

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

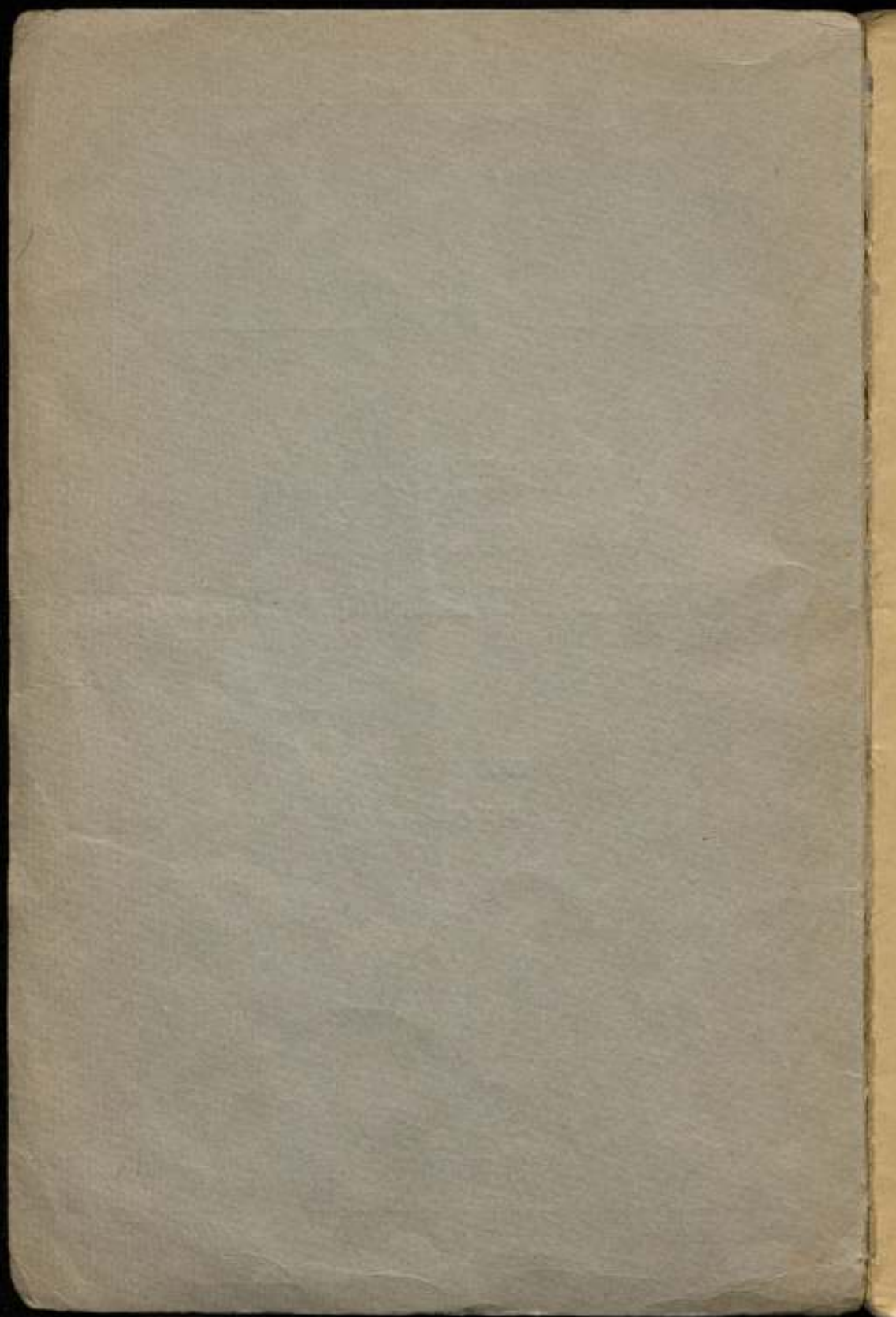
БИБЛИОТЕКА  
Всесоюзного научно-исследовательского  
института метрологии  
имени Д. И. Менделеева

# ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ВНИИМ

ВЫПУСК 12 (72)

МАШГИЗ 1951



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

---

# ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ВНИИМ

ВЫПУСК 12 (72)

Под редакцией проф. В. Г. МАХРОВСКОГО

и 10550



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА 1951 ЛЕНИНГРАД

Выпуск 12 (72) трудов ВНИИМ, посвященный исследованиям в области линейных измерений, содержит статьи общего характера, представляющие интерес для конструкторов и научных сотрудников исследовательских институтов, и статьи, касающиеся специальных вопросов заводской измерительной практики.

К первой группе относится статья, излагающая основы точности конструкций машин и приборов и методы применения их к решению вопросов инструментальных погрешностей измерительных приборов. К этой же группе относится статья о графическом методе суммирования погрешностей измерения и изготовления.

Ко второй группе специального характера относятся статьи, посвященные точному измерению шкал на стереокомпараторе, пневматическому методу измерения длины, измерению больших длин в машиностроении геодезическим методом, а также вопросу переосмотра ГОСТ 2789-45 („чистота поверхностей“) и его внедрения (субъективные методы оценки чистоты поверхности).

Отв. редактор канд. техн. наук *М. П. Павлов*  
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА  
Редакция литературы по машиностроению  
Зав. редакцией инж. *Ф. И. ФЕТИСОВ*



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Научная деятельность лаборатории измерения длины в машиностроении ВНИИМ направлена на решение следующих задач:

1. Задачи расширения области линейных измерений как в сторону больших длин, измеряемых метрами, так и в сторону малых длин, измеряемых микронами и его долями.

2. Задачи повышения точности измерения путем разработки новых методов и изучения источников погрешностей измерений.

Выпуск 12 (72) трудов ВНИИМ „Исследования в области линейных измерений“ отражает деятельность лабораторий в решении этих задач.

Статья В. Г. Махровского „Метрология и теория точности конструкции“ рассматривает вопрос возможности изучения инструментальных погрешностей приборов методами теории точности конструкций.

Вторая статья В. Г. Махровского излагает метод графического определения сумм случайных погрешностей измерения, кривые распределения которых неизвестны.

Вопросу повышения точности измерения штриховых мер (шкал) новым стереокомпараторным методом посвящена статья М. К. Дубинского „Измерения точных штриховых мер на стереокомпараторе“.

М. Л. Бржезинский в статье „Некоторые исследования и применение пневматического метода“ знакомит с возможностью применения нового метода для измерения малых длин и чистоты поверхности.

Л. К. Каяк в статье „О применении геодезических методов для измерения больших длин в машиностроении“ сообщает об опыте измерения больших длин в заводских условиях.

Статья В. Г. Махровского „К вопросу о пересмотре ГОСТ 2789-45. Чистота поверхностей. Микрогеометрия поверхности. Классификация и обозначения“ посвящена разработке терминологии в области оценки качества поверхности.

