пожарных сигналов и соответствующей проводки.

ж) Регулятор и вспомогательные части установки, работающие ночью, не должны иметь электродвигателей.

з) Нагреватели должны быть расположены достаточно далеко от деревянных и других воспламеняющихся предметов.

Перечисленные выше требования накладывают определенные ограничения на свободу выбора метода регулирования.

§ 2. Выбор метода регулирования

Прежде всего необходимо было решить, как будет регулятор работать: на принципе непрерывного действия [9, 10] или прерывного регулирования, путем простого включения или выключения всех нагревательных элементов.

По приближенному расчету теплопотерь комнаты, необходимо было 350 W для поддержания разности температур в 1°C.

В соответствии с требованием пункта „в“, перечисленных выше условий пожарной безопасности, величина регулируемой мощности должна была быть порядка 4 kW. Плавное управление такой мощностью при помощи мотора, передвигающего рукоятку реостата, или при помощи игнайтрона, потребовало бы создания громоздкой аппаратуры, за надежность работы которой трудно было бы поручиться. Кроме того, известно, что и при плавной регулировке нагрева неизбежны колебания комнатной температуры вследствие тепловой инерции нагревателей и помещения. Поэтому мы остановились на регуляторе прерывного действия (релейного типа), работающем по методу простого включения и выключения нагревателей.

В случае автоматического регулирования температуры термостата, когда объект, подлежащий термостатированию, отделен от нагревателей металлическим кожухом, прерывистая регулировка, при наличии достаточного термического контакта между нагревателем и индикатором температуры, управляющим регулятором, вполне достаточна и при прочих равных условиях может дать даже лучшие результаты, чем плавная регулировка температуры [10], так как колебания температуры при достаточно высокой частоте их, затухают, проходя через упомянутый металлический кожух. Совсем другие условия мы имеем в комнате, где нагреватели нельзя термически изолировать от термостатируемого объекта. Если в термостате амплитуда возникающих тепловых колебаний ограничивается путем тесного термического контакта между индикатором

температуры и нагревателем, то пойти по этому же пути при регулировании комнатной температуры невозможно, так как индикатор, находящийся около нагревателя, не сможет учесть изменения температуры около объекта, подлежащего термостатированию.

Для преодоления этого затруднения, при регулировании комнатной температуры, устраивают сложный индикатор¹, часть которого, обладающая меньшей чувствительностью, располагается в непосредственной близости от нагревателей, в то время как вторая, более значительная часть, контролирует температуру комнаты и располагается в непосредственной близости от измерительных приборов (объектов термостатирования) [18]. Этот метод не дает, однако, возможности целиком преодолеть отмеченное выше затруднение, так как часть индикатора, расположенная около нагревателей, ограничивая амплитуду тепловых колебаний в непосредственной близости от них, вместе с тем уменьшает и возможность использования полной мощности нагревателей. При регулировании комнатной температуры важно поэтому иметь температурный индикатор с высокой чувствительностью и малой тепловой инерцией. В этом случае, если индикатор будет расположен даже далеко от нагревательных устройств, он будет все же быстро реагировать на изменения температурного режима в комнате. Нельзя надеяться, однако, что высокая чувствительность индикатора температуры сама по себе сможет обеспечить отсутствие колебаний температуры в комнате [18]. Для устранения температурных колебаний необходимо также довести до минимума инерцию нагревателей и обеспечить хорошую циркуляцию комнатного воздуха.

Из известных температурных индикаторов наибольшей чувствительностью обладают ртутно-толуоловые термометры и термометры сопротивления. При сравнительно одинаковой чувствительности термометры сопротивления обладают во много раз меньшей тепловой инерцией, чем ртутно-толуоловые термометры, и вследствие этого более пригодны для регулирования комнатной температуры. Кроме этого основного преимущества, у термометров сопротивления есть еще ряд других преимуществ по сравнению с ртутно-толуоловыми термометрами: они безопасны в пожарном отношении, занимают мало места, легко допускают возможность осуществления интегрального контроля температуры, путем соответствующего расположения секций термометра сопротивления и, наконец, обеспечивают, при надлежащей конструкции регулятора, более высокое температурное постоянство рабочей точки. Недостатком конструкции, использующих термометр сопротивления в качестве индикатора, является их сложность и сравнительно высокая стоимость. В данном случае эти последние соображения не могли играть серьезного значения, так как задачей было создание уникальной установки, к которой, в первую очередь, предъявлялись требования качества, и вопросы стоимости и

¹ Индикатором для краткости изложения мы будем в дальнейшем называть температуро-чувствительный элемент, изменения температуры которого вызывают через посредство автоматического регулятора, включение или выключение нагревателей.

сложности, в известных пределах, могли рассматриваться как второстепенные. Поэтому мы остановились окончательно на термометре сопротивления, как на наиболее подходящем температурном индикаторе для данной цели.

§ 3. Выбор схемы терморегулятора

Максимальную чувствительность, при использовании термометра сопротивления в качестве индикатора, дает регулятор, основанный на принципе неуравновешенного моста Витстона с зеркальным гальванометром и фотоэлектрическим реле в качестве исполнительного аппарата. Принцип действия такого регулятора поясняется рис. 4. Пространство внутри круга T условно изображает помещение, температура которого должна поддерживаться постоянной.

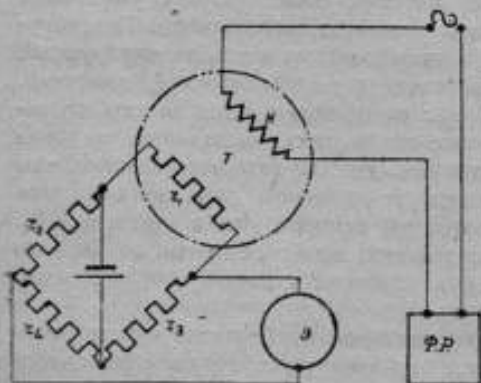


Рис. 4. Схема включения частей терморегулятора.

Изменение температуры помещения T вызывает соответственное изменение в величине сопротивления термометра сопротивления, что влечет за собой появление некоторой добавочной эдс на зажимах гальванометра G и вызывает в конечном счете перемещение светового пятна, с помощью которого осуществляется управление фотоэлектрическим реле ($\Phi. P.$), включающим нагреватели H . Схема собирается так, чтобы при неосвещенном фото-элементе нагреватели были выключены. Это гарантирует

от нежелательного перегрева помещения при перегорании лампочки осветителя. Тогда при падении температуры ниже заданной, за счет охлаждения через стены, световое пятно гальванометра будет перемещаться, и всегда можно, путем переключения проводов, соединяющих его с мостом, добиться того, чтобы это перемещение происходило в сторону окна фото-реле. Когда световое пятно попадет в окно фото-реле, включаются нагреватели и температура помещения будет расти, что вызовет передвижение светового пятна гальванометра в обратную сторону, фотоэлемент будет опять темным и нагреватели выключатся.

Серьезным дефектом этого способа управления фото-реле является то, что, если световое пятно гальванометра, при своем движении в сторону фото-элемента, включит нагреватели, но затем, вследствие тепловой инерции помещения, пройдет в том же направлении за фото-элемент, то нагреватели выключатся. Это поведет к тому, что температура помещения будет продолжать падать, зеркальце гальванометра будет двигаться в прежнем направлении и, следовательно, произойдет полная потеря управления температурой помещения данным регулятором. Бе-

роться с этим явлением можно различным образом, и окончательное решение этой задачи зависит от объекта, температуру которого надо регулировать. Если регулятор поддерживает температуру термостата с малой тепловой инерцией, в котором, благодаря правильной конструкции, обеспечено отсутствие больших колебаний температуры, то вполне достаточно немного увеличить время пребывания светового пятна на фото-элементе с помощью линзы большого диаметра, установленной в окне фото-реле, так, чтобы фото-элемент был в ее главном фокусе [17].

Если случайно колебания температуры настолько велики, что световое пятно будет проходить через всю линзу за столь короткое время, что нагреватели не успеют поднять температуру помещения до нужной величины, то отказ регулятора от работы может быть предупрежден с помощью оптико-электрического приспособления, посылающего электрический импульс нужной величины и направления в обмотку гальванометра каждый раз, как световое пятно собирается выйти за пределы окна фото-элемента.

Такое устройство может быть сравнительно просто осуществлено с помощью небольшой призмы, отклоняющей часть светового пучка, падающего на основной фото-элемент, от его основного направления так, чтобы он попадал на селеновый фото-элемент с запирающим слоем. Последний может быть непосредственно соединен с обмоткой гальванометра, и эдс, генерируемая им при освещении зеркальцем гальванометра, будет достаточна для создания импульса тока, отбрасывающего рамку гальванометра в нужном направлении.

Все эти методы, однако, непригодны при регулировании комнатной температуры, так как при открывании дверей в соседнее помещение происходит, обычно, настолько резкое отклонение температуры от заданной, что ничто, кроме механического упора, не сможет предохранить передвижную систему гальванометра от такого отклонения, при котором световое пятно окажется за пределами окна фото-элемента. Точно также только механический упор может защитить подвижную систему гальванометра от такого проскакивания в том случае, когда регулятор включается на работу при температуре, значительно более низкой, чем рабочая.

Так как последнее явление также часто может наблюдаться при регулировании температуры комнаты, то для удобства и надежности регулирования необходимо снабжать гальванометр механическим упором, ограничивающим свободу перемещения подвижной системы.

Лучше даже ставить не один, а два упора, ограничивая свободу перемещения подвижной системы гальванометра небольшим участком, как раз достаточным для осуществления включения и выключения нагревателей, так как при высокой чувствительности регулятора могут иметь место значительные отклонения подвижной системы гальванометра от положения равновесия, что может повлечь нежелательную деформацию подвеса и сказаться в конечном счете на постоянстве регулируемой температуры. Механический упор является несомненным злом и в данном случае его приходится ставить только в силу необходимости. Следует

обратить самое серьезное внимание на устройство этого приспособления, так как неудачное изготовление упора может свести на нет весь тот выигрыш в чувствительности, который может дать и дает, при правильном использовании, оптический контакт с исполнительным механизмом в виде фото-реле, по сравнению с обычным механическим контактом, осуществляемым с помощью контактного стрелочного гальванометра. Хороший упор представляет собой скоба, вырезанная из куска листовой латуни и прикрепленная к неподвижной магнитной системе гальванометра так, чтобы рамка одновременно затормаживалась с двух сторон. На рис. 5 изображено схематическое положение упорной скобы *Д* относительно подвижной системы *С* гальванометра. Края латунной скобы, которые будут приходить в соприкосновение с рамкой, надо отполировать и тщательно обезжирить промыванием в бензоле или ацетоне.

Если при изготовлении регулятора есть возможность изготовить для него гальванометр специальной конструкции, то следует обратить

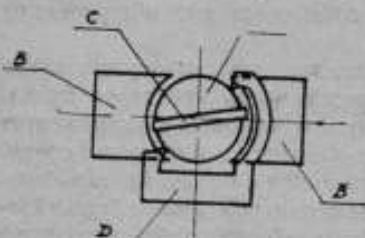


Рис. 5. Схематическое изображение деталей гальванометра с упором.

внимание на то, чтобы воздушный зазор между полюсными башмаками *В* и сердечником *А* не был слишком узок. Некоторые фирмы, в погоне за чувствительностью, делают его столь малым, что, при малейшем отклонении уровня гальванометра от правильного положения, рамка начинает цепляться за стенки сердечника или башмаков. В результате к трению об упор может прибавиться трение о стенки зазора, в котором движется рамка и у гальванометра не только значительно умень-

шится чувствительность, но может и совершенно утратиться свобода движения рамки. Увеличение междужелезного зазора в некоторых случаях может даже вызвать повышение чувствительности гальванометра к изменениям напряжения в диагонали моста. Это объясняется тем, что если при увеличении зазора чувствительность гальванометра уменьшается в a раз, то внешнее критическое сопротивление уменьшается при этом в a^2 раз. Если сопротивление секции моста Витстона, в диагонали которого включается гальванометр, меньше величины внешнего критического сопротивления для данного гальванометра, необходимо последовательно с гальванометром включить в диагональ некоторое добавочное сопротивление, причем такое, чтобы гальванометр был критически успокоен. При понижении внешнего критического сопротивления этот добавок может быть уменьшен, за счет чего увеличится чувствительность гальванометра к изменениям напряжения в диагонали моста.

§ 4. Зависимость чувствительности регулятора от данных моста и оперативных постоянных гальванометра

При составлении схемы моста и выборе гальванометра следует руководствоваться соображениями чувствительности и постоянства регулируемой температуры.

Для получения чувствительности, близкой к наивысшей, мост должен быть равноплечным. При этом, для оценки тока, идущего через гальванометр, при отклонении температуры от заданной (при которой мост уравновешен) на величину ΔT , можно воспользоваться следующей приближенной формулой:

$$I_g = \frac{V_0 \Delta T}{4(r_g + r_0)}, \quad (1)'$$

где: I_g — ток через гальванометр V — напряжение на зажимах моста, r_g — сопротивление гальванометра, r_0 — сопротивление каждого из плеч моста, α — температурный коэффициент термометра сопротивления и ΔT — изменение температуры от заданной, при которой мост находится в равновесии.

Точность формулы зависит от степени несбалансированности моста и при $\Delta T < 0,1^\circ \text{C}$ формула (1) будет давать погрешность при определении I_g всего порядка $0,5\%$, которой можно в данном случае пренебречь.

Чувствительность регулятора определяется тем наименьшим изменением температуры ΔT , которое в состоянии еще вызвать перемещение светового пятна на расстояние, достаточное для переключения фото-реле. Обозначим это расстояние, выраженное в миллиметрах, через d . Введем, кроме того, следующие обозначения: D — расстояние от зеркала гальванометра до фото-элемента, выраженное в метрах; C — динамическая постоянная гальванометра, т. е. сила тока, вызывающая отклонение светового пятна гальванометра на 1 мм по шкале, находящейся на расстоянии 1 м от зеркала гальванометра.

Найдем из формулы (1) значение ΔT , соответствующее тому минимальному току I_g , при котором световое пятно передвигается на величину d , достаточную для срабатывания реле.

В этом случае

$$I_g = C \frac{d}{D}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим:

$$\Delta T = \frac{4(r_g + r_0) d C}{V_0 D}. \quad (3)$$

Выражение (3) дает возможность наметить правильный путь для достижения высокой чувствительности регулятора.

Рассмотрим отдельно, что может дать для повышения чувствительности изменение отдельных параметров схемы, входящих в выражение (3).

Формула (3) справедлива только для простейшей схемы равноплечного моста, одним из плечей которого является термометр сопротивления

¹ Формула (1) выводится в предположении, что три плеча моста намотаны проводом из материала с практически нулевым температурным коэффициентом.

Рассмотрим схему моста, изображенную на рис. 6.
В случае его равноплечности

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_0.$$

Чтобы в процессе работы гальванометр был критически успокоен, должно быть выполнено условие:

$$r_0 + r_k + r_c = R_k,$$

где R_k — сопротивление критического успокоения гальванометра.

Формула (3) написана для случая, когда $r_k = 0$; для схемы, изображенной на рис. 6, ее следует написать в виде,

$$\Delta T = \frac{4(r_c + r_k + r_0)}{V_0} \frac{dC}{D}. \quad (4)$$

Переменные параметры, стоящие в правой части равенства (4), определяются конструкцией моста (r_0 , α , V), конструктивными постоянными гальванометра (r_c , r_k , C) и конструкцией фото-реле (d и D). Для получения высокой чувствительности регулятора надо уменьшать величину ΔT .

Наивысшую чувствительность ($\Delta T = \text{min}$) можно было бы получить, взяв сопротивления плеч моста $r_0 = R_k - r_c$ и применив гальванометр с максимальной токовой чувствительностью (минимальным значением динамической постоянной C).

Первое условие непременно должно выполняться, если имеется свобода в выборе гальванометра; второе условие, обычно, не выполняется, так как гальванометры с высокой токовой чувствительностью имеют внешнее критическое сопротивление порядка $10^4 - 10^5 \Omega$, и

делая термометр сопротивления с малой тепловой инерсией, обладающей столь большим сопротивлением, затруднительно по конструктивным соображениям.

Обычно r_0 нежелательно брать больше 500Ω . Наиболее часто r_0 берется равным 50Ω . Если величина r_0 задана, то при выборе гальванометра надо стремиться к тому, чтобы его внешнее критическое сопротивление было равно r_0 , а динамическая постоянная C имела минимальное значение.

Кроме того, при выборе гальванометра следует обратить внимание на то, чтобы время установки рамки, растущее одновременно с периодом свободных колебаний, не было слишком большим. Чувствительность моста прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению V . Нельзя, однако, произвольно задавать величину V , так как нельзя пропускать через термометр сопротивления ток, больший некоторого

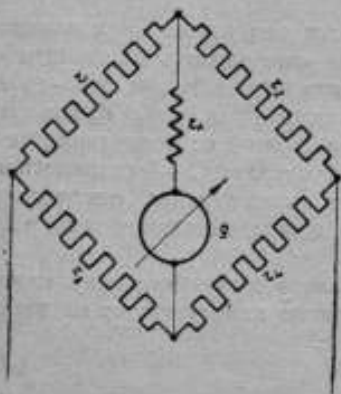


Рис. 6. Схема моста Витстона.

фиксированного значения i_{\max} . Величина i_{\max} зависит от диаметра провода, на которого наматывается термометр сопротивления, его конструкции, допустимой величины перегрева проводов термометра над температурой окружающей среды и может быть точно определена только экспериментальным путем после изготовления термометра сопротивления. Максимальное допустимое значение для V будет, очевидно, равно

$$V_{\max} = 2r_0 i_{\max}.$$

Обычно, для изготовления термометра сопротивления используются материалы, перечисленные в табл. 1.

Таблица 1

Название металла	Удельное сопротивление в омах X см	Температурный коэффициент электр. сопротивления
Железо	$10 \cdot 10^{-6}$	$+6 \cdot 10^{-2}$
Никель	$7 \cdot 10^{-6}$	$+6,2 \cdot 10^{-2}$
Платина	$10 \cdot 10^{-6}$	$+3,9 \cdot 10^{-2}$
Медь	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$+4,1 \cdot 10^{-2}$

Температурный коэффициент для обеспечения максимальной чувствительности должен быть наибольшим, однако, разница в температурных коэффициентах у всех чистых металлов не настолько велика, чтобы это соображение могло быть решающим при выборе материала для термометра сопротивления.

Важнее учесть совокупность прочих физических свойств материалов, из которых важнейшими в данном случае являются: удельное электрическое сопротивление, независимость температурного коэффициента от температуры, отсутствие остаточных изменений или перекристаллизации в металле в рабочем интервале температур и, наконец, антикоррозионные свойства. Кроме того, немаловажными при выборе материала являются вопросы стоимости. Так, например, наилучшим материалом по физическим свойствам является платина, однако, она применяется только в самых ответственных случаях вследствие своей высокой стоимости.

Применение платинового термометра сопротивления почти неизбежно, если необходимо регулировать температуру печи с рабочей температурой выше 400°C , или если от регулятора требуется наивысшее достижимое постоянство во времени рабочей температуры, при одновременном требовании, чтобы материал термометра сопротивления не обладал магнитными свойствами.

При температурах выше 400°C нельзя использовать другие термометры сопротивления, кроме платиновых, так как все прочие металлы, пригодные для изготовления термометров, либо сильно окисляются при высоких температурах, либо испытывают перекристаллизацию, вследствие чего термометр сопротивления после каждого нагревания несколько изменяется по величине сопротивления.

При регулировании комнатной температуры не имеет смысла использовать платиновый термометр, потому что постоянство рабочей точки, которое может обеспечить этот вид термометра, будет излишним и все равно не сможет быть использовано в условиях работы в термостатной комнате. В такой обстановке практическое постоянство рабочей температуры сможет обеспечить более дешевый никелевый термометр сопротивления с большим значением α .