Наконец, статья В. Г. Махровского и М. Ф. Гречко „Исследование субъективных методов оценки чистоты поверхности“ описывает опыт психотехнического испытания способности оценки качества поверхности путем осязания и визуальным методом.

## **МЕТРОЛОГИЯ И ТЕОРИЯ ТОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ**

### **I. Введение**

27 июня 1950 г. исполнилось 20 лет с момента доклада автора в комиссии по допускам при Комитете эталонов Главной палаты мер и весов, посвященного вопросу о допусках для длин в сложных конструкциях машин, приборов и других технических произведений.

В докладе было высказано несколько положений, новых для того времени, вызвавших дискуссию, продолжавшуюся в течение трех дней (27 июня, 7 и 17 июля 1930 г.) В дискуссии принимали участие проф. Л. В. Залуцкий, проф. Н. С. Михельсон, доц. П. П. Зубрилин, А. А. Поликарпов, инж. М. Н. Белоконов, инж. В. Э. Макарович.

Предложение проф. Л. В. Залуцкого об опубликовании этой работы было принято и поддержано Всесоюзным Комитетом по стандартизации при Совете Труда и Обороне. Доклад был опубликован в виде отдельной монографии под названием „Допуски для длин“ (Изд-во „Стандартизация и рационализация“, 1932).

### **2. Основные вопросы теории точности конструкций**

Монография „Допуски для длин“ — своего рода программа работ в области изучения точности конструкций, по которой работал сам автор и ряд других. Правда, эта программа для тридцатых годов была, пожалуй, преждевременной. Лишь 26/IX 1939 г. чл.-корр. Академии наук СССР И. И. Артоболевский на общем собрании отделения технических наук сформулировал задачи исследования проблемы точности в области автоматике и внедрения быстроходных машин.

Автор в своем докладе 27/VI 1930 г. поставил ряд следующих вопросов и в первом приближении дал на них ответ.

1. Чем объясняется отклонение характеристик и отдельных качеств воспроизведенных в материале (реальных, действи-

тельных) технических произведений (будь то двигатель внутреннего сгорания, мост, калибр, развертка и т. п.) от запроектированных характеристик и отдельных качеств (характеристик и отдельных качеств идеальных технических произведений) и как вычислить поправки для перехода от идеальных конструкций к действительным?<sup>1</sup>

2. Каковы допустимые отклонения запроектированных геометрических размеров и физических величин?<sup>2</sup>

3. Каким критерием проверяется правильность допустимых отклонений геометрических размеров конструкции?

4. Как можно вычислить погрешность положения любой точки линии и поверхности конструкции (точки толкателя двигателя, линии соприкосновения зубчатых колес)?<sup>3</sup>

5. Не существует ли общего положения (закона), которым следует руководствоваться при решении частных задач о допустимых отклонениях геометрических размеров?

Как были решены автором и другими за 20 лет, протекших после доклада, отдельные задачи, связанные с поставленными вопросами, будет изложено ниже.

Насколько актуальны были эти вопросы в 1940 г., видно из высказываний И. И. Артоболевского на упомянутом выше собрании отделения технических наук АН СССР. Он сказал, что в связи с развитием в СССР автоматики и внедрения быстроходных машин одной из важнейших проблем является проблема точности машин и механизмов. Первоочередной задачей является установление способа перехода от характеристики идеальной конструкции к характеристике реальной конструкции.

Второй задачей проблемы точности, по мнению И. И. Артоболевского, является задача установления зависимости между основным качеством механизма—его точностью и допусками на длины и посадки.<sup>4</sup>

Высказывания И. И. Артоболевского относятся к концу 1939 г. Современное же состояние вопроса вполне обрисовалось на конференции по вопросам взаимозаменяемости в Ленинграде в 1950 г. в связи с обсуждением доклада акад. Н. Г. Бруевича на тему „О точности механизмов“.

Из доклада акад. Н. Г. Бруевича, в сущности представлявшего изложение основ известной его монографии „О точности механизмов“ (Изд. АН СССР, 1941), следовало, что ничего принципиально нового не было сделано ни в области изучения

<sup>1</sup> В. Г. Махровский, Допуски для длин, Изд-во „Стандартизация и рационализация, 1932, стр. 9.

<sup>2</sup> Там же, стр. 10.

<sup>3</sup> Там же, стр. 13.

<sup>4</sup> И. И. Артоболевский, Значение теории точности машин, современное ее состояние и очередные задачи, Известия АН СССР, Отделение технических наук, 1940, № 7.



точности механизмов, ни в области изучения статических конструкций.

В принятых конференцией решениях указывалось на необходимость дальнейших работ в области взаимозаменяемости и скорейшего их опубликования.

Эти решения и побудили автора опубликовать краткое сообщение о своих последних работах, представляющих развитие идей, изложенных в его докладе в 1930 г.

### 3. Ответ на первый вопрос теории точности конструкций

На первый вопрос, сформулированный выше, был дан следующий ответ. Измерение физических величин сводится к измерению длины, т. е. расстояния между двумя точками на шкале измерительного прибора: точкой нулевой отметки шкалы и некоторой точкой указателя прибора. Указатель прибора перемещается по шкале прибора под действием некоторого импульса, полученного через передаточное устройство от датчика прибора, реагирующего на измеряемую величину.

Между измеряемой величиной и перемещением указателя прибора существует определенная функциональная зависимость

$$F(s, A, P_i^m) = 0, \quad (1)$$

где  $s$  — перемещение указателя прибора;

$A$  — измеряемая величина;

$P_i^m$  —  $m$  физических и геометрических констант, определяющих конструкцию приборов.

Геометрические константы, входящие в уравнение (1), представляют собой линейные и угловые размеры деталей прибора.

Физические же константы получаются, в свою очередь, в результате измерений на соответствующих приборах, также построенных на основании функциональной зависимости, содержащей геометрические параметры.

Таким образом, точность измерения любой физической величины зависит прежде всего в той или иной мере от знания точных значений геометрических параметров измерительных приборов.

Но всякий результат измерения длиныотягощен погрешностью измерения и сохраняет свое значение только при температуре измерения.

В условиях применения прибора при температуре, отличной от температуры измерения, значения геометрических параметров приборов изменяются. С течением времени возможен износ деталей, их деформация вследствие старения материала или каких-либо случайных механических воздействий.

Без периодической поверки измерительные приборы могут

давать показания, весьма отклоняющиеся от действительных значений измеряемой величины.

Если бы мы имели возможность измерить абсолютно точно все геометрические параметры и координаты любой точки измерительного прибора в системе координат, связанной с основанием прибора, то, несомненно, заметили бы, что точки кон-

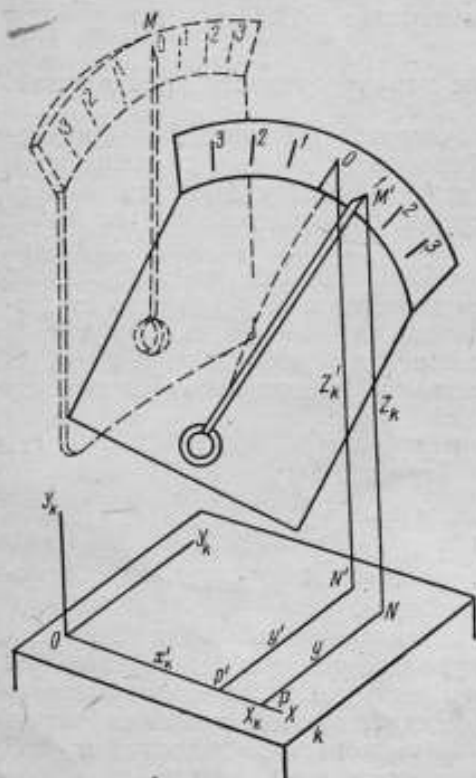


Рис. 1. Указатель и шкала действительного и идеального приборов

струкции не занимают того положения в пространстве, какое должны иметь в идеальной конструкции, а несколько смещены. В частности изменится как положение нулевой точки шкалы, так и указателя прибора. На рис. 1 утрированно изображено изменение положения этих точек. Пунктиром показано идеальное положение шкалы и указателя, а сплошными линиями — действительное положение. Зная погрешности положения нулевой точки шкалы и указателя измерительного прибора, вводя поправки, мы могли бы получить истинное значение измеряемой величины, умножив число делений шкалы на соответствующую цену деления.

Каждое техническое произведение имеет свое целевое назначение. Целевым назначением измерительного прибора является дача показаний численных значений измеряемых величин. Свое назначение прибор выполняет с некоторой погрешностью. Целевым назначением двигателя внутреннего сгорания служит преобразование химической энергии жидкого топлива в механическую энергию. В основе конструкции двигателя, как и в основе конструкции измерительного прибора, лежит некоторая функциональная зависимость. Эту зависимость символически можно выразить так:

$$F(r_1, q_1, q_2, N, p_1^n) = 0, \quad (2)$$

где  $r$  — теплотворная способность топлива;

$q_1$  — часовой расход горючего;

$q_2$  — часовой расход воды для охлаждения;

$N$  — развиваемая мощность;

$p_1^n$  —  $n$  геометрических размеров, определяющих кинематику шатунного и распределительного механизма камеры сгорания, зазоров между цилиндром и поршнем и др.

Аналитически учесть влияние всех факторов едва ли когда-нибудь будет возможно. Но даже в предположении, что нам известна точная функциональная зависимость (2), мы не получим запроектированной мощности, так как теплотворная способность топлива  $r$  в действительности будет иметь значение  $r + \delta r$ . Часовые расходы воды и горючего также будут отличаться от запроектированных значений вследствие неидеального регулирования и погрешностей измерения. Обозначим значения этих величин через  $q_1 + \delta q_1$ ,  $q_2 + \delta q_2$ ... Вследствие неизбежности погрешностей станков, измерительного и режущего инструмента, а также личных погрешностей рабочего при установке изделия и измерении геометрические параметры  $p_1^n$  будут осуществлены в действительном двигателе на  $p_1^m + \delta p$ .

Таким образом, вместо ур-ния (2) в действительности будет иметь место уравнение

$$F(r + \delta r, q_1 + \delta q_1, q_2 + \delta q_2, N + \delta N, p^n + \delta p) = 0. \quad (3)$$

При разложении в ряд, ограничиваясь членами первого порядка малости, принимая во внимание ур-ние (2), мы получаем

$$\frac{\partial F}{\partial r} \cdot \delta r + \frac{\partial F}{\partial q_1} \cdot \delta q_1 + \frac{\partial F}{\partial q_2} \cdot \delta q_2 + \frac{\partial F}{\partial N} \cdot \delta N + \sum_1^n \frac{\partial F}{\partial p_i} \cdot \delta p_i = 0. \quad (4)$$

Даже в предположении наличия топлива запроектированной теплотворной способности и идеального регулирования расхода топлива и воды действительная мощность, развиваемая двигателем, будет отличаться от запроектированной на величину

$$\delta N = - \frac{\sum_1^n \frac{\partial F}{\partial p_i} \delta p_i}{\frac{\partial F}{\partial N}}, \quad (5)$$

зависящую от неизбежных погрешностей изготовления деталей и отклонений, обусловленных режимом работы двигателя.

#### 4. Ответ на второй вопрос теории точности конструкций

На второй вопрос о величине допустимых отклонений геометрических размеров конструкций в монографии был дан следующий ответ в 1930 г.

При проектировании обычно исходят из некоторой функциональной зависимости, устанавливаемой соответствующим отделом прикладной механики, между требуемыми от целой машины или его детали значениями физико-механических величин и геометрическими размерами.

$$F(I_j, p_i) = 0 \quad \begin{matrix} i=1, 2, 3 \\ j=1, 2, 3 \dots \end{matrix} \quad (6)$$

изображает такую зависимость между размером  $I_j$  и рядом физико-механических величин  $p_i$ .

Физико-механическая характеристика двигателя в действительной машине будет иной, чем в идеальной машине, и отклонения, вообще говоря, будут тем более, чем больше допуски геометрических размеров.

Прогресс техники имеет своей целью сузить вариации ожидаемых от конструкции качеств, так что можно говорить для настоящего момента о каких-то определенных пределах в колебании коэффициента полезного действия, в колебаниях веса и т. д.

Допуски должны быть такими, чтобы они гарантировали, что физико-механическая характеристика двигателя или других конструкций лежит в пределах современных колебаний отдельных качеств.

Задаваясь допустимыми вариациями исходных величин проектируемой конструкции, пользуясь ур-нием (6) в виде

$$\sum_1^m \frac{\partial F}{\partial I_j} \delta I_j + \sum_1^n \frac{\partial F}{\partial p_i} \delta p_i = 0, \quad (6a)$$

можем вычислить допустимые отклонения геометрических размеров.

В случае механизма, как устройства для получения из перемещения ведущего звена соответствующего перемещения ведомого звена, при наличии лишь геометрической связи между звеньями, функциональная зависимость, лежащая в основе принципиальной схемы механизма, будет содержать лишь геометрические параметры (линейные и угловые размеры):

$$F(q_i^n) = 0. \quad (7)$$



Решая это уравнение относительно параметра, определяющего положение ведомого звена, и находя вариации обеих частей уравнения, получим

$$\delta q_1 = \sum_2^n \frac{\partial \varphi}{\partial q_i} \delta q_i \quad (8)$$

Эта формула идентична с формулой

$$\Delta \varphi = \sum_s \left( \frac{\partial \varphi}{\partial q_s} \right) \Delta q_s, \quad (9)$$

положенной Н. Г. Бруевичем в основу теории точности механизмов.