Никель следует предпочесть железу и меди, так как он мало подвержен коррозии, и его сопротивление будет поэтому лучше сохранять свою величину с течением времени.

Проволоку из чистого никеля подходящего диаметра не всегда удается достать, поэтому в тех случаях, когда никеля нет, приходится выбирать между медью и железом.

Мы считаем, что лучше делать медный термометр сопротивления, так как хотя чувствительность регулятора будет при этом меньше, но зато и тенденция к окислению при комнатной температуре у меди значительно меньше и поэтому такое сопротивление будет более устойчивым.

Из изложенного вытекает, что при проектировании терморегуляторов мы очень редко бываем свободны в выборе материала с подходящим α и что от изменения этого параметра мало зависит чувствительность регулятора, так как возможные значения α практически лежат в пределах:

$$4 \cdot 10^{-3} \leq \alpha \leq 6 \cdot 10^{-3}.$$

Расстояние между зеркальцем гальванометра и фото-элементом D выгодно иметь большим. Проще всего можно достичь этого, установив гальванометр отдельно от фото-реле. Не следует, однако, увлекаться увеличением D , так как с расстоянием D связано значение d того промежутка, на который должно переместиться световое пятно, чтобы произошло переключение фото-реле. Зависимость этих величин друг от друга довольно сложна, но во всяком случае, вследствие уменьшения интенсивности светового потока, падающего на фото-элемент, при увеличении расстояния между зеркалом и гальванометром величина d также будет увеличиваться и несколько ослабит эффект, дающий увеличение D .

Обращаясь к величине d , следует отметить, что она должна быть как можно меньше не только для того, чтобы обеспечить максимальную чувствительность, но и чтобы обеспечить постоянство регулируемой температуры.

Значение d зависит от характеристики фото-реле и интенсивности светового пятна гальванометра.

Для уменьшения d чувствительность фото-реле должна быть максимальной.

§ 5. Конструкция термометра сопротивления

Термометр сопротивления является самой ответственной частью регулятора. От постоянства его сопротивления зависит постоянство регули-

руемой температуры, а от его тепловой инерции — амплитуда колебаний температуры за время рабочего цикла¹.

Тепловая инерция термометра сопротивления зависит от теплоемкости и теплопроводности материала, из которого он сделан, и условий, при которых осуществляется тепловой контакт с окружающей средой, при регулировании комнатной температуры — с воздухом. Если теплоемкость материала C , теплопроводность K и ρ — плотность его, то тепловая инерция будет тем меньше, чем больше отношение

$$\frac{K}{C\rho}$$

Точно также тепловая инерция будет, очевидно, уменьшаться при увеличении поверхности термометра S и уменьшении его объема V ,

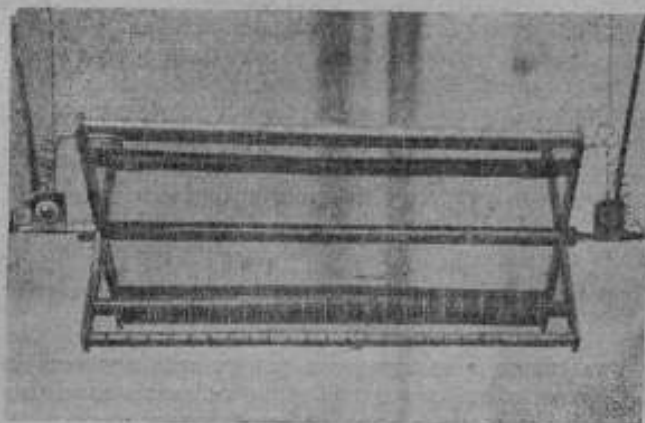


Рис. 7. Термометр сопротивления.

т. е. будет обратно-пропорциональна отношению $\frac{S}{V}$. Если считать, что термометр сопротивления представляет собой бесконечно длинный цилиндр с радиусом r и длиной l , то отношение

$$\frac{S}{V} = \frac{2\pi r l}{\pi r^2 l} = \frac{2}{r}$$

т. е. тепловая инерция термометра сопротивления прямо-пропорциональна диаметру провода, из которого он намотан.

По ряду причин было бы, однако, нецелесообразно брать для изготовления термометра сопротивления очень тонкий провод, так как стабильность электрической величины сопротивления термометра уменьшается с уменьшением диаметра провода [21]. При применении голого провода, свободно висящего на каркасе из изолирующего материала, это объясняется коррозией провода и его вытягиванием за счет деформаций каркаса. При применении изолированного провода к упомянутым

¹ Рабочим циклом мы будем называть цикл изменений температуры помещения за промежуток времени между двумя последовательными выключениями (выключениями) нагревателей.

причинам может еще прибавиться изменение сопротивления из-за механических натяжений в изоляции, вызываемых колебаниями относительной влажности воздуха в помещении.

Из этих соображений лучше всего применить провод диаметром не меньше 0,1,—0,2 мм.

В описываемой установке был применен голый провод из электролитического никеля, диаметром 0,15 мм. Провод был намотан на каркас из четырех миканитовых трубок, расположенных по ребрам прямоугольного параллелепипеда. Для защиты намотки от механических повреждений на некотором расстоянии над основной намоткой делалась вторая намотка толстым металлическим проводом (диаметром 1 мм).

Такого вида термометр сопротивления изображен на рис. 7.

Благодаря „ажурности“ конструкции термометров, они, будучи подвешены к потолку комнаты, на высоте около 2 м над уровнем пола, прекрасно омывались конвекционными токами воздуха и имели ничтожную тепловую инерцию. Три термометра, подвешенные на некотором расстоянии друг от друга и соединенные последовательно, включались в качестве одного из плеч в мост терморегулятора и, таким образом, вполне достигалась интегральность контроля комнатной температуры. Общее сопротивление трех термометров, соединенных последовательно, составляло около 270Ω.

§ 6. Выбор схемы исполнительного механизма регулятора (фото-реле)

При выборе схемы и конструкции исполнительного механизма регулятора, работающего от светового пятна гальванометра, мы стремились удовлетворить следующим техническим требованиям: а) отсутствие контактов, замыкающих большую нагрузку на воздухе; б) уверенное включение контактов силового реле; в) наличие аварийной системы, выключающей нагрузку в случае отказа от работы любой части фото-реле; г) возможность продолжительной работы без смены деталей и ламп и без дополнительных наладиваний аппарата в целом; д) полное питание от сети переменного тока; е) максимальное использование готовых радиодеталей.

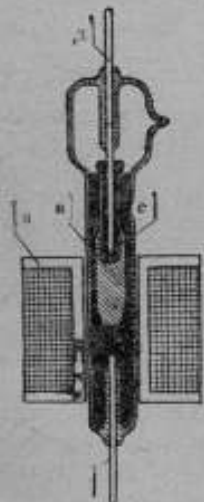


Рис. 8. Ртутное вакуумное реле.

Так как в продаже не появляются мощные вакуумные силовые реле, то для выполнения первого пункта изложенных выше требований были изготовлены ртутные вакуумные реле с разрывной мощностью порядка 1,5 kW (15 А, 127 В) при собственном потреблении мощности, равном 3 Вт, сконструированные специально для данной цели инж. Б. Н. Диньковым.

При конструировании реле был использован принцип, положенный в основу ряда конструкций вакуумных силовых реле, появившихся за границей за последние годы [24]. Чертеж реле приведен на рис. 8.

Работа реле протекает следующим образом.

При возрастании силы тока в катушке B (рис. 8), в нее втягивается подвижной сердечник A , сделанный из мягкого железа и свободно плавающий в ртути, налитой в стеклянный резервуар реле. С подвижным сердечником жестко связана стеклянная чашечка C , наполненная ртутью. В чашечку C заходит верхний токонесущий молибденовый провод D . При передвижении чашечки провод всегда остается погруженным в налитую в нее ртуть (для этого длина погруженной в ртуть части провода D берется несколько большей максимального возможного перемещения чашки C).

При отсутствии тока в катушке B реле, поверхность ртути, налитой в стеклянный резервуар реле и находящейся в контакте с нижним молибденовым вводом, находится на 5—7 мм ниже мениска ртути в чашечке C .

При втягивании сердечника ртуть, налитая в чашечку C , приходит в соприкосновение с ртутью, налитой в баллон реле, что приводит к замыканию тока силовой цепи. Воздух в резервуаре реле откачивается. Поэтому замыкание цепи происходит между ртутными поверхностями в вакууме. Имеются указания [24], что реле этого типа выдерживают более 1,5 мил. переключений. Мощность изготовленных реле лимитировалась, главным образом, током, который можно было пропустить через молибденовые вводы D , не вызывая слишком сильного их перегрева. Диаметр вводов был взят равным 2 мм. Было решено для большей надежности при длительной работе не пропускать через реле тока более 12 А. При непродолжительной работе реле этого типа разрывало цепь с током, силой в 25 А, при напряжении, равном 120 В, без сильного искрения.

Для успешной работы силового реле ток в катушке реле должен быстро возрастать до величины, достаточной для замыкания силовой цепи, и затем сохранять некоторое время величину, достаточную для того, чтобы реле оставалось замкнутым.

Включение и выключение реле должно производиться совершенно четко, без „неуверенности“, создаваемой колебаниями тока, управляющего сердечником реле.

„Неуверенное“ включение или выключение приводит к зажиганию вольтовой дуги между контактами реле, что может повести к преждевременному его разрушению.

Незначительное сотрясение зеркального гальванометра может вызвать продолжительные колебания светового пятна, управляющего фото-реле, и колебания тока в катушке реле. В конечном счете это может привести к слишком частому зажиганию дуги между контактами реле.

Для полного исключения возможности возникновения такого явления была выбрана схема фото-реле, гарантирующая невозможность возникновения колебаний тока с малым периодом в катушке оконечного реле.

Скелет избранной схемы изображен на рис. 9.

Здесь L_2 — мощная электронная лампа, управляющая током, проходящим через обмотку силового реле P_2 . В анодной цепи лампы L_1 , управляемой фото-элементом, включено телефонное реле P_1 . При не-

освещенном фото-элементе Φ обе лампы запираются отрицательным смещением, полученным от сопротивлений r_2 и r_4 , через высокоомные сопротивления r_1 и r_3 , служащие утечками сеток.

При освещении фото-элемента Φ , отпирается лампа L_1 и срабатывает реле P_1 . При замыкании контактов реле P_1 сетка лампы L_2 оказывается соединенной с катодом той же лампы через сопротивление r_5 . Сопротивление r_5 включается для предохранения контактов реле P_1 от прохождения сильного тока в момент замыкания его контактов. Величина r_5 берется во много раз меньшей, чем у сопротивления r_3 , через которое задается отрицательное смещение, так что при замыкании кон-

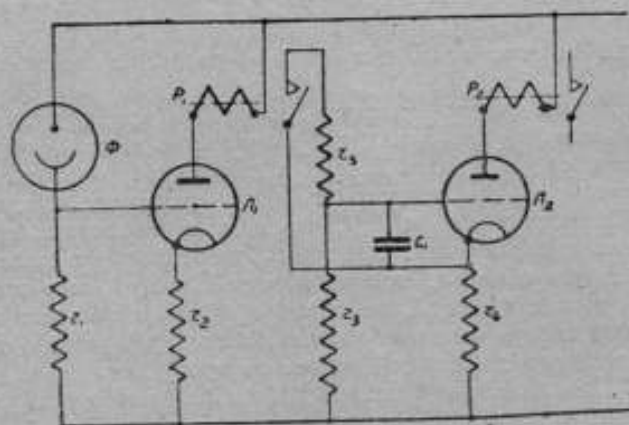


Рис. 9. Схема фото-реле.

тактов реле P_1 сетка лампы L_2 оказывается практически накоротко соединенной с катодом и ее анодный ток возрастает до величины, достаточной для срабатывания силового реле P_2 .

Таким образом, освещение фото-элемента приводит к замыканию оконечного реле, т. е. к включению нагревателей. Наличие конденсатора C , включенного между сеткой и катодом лампы L_2 , обеспечивает выдержку времени T между моментами выключения реле P_1 и P_2 . Желательное значение выдержки времени, равное в данном случае

$$T = r_3 C_1 \ln \frac{v_1}{v_2},$$

где v_1 и v_2 — значения разности потенциалов на концах сопротивления r_3 , соответствующие моментам включения и выключения оконечного реле, легко могло быть получено подбором значений r_3 и C_1 .

Наличие заранее фиксированного минимального промежутка времени между моментами включения и выключения оконечного реле P_2 , а также четкость процессов включения и выключения, гарантируемые данной схемой фото-реле, устранили возможность длительного зажигания дуги в оконечном реле или слишком частых его переключений.

Применение двух электронных ламп и фото-реле не только дает возможность создать реле с выдержкой времени, но и значительно облегчает конструирование и налаживание фото-реле, а также способствует удлинению срока его службы и надежности действия.

Описываемый тип фото-реле предназначался для управления нагревателями, мощностью в 2—3 kW. Так как не представлялось возможным изготовить оконечные реле, способные разорвать ток такой мощности, то нагреватели были разбиты на две группы (по 1¹/₂ kW каждый), включение и выключение которых производилось двумя оконечными реле. Собственное потребление мощности каждого из них составляло около 3—4 W. При отсутствии второй лампы было бы трудно управлять с помощью фото-элемента анодным током электронной лампы с нагрузкой в анодной цепи в виде двух реле с потреблением мощности в 3—4 W каждое.

При применении регулятора, собранного по схеме рис. 9, в анодную цепь лампы L_1 может быть включено реле весьма малой мощности. Например, в собранном аппарате было поставлено телефонное реле с собственным потреблением мощности порядка 0,1 W. Чем меньше мощность, потребляемая реле, тем меньше изменения анодного тока лампы, требующиеся для его переключения. Изменения анодного тока лампы вызываются соответствующими изменениями тока фото-элемента. Поэтому понижение мощности реле, включенного в анодную цепь лампы, управляемой фото-элементом, повышает чувствительность фото-реле, так как включение и выключение оконечного реле происходит при меньших изменениях фото-тока. Увеличение чувствительности электронного реле подобным путем, т. е. за счет уменьшения, требующегося для срабатывания реле, изменения фото-тока ΔI , очень выгодно и значительно облегчает конструирование фото-реле в целом.

Прирост фото-тока ΔI происходит вследствие прироста светового потока $\Delta \Phi$, отраженного на фото-элемент зеркальцем гальванометра, т. е.

$$\Delta I = K \Delta \Phi, \quad (1)^1$$

где K — чувствительность фото-элемента, выраженная в микроамперах на люмен.

Если световое пятно гальванометра имеет прямоугольную форму, то величина $\Delta \Phi$ будет прямо пропорциональна перемещению светового пятна:

$$\Delta \Phi = C \delta, \quad (2)$$

где δ — перемещение светового пятна в миллиметрах, а C — коэффициент пропорциональности в люменах на миллиметр.

Из выражений (1) и (2) получаем:

$$\Delta I = KC \delta. \quad (3)$$

¹ Выражение (1) справедливо только при условии постоянства напряжения на фото-элементе.

Обозначим ширину светового пятна гальванометра через δ_{\max} , тогда наибольшее изменение тока фото-элемента, которое может создать световое пятно гальванометра, соответственно будет Δi_{\max} , и, следовательно

$$\Delta i_{\max} = KC\delta_{\max}.$$

Фото-реле будет работать до тех пор, пока

$$\Delta i_{\max} = KC\delta_{\max} > \Delta i_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где $\Delta i_{\text{ср}}$ — прирост фото-тока, необходимый для срабатывания фото-реле.

Перепишем еще раз выражение (4) в виде

$$K\Phi_{\max} > \Delta i_{\text{ср}}, \quad (4')$$

где $\Phi_{\max} = K\delta_{\max}$ — максимальный световой поток, который может быть послан зеркальцем гальванометра на фото-элемент (при полном наведении светового пятна на окно фото-элемента).

Выражение (4') позволяет оценить коэффициент запаса фото-реле (отношение рабочего тока $K\Phi_{\max}$ к току срабатывания $\Delta i_{\text{ср}}$).

$$K_{\text{запаса}} = \frac{K\Phi_{\max}}{\Delta i_{\text{ср}}}.$$

При изготовлении описываемого фото-реле было желательно обеспечить продолжительную (не менее 1000 час.) работу без замены фото-элемента и лампочки накаливания осветителей.

Для этого необходимо было иметь большое значение коэффициента запаса, так как газополные фото-элементы, наиболее подходящие для устройства фото-реле, работающего от зеркального гальванометра, в первые же 50—100 час. работы теряют значительную часть своей чувствительности, иногда до 50% [3, 4, 5, 6].

В продаже, обычно, появляются только неполноценные фото-элементы, и у тех экземпляров из них, с которыми приходилось иметь дело автору данной статьи, указанная потеря чувствительности (на 30—50%) всегда имела место.

В дальнейшем падение чувствительности фото-элемента замедляется и при наличии перерывов в работе, она может колебаться, возрастая за время перерыва, но не делаясь меньше некоторой предельной величины.

Учитывая изложенное, необходимо считаться с тем, что величина чувствительности K фото-элемента может уменьшиться, после продолжительной работы (порядка 1000 час.), в 4—5 раз (т. е. упасть до 25—20% первоначального значения).

Величина светового потока Φ_{\max} тоже будет уменьшаться с течением времени, вследствие распыления материала нити лампы, осветителя гальванометра и загрязнения промежуточных стеклинных поверхностей (стенки линзы осветителя, стекло гальванометра, поверхность колбы фото-элемента). Однако, при экономичной работе (недокале лампы) величина Φ_{\max} не будет подвержена столь сильным изменениям с течением времени, как чувствительность фото-элемента.

Из этого видно, что коэффициент запаса должен быть около 7 для гарантии бесперебойной работы в течение промежутка времени порядка

1000 час. Выгодно сделать его еще больше, так как это облегчит замену фото-элемента после окончания его срока службы. В продаже встречаются газонаполненные фото-элементы с чувствительностью K от 30 до $500 \frac{\mu A}{lm}$.

Выгоднее использовать фото-элементы с максимальной чувствительностью, так как тогда, при заданном ΔI_{cp} , можно работать с малыми значениями Φ_{max} , а возможность уменьшить Φ_{max} позволяет заменить лампу осветителя менее мощной или уменьшить ее накал, или сделать и то и другое.

Наилучшим было бы установление значения такого тока срабатывания, чтобы при условии применения фото-элемента с любым K от 30 до $500 \frac{\mu A}{lm}$ и при условии недокала лампочки осветителя на 20% , что гарантирует около 2000 час. горения, фото-реле имело все же коэффициент запаса около 5. Подобное фото-реле могло бы работать несколько тысяч часов без смены фото-элемента у лампочки осветителя.

Достигнуть столь малого значения для ΔI_{cp} можно, главным образом, за счет уменьшения собственного потребления мощности реле P_1 . При условии выполнения фото-реле по схеме рис. 9, мощность, которой управляет реле P_1 мала, и в силу этого электро-механическое (тепловое или электромагнитное) реле практически любой мощности, вплоть до реле типа контактного гальванометра, может быть использовано в качестве реле P_1 .

Таким образом, введение второй лампы в схему существенно повышает ее надежность, так как при двух лампах коэффициент запаса может быть сделан больше и увеличивает срок службы деталей фото-реле.

Аварийное реле представляло собой электронное реле, управляемое ртутным контактным термометром.

Схема аварийного реле приведена на рис. 10.

При разомкнутых контактах KT ртутного термометра сетка лампы L имеет потенциал, близкий к потенциалу катода, с которым она соединяется через высокоомное (около $10M\Omega$) сопротивление r_2 . При этом, через лампу L проходит максимальный ток, и реле P замкнуто.

Если произойдет авария с фото-электрическим регулятором (например, рамка гальванометра потеряет свободу передвижения в тот момент, когда световое пятно будет находиться на фото-элементе или произойдет заедание в оконечном реле и оно останется в замкнутом состоянии при отсутствии тока в его обмотке), в результате которой нагреватели останутся включенными, то температура комнаты будет возрастать и ртуть замкнет контакты термометра KT . На сетку лампы L будет подано при этом отрицательное смещение от сопротивления r_2 через сопротивление r_1 ($r_1 \ll r_2$); анодный ток лампы L уменьшится до величины, при которой происходит отпущение реле P и оно прервет ток, идущий через нагреватели.

Фото-реле было собрано в одном ящике с аварийным реле, и они имели общее питание. Из соображений надежности и долговременности они питались выпрямленным и сглаженным переменным током.

Кроме того, в окончательную схему прибора было внесено еще одно усовершенствование, с целью создания постоянных сеточных смещений у всех трех ламп, работающих как электронные реле, и поддержания постоянного напряжения на фото-элементе. При работе электронного реле, вследствие большой разницы между анодным током лампы при включенном и выключенном электромагнитном реле, управляемым ею, имеют место сильные колебания напряжения на сопротивлениях, задающих отрицательное смещение на сетки ламп (сопротивления r_2 и r_1 на рис. 9 и r_3 на рис. 10).

По аналогичной причине имеют место сильные колебания напряжения на зажимах фото-элемента.

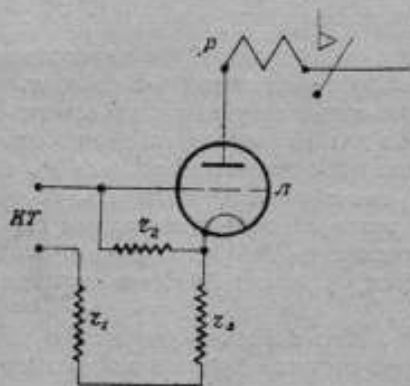


Рис. 10. Схема аварийного реле.

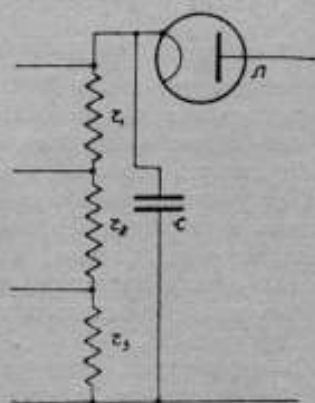


Рис. 11. Схема потенциометра.

Для устранения этого явления в изготовленном фото-реле смещения на сетки всех ламп и питание фото-элемента, получаются от потенциометрически включенных сопротивлений, питаемых отдельным выпрямителем.

Схема этого устройства дана на рис. 11.

Так как сумма сопротивлений $r_1 + r_2 + r_3$ была взята порядка $1 \text{ м}\Omega$, то введение этой схемы не вызывает существенного повышения расхода мощности (на накал лампы L расходуется всего $0,3 \text{ Вт}$). При небольшом недокале лампы L может, повидимому, работать в этой схеме значительное время без смены, так как потребление мощности в ее анодной нагрузке составляет всего $0,16 \text{ Вт}$.

Полная схема регулятора показана на рис. 12.

Схема представляет собой простое соединение ранее разобранных схем, изображенных на рис. 9, 10 и 11, и не нуждается, поэтому, в пояснениях.

В регуляторе применены следующие детали:

1. Лампы: L_1 —УО—104, L_2 —УО—104, L_3 —УБ—132, L_4 —неоновая лампа (220 В), L_5 —ВО—116, L_6 —УБ—110.

2. Сопротивления: r_1 — $1 \text{ м}\Omega$, r_2 — $15 \text{ м}\Omega$, r_3 — $15 \text{ м}\Omega$, r_4 — $50 \text{ к}\Omega$.

$r_1 = 20 \text{ м}\Omega$, $r_2 = 300 \text{ к}\Omega$, $r_3 = 100 \text{ к}\Omega$, $r_4 = 700 \text{ к}\Omega$, $r_5 = 9 \text{ к}\Omega$ (6 W).

3. Конденсаторы: C_1 , C_2 и C_3 бумажные, завода „Красная заря“; $C_1 = 0,5 \mu\text{F}$; $C_2 = 2 \mu\text{F}$; $C_3 = 2 \mu\text{F}$.

C_4 — электролитический, завода „Электросигнал“, емкостью $4 \mu\text{F}$.

4. Реле P_1 и P_2 — ртутные вакуумные силовые, изготовленные во ВНИИМе. P_3 — телефонное реле завода „Красная заря“.

5. Фото-элемент Φ — цезиевый газонаполненный, типа ЦГ—1, с чувствительностью $500 \frac{\mu\text{A}}{\text{лм}}$.

6. В качестве силового трансформатора был применен перемотанный трансформатор типа ТС—28.

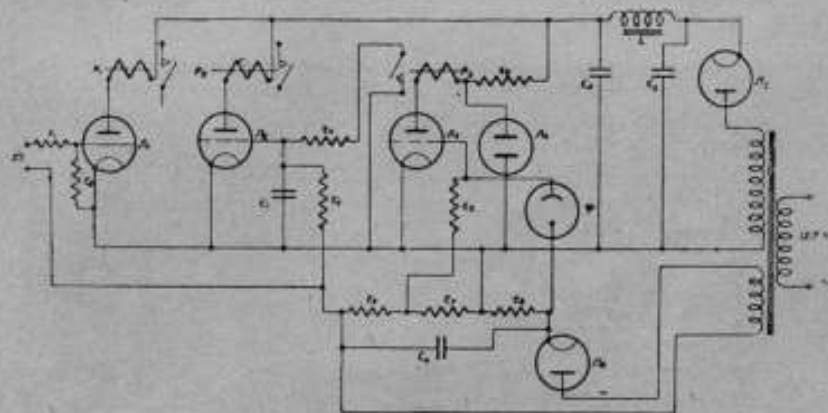


Рис. 12. Полная схема фото-реле и аварийного реле.

§ 7. Характеристики отдельных элементов фото-реле

Разные составные элементы исполнительного механизма фото-реле имели различные коэффициенты запаса — $K_{\text{запаса}}$. Наибольший коэффициент запаса был у системы, состоящей из фото-элемента и управляющего светового пучка. При лампе осветителя в 15 W, работающей при напряжении на 20% ниже номинального, реле срабатывало при уменьшении чувствительности фото-элемента до $30 \frac{\mu\text{A}}{\text{лм}}$. Так как нормально регулятор работал с фото-элементом, обладающим чувствительностью $500 \frac{\mu\text{A}}{\text{лм}}$, то коэффициент запаса для собственно фото-реле можно считать равным $K_{\text{запаса}} = \frac{500}{30} = 17$. Напряжение на фото-элемент, при освещении его, равнялось 170 V, что составляет 70% номинального. Такое большое значение $K_{\text{запаса}}$, в соединении с облегченным режимом работы осветителя и фото-элемента, обеспечило исключительно долгий срок работы фото-реле без смены частей. За год после сдачи его в эксплуатацию оно

находилась в работе около 3000 час. За все это время пришлось сменить один раз лампы УО — 104 и УБ — 132, все остальные лампы работают без смены с момента изготовления фото-реле.

Коэффициенты запаса электромагнитных реле были взяты значительно меньшими. При налаживании аппарата ток через реле P_3 составлял (при полностью освещенном фото-элементе) 15 мА при токе срабатывания 5 мА, т. е. значение $K_{запаса}$ равнялось 3.

Такое большое значение $K_{запаса}$ для реле P_3 пришлось выбрать по той причине, что оно управляется фото-элементом, чувствительность которого быстро уменьшится с течением времени. Брать подобные значения $K_{запаса}$ для окончных реле P_2 и P_3 не только не имело смысла, поскольку характеристики электронных ламп, управлявших ими, достаточно стабильны, но и было невозможно, так как привело бы к значительному перегреву катушек реле.

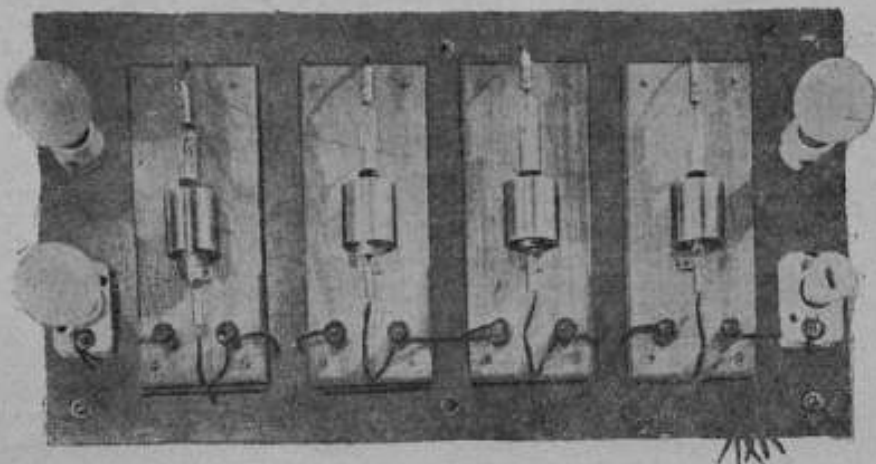


Рис. 13. Щит с ртутными реле.

Поэтому значение $K_{запаса}$ для реле P_2 было выбрано около 1,3; для реле P_1 , которые все время остаются включенными и поэтому, с одной стороны, сильнее перегреваются, а с другой — не нуждаются в больших значениях рабочего тока, поскольку для них важно только обеспечить прохождение тока, большего, чем ток отпускания, — значение $K_{запаса}$ было взято весьма близким к единице. Ввиду выбора значений $K_{запаса}$, близких к предельному значению, при котором вообще возможна работа реле, в монтажной схеме регулятора была предусмотрена возможность изменения $K_{запаса}$ для реле P_1 и P_2 путем включения лампы накаливания в анодные цепи ламп УО — 104, последовательно с реле.

Реле вместе с лампами накаливания, включенными для регулировки тока, проходящего через их катушки, были смонтированы на отдельном щите, укрепленном на стене около ящика со всеми остальными деталями фото-реле (рис. 13).

Поскольку мощные оконечные реле были сконструированы для данного аппарата и являются нестандартной деталью, мы считаем целесообразным привести усредненную характеристику реле этого типа, определенную путем усреднения значений, полученных в результате испытания 8 реле. В этом случае имеем: сопротивление обмотки возбуждения 2500 Ω , минимальный ток срабатывания 27 мА, ток уверенного срабатывания 29 мА, рабочий ток 35 мА, ток отпускания 17 мА, управляемая мощность 1,5 кВт; время отпускания и срабатывания выражается долями секунды.

Электронное реле, управляющее электромагнитным оконечным реле R_1 , имело выдержку времени, при отпускании, около 2 сек. Принимая во внимание большую теплоемкость комнаты, это замедление в выключении нагревателей не могло вызвать сколько-нибудь существенных колебаний в комнатной температуре.

Большое значение имеет правильный выбор величин сопротивлений утечек сеток, в данном случае r_2 , r_3 и r_4 , и сопротивлений потенциометра, задающего сеточные смещения на все лампы. Беря общее сопротивление потенциометра высоким, мы добиваемся, во-первых, снижения потребления мощности, а во-вторых, уменьшения пульсаций напряжения в цепи потенциометра. Величины сопротивлений r_2 и r_3 должны быть значительно больше величин сопротивлений участков потенциометра, от которых задается сеточное смещение, иначе распределение напряжений в потенциометре будет меняться при работе реле.

Особенно важно иметь сопротивление r_3 большой величины, так как изменение сеточного напряжения лампы L_3 , управляемой фото-элементом, в первом приближении можно считать прямо-пропорциональным величине r_3 (равным $i r_3$, где i — ток фото-элемента).

При очень больших значениях r_3 схема оказывается неустойчивой. Это объясняется несовершенством изоляции сетки электронной лампы L_3 (УБ—132). При сборке макета регулятора на шите, когда все лампы хорошо охлаждались конвекционными токами воздуха, схема устойчиво работала при $r_3 = 300$ м Ω . После же того, как панель регулятора была установлена в ящик, работа схемы оказалась неустойчивой. Вследствии разогрева цоколя лампы изоляция сетки стала постепенно уменьшаться, и, так как сопротивление изоляции было сравнимо с величиной сопротивления r_3 , то величина анодного тока также стала непостоянной, возрастая по мере падения сопротивления изоляции сетки. Создать при этом какой-либо определенной режим изменений анодного тока лампы, в зависимости только от фото-тока, было невозможно. Постепенно уменьшая значение r_3 , опытным путем удалось установить, что для полного исключения отмеченного выше явления надо понизить значение r_3 до величины порядка 20 м Ω .

Не следует отклоняться от этой величины более, чем на $\pm 50\%$, чтобы не понижать чувствительность или стабильность схемы. Это замечание будет, конечно, верно только для бариевых ламп, с стандартным сопротивлением изоляции (не менее 100 м Ω), выпускаемых заводом „Радиолампа“.



§ 8. Мост Витстона

Данные термометров сопротивления были приведены раньше. Мост Витстона, одним из плеч которого служил термометр сопротивления, был сделан равноплечным (сопротивление каждого плеча равнялось 217Ω) для получения наибольшей чувствительности. Остальные три плеча были изготовлены из манганина. Мост был уравновешен при 20°C , в нем были замонтированы катушки сопротивлений постоянной величины и он не имел никаких приспособлений для плавной регулировки температуры. Напряжение, приложенное к мосту, равнялось приблизительно 10 V . Питание моста производилось выпрямленным переменным током. В выпрямителе была поставлена электронная лампа $УО-104$ (анод соединен с сеткой), но, конечно, в данном случае гораздо лучше было бы применить купроксый выпрямитель. Питая мост от одного выпрямителя с фото-реле нельзя, это может привести к непостоянству регулируемой температуры. В диагональ моста был включен зеркальный гальванометр, с кварцевым подвесом. (Динамическая постоянная $2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ам}}{\text{мм}}$, внешнее критическое сопротивление 900Ω , сопротивление рамки 50Ω , период колебания 2 сек.).

§ 9. Испытание регулятора

Основные характеристики регулятора, его чувствительность, степень постоянства регулируемой температуры и инерционность, не могли быть определены непосредственно при регулировании комнатной температуры, так как при высокой стабильности и чувствительности регулятора качество регулировки комнатной температуры лимитировалось бы несовершенством самой комнаты как термостата.

Поэтому регулятор предварительно был испытан при регулировании температуры термостата в условиях, весьма близких к условиям регулирования температуры комнаты, без наблюдателей.

Для испытания был использован воздушный термостат с объемом внутреннего (рабочего) пространства $0,15 \text{ м}^3$. Стенки внутреннего пространства термостата образовал латунный бак диаметром, равным высоте (приблизительно $0,6 \text{ м}$). Термостат имел тепловую изоляцию в виде оболочек из пробки, войлока и деревянных досок общей толщиной 15 см . Для более точного воспроизведения условий работы в комнате были использованы не обычные нагреватели термостата, а электрическая лампочка, мощностью 200 W , поставленная на дно внутреннего бака термостата. В центре бака был расположен термометр сопротивления, а в верхней части — переключенный термометр Бекмановского типа, с подразделениями на сотые доли градуса.

При подобном расположении нагревателя (электрической лампочки) во внутреннем пространстве термостата должно было установиться, после достижения теплового равновесия, некоторое неравномерное распределение температуры. Во всех точках внутреннего пространства термостата температура должна была быть различной, но поскольку она в некото-

рой точке поддерживалась постоянной с помощью термометра сопротивления, она должна была сохранять постоянное значение и во всех остальных точках внутреннего пространства термостата.

Опыт, поставленный в таком виде, должен был дать исчерпывающую характеристику чувствительности, постоянства и инерционности регулятора. Обычно, давая характеристику работе регулятора, оценивают его по работе с термостатом, нагреватели которого отделены металлической стенкой от пространства, температура которого регулируется. При этом невозможно определить истинные качества регулятора, так как, если даже и имеются при этом значительные колебания температуры, то они затухают в металлической стенке, отделяющей нагреватели от термостатируемого объекта. Постоянство рабочей температуры при этом часто определяется не столько надежностью регулятора, сколько большой тепловой инерцией термостата. В описанных выше условиях термостатируемый объект (контрольный Бекмановский термометр), температурочувствительный элемент (термометр сопротивления) и нагреватель (электрическая лампочка) были расположены в одной камере, на таком расстоянии друг от друга, что достаточно было нескольких секунд неконтролируемого регулятором горения лампочки для изменения показаний контрольного термометра.

Из ранее изложенных соображений о выборе параметров моста и оперативных постоянных гальванометра для получения высокой чувствительности (см. § 4) видно, что гальванометр, примененный в первой модели терморегулятора, не вполне отвечал своему назначению. Чувствительность регулятора сильно уменьшалась из-за необходимости включать в диагональ моста, последовательно с гальванометром, добавочное сопротивление (r_b — на схеме рис. б) для того, чтобы он был критически успокоен. В первой модели терморегулятора величина r_b была взята равной 500 Ω . Так как сопротивление каждого из плеч моста равнялось 217 Ω , то гальванометр был замкнут на сопротивление, равное 717 Ω , т. е. он был несколько переуспокоен. Легко оценить чувствительность первой модели регулятора, воспользовавшись для этой цели формулой (4).

В первой модели регулятора параметры, входящие в формулу (4), имели следующие значения: сопротивление гальванометра $r_g = 50 \Omega$, добавочное сопротивление $r_b = 500 \Omega$, сопротивление плеч моста $r_0 = 217 \Omega$, напряжение на зажимах моста $v = 10 \text{ V}$, температурный коэффициент электрического сопротивления термометра сопротивления $\alpha = 6 \cdot 10^{-4}$, динамическая постоянная гальванометра $C = 2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ам}}{\text{мм}}$, расстояние от зеркала гальванометра до фото-элемента $D = 0,5 \text{ м}$, расстояние, на которое должно было перемещаться световое пятно по фото-элементу для переключения фото-реле $d \approx 5 \text{ мм}$.

Подставляя эти значения в формулу (4), получим

$$\Delta T = \frac{4(r_g + r_b + r_0)}{v^2} \cdot \frac{dC}{D} = \frac{4(50 + 500 + 217)}{10 \cdot 6 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{5 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{0,5} \approx 0,01 \text{ C}.$$

Чувствительность в 0,01 C для терморегулятора, управляемого зеркальным гальванометром, следует считать чрезмерно низкой. Столь низкая

чувствительность объясняется неподходящими параметрами примененного гальванометра. Так как завод „Эталон“ не изготовлял гальванометров с малым значением величины сопротивления критического усложнения, то для повышения чувствительности во второй модели терморегулятора был применен переделанный гальванометр этого же завода, с перемотанной рамкой. Этот последний гальванометр имел следующие оперативные постоянные: $r_k = 15 \Omega$, внешнее критическое сопротивление $R_k = 250 \Omega$, динамическая постоянная $C = 6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Ам}}{\text{мм}}$, период свободных колебаний $T = 9$ сек. Во второй модели терморегулятора, где был применен описанный гальванометр, можно было не включать добавочных сопротивлений в диагонали моста, последовательно с гальванометром, т. е. $r_k = 0$. За исключением C , r_k и r_k , все остальные величины входящие в формулу (4), имели для обеих моделей одинаковое значение.

Оценивая чувствительность второй модели по формуле (4), получим

$$\Delta T = \frac{4(15 + 217)}{10 \cdot 6 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{5 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{0,5} \approx 0,0009 \text{ С.}$$

Ниже приведены результаты испытания второй модели регулятора.

Результаты испытания. После достижения равновесия, полная продолжительность рабочего цикла составляла около 20—30 сек, причем в течение 3—5 сек нагреватель был включен и остальное время выключен. Колебания температуры за время одного рабочего цикла не превосходили, после достижения равновесия, $0,01 \text{ С}$ и потому не могли быть отмечены Бекмановским термометром в силу его инерционности.