### 5. Ответ на третий вопрос теории точности конструкций

На третий вопрос—о критерии правильности выбранных допусков в 1930 г. мы ответили:

„Приведенными соображениями вопрос о допусках не исчерпывается: выдержанные в вычисленных по вариационной формуле пределах размеры деталей еще не гарантируют, что эти детали смогут быть собраны в целую машину без добавочных пригоночных работ.

Тенденция современного машиностроения—свести до минимума ручные пригоночные работы: деталь со станка должна сходиться в таком виде, чтобы, будучи помещена на конвейер, она могла быть собрана в комплект неквалифицированным рабочим.

Поэтому дополнением к приведенному выше ответу на основной вопрос будет:

Допуски должны гарантировать сборку без специальных пригоночных работ, требующих после станочной обработки применения квалифицированной силы, или, по крайней мере, свести эти работы до минимума“.

Разбирая вопрос о допусках с точки зрения сборки конструкции, мы дали в 1930 г. определение нового для того времени понятия „конструктивная цепь“. В настоящее время это понятие соответствует термину „пространственная размерная цепь“.

К понятию конструктивной цепи мы подошли, анализируя по рабочим и сборочным чертежам конструкцию авиационного двигателя.

Допустим на время, что нам удалось математически точно воплотить в металл все детали конструкции и собрать целую конструкцию.

Отметим на чертеже центры тяжести поверхностей сопряжения сопрягаемых деталей, не исключая и поверхности, на которую устанавливается двигатель. Назовем поверхность сопряжения нижней половины картера с верхней половиной основной базой конструкции. Присвоим какой-нибудь детали,

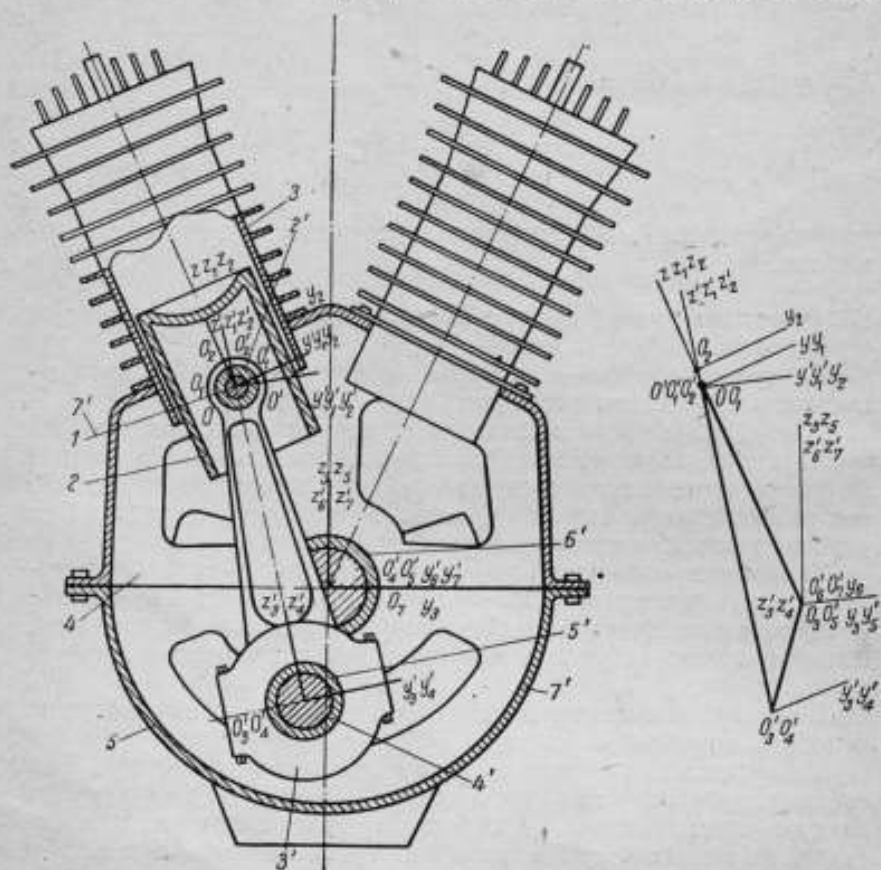


Рис. 2. Конструктивная цель авиационного двигателя

например поршневому пальцу, индекс 0, и от этой детали попытаемся двумя кратчайшими путями, через отмеченные центры контактных поверхностей добраться до основной базы конструкции („Допуски для длин“, стр. 10).

При этом мы предполагаем, что в конструкции отсутствуют зазоры.

*Первое направление* было выбрано от пальца поршня к втулке шатуна через общую поверхность сопряжения пальца поршня с поверхностью расточки во втулке шатуна, далее —

через центр тяжести наружной цилиндрической поверхности втулки, вставляемой в расточку шатуна, и т. д., пока не достигаем основной базы.

*Второе направление* выбрано от центра тяжести цилиндрических частей поверхности и соответствующих частей поверхности в расточке поршня и т. д., пока не достигаем основной базы.

Перенумеровав последовательно все центры тяжести, через которые мы прошли от пальца к основной базе, и соединив отмеченные каждые два последовательные центра, мы получим некоторый полигон, состоящий из двух ветвей соответственно двум направлениям от начальной детали.

Ряд деталей, через которые проходит этот полигон или точнее в металле коих находятся вершины полигона и которые нас интересуют с точки зрения сопряжения соседних деталей, мы будем называть конструктивной цепью („Допуски для длин“, стр. 11).

В настоящее время мы называем конструктивной цепью и самый полигон (рис. 2).

В каждой вершине полигона мы помещаем начало прямоугольной системы координат. В 1930 г. мы рекомендовали в случае цилиндрических контактных поверхностей одну из осей координат направлять по оси цилиндра; одну из двух других осей мы располагали в горизонтальном направлении.

В случае плоских контактных поверхностей — одну из осей координат мы рекомендовали направлять по перпендикуляру к плоскости, а из двух остальных — одну располагаем в контактной плоскости в горизонтальном направлении.

В настоящее время одноименные оси координат во всех вершинах конструктивной цепи располагаем в одном направлении, причем две оси координат основной базы располагаем в плоскости соприкосновения с одной из смежных деталей.