Предположение о том, что, несмотря на значительную неравномерность нагрева, в каждой точке внутреннего объема термостата установится некоторая отличная от температуры термометра сопротивления, но однако постоянная температура, целиком оправдалось. Действительно, хотя температура в месте расположения Бекмановского термометра и отличалась на 2° С (была ниже) от температуры того места, где находился термометр сопротивления, но вместе с тем температура первого поддерживалась постоянной с большой степенью точности. В первые сутки работы наблюдались отклонения температуры от средней на $\pm 0,02$ за 4 часа работы. На третьи сутки непрерывной работы регулятора показания контрольного термометра оставались неизменными в течение 8 час. Так как на контрольном термометре можно было отсчитывать тысячные доли градуса на глаз, то если и имели место за это время изменения температуры контрольного термометра, то они были, во всяком случае, меньше $0,002 \text{ С}$.

Для обеспечения достаточной чувствительности регулятора, через мост и, следовательно, через термометр сопротивления пропускают обычно ток, вызывающий некоторый перегрев термометра сопротивления над температурой окружающей среды. Величину этого перегрева зачастую создают значительно большей допустимых значений для отклонения температуры от заданной. В этом случае для достижения постоянства регулируемой температуры необходимо поддерживать неизменным перегрев термометра сопротивления. При работе термометра сопротивления в тер-

мостате, достаточно для этого поддерживать неизменной лишь силу проходящего через него тока. При регулировании комнатной температуры надо исключить еще возможные колебания степени перегрева из-за неодинаковой скорости движения токов воздуха, омывающего термометр-сопротивления. Поэтому решено было пропускать через термометр сопротивления ток, который не мог бы вызвать его перегрева над температурой окружающей среды больше, чем на $0,1-0,2$ С.

Чтобы установить, какое значение тока через термометр сопротивления надо выбрать, определялась зависимость температуры термостата от значений тока, проходящего через термометр сопротивления.

В табл. 2 приведена температура термостата в функции от величины тока, проходящего через термометр. На основании этой таблицы можно приблизительно оценить температуру термометра сопротивления и установить, насколько он перегревался при различных токах.

Таблица 2

Зависимость температуры термостата от тока через термометр сопротивления

Значения тока через термометр-сопротивления, в мА	50	43,8	37,5	18,7
Температура термостата, в градусах столбчатой шкалы	40,48	40,56	40,60	40,65

§ 10. Регулирование температуры комнаты

Температура комнаты поддерживалась постоянной при помощи двух регуляторов описанного типа. Регулятор, вместе со всеми работающими деталями, изображен на рис. 14. Все электрические нагреватели были разбиты на четыре группы. Каждый регулятор управлял, при помощи двух оконечных реле, двумя группами нагревателей.

Устройство нагревателей видно из рисунков 15 и 16.

На рис. 15 изображен трехсекционный нагреватель, состоящий из трех независимых секций, а на рис. 16 — односекционный нагреватель. Нагревательная обмотка каждой секции представляла собой навитый на прямоугольную раму, с фарфоровыми трубками из жароупорного и изолирующего материала, константановый провод, диаметром 0,5 мм и длиной 20 м. Общее сопротивление каждой секции нагревателей составляло около 50 Ω и среднее потребление мощности — 300 W. Всего в комнате было расположено пять односекционных нагревателей и три трехсекционных. Общая регулируемая мощность равнялась, примерно, 4 kW. По расчету этой мощности могло хватить для поддержания температуры комнаты постоянной, при разности температур (между комнатой и наружной средой) порядка $10-15^{\circ}$ С. Для поддержания температуры постоянной, при больших перепадах температуры, была предусмотрена возможность подключения добавочных не регулируемых нагревателей, общей

мощностью до 6 kW, для чего электрическая проводка в комнате была выполнена с соответствующим запасом нагрузочной способности.

Опыт показал, однако, что имевшихся основных регулируемых нагревателей (4 kW) достаточно для поддержания температуры в 20° С в течение весеннего и осеннего периода, когда водяное отопление не рабо-

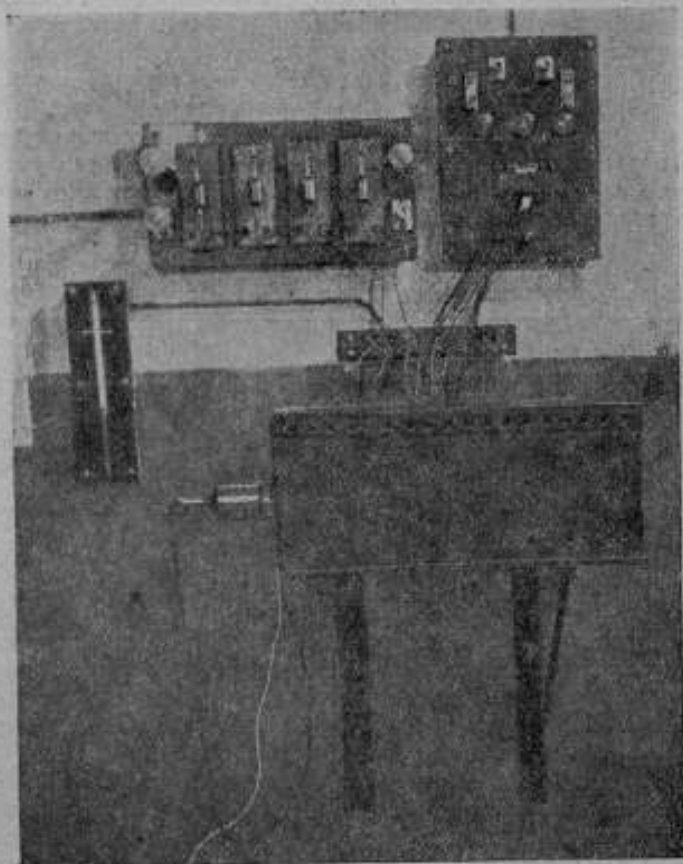


Рис. 14. Общий вид терморегулятора.

тает. После включения водяного отопления приходилось, обычно, бороться с излишком тепла, выделяемым трубопроводом водяного отопления, и электрической мощности в 4 kW тоже было достаточно для доведения температуры комнаты до 20° С.

Для большего удобства и гибкости регулирования каждый нагреватель имел самостоятельное включение, и можно было, по желанию, с помощью перекидного рубильника, включить его в цепь независимо от регулятора, через регулятор или совершенно выключить.

Для увеличения теплоотдачи нагревателей, за ними были расположены вентиляторы (рис. 15 и 16), с помощью которых можно было создать движение воздуха сквозь нагреватель, со скоростью, достаточной для того, чтобы мощность, рассеиваемая нагревателями, практически целиком передавалась струе воздуха. При длительной работе без перемешивания воздуха температура обмотки нагревателей была порядка 100—150° С. Температура фарфоровых трубок, с которыми непосред-

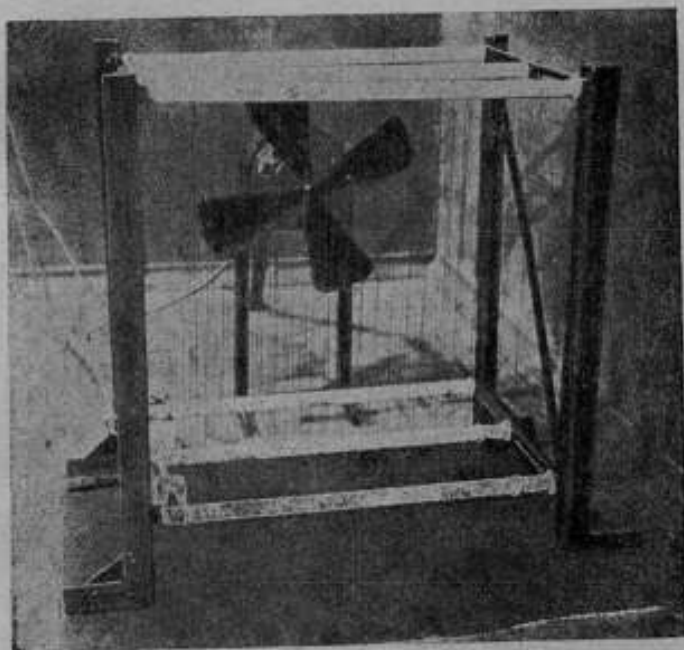


Рис. 15. Трехсекционный нагреватель.

ственно соприкасалась обмотка нагревателя, не поднималась выше 40—50° С. При работе вентиляторов обмотка нагревателей оставалась холодной на ощупь. Вентиляторы были расположены так, чтобы при их работе в комнате создавалось круговое течение воздуха. Главным назначением их было, однако, уменьшение тепловой инерции нагревателей, путем улучшения их теплоотдачи, а не перемешивание комнатного воздуха.

После установки нагревателей и вентиляторов была промерена скорость движения воздуха в различных частях комнаты при помощи термоэлектрического анемометра системы К. Н. Васильева.

Были получены следующие результаты.

На расстоянии 1 м от односекционного нагревателя (сзади которого располагался на расстоянии 40 см вентилятор комнатного типа с шелковыми крыльями), при работе вентилятора скорость течения воздуха

составляла 0,3 м/сек, при остановке вентилятора— 0,2 м/сек. На расстоянии 10 см от нагревателя скорость течения равнялась 1,4 м/сек. Скорость течения воздуха, измеренная на том же расстоянии от большого (трехсекционного нагревателя), составляла 1 м/сек. В частях комнаты, удаленных от вентиляторов, были получены следующие значения для скорости воздуха: около измерительной машины 0,2 м/сек, у термометров сопротивления 0,1 м/сек.

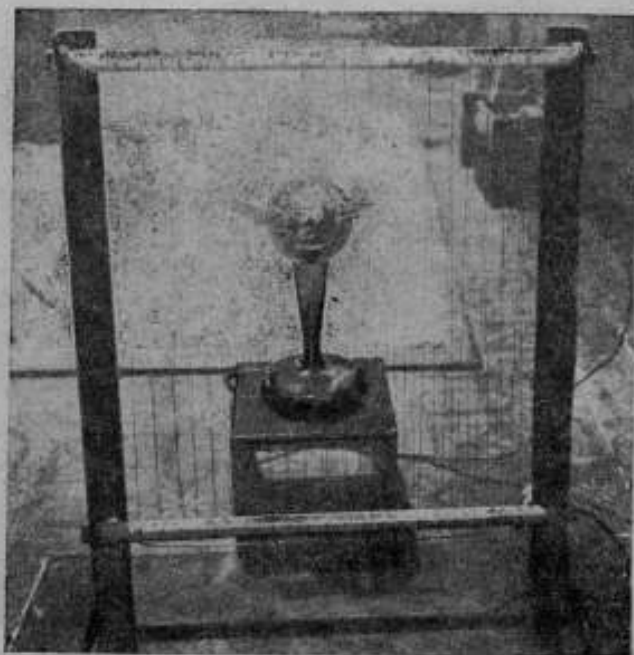


Рис. 16. Односекционный нагреватель.

Расположение нагревателей, термометров сопротивления и термометров, которыми измерялась температура в различных точках комнаты, показано на рис. 1. В центре изображена в плане станция измерительной машины¹ и фундамент, на котором она расположена. На рисунке зачерченными кружками обозначены места расположения измерительных ртутных термометров, прямоугольниками — термометров сопротивления. Пунктиром показано, какие термометры сопротивления соединены последовательно и работают как один термометр.

Нагреватели были смонтированы непосредственно на полу комнаты (под нагреватели была положена огнеупорная прокладка в виде листов кровельного железа и асбеста).

¹ Фотографию измерительной машины см. на стр. 24 (рис. 19) в статье А. А. Поликарпова и П. П. Зубрилина „Исследование концевой измерительной машины в 6 м³ в этом же сборнике.

Термометры сопротивления были повешены на высоте 2,2 м над уровнем пола. Высота расположения контрольных ртутных термометров приведена в табл. 3.

Перед пуском автоматического регулятора температуры было произведено контрольное измерение температуры в различных участках комнаты в течение мая 1938 г. Отопление не работало.

Таблица 3

Порядковый номер термометра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Высота над уровнем пола в метрах	1,5	0,2	0,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0,75	0,75

Первая серия измерений, произведенных за время с 11 по 22 мая 1938 г., была выполнена для того, чтобы установить, насколько будут различаться температуры наиболее удаленных друг от друга частей машины (длина станины 7 м). Для этого наблюдались показания

Таблица 4

Изменение температуры фундамента машины при выключенном отоплении

двух термометров, расположенных на стальных рельсах у основания машины на расстоянии около 5 м друг от друга.

Результаты измерений приведены в таблице 4.

В течение того времени, когда производились наблюдения, в комнате никто не работал, поэтому наблюдавшиеся изменения температуры вызывались исключительно колебаниями температуры наружного воздуха.

Из приведенных в табл. 4 данных, видно, что максимальное различие в температуре между наиболее удаленными друг от друга, но расположен-

Дата Май 1938 г.	Время	Температура, в градусах столбчатой шкалы	
		Термометр № 2	Термометр № 3
11	ч. м		
	19 30	14,50	14,50
12	22 00	13,75	13,90
	11 00	13,45	13,60
	12 30	13,50	13,60
	16 30	13,60	13,80
13	11 30	13,28	13,45
	13 40	13,40	13,55
	15 30	13,45	13,60
14	17 10	13,50	13,65
	10 40	13,35	13,45
	16 00	13,50	13,62
	20 30	13,50	13,60
	10 45	13,45	13,50
15	13 20	13,60	13,70
	14 30	13,70	13,80
	18 00	13,70	13,85
16	22 00	13,70	13,80
	15 00	13,75	13,90
	21 00	14,10	14,20
17	14 30	14,10	14,50
	17 00	14,30	14,60
18	11 00	14,60	14,70
	20	11 30	14,90

ными на одном уровне (на одной высоте), частями фундамента машины не превышает в этих условиях $0,2^{\circ}\text{C}$. Максимальное изменение температуры фундамента (у основания машины) за день составляет $0,75^{\circ}\text{C}$. Обычное изменение $0,2-0,3^{\circ}\text{C}$ за день.

Начиная с 26 мая 1938 г. велся систематический контроль температуры комнатного воздуха и различных участков машины.

Термометры № 4, 5, 6 и 7 были свободно подвешены в воздухе, на высоте 1,5 м над уровнем пола. Термометры № 9 и 10 были погружены в химические стаканы, наполненные трансформаторным маслом, и поставлены на машину на расстоянии около 5 м друг от друга.

Термометр № 3 лежал на стальном рельсе у основания машины.

Результаты измерений приведены в табл. 5 и графически на рис. 2 и 3.

Таблица 5

Изменения температуры воздуха комнаты и станины измерительной машины при отсутствии отопления и других внутренних источников тепла

Дата	Время	Температура, в градусах столбчатой шкалы							
		Термометры №							
		4	5	6	7	10	9	3	
Май 1938 г.	ч. м								
21	13 00	14,15	14,11	14,54	14,45	14,55	14,60	14,50	
	18 00	14,20	14,15	14,30	14,34	14,35	14,40	14,20	
22	15 00	13,70	13,65	13,75	13,80	13,75	13,80	13,70	
	18 00	13,50	13,42	13,52	13,58	13,54	13,60	13,48	
23	23 00	13,32	13,30	13,40	13,50	13,42	13,50	13,35	
	11 00	13,52	13,45	13,62	13,68	13,50	13,50	13,30	
24	12 45	13,40	13,30	13,50	13,55	13,42	13,50	13,25	
	15 40	13,30	13,22	13,38	13,44	13,35	13,40	13,20	
25	16 00	13,90	13,82	14,00	14,06	14,10	14,15	13,75	
	19 00	13,62	13,55	13,72	13,75	13,72	13,75	13,52	
26	21 20	13,50	13,45	13,60	13,70	13,65	13,65	13,45	
	22 30	13,50	13,42	13,58	13,64	13,58	13,60	13,43	
27	11 30	13,35	13,38	13,50	13,60	13,30	13,35	13,20	
	13 40	13,60	13,60	13,72	13,80	13,50	13,55	13,30	
28	15 00	13,58	13,54	13,70	13,78	13,60	13,65	13,40	
	13 30	13,98	13,95	14,12	14,20	13,82	13,90	13,75	
29	17 20	14,12	14,10	14,30	14,40	14,08	14,10	13,95	
	19 20	14,20	14,20	14,30	14,38	14,18	14,22	14,05	
30	13 30	14,30	14,62	14,75	14,85	14,65	14,70	14,55	
	17 00	14,60	14,62	14,75	14,90	14,70	14,80	—	
31	17 40	—	15,30	15,45	15,50	15,40	15,45	—	
	11 30	—	15,38	15,50	15,60	15,35	15,40	—	
Июнь 1938 г.									
5	7 30	—	16,80	16,90	17,00	16,90	17,05	—	
	16 30	—	17,30	17,45	17,55	17,35	17,40	—	
7	21 30	—	17,50	17,65	17,75	17,65	17,80	—	
	17 00	—	18,00	18,15	18,25	18,10	18,20	—	
9	19 30	—	19,20	19,30	19,40	—	—	—	
	18 00	—	19,30	19,40	19,70	—	—	—	
13	11 00	—	19,00	19,15	19,25	—	—	—	

Из табл. 5 видно, что, несмотря на большую массу машины, ее температура незначительно отстает от изменений температуры воздуха. Температуры наиболее удаленных друг от друга участков машины, расположенных на одном уровне в верхней части станины машины, не различались больше, чем на 0,1 С.

Температура основания машины была ниже на 0,3 С температуры верха (салазок) машины. Максимальное суточное изменение температуры комнаты за срок с 21 мая по 5 июня составляло 0,7 С (обычное изменение около 0,3—0,4 С).

Первое испытание работы регулятора в комнате было произведено в марте—апреле 1939 г. Измерялась температура воздуха при помощи термометров № 1, 8 и 5, температура станины машины при помощи термометров № 9 и 10 и температура концевой меры термометрами № 0 и 11.

Результаты приведены в табл. 6 и рис. 17.

Таблица 6

Изменения температуры воздуха комнаты, станины измерительной машины и концевой меры при работающих автоматических регуляторах температуры

Дата	Время	Температура, в градусах столбчатой шкалы										
		Термометры №										
		1	8	5	10	12	0	11	9			
Март 1939 г.												
26	9 30	19,40	19,80	19,90	19,35	18,90	—	—	—	—	—	—
	16 00	20,05	20,22	20,30	19,75	18,90	20,15	20,20	—	—	—	—
27	9 30	19,80	20,0	20,20	19,60	—	—	—	—	—	—	—
	9 30	19,95	20,00	20,10	19,40	—	19,80	20,20	—	—	—	—
28	16 00	19,82	20,02	20,25	19,70	—	20,00	20,25	19,90	—	—	—
	9 30	19,90	20,00	20,05	19,40	—	19,90	20,00	19,64	—	—	—
29	18 00	19,85	20,00	20,12	19,75	—	20,10	—	20,00	—	—	—
	9 30	19,80	19,90	20,02	19,48	—	19,80	20,00	19,65	—	—	—
Апрель 1939 г.												
2	9 30	19,89	20,00	20,11	19,44	—	—	—	19,70	—	—	—
	9 30	19,90	19,95	20,09	19,30	—	—	—	19,44	—	—	—
4	9 30	19,95	20,12	20,24	19,65	—	20,05	20,30	20,00	—	—	—
	9 30	20,20	20,30	20,45	19,60	—	20,20	20,30	20,00	—	—	—
7	10 40	20,05	20,20	20,40	19,70	—	20,20	20,30	20,05	—	—	—
	11 30	20,20	20,35	20,55	19,80	—	—	—	20,10	—	—	—

Амплитуда колебаний температуры воздуха комнаты за время одного полного цикла работы регулятора, т. е. за промежуток времени между двумя последовательными включениями нагревателей, была настолько мала, что на ртутных термометрах с подразделениями на 0,1 С, висящих в воздухе, нельзя было обнаружить колебаний температуры.

Необходимо отметить, что сотрудники Лаборатории мер длины не пользовались обычно вентиляторами для перемешивания комнатного воздуха, и все наблюдения за температурой помещения, результаты

которых приводятся в таблицах, относятся к случаю полного отсутствия перемешивания воздуха комнаты.

Из табл. 6 видно, что в течение первого дня наблюдений, 26 марта 1939 г., изменения температуры почти всех точек комнаты за рабочий день были значительно больше, чем за последующие дни. Это объясняется тем, что после первого дня наблюдений были приняты меры для ослабления ряда вредных факторов, вызывавших отмеченные изменения (были закрыты тепловой изоляцией водопроводные трубы $t_{12} = 18,9^{\circ}\text{C}$, и на ночь оставалась зажженной часть верхних светильников электрического освещения).

На рис. 17 приведены кривые, показывающие изменение температуры воздуха комнаты (кривые 5 и 8), меры θ (двухметровая концевая мера) и станины машины 10. Цифра в скобках у кривой указывает

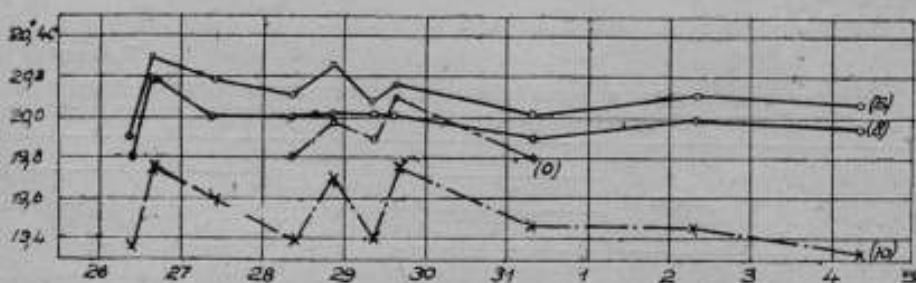


Рис. 17. Графики изменения температуры различных участков комнаты при работе автоматического регулятора температуры.
По оси абсцисс — дни (март—апрель 1939 г.).

номер контрольного термометра, показания которого образуют данную кривую и дают возможность видеть, к какому участку комнаты относятся изменения температуры.

На основании данных табл. 6 и в результате рассмотрения кривых рис. 17 можно сделать следующие заключения.

а) Температура воздуха комнаты, измеренная в определенное время суток, до начала рабочего дня, обычно не отклоняется от 20°C больше, чем на $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

б) Температура воздуха поднималась после прихода в комнату наблюдателей и включения электрического освещения (например, 26 марта 1939 г., температура воздуха поднялась за рабочий день на $0,4^{\circ}\text{C}$).

в) Температура станины (салазок) измерительной машины держалась все время на $0,4-0,6^{\circ}\text{C}$ ниже температуры воздуха, непрерывно следуя за ее изменениями.

г) Температура концевой меры, расположенной на высоте около 10 см над станиной машины, имела значение промежуточное между температурой воздуха и станиной, но значительно более близкое к первой.

Таким образом оказалось, что несмотря на высокую чувствительность регулятора и удовлетворительное постоянство рабочей температуры, на которую рассчитан регулятор, нельзя было в достаточной мере устра-

нить влияние наблюдателей на измерительную машину и обеспечить отсутствие различия в температурах меры и измерительной машины.

Легко обнаружить причину указанных недостатков и наметить пути к их устранению.

Из рис. 1 видно, что регулируемые источники тепла расположены вдоль стен комнаты, и передача тепла от них к машине происходит, главным образом, за счет конвекционных токов воздуха. При установившемся тепловом равновесии, когда температура воздуха комнаты, измеренная в точках 4, 5, 6 и 7 на высоте 1,5 м над полом, держалась равной 20°C , температура пола под машиной составляла всего $18,4\text{—}19^{\circ}\text{C}$. Охлаждаясь непрерывно от пола, за счет лучеиспускания, конвекции и теплопроводности через фундамент, станина машины приобретала температуру, меньшую температуры воздуха. При отсутствии наблюдателей в комнате устанавливалось некоторое неравномерное, но постоянное, распределение температуры. После прихода наблюдателей

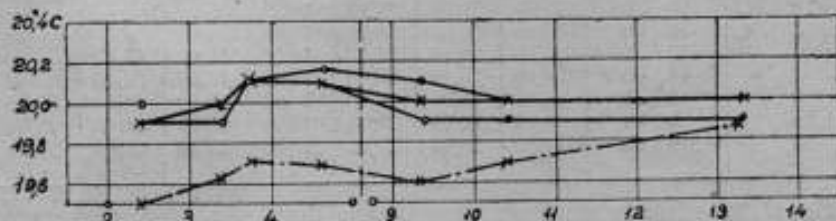


Рис. 18. Графики изменения температуры различных участков комнаты при работе автоматического регулятора температуры.
По оси абсцисс — дни (июнь 1939 г.).

на работу тепловое равновесие нарушалось и температура тех участков комнаты, в которых находились наблюдатели, возрастала. Термометры сопротивления не могли в достаточной мере реагировать на это перераспределение температур, так как они были расположены на значительном расстоянии от тех точек, в которых были расположены контрольные термометры, учитывающие температуру комнатного воздуха. Если бы термометры сопротивления, регулирующие температуру, были расположены в непосредственной близости от измерительной машины, то вредное влияние (подъем температуры) наблюдателей было бы в значительной мере ослаблено. Однако, правильного расположения термометров сопротивления, управляющих регулятором, было бы еще недостаточно для устранения различия между температурой воздуха (концевой меры) и станины измерительной машины. Для устранения этого различия необходимо скомпенсировать потери тепла через пол комнаты. Чтобы довести температуру пола под машиной до 20°C , надо по приближенным подсчетам подводить к нему непрерывно мощность около $250\text{—}300\text{ W}$.

Если расположить на полу под машиной равномерно распределенные нагреватели этой мощности и регулировать автоматически температуру воздуха под машиной, то второй отмеченный недостаток (различие между температурой концевой меры и машины) также будет устранен. Эти мероприятия намечено провести в ближайшее время.

Правильность высказанных выше соображений подтверждается, в известной мере, наблюдениями за температурой комнаты и измерительной машины, произведенными в июне 1939 г.

Результаты наблюдений приведены в табл. 7 и графически на рис. 18.

Таблица 7

Изменения температуры воздуха комнаты, станины измерительной машины и концевой меры при работе автоматических регуляторов температуры (водяное отопление выключено)

Дата	Время	Температура, в градусах столбчатой шкалы							
		Термометры №							
		1	3	5	10	9	0	11	
Июнь 1939 г.	ч. м								
2	9 30	19,90	19,90	20,00	19,50				
3	9 30	19,90	20,00	20,00	19,63				
	13 40	20,10	20,10	20,10	19,70	20,02	19,92		
4	11 00	20,10	20,10	20,15	19,07	20,05	20,00		
9	9 30	19,90	20,00	20,10	19,60	19,60	19,94	20,00	
10	9 30	19,90	20,00	20,00	19,70	19,70	20,00	20,02	
13	10 00	19,90	20,00	20,00	19,90	19,90	20,00	20,00	

После 13^{го} июня дальнейшая регулировка была уже невозможна, так как среднесуточная температура наружного воздуха сделалась слишком близкой к 20° С.

Три верхние кривые рис. 18 показывают изменение температуры воздуха комнаты в трех различных точках, нижняя — изменение температуры станины измерительной машины.

Из рис. 18 видно, что точность поддержания температуры комнатного воздуха не зависит в данном случае от изменений температуры наружного воздуха, поскольку она в марте и июне одинакова, и возможность регулирования не теряется до тех пор, пока температура стен комнаты не превысит 20° С.

По мере того, как возрастает температура пола, температура станины тоже увеличивается, и в тот момент, когда температура пола и стен делается равной регулируемой температуре, температуры станины и воздуха выравниваются. Это является доказательством того, что отмеченное выше различие в температурах станины машины и воздуха вызывалось потерей тепла через пол комнаты. Следует отметить, что вентиляторы не использовались, и перемешивание комнатного воздуха осуществлялось исключительно за счет конвекции. Для притока свежего воздуха в стенах комнаты имелись сквозные вентиляционные отверстия, через которые проникал воздух с улицы без какого-либо подогрева. Подобный примитивный способ вентиляции, естественно, снижал качество регулирования и скверно отражался на регуляторе, так как струи холодного воздуха, попадая на термометр сопротивления, вызывали резкие броски рамки гальванометра, включенного в диагональ моста, и приводили иногда к прилипанию подвижной системы (рамки) гальванометра к уперу.

Нужно думать, что улучшение вентиляционной системы также поможет повысить точность поддержания температуры в комнате.

Необходимо отметить, что метод регулирования и схема терморегулятора были разработаны автором совместно с Д. В. Гутнером.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проф. Б. М. Аше. Отопление и вентиляция. 1936, ОНТИ.
2. R. Griffiths, M. Sc. Thermostats and temperature regulating instruments, London, 1934.
3. Хенней. Электронные и полупроводниковые приборы в промышленности, 1937, ОНТИ.
4. Ф. С. Гузликсен и Е. Г. Велдер. Промышленная электроника, 1937, ОНТИ.
5. Б. С. Сотсков. Элементы телемеханической и автоматической аппаратуры. Часть I. Реле. 1938.
6. Н. А. Лившиц, Д. В. Спицин, А. В. Давидкин. Теория и расчет элементов автоматических систем, Реле, 1939, ГОИТИ.
7. Emerson M. Temperature Control with Regard to oscillations of External Conditions and to Characteristics of Walls. Instruments, vol. 9, N. 5, 1936.
8. Deighton T., A. Precision Thermostat for the Temperature Regulation of a Room. Journal of Scientific Instruments, vol. 13, p. 298, 1936.
9. Макс Лонг. Прага. Проект теории техники регулирования температуры. „Zeitschrift für technische Physik“ N. 3, ss. 98—105, 1933.
10. L. V. Turner, Constant temperature: A study of principles in electric Thermostat Design; and a mainsoperated isothermal Chamber Constant to one-thousandth of a degree centigrade. Journal „J. E. E.“ Vol. 81, p. 399, 1937.
11. L. V. Turner. The Control of a Gas Valve Through a Phase-Shifting Input Valve. „Wireless Engineer“, Vol. XIV, N. 164, p. 229, 1937.
12. Himmelr C. Ueber einen neuen kontinuierlichen elektrischen Regler. „Archiv für Elektrotechnik“, Bd. 29, N. 9, 1935, S. 577.
13. M. Benedict. Use of an alternating bridge in laboratory temperature control. „R. S. I.“ Vol. 8, 1937.
14. Automatic furnace temperature regulator. „Journ. of Scient. Instruments“, Vol. XIII, N. 11, p. 374.
15. Афанасьев. Фото-электрический регулятор температуры. „Заводская лаборатория“, № 2, 1938.
16. Стрелков. Фото-электрический регулятор температуры. „Журнал технической физики“, 1935.
17. A. Grase. Description of two relays Incorporating Photocells. „Journal of Scientific Instruments“, Vol. XV, N. 4, 1938.
18. Л. Д. Брызжев. Регуляторы температуры и напряжения для группового эталона частоты. „Метрология и поверочное дело“, № 11, стр. 1—7, 1939.
19. C. F. Booth and E. J. C. Dixon. Crystal Oscillators for Radio Transmitters. „Journal I. E. E.“ vol. 77, p. 197, 1935.
20. Temperaturregler mit Stromtoren. „ATM“ Lf. 59, B. 66, 67, 1936.
21. T. H. Dice. The effect of atmospheric humidity on unscaled resistors—causes and remedy. „R. S. I.“ Vol. 7, N. 17, p. 278, 1936.
22. Н. А. Маренин. Платиновые термометры сопротивления. „Временник Главной палаты мер и весов“. Выпуск 2 (14), стр. 69, 1928.
23. Обширная библиография по кондиционированию воздуха приводится в журналах „Отопление и вентиляция“ и „Автоматика и телемеханика“ (в последнем, начиная с 1938 г. библиография по кондиционированию воздуха больше не приводится).
24. Fischer „1,5kW — Allstrom — Relais für sehr geringe Kontakt — belastung.“ „Zeitschrift für Instrumentenkunde“, 4 Helt. S. 167, 1937.

П. Е. СОЛОВЬЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ДВОЙНОМ МИКРОСКОПЕ ЛИННИКА

§ 1. Введение

В связи с повышением точности изготовления деталей, приборов и машин и улучшением качества обработки поверхностей деталей возникли требования к разработке методов, позволяющих дать оценку качества поверхностей изготовленной детали. За последние годы было замечено, что деталь, обработанная различными методами, имеет различную поверхность (в смысле шероховатости). Детали, обработанные при различном режиме шлифовки (подача, скорость вращения), отличаются друг от друга качеством поверхности.

Условные обозначения обработки деталей ∇ , $\nabla\nabla$, $\nabla\nabla\nabla$ и $\nabla\nabla\nabla\nabla$ на разных заводах понимаются по-разному. Если сравнить детали этих заводов, изготовленные под ∇ и др. знаками, то можно заранее сказать, что качество поверхностей их будет разное. Два образца, изготовленные из разного металла, например, из чугуна и стали, но имеющие одинаковый режим обработки, имеют качество поверхности различное. Кроме того замечено, что чугун, особенно содержащий большое количество графита, имеет поверхность не в виде направленных рисок, а в виде штриховой сетки, т. е. поверхность представляет собой ряд клеток, расположенных в различном направлении. Это явление можно объяснить тем, что чугун, имеющий очень хрупкое строение, во время обработки выкрашивается. Поэтому необходимо просматривать поверхность детали из чугуна как поперек риска, так и вдоль их, и тем самым оценить ее по двум направлениям поверхности. К этому необходимо добавить, что резец, имеющий различные углы заточки, а также материал, из которого сделан резец, влияют на качество поверхности. Могут быть случаи, когда различные участки поверхности одной и той же детали отличаются разным качеством.

Из указанного выше явствует, что причин, влияющих на качество обработки поверхностей, очень много и учесть их полностью трудно. Однако, промышленность в настоящее время подошла вплотную к вопросу о необходимости точной оценки качества обработанных поверхностей. Вместе с тем, существующие до настоящего времени обозначения обработки ∇ , $\nabla\nabla$, $\nabla\nabla\nabla$ и $\nabla\nabla\nabla\nabla$, не охватывающие всех степеней точности, отжили свое время. Необходимо работать над новой классификацией по обозначению обработки и по оценке качества поверхностей.

Существует несколько методов оценки качественных и количественных показателей обработанных поверхностей. Эти методы можно разбить на три группы: а) механические (профилограф), б) оптические (микроскоп Буша, двойной микроскоп, микронинтерферометр и др.) и в) электрические (емкостный, рефлектофотометрический и т. д.).

Настоящая работа относится только к изучению метода определения качества поверхности на двойном микроскопе акад. Линника.

§ 2. Принцип действия прибора

Прибор состоит из двух микроскопов P и N (рис. 1). Микроскоп P состоит из объектива, щели k и лампочки L . Микроскоп N содержит объектив, окуляр o и окулярный микрометр m с отсчетным барабаном n . Микроскопы расположены по отношению к изделию A под некоторым углом α .

Щель k освещается лампочкой L ; от нее свет проходит в виде световой полоски и падает через объектив на поверхность A . Так как эта поверхность A имеет определенную шероховатость, то световая

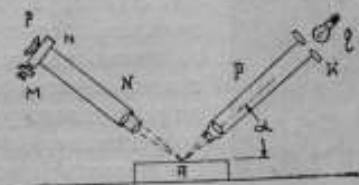


Рис. 1.

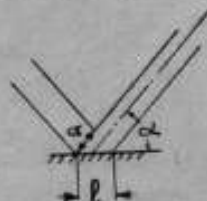


Рис. 2.

полоска отразится от нее в виде искривленной линии, принимая форму самой поверхности. Эту искривленную световую линию мы в увеличенном виде рассматриваем через микроскоп N . Имея при микроскопе N окулярный микрометр m с отсчетным барабаном n , мы, зная цену деления барабана при данном увеличении микроскопа, можем определить высоты гребешков шероховатости поверхности или ее впадины.

При данном методе необходимо помнить и учитывать, что световая полоска падает на поверхность под некоторым углом α (рис. 2), и потому она копирует не действительную поверхность, не реальные высоты гребешков или глубины впадин, а величины, несколько большие.

Если обозначим истинную величину высоты гребешка или глубины впадины через a , а соответствующую видимую величину гребешка или впадины через l , то получим следующую зависимость этих величин между собою:

$$a = l \cos \alpha, \quad (1)$$

где α — угол наклона микроскопа к исследуемой поверхности. Поэтому, при измерении профиля поверхности отсчеты берут по видимым величинам световой полоски, но для получения действительных значений a , необходимо умножить полученные результаты соответственно на $\cos \alpha$.

§ 3. Конструкция и установка прибора

Основными частями прибора являются два микроскопа, имеющие одинаковые объективы. Микроскоп *P* (рис. 3) имеет две пластинки со скошенными краями, иначе говоря, два ножа, которые помещены в коробке *k*. Эти ножи можно раздвигать и получать любую ширину щели в пределах от 0 до 3 мм. Щель освещается лампочкой *l* от карманного фонаря. Полученная световая полоска проектируется микроскопом *P* на изделие так, чтобы она имела минимальную свою ширину.

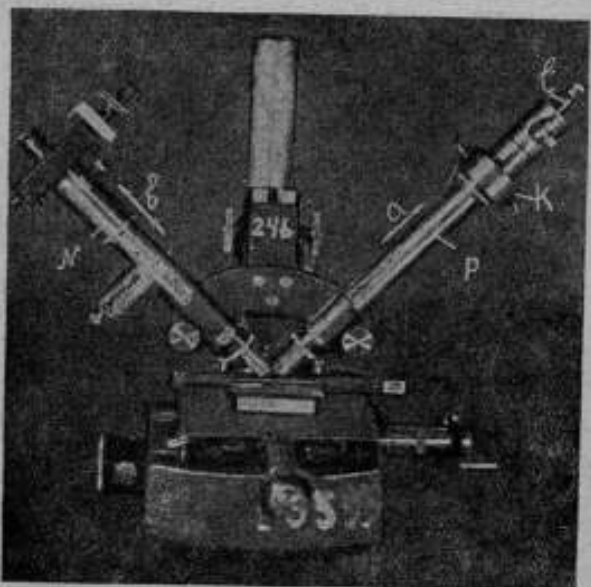


Рис. 3.

Для этого перемещают микроскоп *P* по стрелке *a*.

Искривленную полоску рассматривают через микроскоп *N*. Для получения резкости полоски микроскоп *N* перемещают по стрелке *b*. В результате регулировки микроскопов в поле зрения окуляра мы видим искривленную световую полоску (рис. 4). Процесс измерения профиля поверхности не

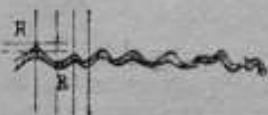


Рис. 4.

сложен. Выбрав произвольную точку на исследуемой поверхности, например точку *A* (рис. 4), подводим ее, при помощи микрометрической подачи столика, на котором находится исследуемая поверхность, к неподвижной вертикальной нити окулярного микрометра и замечаем показания отсчетного барабана столика.

Биссектор микрометра подводим к намеченной точке *A*, помещая эту точку посередине между нитями и производим отсчет. Перемещаем столик с образцом дальше, подводя к вертикальной нити окулярного микрометра точку *B*. Замечаем показания микрометра столика. Опускаем биссектор к точке *B* и производим отсчет. Так проходим все точки поверхности нескольких участков.

Для обработки результатов определяем цену одного деления барабана окулярного микрометра. Для этого помещаем на место исследуемой поверхности стеклянную пластинку (объект микрометр), с нане-

сенными на ней делениями в 0,01 мм. Выбираем произвольный промежуток на пластинке, например, 0,1 мм, и смотрим, сколько оборотов барабана приходится на данный промежуток. Делим 0,1 мм на количество делений барабана, приходящихся на этот промежуток, и получаем цену деления барабана в миллиметрах или микронах. Переводим отсчеты по барабану измеренного профиля поверхности в микроны, с последующим умножением на $\cos \alpha$; получаем действительные значения высот гребешков или впадин. Записав полученные результаты профиля поверхности и расстояния между искривлениями световой полоски в таблицу, получаем необходимые данные для оценки качества обработки поверхности.