При нашем построении в каждой вершине полигона системы координат оси координат в собранной конструкции принадлежат одновременно двум сопрягаемым деталям. При разборке конструкции как бы происходит расщепление единой системы координат на две системы, причем эти системы с их обозначениями составляют неотъемлемую принадлежность двух сопрягаемых деталей. Каждая из разобранных деталей, имея на своей поверхности две вершины конструктивной цепи, будет иметь две системы координат (рис. 3).

Параметры преобразования одной системы координат в другую систему координат, вместе с параметрами, определяющими положение первой контактной поверхности по отношению к пер-

вой системе координат, мы называем основными конструктивными размерами детали.

Так как две смежные детали имеют системы координат с одинаковыми обозначениями, то сущность сборки любой кон-

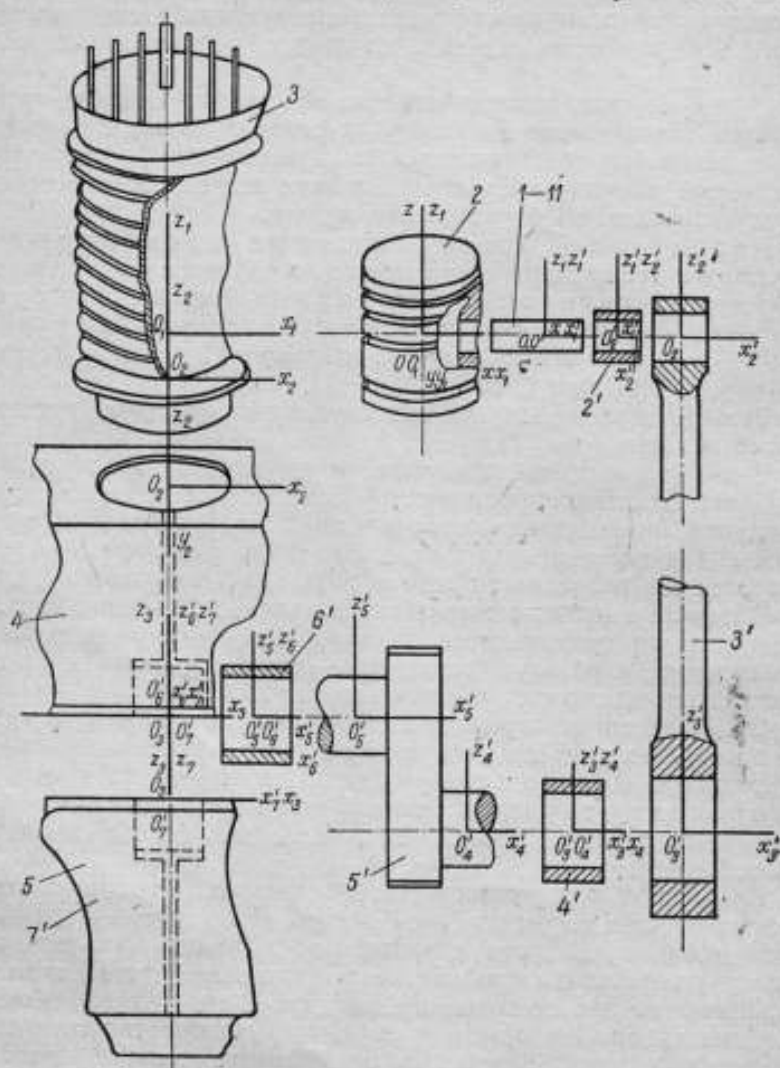


Рис. 3. Система координат деталей конструктивной цепи

струкции заключается во взаимном совмещении двух одноименных систем координат, связанных со смежными деталями.

Выявив одну из конструктивных цепей, т. е. ряд деталей, каждая из которых может в результате сборки как бы быть



нанизанной на соответствующую сторону конструктивного полигона, представим себе процесс сборки, как процесс нанизыва-

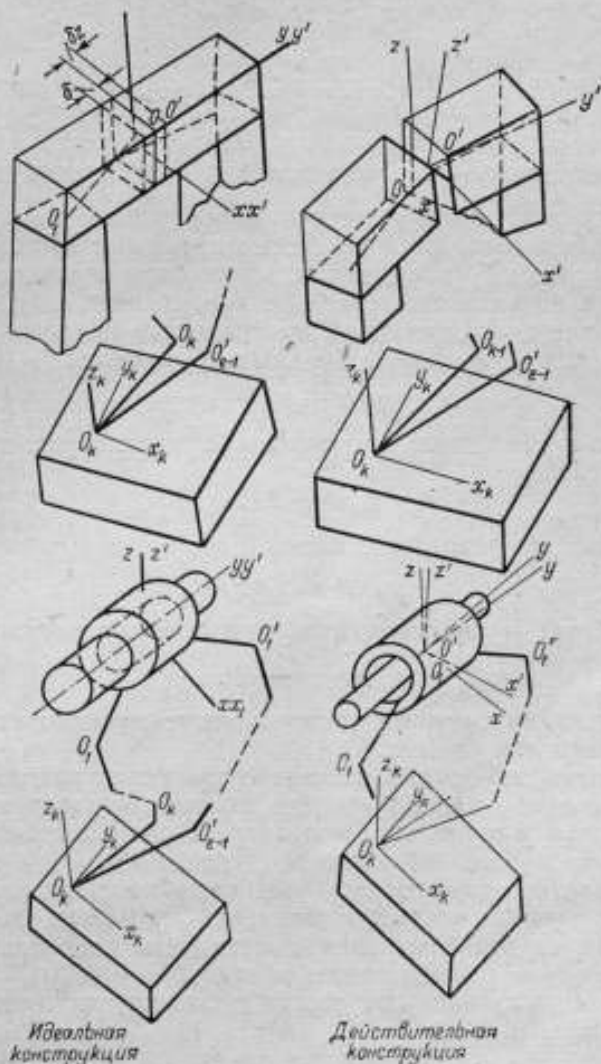


Рис. 4. Замыкание деталей идеальной и действительной конструктивных цепей

ния деталей по двум ветвям полигона, идущим от основной базы конструкции. Пусть замыкание конструктивной цепи происходит по поверхностям сопряжения двух выбранных смеж-

ных деталей, выраженных соответственно уравнениями в координатах сопрягаемых систем:

$$\left. \begin{aligned} \Phi(x, y, z, p_i^m) &= 0; \\ \Psi(x', y', z', p_i^{m'}) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

в которых  $p_i^m$  и  $p_i^{m'}$  — соответственно  $m$  и  $m'$  постоянных величин, связанных с инвариантами поверхностей и параметрами их положений относительно систем координат (рис. 4).

Поверхностями сопряжения могут быть плоскости, цилиндрические поверхности, винтовые поверхности и др.