При помощи прибора акад. Линника можно исследовать поверхность с профилем от одного микрона и выше. По данным немецкого проф. Шмальца¹, имеем следующую таблицу зависимости увеличения от высот профиля поверхности (табл. 1):

Таблица 1

Высота гребешка, в μ	Характер обработки	Увелич. объект.	Увелич. микроскопа	Видимое поле зрения, в мм
1—5	Точная шлифовка	Opri	240*	6,9
	Тонкая сверловка	16*		
	Развертка			
5—15	Тонкая точка	Er1	145*	1,5
	Тонкая фрезеровка	9,7*		
	Тонкая сверловка			
15—50	Грубая точка	Er1	80*	2,7
	Фрезеровка	5,3*		
	Грубая шлифовка			

§ 4. Исследование поверхностей

На двойном микроскопе были исследованы поверхности двух деталей, присланных заводом им. Кирова, и двух образцов из Института сельско-хозяйственного машиностроения.

Образцы завода им. Кирова исследовались по двум поверхностям — внутренней и наружной; образцы Института сельско-хозяйственного машиностроения — только с внутренней поверхности.

Одна деталь завода им. Кирова представляла собой трубку из чугуна (серого) с внутренней поверхностью, обработанной разверткой, и наружной — шлифованной; вторая деталь — большое кольцо с фланцем из чугуна (внутренняя поверхность точеная резцом, наружная — шлифованная). Были изучены шесть поверхностей четырех образцов. Почти каждая поверхность исследовалась по трем произвольно выбранным участкам, размером в один миллиметр. Каждый изученный миллиметр разбивался не на равные промежутки, а в зави-

¹ Каталог Zeiss „Oberflächen-Prüfgerät nach Prof. Schmalz.“

симости от профиля поверхности, т. е. под неподвижную нить окулярного микрометра подводился каждый гребешок или впадина, а расстояния между ними фиксировались барабаном микрометра столика. На каждый гребешок или впадину производилось трехкратное наведение биссектора окулярного микрометра с отсчетом непосредственно после каждого наведения, а затем



Рис. 5.

брались среднее значение по трем результатам. Отсчеты по барабану окулярного микрометра столика заносились в журнал наблюдений.

После определения цены деления барабана, записанные в журнал наблюдений результаты, выраженные в делениях барабана, были переведены в микрона.

Цена одного деления барабана окулярного микрометра в нашем случае была равной 0,15 м.

Далее строились графики профилей изученных поверхностей для каждого миллиметра, причем на каждую поверхность по три графика. Микрофотографии (рис. 5а, б и а) показывают характер и вид профилей изученных поверхностей.

§ 5. О некоторых методах оценки качества обработки поверхностей

Существует несколько методов оценки качества обработки поверхностей: американский стандарт (проект), метод проф. Шмальца, метод Бодара (Bodart), метод Аббота и др. Рассмотрим некоторые из этих методов.

а) Метод американского стандарта (проект) заключается в определении средней высоты $h_{\text{ср}}$ профильной кривой. Эта $h_{\text{ср}}$ определяется как корень из среднего значения суммы квадратов ординат каждой точки кривой (рис. 6): Если обозначим ординату первой точки кривой через a , вторую ординату через b и т. д., то будем иметь следующую зависимость:

$$h_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + \dots + k^2}{n}} \quad (2)$$

Средняя ордината кривой $h_{\text{ср}}$ и есть показатель качества обработки поверхности по американскому проекту стандарта.

б) **Метод Шмальца** расширяет оценку качества обработки поверхностей, так как оценка производится по трем факторам.

Имеется профильная кривая $A-B$ (рис. 6). Проводим линию $m-n$, проходящую через наибольшую впадину. Тогда h_{cp} будет та ордината, по отношению к которой сумма площадей выступов и впадин будет равна нулю. Найдя эту величину h_{cp} , мы имеем три показателя качества обработки поверхностей:

- 1) H — максимальная высота наибольших гребешков кривой, считая от линии $m-n$.
- 2) h_{cp} — средняя высота данной кривой, и
- 3) $K = \frac{h_{cp}}{H}$ — коэффициент заполнения. (3)

Таким образом, каждая кривая профиля поверхности по Шмальцу характеризуется тремя величинами: H , h_{cp} и K .

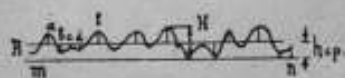


Рис. 6.



Рис. 7.

в) **Бельгийский метод** (метод Бодара). Этот метод оценки качества обработки поверхностей вводит еще две величины, а именно h_m — среднее значение ординаты кривой относительно линии $p-k$ (рис. 7), определяемой величиной h_{cp} . Пусть имеем ординаты кривой, относительно линии $p-k$, $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n, \dots$ и т. д.; количество этих ординат равно n . Получаем:

$$h_m = \frac{\sum |\delta_i|}{n}, \quad (4)$$

где h_m — взято в абсолютных величинах.

Вторая дополнительная величина, введенная в этом методе, это подача, обозначенная буквой C .

При этих величинах (H , h_{cp} , h_m и C) оценка качества обработки поверхности производится по следующему коэффициенту:

$$A_B = \frac{H^2}{(H - h_p) h_m} \cdot C, \quad (5)$$

где H — максимальная высота профильной кривой, считая от наибольшей впадины до наибольшего выступа, h_{cp} — средняя высота профильной кривой, h_m — средняя высота кривой относительно величины h_{cp} и C — подача.

Коэффициент A_B (Бодара) называется коэффициентом остроты.

г) **Метод Абботта** (Abbott) или метод диаграммы. По этому методу на основе полученной профильной кривой, строятся две диаграммы: 1) заполнения материала и 2) кривая времени эксплуатации материала, получающаяся из первой диаграммы.

Имеем некоторую профильную кривую $A-B$ (рис. 8). Проводим прямую $m-n$ по наибольшей впадине; будем считать ее за ось X .

Возьмем точку O за начало координат. Кривую $A-B$ разбиваем пунктирными линиями по высоте на равные промежутки и продолжаем пунктирные линии до пересечения с осью Y . Выступы кривой разобьются на участки; первый выступ имеет участки a_1, a_2, a_3, \dots , второй — b_1, b_2, b_3, \dots . Строим диаграмму заполнения. От оси Y откладываем вправо по каждой линии 1, 2, 3 ... участки a_1, a_2, a_3, \dots ; b_1, b_2, b_3, \dots . По первой линии ширина гребешков равна нулю, следовательно, она будет лежать на оси Y . По второй линии откладываем a_1 ; по третьей линии имеем два участка: a_2 от первого гребешка и b_1 от второго гребешка; в результате имеем сумму $a_2 + b_1$ (рис. 8, диаграмма 1). Далее откладываем сумму участков $a_3 + b_2$ на четвертой линии и так далее, по всей высоте кривой. В конечном счете получаем диаграмму заполнения, показанную на рис. 8 и обозначенную цифрой 1.

Кривая II, т. е. кривая времени эксплуатации материала, строится по диаграмме I и находится с ней в такой зависимости:

$$T = \int_0^y f(x) dy. \quad (6)$$

Эта кривая строится так: определяем площади участков диаграммы I, заключенные между 1-й и 2-й, между 1-й и 3-й линиями, и т. д. Полученные величины этих площадей откладываем по тем же линиям 1, 2, 3 ... и т. д. в произвольно выбранном масштабе. На основе этих построений получаем кривую II времени эксплуатации стирания.

Таковы основные методы оценки качества обработки поверхностей.

По этим методам была произведена обработка некоторых кривых исследованных нами поверхностей. Обозначая выбранные нами кривые порядковыми номерами 1, 2, 3 получаем следующие значения (табл. 2).

Таблица 2

№ кривых	Американский стандарт (проект)	Метод Шмидта	Бельгийский метод
1	$(H = 7,7 \mu) h_{\text{вн}} = \pm 2,5 \mu$	$H = 7,7 \mu;$ $h_{\text{ср}} = 3,8 \mu;$ $K = 0,6$	—
2	$(H = 11,4 \mu) h_{\text{вн}} = \pm 4,1 \mu$	$H = 11,4 \mu;$ $h_{\text{ср}} = 5,3 \mu;$ $K = 0,59$	—
3	$(H = 31,1 \mu) h_{\text{вн}} = \pm 10 \mu$	$H = 31,1 \mu;$ $h_{\text{ср}} = 12,7 \mu;$ $K = 0,53.$	$h_{\text{ср}} = 12,7 \mu;$ $H = 31,1 \mu;$ $h_m = 5,2 \mu;$ $A_B = 30,8 \text{ мм}^2$ $C = 0,1 \text{ мм}$



Рис. 3.

§ 6. Заключение и выводы

Изложенный выше способ исследования качества обработанных поверхностей, при помощи двойного микроскопа акад. Линника, представляет собой наиболее совершенный из группы оптических методов. Главным его отличием является численное определение элементов профиля поверхности. Кроме того, сам прибор можно приспособить непосредственно к обрабатываемой детали на станке. Наличие микрометрических подая каждого микроскопа в отдельности и общего перемещения двух микроскопов, а также быстрая регулировка освещения щели ставят этот прибор и сам метод в ряд лучших методов по изучению качества обработанных поверхностей. Этот прибор позволяет исследовать поверхности с шероховатостью от одного микрона и выше, что обуславливает его широкое применение в промышленности.

Что касается оценки качества обработки поверхностей, то в настоящее время, ввиду незначительного опытного материала, еще трудно сказать, какой из существующих методов наилучший и какой метод можно было бы предложить, как стандарт.

Если взять американский проект стандарта, то он дает оценку по одному показателю, а именно по средней квадратичной величине $h_{ср}$ (см. формулу 2). Эта величина ниже максимальной высоты и полной характеристики кривой не дает. По этому методу имеем следующие величины трех выбранных нами кривых: по 1-й кривой $h_{ср} = \pm 2,5\mu$, по 2-й $h_{ср} = \pm 4,1\mu$ и по 3-й $h_{ср} = \pm 10\mu$.

Метод Шмальца в этом отношении значительно шире. Он характеризует качество обработки поверхности по трем факторам: максимальной высоте H кривой, ее средней величине $h_{ср}$ и коэффициенту заполнения K .

Бельгийский метод вводит еще две дополнительные величины, указанные выше, а именно: h_m и C , но конечным результатом является коэффициент остроты A_H .

Метод Аббота фактически не дает полной характеристики, так как не позволяет численно оценить кривую, но эти диаграммы Аббота могут дать ясное представление об исследуемой поверхности с точки зрения возможного ее износа.

Таким образом, все существующие методы оценки качества обработанных поверхностей обладают и достоинствами и недостатками.

Рекомендовать какой-либо определенный метод оценки, из-за общего недостатка опытного материала по этому вопросу, пока нельзя.

При исследовании выбранных нами деталей двойным микроскопом, наблюдения и отсчеты высот гребешков и впадин производились на каждую точку профиля по три раза, что дало возможность определить погрешность наблюдений. В результате всех наблюдений мы получали вероятную погрешность ρ наблюдений, равной $\pm 0,1\mu$.

Двойной микроскоп дает возможность определять количественную оценку качества обработки поверхности непосредственно на станке. Этот микроскоп можно рекомендовать для заводских лабораторий и отделов технического контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Schmalz. Technische Oberflächenkunde, 1936.
2. P. Nikolau. Quelques récentes progrès de la microgéométrie des surfaces usinées et de l'intégration pneumatique des rugosités superficielles. *Mécanique*, 1939, v 23, № 285, p. 152—155.
3. J. Gaillard. How smooth is smooth? *Machine Design*, 1939 (август).

М. Х. ПЛАТОНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КОНЦЕВЫХ МЕР ПРИ ПОМОЩИ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРА ЛИННИКА

§ 1. Принцип микроинтерференционного метода и описание микроинтерферометра

Микроинтерферометр академика Линника, примененный для исследования качества плоскопараллельных концевых мер, представляет собой упрощенное конструктивное оформление принципиальной схемы установки Майкельсона (Michelson) для сравнения метра с длиной световой волны.

Микроинтерферометр, как и установка Майкельсона, позволяет наблюдать интерференционные полосы равной толщины. Искривление полос является мерой отступления поверхности от идеальной плоскости.

Исследование поверхностей плоскопараллельных концевых мер производилось при помощи микроинтерферометра 2 (рис. 1), укрепленного в тубусе микроскопа Телфер 1, имеющего два взаимно перпендикулярных перемещения (одно — перемещением стола с отсчетом 0,005 мм по барабану 3 и второе — поперечным перемещением тубуса микроскопа с отсчетом 0,01 мм по барабану 4. Кроме того тубус микроскопа имеет перемещение вдоль своей оси при помощи кремальеры 5. Микрометрического перемещения вдоль своей оси тубус микроскопа не имел. Так как столик 6 не имеет приспособления для установки исследуемого изделия в положение перпендикулярное оси микроскопа, то на столик микроскопа предварительно устанавливался другой столик 7 на трех ножках, позволяющий наклонять детали.

Микроинтерферометр 2 представляет собою приставку, ввинчивающуюся в тубус микроскопа вместо объектива. Эта приставка, схематически изображенная на рис. 2, состоит из металлического корпуса 1, двух одинаковых объектов O_1 и O_2 , заключенных в резьбовые оправки 2 и 3, двух зеркал, одно из которых стеклянное-полусеребрянное N , а второе металлическое M , диафрагмы 4 и осветителя S .

Зеркало N состоит из двух склеенных друг с другом стеклянных плоскопараллельных пластинок одинаковой толщины. Одна из этих пластинок покрыта полупрозрачным слоем серебра. Пластины склеены так, чтобы полупрозрачный слой серебра находился на внутренней, т. е. склеенной поверхности. Это зеркало, заключенное в оправу, установлено между объективом O_1 и окуляром микроскопа (ближе к объективу O_1) под углом в 45° к оси микроскопа.

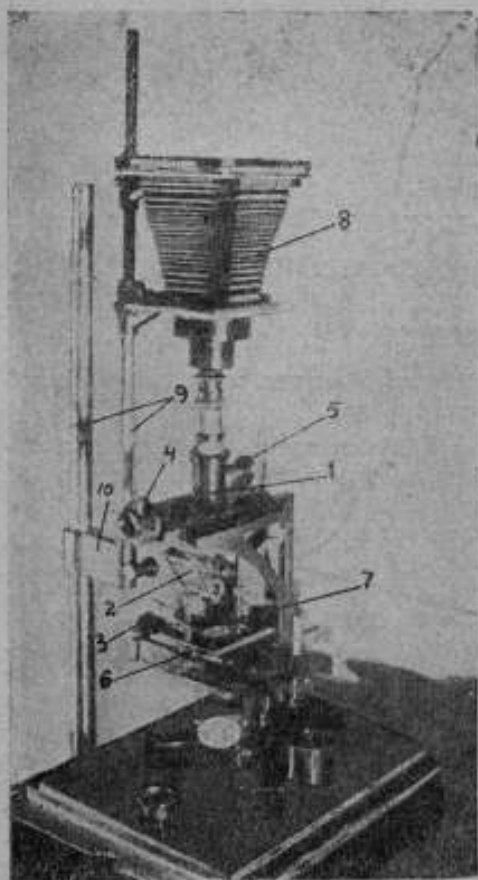


Рис. 1.

проходит объектив O_1 и зеркало N и дают изображение исследуемой поверхности, которое рассматривается при помощи окуляра.

Другая часть лучей, пройдя зеркало N и объектив O_2 , отражается зеркалом M , после чего проходит объектив O_2 в обратном направлении и отражаясь зеркалом N к окуляру накладывается на изображение исследуемой поверхности, полученной от первой части пучка лучей.

Объектив O_1 расположен также на оси микроскопа, а объектив O_2 — перпендикулярно оси на уровне посеребренного зеркала N . Оба объектива O_1 и O_2 должны быть по возможности одинаковы. Особенно существенно, чтобы толщины линз в обоих объективах были соответственно равны.

У объектива O_2 на общей с ним, перпендикулярной оси микроскопа, прямой находится металлическое зеркало M .

По другую сторону от полупосеребренного зеркала N , на той же перпендикулярной к оси микроскопа прямой, расположены диафрагма A и источник света S , который состоит из обыкновенной электролампочки 4 $V \times 0,3$ А (лампочка карманного фонаря), заключенной в кожух 5 (рис. 2).

Пучек лучей по выходе из источника света S проходит диафрагму A и попадает на полупосеребренное зеркало N . Это зеркало отражает часть лучей, которые, пройдя через объектив O_1 , попадают на исследуемый объект. Затем, отражаясь от последнего, снова

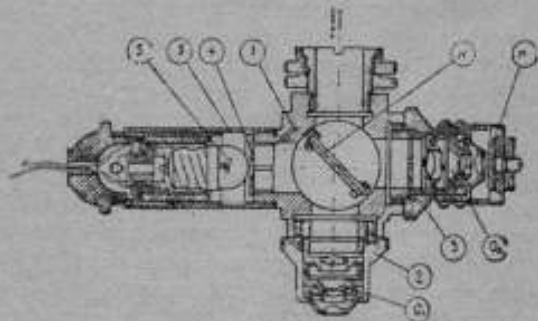


Рис. 2.

Благодаря тому, что зеркало M расположено под небольшим углом к оси, создается разность фаз, первого и второго пучков, что дает интерференционную картину.

Исследование плиток производилось методом фотографирования при помощи фотокамеры Цейсса 8 (см. рис. 1), которая укреплялась на отдельном от микроскопа штативе 9 посредством жесткой металлической планки 10, позволяющей устанавливать фотокамеру в одном и том же положении относительно микроскопа.

§ 2. Юстировка прибора

Юстировка микроинтерферометра главным образом заключается в установке металлического зеркала M в такое положение, при котором изображение исследуемой поверхности совпадает с изображением металлического зеркала.

Это достигается следующим образом: закрепив объектив O_2 , устанавливаем металлическое зеркало M путем перемещения его относительно объектива O_2 до тех пор, пока какие-либо пороки, пылинки и другие отметины, имеющиеся на поверхности зеркала, будут наиболее резко видны при наблюдении через окуляр. Для удобства наблюдения, в случае закрепленного измеряемого изделия, при установке металлического зеркала, либо исследуемая поверхность покрывается листом белой бумаги, либо тубус микроскопа отводится от детали.

После этого закрепляют измеряемый объект на столике и сначала приближенным наведением, а затем осторожным микрометрическим перемещением тубуса микроскопа достигают резкости изображения при помощи объектива O_1 .

Затем перемещают объектив O_2 вместе с металлическим зеркалом M , приближая его к оси микроскопа или удаляя до тех пор, пока интерференционные полосы появятся в поле зрения микроскопа.

Далее очень незначительными перемещениями металлического зеркала M и объектива O_2 добиваются получения наиболее резких интерференционных полос.

Установив интерференционные полосы согласно изложенному выше, вращением полупосеребренного зеркала N вокруг оси, перпендикулярной к плоскости, проходящей через оси обоих симметрично расположенных объективов, достигают наилучшей ширины интерференционных полос. Видимая в поле зрения окуляра ширина интерференционных полос, при которой удобнее всего производить измерения, не должна превышать двух миллиметров и может колебаться от 1,5 до 2 мм.

При очень узких интерференционных полосах влияние впадин и выступов исследуемой поверхности на искривление интерференционных полос становится плохо различимым. Широкие интерференционные полосы наоборот лучше различимы, но размеры шероховатости искажаются вследствие происходящего как бы затекания полосы во впадины поверхности.

Поворот интерференционных полос в плоскости, перпендикулярной к оси микроскопа, осуществляется двумя юстировочными винтами 6

(рис. 3), которыми снабжена оправка полупосеребренного зеркала *M*. Указанными винтами производят наклоны зеркала, приводящие к повороту полос. Изменение наклона интерференционных полос следует производить после того, как исследуемая поверхность установлена в положение, перпендикулярное оси микроскопа, так как неправильное (наклонное) положение детали влияет на направление полос.

При освещении прибора лампочкой карманного фонаря, даже при наилучшем положении ее относительно диафрагмы, интерференционные полосы будут недостаточно контрастными, без резко выраженной границы между темными и светлыми частями полосы. При уменьшении диафрагмы контрастность интерференционных полос немного улучшается, но зато значительно уменьшается освещенность поля зрения. Последнее

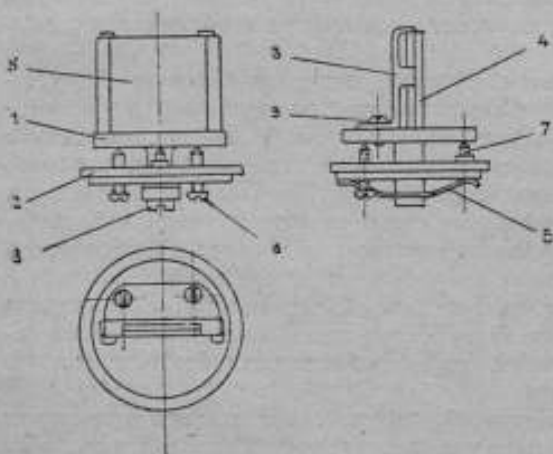


Рис. 3.

обстоятельство вынуждает переходить от лампочки карманного фонаря к более сильному источнику света, т. е. прибегать к дополнительным приспособлениям, вызывающим ряд неудобств и лишаящим прибор портативности.

Наибольшая резкость и контрастность полос с лампочкой карманного фонаря получается при уменьшении диафрагмы до 0,1—0,2 мм и установке лампочки в такое положение, чтобы освещение прибора производилось только раскаленной нитью. При такой установке получается прекрасная картина интерференционных полос на узкой полоске освещенной части поля зрения; остальная часть поля зрения остается почти совершенно темной, вследствие чего оказывается невидимой большая часть поверхности исследуемой детали. Если бы, вместо лампочки карманного фонаря, прибор освещать указанным выше образом, лампочкой, имеющей вместо нити накала площадку или полоску, шириною в 2—3 мм, то при хорошей контрастности полос можно было бы получать достаточную освещенность всего поля зрения.

§ 3. Методы измерений

Исследование степени чистоты обработанных поверхностей при помощи микроинтерферометра заключается в измерении отклонений интерференционной полосы от прямой линии. Таким образом, каждая интерференционная полоса представляет собою изображение совпадающего

с полосой профиля поверхности исследуемой детали на участке, видимом в поле зрения микроскопа. Масштабы измеренных неровностей, т. е. впадин или выступов, по высоте и расстояний между ними не одинаковы, так как высота или глубина впадины определяется шириной интерференционной полосы, а расстояние между ними — увеличением микроскопа, определяемым посредством объект-микрометра.

Измерения выступов и впадин, а также расстояний между ними, могут производиться двумя методами.

Первый метод заключается в следующем. Исследуемое изделие устанавливается на столике так, чтобы направление рисок или штрихов шероховатости было перпендикулярным направлению перемещения стола, и в последующем — направлению интерференционных полос, и закрепляется. Затем микроскоп фокусируется, и при помощи установочных винтов столика измерительная поверхность детали устанавливается перпендикулярно к оси микроскопа, и еще раз тщательно проверяется фокусировка микроскопа. При хорошей юстировке микроинтерферометра и правильной фокусировке микроскопа, должны быть одинаково резко видны и исследуемая поверхность детали и интерференционные полосы. В противном случае следует произвести добавочную юстировку микроинтерферометра согласно изложенному выше.

Завершив юстировку прибора и установку детали, производят измерения при помощи окулярного микрометра. Нити окулярного микрометра наводят на каждый из изгибов интерференционной полосы в двух взаимно-перпендикулярных направлениях с последующими отсчетами по барабану после каждой наводки.

Затем, имея отсчеты по барабану для двух взаимно-перпендикулярных направлений, при помощи указанных выше масштабов, определяют цену деления барабана окулярного микрометра для впадин или выступов и отдельно для расстояний между ними. Далее, беря разности между последующими отсчетами и первым и умножая каждую из разностей на соответствующую ей цену деления барабана, получают отклонение профиля поверхности от прямолинейности (в микронах).

Вследствие того, что прибор обладает большой чувствительностью к перемещению тубуса микроскопа вдоль оси, при наличии которого происходит смещение интерференционных полос (изменение расстояния между исследуемой поверхностью и тубусом микроскопа на одну длину волны, т. е. на $0,57\mu$, производит смещение интерференционных полос в поле зрения микроскопа на две полосы), то пользование указанным методом вызывает ряд неудобств:

а) несмотря на хорошее крепление всех подвижных частей микроскопа, все же происходит медленное сползание тубуса под действием собственного веса и веса окулярного микрометра, которое влечет за собою медленное смещение интерференционных полос.

б) при наводке нитей окулярного микрометра на изгибы интерференционных полос, приходится делать произвольные нажимы на тубус микроскопа, что также приводит к смещению интерференционных полос;

в) после произведенной работы, кроме записи в журнале наблюдений, не остается никаких дополнительных материалов, позволяющих

поверить правильность измерений и восстановить могущую произойти неточность, а также дополнить данные измерений наглядным изображением измеряемых величин.

Кроме указанного, этот метод требует значительной затраты труда и времени.

Второй метод — метод фотографирования, при помощи которого производилось исследование образцов, заключается в следующем.

Установив исследуемую деталь в измерительное положение, так же как и в первом методе, фотографируют полученные интерференционные полосы, а затем по снимкам измеряют отклонения интерференционных полос от прямолинейности.

Фотографирование производится следующим образом. К прибору с установленным изделием подводится фотокамера, укрепленная на отдельном от прибора массивном штативе так, чтобы фотокамера не касалась прибора. Фотокамера устанавливается на некотором расстоянии, примерно 1—2 мм, от прибора для того, чтобы изолировать микроинтерферометр от влияния веса фотокамеры и напряжений, получаемых последней от внешних причин, которые, как указывалось выше, приводят к смещению интерференционных полос.

Затем, наблюдая изображение интерференционных полос и исследуемой поверхности на матовом стекле фотокамеры, добиваются наибольшей резкости изображения путем очень незначительной дополнительной фокусировки микроскопа.

Далее, вместо матового стекла вставляют кассету с фотопластинами и производят съемку.

Выше указывалось, что прибор обладает большой чувствительностью к различного рода сотрясениям, в связи с чем, несмотря на принятые предосторожности и соответствующие крепления подвижных частей, все же происходит медленное сползание тубуса микроскопа, смещающее интерференционные полосы. Это вынуждает производить фотосъемку на пластинках большой чувствительности, требующих минимальной экспозиции. Далее, так как при наилучшей юстировке микроинтерферометра все же не удается получить достаточно резкой (контрастной) границы между темными и светлыми частями интерференционных полос, которые к тому же окрашены, то фотографирование следует производить на пластинках, обладающих наибольшей контрастностью и цветочувствительностью. Проявление негативов и печатание снимков следует производить контрастным проявителем.

Затем по отпечатку измеряют отклонения интерференционной полосы от прямолинейности в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Измерения следует производить на приборе с небольшим увеличением (примерно 5—6 крат) при помощи измерительного (отсчетного) столика, а не при помощи окулярного микрометра.

По полученным отсчетам строят диаграммы, представляющие собою профиль совпадающей с интерференционной полосой части исследуемой поверхности.

Масштабы выступов или впадин и расстояний между ними определяются как и в первом методе, т. е. первый по ширине интерферен-

ционной полосы, а второй при помощи объектникрометра по увеличению прибора.

Второй метод измерения непрямолинейности интерференционных полос несколько лучше первого, так как не требует дополнительных фотоснимков для полноты картины измерений и позволяет производить измерения не на микроинтерферометре, а в более спокойной обстановке. Но все же оба эти метода являются очень трудоемкими, требующими для измерения профиля поверхности на длине одного миллиметра от 60 до 90 час. Измерение изгибов с помощью лупы на-глаз в дозах полосы не гарантирует достаточной точности.

§ 4. Исследование образцов

Описанным вторым методом были исследованы образцы плоскопараллельных концевых мер (плиток) четырех заводов: „Кара Цейсс“, „Красный инструментальщик“, „Иоганссон“ и „Фриц Вернер“; причем плитки „Красного инструментальщика“ и „Иоганссона“ были совершенно новыми, т. е. не были в эксплуатации, а плитки „К. Цейсса“ и „Ф. Вернера“ были в употреблении при работах в лаборатории.

Фотографирование интерференционных полос производилось с помощью фотокамеры Цейсса на пластинках изопанхром, чувствительностью 400—500 ХД.

Примечание. При фотографировании были испробованы пластинки: ортохром, диапозитивные и изопанхром со светофильтром и без него. Ненаучные результаты получены при работе с пластинками изопанхром без светофильтра. На пластинках ортохром, вследствие их недостаточной светочувствительности, пробуя различные экспозиции, размеры диафрагмы, освещенность и чувствительность пластинок, мы получали снимки плохого качества. Интерференционные полосы получались не контрастные, размытые и недостаточной яркости. На диапозитивных пластинках вообще ничего не получилось, так как диапозитивные пластинки выпускаются малой чувствительности, следовательно, требуют большой экспозиции, а при большой экспозиции полосы успевают смещаться.

На пластинках изопанхром, при работе с электролампочкой $4V \times \times 0,3A$, экспозиция равнялась 15 сек, но так как при проявлении контрастным проявителем негативы получались неплотными, то их приходилось уславивать, а затем уже делать отпечатки на контрастной бумаге также с помощью контрастного проявителя.

Состав проявителя, при помощи которого были получены наиболее контрастные отпечатки, следующий:

I. Раствор: дигидрофосфорнокислый натр	9 куб. см
сульфит безводный	36 г
гидрохинон	9 „
вода	396 куб. см
	Всего — 450 куб. см
II. Раствор: дигидрофосфорнокислый натр	2 куб. см
метол	1 г
сульфит безводный	5 „
вода	92 куб. см
	Всего 100 куб. см
III. Раствор: поташ	25 г
вода	175 куб. см
	Всего 200 куб. см

Так как поле зрения прибора равно 0,2 мм, то для исследования поверхности плитки в один миллиметр, необходимо было произвести фотографирование, обработку фотоснимков, а также измерения пяти смежных участков, т. е. участков, расположенных один подле другого. Перемещение детали на величину, позволяющую фотографировать рядом лежащие участки исследуемой поверхности, производится при помощи микроскопа.

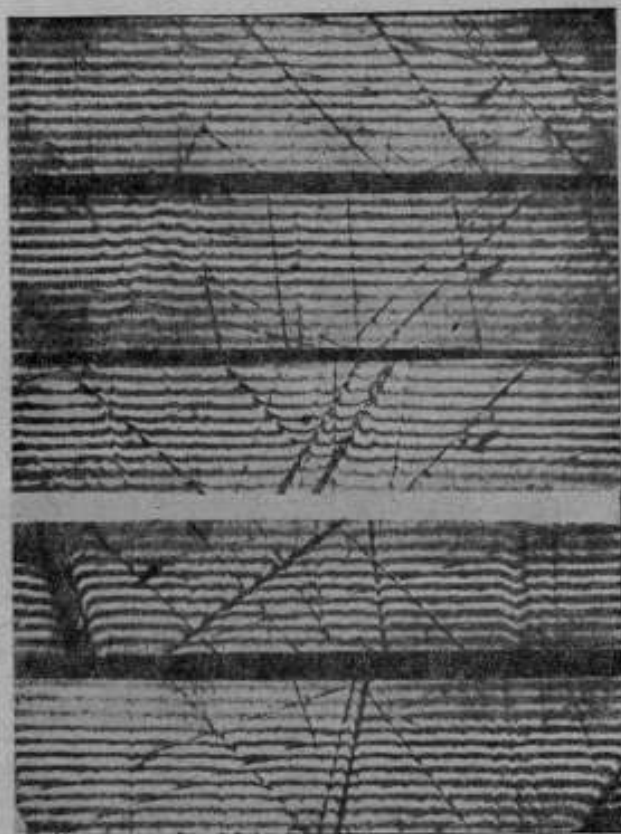


Рис. 5.

Примечание. Поле зрения микроскопа с микроинтерферометром равно 0,25 мм, но вследствие плохого изображения на краях, зависящего от качества оптических деталей микроинтерферометра, приходится брать участок в 0,2 мм.

Таким образом, исследовано по одному миллиметру поверхности плитки для каждого из указанных заводов в отдельности. Кроме того, сняты фотографии еще с трех плиток для каждого из заводов, благодаря чему получена возможность произвести визуальное сравнение при

плиток, являются следствием обработки и какие появились во время работы с ними. Из профилограммы 1 видно, что если не считать двух-трех особенно глубоких царапин, явно появившихся вследствие неосторожного обращения с плитками во время работы, то наибольшая глубина царапины достигает $0,25\mu$ при расстоянии между ними от $0,002$ до $0,052$ мм.

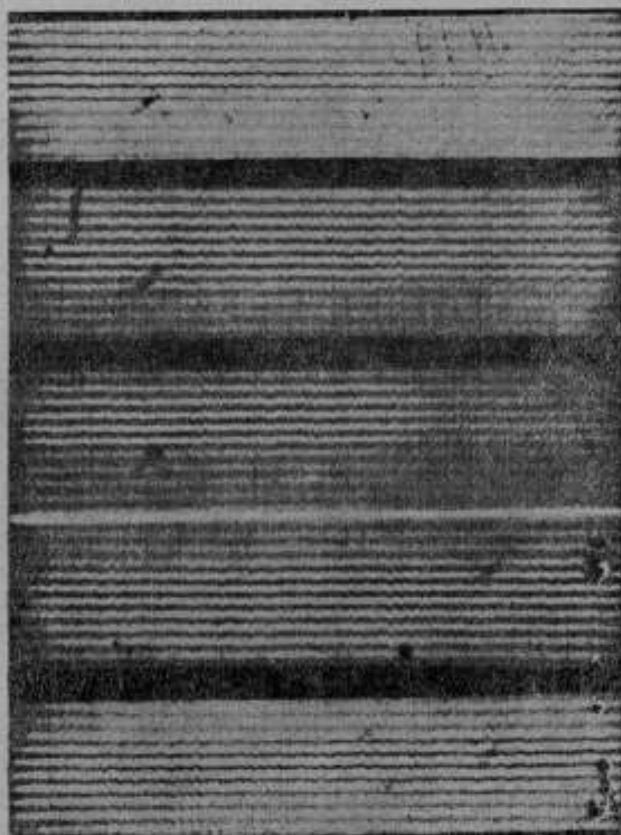


Рис. 7.

Профилограмма 2 (рис. 6) соответствует изображенной на рис. 7 поверхности плитки завода „Красный инструментальщик“. Эти плитки совершенно не были в работе и, как видно из фотоснимка и профилограммы 2, имеют поверхность значительно лучшую, чем предыдущие. Шероховатость поверхности этих плиток не превышает $0,12\mu$ при расстоянии между впадинами от $0,0005$ до $0,005$ мм.

Кривые профилограммы 3 (рис. 8) и снимок поверхности, изображенной на рис. 9, позволяют судить о поверхности плиток фирмы

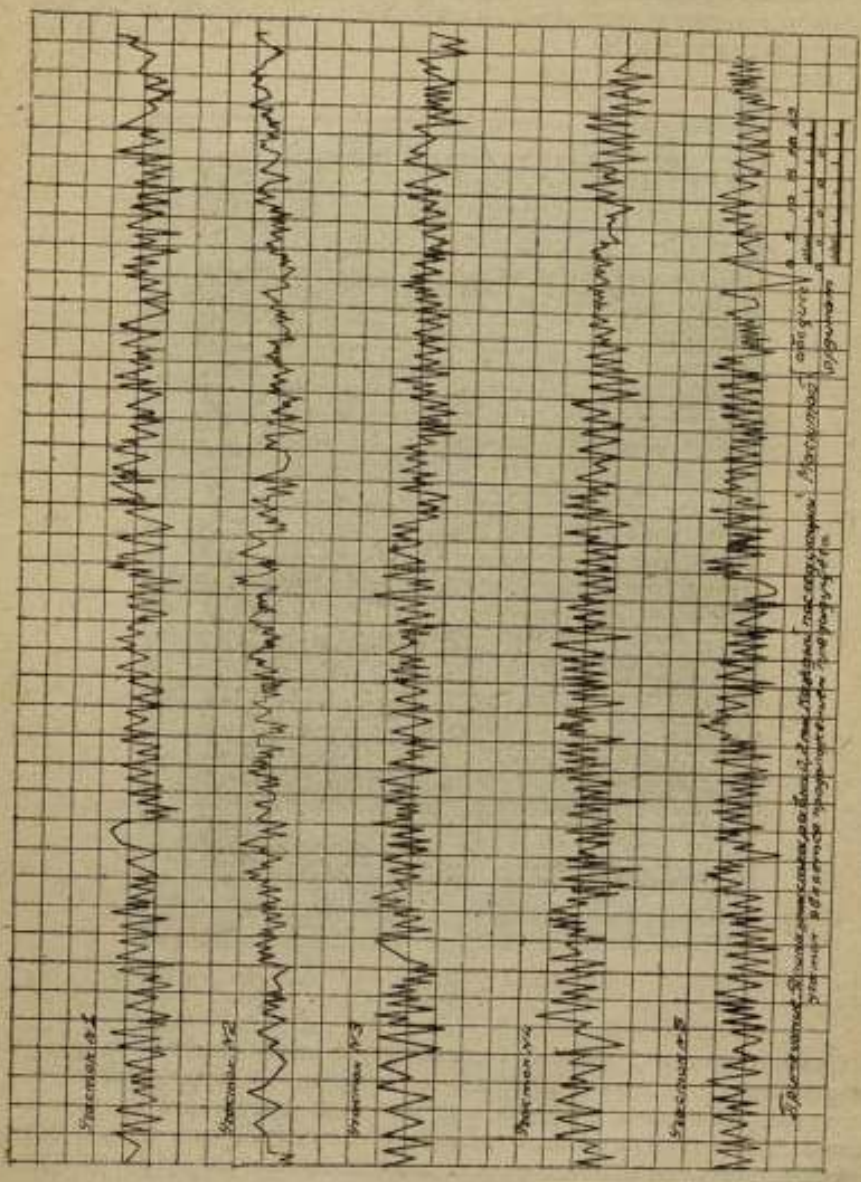


Рис. 8. Профилограмма № 3 (в угла Иоганссон).

Иоганссон. Поверхности плиток Иоганссон, которые также не были в работе, немногим отличаются от плиток „Красного инструментальщика“, хотя несколько лучше последних, имеют наибольшую глубину шероховатости в 0,09 μ при расстоянии между впадинами или гребешками от 0,0005 до 0,003 мм.

Резкий контраст в сравнении с описанными поверхностями представляют поверхности плиток фирмы Фриц Вернер, представленные про-

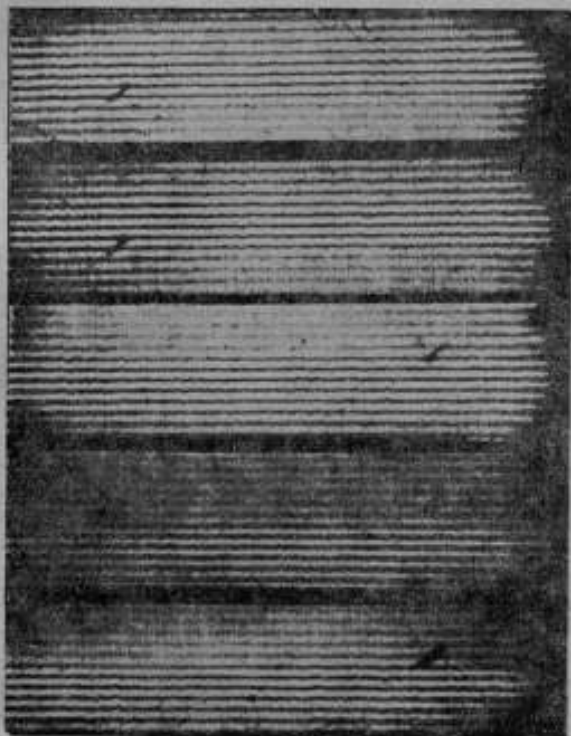


Рис. 9.