В случае цилиндрической поверхности, наклоненной к оси  $Z$  под углом  $\gamma$ , мы имели бы такое уравнение:

$$x^2 + p_1 yz + p_2 z^2 + p_3 = 0, \quad (11)$$

в котором постоянная  $p_1$  связана с параметром положения соотношением

$$p_1 = -2 \sin \gamma; \quad (12)$$

постоянная  $p_2$  — соотношением

$$p_2 = \sin \gamma, \quad (13)$$

а постоянная  $p_3$  связана с инвариантой  $R$  соотношением

$$p_3 = -R^2. \quad (14)$$

Сопряжения смежных деталей могут происходить по кривым линиям и в точках.

Например, по прямым линиям сопрягаются прямозубые зубчатые колеса и цилиндрические колеса; сопряжение в точке имеет место у шупа эвольвентомера в соприкосновении с поверхностью зуба.

Так как поверхности при изменении констант могут вырождаться в линии и даже в точки, то мы можем считать, что в частном случае уравнения поверхности сопряжения могут вырождаться в кривую линию и точку.

Поэтому в дальнейшем рассуждении получим вывод в самом общем виде.

Так как мы предположили, что детали выполнены в материале математически точно по номинальным размерам без зазоров, и добавили, что материал со временем не стареет и под влиянием изменения температуры не изменяет плотности (ливар), то, очевидно, первым условием сборки должно быть:

$$\Phi(x, y, z, p_i^m) \equiv \Psi(x', y', z', p_i^{m'}). \quad (15)$$

Это тождество выражает, что в случае сопряжения охватывающей детали с охватываемой деталью посадка будет плотная.

Если же сопрягаемые поверхности — плоскости, то эти плоскости должны своими точками **плотн**о прилегать друг к другу.

Не налагая пока никаких ограничений на ориентацию систем координат в собранной конструкции, отнесем поверхность (линию, точку) сопряжения к базовой системе координат, путем последовательного преобразования координат вдоль двух ветвей конструктивной цепи.

Каждое преобразование координат должно вводить в уравнение поверхности шесть параметров: три угла Эйлера и три координаты нового начала координат по отношению к старой системе координат.

Обозначим эти параметры буквой  $q_i$ . Первоначальную систему координат мы назовем нулевой и перенумеруем последовательно вдоль ветвей конструктивной цепи все системы координат порядковыми числами. Пусть в первой ветви конструктивной цепи имеется  $k$  систем координат, не считая нулевой системы, а во второй —  $l$  систем, также не считая нулевой.

В результате преобразования координат мы получаем два ряда уравнений:

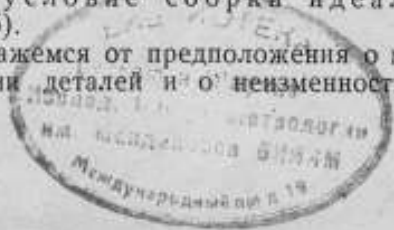
$$\left. \begin{aligned} \Phi(x, y, z, \overset{m}{p}_1) &= 0; & \Psi(x', y', z, \overset{m'}{p}'_1) &= 0; \\ \Phi_1(x_1, y_1, z_1, \overset{m}{p}_1, \overset{6}{q}_1) &= 0; & \Psi_1(x'_1, y'_1, z'_1, \overset{m'}{p}'_1, \overset{6}{q}'_1) &= 0; \\ \Phi_2(x_2, y_2, z_2, \overset{m}{p}_1, \overset{12}{q}_1) &= 0; & \Psi_2(x'_2, y'_2, z'_2, \overset{m'}{p}'_1, \overset{12}{q}'_1) &= 0; \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Phi_k(x_k, y_k, z_k, \overset{m}{p}_1, \overset{6k}{q}_1) &= 0; & \Psi_k(x'_k, y'_k, z'_k, \overset{m}{p}_1, \overset{6k}{q}_1) &= 0. \end{aligned} \right\} (16)$$

Так как уравнения последней строки выражают одну и ту же поверхность сопряжения в одной и той же базовой системе координат, то очевидно эти уравнения должны быть тождественны:

$$\Phi(x_k, y_k, z_k, \overset{m}{p}_1, \overset{6k}{q}_1) = \Psi(x'_k, y'_k, z'_k, \overset{m'}{p}'_1, \overset{6k}{q}'_1). \quad (17)$$

Это второе условие сборки идеальной конструкции (рис. 5).

Но если мы откажемся от предположения о математически точном изготовлении деталей и о неизменности во времени



материала деталей, то сборка конструкции окажется невозможной. Поверхности сопряжения действительной конструкции будут несколько отличны по своей протяженности и по положению относительно других поверхностей запроектированных деталей. Будет и некоторое изменение вида поверхности, например вместо цилиндрической круглой поверхности деталь может быть обработана по конической поверхности с весьма малой конусностью или иметь корсетность, т. е. иметь форму гиперboloида. Однако все эти отклонения от формы значительно меньше отклонений размеров и поэтому ими в первом приближении можно пренебречь, что мы и допускали в 1930 г.

Этим неизбежным отклонениям в размерах действительных деталей соответствует и некоторое изменение уравнений сопрягаемых поверхностей. Действительные поверхности будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \Phi(x + \delta x, y + \delta y, z + \delta z, p_i + \delta p_i) &= 0; \\ \Psi(x' + \delta x', y' + \delta y', z' + \delta z', p_i + \delta p_i) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Из этих уравнений разложением в ряд до члена первого порядка малости мы получаем такие два соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \delta r &= \frac{-\sum_1^m \frac{\partial \Phi}{\partial p_i} \delta p_i}{\Delta}; \\ \delta r' &= \frac{-\sum_1^{m'} \frac{\partial \Psi}{\partial p_i} \delta p_i}{\Delta'}, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \Delta &= \sqrt{\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right)^2}; \\ \Delta' &= \sqrt{\left(\frac{\partial \Psi}{\partial x'}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial y'}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z'}\right)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$\delta r$  и  $\delta r'$  выражают отклонения точек действительных поверхностей сопряжения от идеальных поверхностей, отсчитываемые по нормали к этим поверхностям.

В силу случайного характера погрешностей изготовления случайными являются и обусловленные ими вариации параметров уравнения. Поэтому, вообще говоря, мы будем иметь

$$\delta r \neq \delta r'. \quad (21)$$

Вероятность равенства этих отклонений ничтожно мала, так же ничтожно мала вероятность равенства сужения и расширения охватывающей и охватываемой деталей. Возможно такое положение, когда охватывающая поверхность может быть (в математическом смысле) внутри охватываемой поверхности. При этом условии сборка возможна лишь с натягом. Если натяг недопустим, сборка невозможна.

Чтобы устранить неопределенность характера посадки, надо в уравнения действительных поверхностей сопряжения ввести наряду с случайными вариациями параметров известные (систематические) вариации, которые были бы достаточны по своим величинам, чтобы гарантировать соотношение

$$\delta r > \delta r'. \quad (22)$$

Если левый член относится к охватывающей детали, а правый — к охватываемой детали, разности этих вариаций соответствует наличие в сопряжении зазора

$$\Delta = \delta r - \delta r'. \quad (23)$$

Таким образом, первое условие сборки идеальной конструкции неприменимо к сборке действительной конструкции без наличия зазора, обеспечивающего вхождение каждой охватываемой детали в сопрягаемую охватывающую деталь при всех допустимых отклонениях размеров деталей.

Второе условие сборки идеальной конструкции также неприменимо к сборке действительной конструкции (рис. 6).

Тождество для действительной конструкции

$$\left. \begin{aligned} \Phi_k \left( x_k + \delta x_k, y_k + \delta y_k, z_k + \delta z_k, p_i \frac{m}{l} \delta p_i, q_i \frac{6k}{l} \delta q_i \right) &\equiv \\ &\equiv \Psi_i \left( x'_i + \delta x'_i, y'_i + \delta y'_i, z'_i + \delta z'_i, p'_i \frac{m'}{l'} \delta p'_i, q'_i + \delta q'_i \right), \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

вообще говоря, не имеет места — в силу случайного характера вариаций.

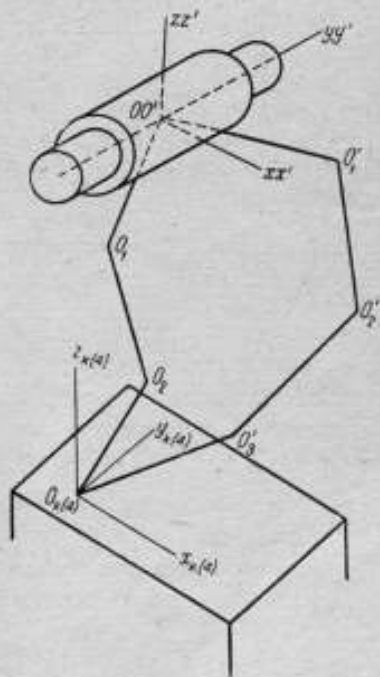


Рис. 5. Положение идеальных замыкающих деталей в системе базовых координат



Для сборки необходимо обеспечить зазорами вхождение охватываемых деталей в охватывающие для всех сопряжений вдоль конструктивной цепи, но этого недостаточно вследствие возможности перекоса деталей, обусловленного накоплением вдоль конструктивной цепи погрешностей изготовления, влияющих на относительное положение смежных деталей.

Для обеспечения условия вхождения охватываемой детали в охватывающую при возможном перекосе

$$\delta r_k > \delta r_l \quad (25)$$

необходимо в уравнения действительных сопрягаемых поверхностей ввести новые постоянные вариации параметров, что соответствует дальнейшему расширению зазоров.

Но расширение зазоров возможно лишь до некоторого предела, определяемого назначением конструкции.

Если допустимыми расширениями зазоров неравенство (25) не выполняется, сборка без пригоночных работ невозможна.

В 1930 г. в монографии „Допуски для длин мы указывали: сборка конструктивной цепи не-

Рис. 6. Положение действительных замыкающих в системе базовых координат (без зазоров)

осуществима без наличия в цепи обстоятельств, обуславливающих вариации второго рода вроде люфтов и других зазоров или специальных устройств.

Это значит, что сборка возможна без пригоночных работ лишь при наличии компенсаторов в виде регулировочных и юстировочных устройств, входящих в конструктивную цепь и обеспечивающих возможность вариации одного из зазоров конструктивных цепей в пределах, зависящих от других зазоров и погрешностей изготовления деталей конструктивной цепи.

Вопросами расчета компенсаторов в плоских конструктивных (размерных) цепях занимался Б. А. Балакшин, первая работа которого появилась в 1934 г.

## 6. Ответ на четвертый вопрос теории точности конструкций

Ответ на вопрос о способе вычисления погрешности положения любой точки конструкции в 1930 г. был дан в такой форме.

Если положение некоторой действительной точки  $M$  в системе координат детали, которой принадлежит эта точка, определяется координатами:

$$\begin{array}{l} x + \delta x; \\ y + \delta y; \\ z + \delta z; \end{array}$$

то, зная действительные параметры последовательных преобразований этих координат к базовой системе, мы однозначно можем получить значения действительных координат точки  $M$  в базовой системе координат:

$$\left. \begin{array}{l} x_k + \delta x_k = \varphi_1 \left( x + \delta x, y + \delta y, z + \delta z, q_i + \delta q_i \right); \\ y_k + \delta y_k = \varphi_2 \quad \quad \quad (\text{idem}) \\ z_k + \delta z_k = \varphi_3 \quad \quad \quad (\text{idem}) \end{array} \right\} (26)$$

или, ограничиваясь в разложении в ряд членами первого порядка малости, находим проекции погрешности положения точки  $M$  на оси координат базовой системы (рис. 7).

Непосредственное вычисление по ф-лам (26) в 1930 г. не было возможно, так как функции  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  не были известны, как и функция  $\varphi$  в формуле Н. Г. Бруевича.

Конкретные задачи приходилось решать методом последовательных преобразований координат.

Тем не менее, на основании ф-л (26) еще в 1930 г. была выведена следующая теорема относительно погрешности положения любой точки конструкции:

Любая точка конструкции, вследствие вариаций координат точки  $M$  в нулевой системе координат и  $k$  параметров последовательных преобразований к  $k$ -й базовой системе, может занять некоторое положение внутри полиэдрической зоны с числом граней, равным удвоенному числу сочетаний из  $(6k+3)$  элементов по два, то есть равным  $2C_{6k+3}^2$ .

Новое доказательство этой теоремы дано автором в докторской диссертации: „О некоторых общих вопросах метрологии и теории точности механизмов“, 1948 г.

Любая точка конструкции, при наличии в системе зазоров, из своего действительного положения внутри полиэдрической зоны, определенного в предположении отсутствия зазоров,

может свободно перемещаться внутри второй зоны — зоны свободы.

Эта зона также может быть определена по ф-лам (26), если в них вместо погрешностей изготовления подставить проекции возможных поступательных перемещений на соответствующие оси координат и вариации углов Эйлера, обусловленных наличием в конструктивной цепи зазоров.

Пользуясь понятиями „зона неподвижного положения точки“ (зона первого рода) и „зона свободы точки“ (зона второго рода), сущность сборки можно представить таким образом.

Пусть некоторая конструктивная цепь замыкается валиком, отнесенным к первой ветви цепи, и втулкой, отнесенной ко второй ветви цепи. Ходовая посадка гарантирована изготовлением по калибрам.