филограммой 4 (рис. 10) и фотоснимком (рис. 11). Как видно из фотоснимка и профилограммы 4, интерференционные полосы очень близки к прямой линии, лишь незначительно от нее отклоняясь. Так как эти плитки были в работе, правда, непродолжительное время, то вполне возможно, что царапины, вызвавшие отклонение интерференционной полосы от прямой линии, появились вследствие работы с ними. Наибольшее углубление царапины, обнаруженное на поверхности плитки, не превышает 0,06 μ при расстоянии между ними от 0,003 до 0,2 мм.

Приведенные фотоснимки позволяют сделать вывод, что поверхность плиток „Фриц Вернер“ выгодно отличается от поверхностей плиток остальных заводов.



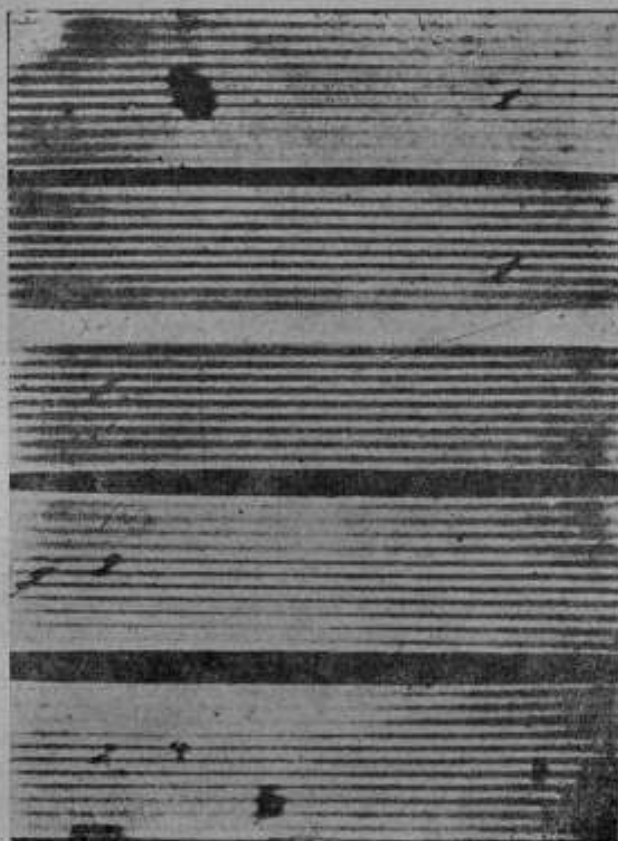


Рис. 11.

§ 5. Погрешности измерений

Полученные результаты измерения имеют погрешности, обусловленные рядом факторов. Эти факторы следующие:

1. Искажение интерференционных полос на краях поля зрения вследствие плохого качества объективов.

2. Незначительное смещение интерференционных полос, вследствие медленного опускания тубуса микроскопа и сотрясений прибора во время фотосъемки.

3. Искажение искривлений интерференционных полос вследствие того, что положение царпинны не перпендикулярно направлению полос.

4. Погрешность установки фотокамеры при фотографировании объектно-микрометра для определения увеличения прибора.

5. Погрешность, зависящая от неравномерного сокращения фотобумаги при печатании снимков.

6. Погрешность при определении масштабов.
7. Погрешность при измерении впадин и выступов вследствие размытости интерференционных полос.

8. Погрешность, зависящая от дефектов негатива и фотобумаги.

9. Погрешность при перенесении размеров на профилограммы.

Анализируя приведенные выше соображения о погрешностях измерений, можно с достаточным основанием утверждать, что относительная погрешность измерения будет порядка $\pm (3-5\%)$.

Заключение

Сравнивая между собой полученные профилограммы поверхностей исследованных плиток и имея в виду, что все плитки вполне пригодны к работе, можно сделать вывод, что качество измерительных поверхностей плоскопараллельных концевых мер колеблется в довольно значительных пределах, а именно: начиная от зеркальной поверхности, дающей профилограмму в виде прямой линии, и кончая поверхностью с впадинами глубиною 0,24 μ и расстоянием между ними — 0,05 мм.

Этот вывод, возможно, в дальнейшем будет несколько уточнен, так как исследованы плоскопараллельные концевые меры не в достаточном большом количестве и не всех заводов-изготовителей. Кроме того, не исследованы поверхности плиток, стоящих на грани износа, но еще пригодных к работе, а также плиток после ремонта.

Не исследован также вопрос влияния методов обработки поверхностей на степень их чистоты.

Отмечая целесообразность применения микроинтерферометра для исследования качества измерительных поверхностей плоскопараллельных концевых мер, считаем необходимым указать на большую трудоемкость метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. Д. Хвольсон. Курс физики, 1911, т. 2, стр. 591.
2. G. Schmalz. Technische Oberflächenkunde. 1936. S. 58.
3. Акад. В. Линник. „Труды Академии наук СССР“, 1934.
4. W. Kinder. Ein Mikro-Interferometer nach W. Linnik. Zeiss-Nachrichten. 1937. August, Folge 2, Heft 3.
5. Л. Н. Афаньева. Разработка метода измерений профилей металлических образцов по фотографическим интерференционным полосам. ГОИ. Отчет 0—302, 1938.

П. Е. СОЛОВЬЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА МИКРОСКОПЕ БУША

§ 1. Назначение и конструкция микроскопа Буша

Микроскопом Буша пользуются для сравнения двух обработанных поверхностей, при чем одна из поверхностей является эталонной. При помощи этого прибора можно дать качественную оценку поверхности и получить ее микрофотографию.

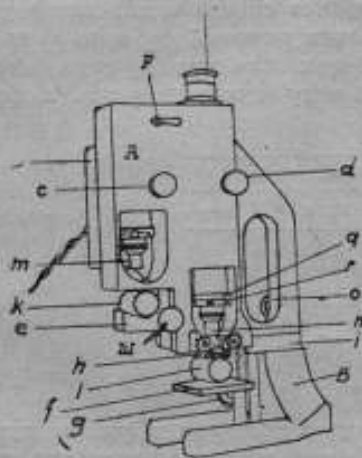


Рис. 1.

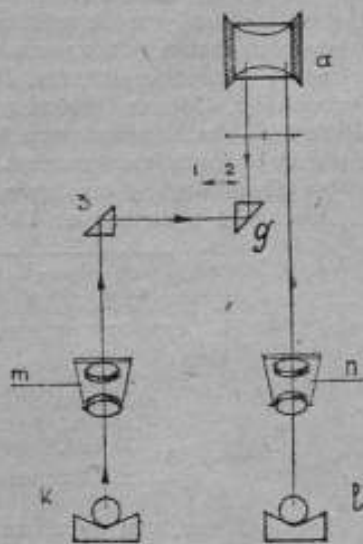


Рис. 2.

Микроскоп Буша можно применять в различных отраслях промышленности: в сланко- и приборостроении, в бумажной и текстильной промышленности и т. п.

Микроскоп Буша представляет собой конструкцию вида, изображенного на рис. 1.

Два тубуса объективов закрепляются в общем корпусе *A* микроскопа, а в них на „ласточкинном хвосте“ помещаются объективы *m* и *n*. Регулировка объективов производится ручонками *c* и *d* по поверхности образцов *k* и *l*. Изображение поверхностей попадет в окуляр *a*

от объектива *n* — прямым путем, а от объектива *m* — через систему призм. В поле зрения окуляра получаются два изображения: одно от исследуемого изделия *l* через объектив *n*, другое от эталонной поверхности *k* через объектив *m* и две призмы. Ход лучей можно представить следующей оптической схемой (рис. 2). Здесь *k* и *l* — образцы с обработанными поверхностями, *m* и *n* — объективы, *з* и *ж* — призмы для направления пучка от поверхности в окуляр, причем призма *ж* перемещается по направлению стрелки при помощи кнопки *p* (см. рис. 1). Кнопкой *p* мы можем либо вводить в поле зрения окуляра изображение поверхности от эталона *k*, либо выводить его из окуляра.

Корпус микроскопа держится на подставке *B* (см. рис. 1), в верхней части которой имеется окно для руки при переноске микроскопа, а также — для осмотра изделия при установке микроскопа на станке. Эталон (или образец, с которым сравнивают изучаемый) крепится на призме *e* и поджимается к корпусу микроскопа; если эталон плоский, то его ставят на специальный столик, устанавливаемый на место призмы *e*. Исследуемое изделие кладут на подвижной столик *f* и поджимают к роликам *h*, которые можно поднимать и опускать, в зависимости от диаметра изделия. Подвижка столика достигается поворотом рукоятки *г*. Объекты наблюдений освещаются специальными матовыми лампочками пальцеобразного вида. Лампочки помещаются в кожухе *b* и имеют общий выключатель света. При микроскопе Буша имеется набор объективов и окуляров, благодаря чему можно получить любое увеличение в пределах от 15 до 200^x.

Объективы: аппаратура и увеличение	Окуляры и их увеличения			
	5 ^x	8 ^x	11 ^x	17 ^x
	Общие увеличения			
0.10/3 м	15	25	35	50
0.16/6,5 „	30	50	70	110
0.25/11 „	55	90	120	200

Буш считает, что на практике чаще всего пользуются увеличением в пределах от 30 до 70^x. Однако, это справедливо не во всех случаях практики. В тех случаях, когда имеются поверхности с высокой степенью точности обработки, этот предел недостаточен и приходится пользоваться увеличением до 200^x.

§ 2. Работа с микроскопом

При исследовании микроскопом Буша качества обработки поверхностей желательно иметь эталоны различных степеней чистоты, определенных размеров и диаметров. Эталон кладут на призму *e* и прижимают к нижней части корпуса *A*; после этого закрепляют винт *ш*. Кнопку *p* передвигают в положение 2 и, смотря в окуляр *о*, фокусируют рукояткой *с* на поверхность до тех пор, пока изображение в оку-

дере не станет резким, после чего кнопку p перемещают в положение 1. Испытуемое изделие l ставят на столик f и прижимают к роликам h , если изделие небольших размеров. Объектив n фокусируют рукояткой d до полной резкости изображения, получаемого в окуляре a . Когда получено резкое изображение, кнопку p перемещают в положение 2 и этим получают в поле зрения окуляра микроскопа два изображения: одно — поверхности эталона и второе — поверхности изучаемого изделия. Наблюдая, таким образом, через окуляр, можно сравнивать изучаемую поверхность с эталонной. В качестве иллюстрации наблюдаемого эффекта можно получить фотоснимки качества поверхностей и, следовательно, не только сравнивать их между собой, но и подробно далее изучать полученные результаты.

§ 3. Исследование качества обработки поверхностей гладких пробок завода „Калибр“

От завода „Калибр“ были получены три набора калибров. Было произведено сравнение гладких пробок 1, 2, 3 степеней точности всех трех наборов и получены снимки этих сравнений.

План работы был следующий.

Сравнивались поверхности одинаковых степеней точности обработки из трех наборов. После этого сличались разные степени точности обработки, для получения представления, насколько одна степень точности обработки отличается от другой.

Кроме этих, основных, калибров имелись гладкие пробки завода „А“ со знаками обработки ∇ , $\nabla\nabla$, $\nabla\nabla\nabla$ и $\nabla\nabla\nabla\nabla$. Эти пробки сравнивались с калибрами одного из первых трех наборов, причем каждое сравнение фотографировалось.

Так как поверхности калибров первого набора были ранее изучены в ГОИ и для них имелись готовые профилограммы, то поверхности этих калибров принимались за эталонные.

Были получены следующие фото-снимки:

I негатив: a — эталон 3 степени, b — образец с $\nabla\nabla\nabla$ — обработки (рис. 3).

II негатив: a — образец с $\nabla\nabla$ — обработки, b — образец с $\nabla\nabla\nabla$ — обработки (рис. 4).

III негатив: a — образец с $\nabla\nabla$ — обработки, b — образец с ∇ — обработки (рис. 5).

Чувствительность примененных пластинок — 350 по X и D, экспозиция 2 мин., освещение — лампочки микроскопа. Увеличение снимков 12 \times .

§ 4. Результаты сравнения

Сравнение полученных на микроскопе Буша микрофотографий позволило установить, что различия в снимках 1-ой степени точности обработки не наблюдаются, и их можно считать тождественными. Раз-

ница между 1-ой и 2-ой степенью точности также, как показали микрофотографии, очень незначительна. Различие же между 1-й и 3-ей и

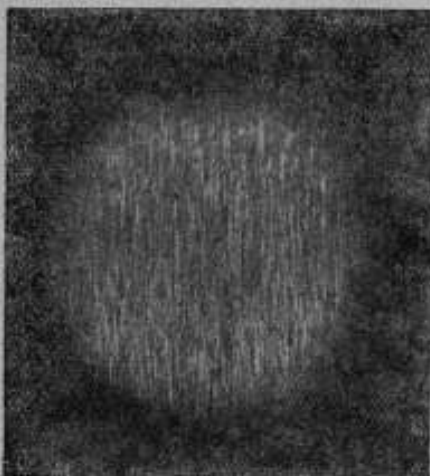


Рис. 3.



Рис. 4.

далее — между 2-й и 3-й степенями точности уже более наглядно. Особенно это заметно при сопоставлении образцов эталона 1-й степени точности с калибром, обработанным под $\nabla\nabla\nabla\nabla$.

Образец с $\nabla\nabla\nabla$ не подходит к эталону 2-ой степени, но совершенно подобен эталону 3-ей степени точности обработки, и это полностью подтверждается снимком (рис. 3). Следовательно, можно считать, что образцы с $\nabla\nabla\nabla$ подобны эталону 3-ей степени точности.

Различия между знаками обработки, $\nabla\nabla\nabla$, $\nabla\nabla$ и ∇ наглядно показаны на двух, наиболее характерных фотографиях (рис. 4 и 5).



Рис. 5.

Таким образом, при помощи микроскопа Буша можно получить наглядный материал, характеризующий различия между поверхностями отдельных образцов, а, имея микроснимки поверхностей

изучаемых изделий, можно сделать и соответствующие производственные выводы.

Заключение

Микроскоп Буша, применяемый для исследования качества обработки поверхностей, дает качественную характеристику поверхности относительно поверхности эталона, но не позволяет определять микрогеометрию ее, как, например, методы микроинтерференции, двойного микроскопа Линника и профилографа. Но метод Буша имеет то преимущество перед другими, что дает возможность гораздо быстрее произвести сравнительную оценку качества поверхности, без составления дополнительных таблиц и записей. Эта оценка будет, конечно, вполне действительной при наличии эталонов или образцов, заранее изученных и имеющих вполне определенную микрогеометрию поверхности. Имея такого рода эталоны, можно очень быстро проверить качество поверхности изготавливаемых изделий, т. е., сличая поверхности изделия с эталоном чистоты, можно дать на месте производства оценку данной поверхности. Желательно иметь два эталона чистоты поверхности, в пределах чистоты обработки которых должна находиться испытуемая поверхность.

Контрольным отделам цехов всевозможных заводов, связанным с обработкой поверхностей, микроскоп Буша может оказать большую помощь, а потому применение его в этих отделах, в связи с повышением требований к качеству обработки поверхностей, весьма полезно.

Применение микроскопа непосредственно на рабочем месте у станков связано с некоторыми неудобствами, так как прибор имеет довольно большие габариты и большой вес.

Для рабочего места необходимо иметь такую аппаратуру, которая дала бы возможность быстро проверять качество поверхности изделия.

В работах и исследованиях, при получении оценки качества обработки поверхностей в зависимости от изменения условий режима обработки изделий резами и другими режущими инструментами (изменение подачи и скорости резания, угла заточки реза и других факторов) микроскоп Буша дает возможность сразу со станка просмотреть поверхность и сделать заключение, лучше или хуже она сравнительно с поверхностью предыдущей обработки.

Таким образом, микроскоп Буша, при наличии эталонов чистоты обработки поверхности, может служить контрольным прибором на производстве. В лабораториях этот прибор дает возможность получить фотоснимки поверхностей эталонов и любых готовых изделий.

Отв. редактор *Г. М. Кручинин*.

Подписано к печати 10/1 1941 г. Печ. л. 75.
Уч.-изд. л. 35. стр. 1000 экз. Заказ № 608,
М 1367

Набрано по 5-й типографии ОГИЗд РСФСР
треста «Полиграфиздат» «Печатный Двор»
им. А. М. Горького. Ленинград, Гатчинская, 26.

Отпечатано с готовых матриц в тип. «Совет-
ский печатник», по заказу № 1008,
Ленинград, Малахова, 44.

ТРУДЫ ВНИИМ

1. Микроанометры, энеометры. № 20 (36), под ред. проф. *Доброхотова А. Н.*, ц. 5 р.
2. Электрические исследования и измерения, № 21 (37), под ред. проф. *Маренина Н. А.*, ц. 4 р.
3. Исследования в области измерения длины, № 22 (38), под ред. проф. *Барина В. А.*, ц. 10 р.
4. Исследования в области свето-измерительных ламп и световых измерений, № 23 (39) под ред. проф. *Тиходева П. М.*, ц. 12 р.
5. Исследования в области электрических измерений, № 24 (40), под ред. проф. *Маренина Н. А.*, ц. 10 р.
6. Исследования в области рентгенометрии, № 25 (41), под ред. проф. *Паройкова И. В.*, ц. 4 р.
7. Исследования в области радиологии, № 26 (42), под ред. проф. *Богоявленского Л. Н.*, ц. 4. 50 к.
8. Магнитные исследования и измерения, № 1 (43), под ред. проф. *Шрамкова Е. Г.*, ц. 8 р.
9. Механические измерения, № 2 (44), под ред. проф. *Доброхотова А. Н.*, ц. 5 р.
10. Высокочастотные исследования и измерения, под ред. проф. *Кьяндского Г. А.*, ц. 7 р.
11. Потенциометры. *Кротова В. И.* Монография, ц. 9 р. 75 к.
12. Эталон времени. *Росовская В. А.* Монография.
13. Современное состояние эталонов длины и методы точного измерения длины. Проф. *Барин В. А.* Монография.
14. Краткий обзор важнейших научно-исследовательских работ лабораторий ВНИИМ (бесплатно).

В ПЕЧАТИ

1. Исследования в области термометрии, под ред. проф. *Кондратьева Г. М.*
2. Исследования в области химии, под ред. проф. *Липина С. В.*
3. Исследования в области оптических измерений, под ред. действ. члена *Романовой М. Ф.*
4. Точные измерения в машино- и приборостроении под ред. проф. *Барина В. А.*
5. Исследования в области тепловых измерений под ред. проф. *Кондратьева Г. М.*
6. Новый световой эталон, под ред. проф. *Тиходева П. М.*
7. Исследования в области механических измерений, под ред. проф. *Петрова В. П.*
8. Исследования в области рентгенометрии и электронизмерений, под ред. проф. *Карандеева К. Б.*
9. Введение в теорию ампересов. Проф. *Залуцкий Л. В.* Монография

Заказы на сборники и отчеты о научно-исследовательских работах, указанных в вышедшем из печати „Кратком обзоре важнейших научно-исследовательских работ лабораторий ВНИИМ“, направлять в Ленинград, 5, Международный пр., 19, Планово-производственный отдел ВНИИМ“.

ЦЕНА 7 руб.

*обложке
как на сер.*

СКЛАД ИЗДАНИЙ:
Ленинград. Международный пр., д. 19, ВНИИМ