Сборка конструктивной цепи будет возможна, если принятые допуски и посадки, а также и компенсационное устройство позволяют совместить оси деталей при самом неблагоприятном сочетании погрешностей изготовления.

Положение общей оси валика и втулки пусть определяется точками  $A_0$  и  $B_0$ , являющимися двойными точками, в которых совмещены

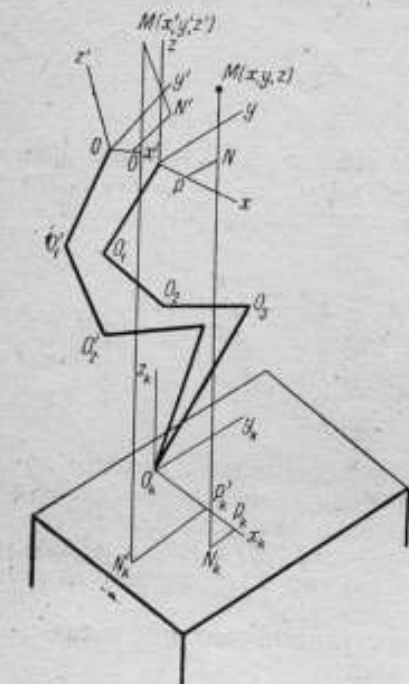


Рис. 7. Положение идеальной и действительной точки конструкции в базовой системе координат

точки  $A$  и  $A'$  и точки  $B$  и  $B'$ , из которых  $A$  и  $B$  связаны с первой ветвью цепи, а  $A'$  и  $B'$  — со второй ветвью.

В действительной конструкции каждая из этих точек, вследствие погрешностей изготовления, неизбежно отклонится от своего номинального положения и займет некоторое определенное положение (в предположении отсутствия зазоров и компенсаторов) внутри соответствующей зоны первого порядка (рис. 8). При наличии зазоров и компенсаторов точки  $A$ ,  $A'$ ,  $B$  и  $B'$ , занимая определенное положение в своих зонах первого рода, могут перемещаться свободно в своих зонах второго рода. В случае пересечения зон второго рода точки  $A$  и  $A'$  и точки  $B$  и  $B'$  могут быть соответственно совмещены, как и оси валика и втулки.

При этом условии валик может войти во втулку и занять предусмотренное конструкцией положение, если этому позволят связи, налагаемые на эти детали другими конструктивными цепями, в которые могут войти валик и втулка.

Из изложенного видно, как сложна проблема расчета допусков для целой конструкции. Вообще говоря, нельзя ограни-

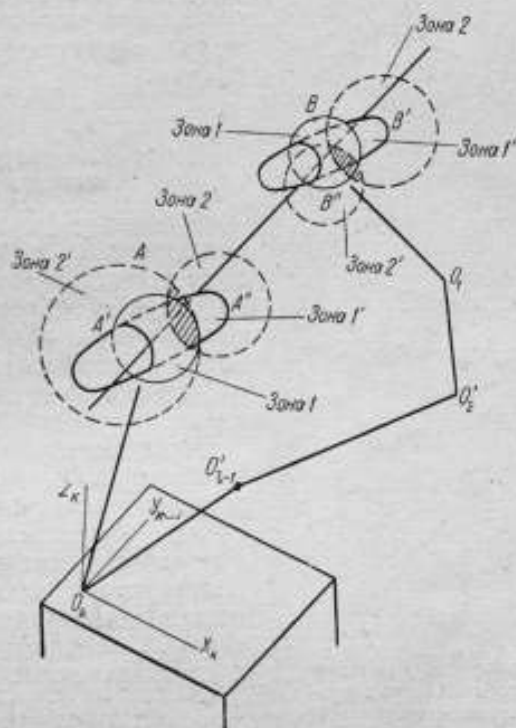


Рис. 8. Пересечение зон 1-го и 2-го рода, как условие сборки конструктивной цепи

читься расчетом по одной конструктивной цепи; лишь в простейших случаях плоской задачи достаточно рассмотреть одну цепь.

В общем случае следует говорить о конструктивной сетке, представляющей собой совокупность всех взаимосвязанных конструктивных цепей технического произведения. Конструктивные полигоны внутри материала конструкции представляют собой ее остов, своего рода пространственную ферму. Стержни этой фермы могут несколько изменять свою длину и наклон к другим стержням.

Конструктор в своей работе вскрывает конструктивную сетку

и выделяет в ней доминирующую, основную конструктивную цепь (рис. 9). Расчет допусков пространственной конструкции без наличия компенсаторов весьма сложен и не всегда может дать удовлетворительное решение (зоны второго рода могут не пересекаться), что укажет на необходимость изменения конструкции и введения компенсаторов. При конструировании компенсаторов полезными могут быть формулы теории точности конструкции.

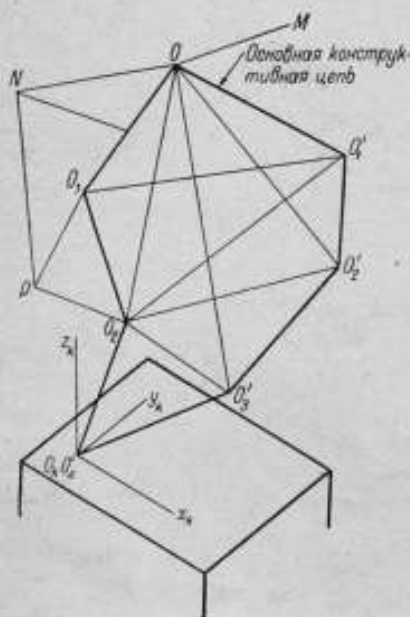


Рис. 9. Конструктивная сетка (ферма) и основная конструктивная цепь

## 7. Ответ на пятый вопрос теории точности конструкций

В монографии „Допуски для длин“ (стр. 28) мы сделали попытку дать ответ на вопрос о существовании некоторой общей закономерности, которой должны подчиняться расчеты на точность конструкций.

Анализируя взаимосвязи в конструкции зон первого и второго рода, исходя из постулата существования оптимальной системы зазоров, гарантирующей минимальность нагрева подшипников и бесшумный ход, мы установили следующую зависимость

$$\sum A_i \delta p_i = \text{const},$$

которая вычисляется по оптимальным значениям зазоров. Очевидно, в случае измерительных приборов, в конструкциях которых недопустимы зазоры,

$$\text{const} = 0,$$

и следовательно,

$$\sum A_i \delta p_i = 0.$$

Здесь  $A_i$  — величина, зависящая от параметров конструктивной цепи, вычисляемая для каждого конкретного случая по специальным формулам, выводимым из формул преобразования координат.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> „Допуски для длин“, стр. 28 и далее.



Назовем  $A$  эквивалентом точности параметра  $p^1$  и выше-приведенное соотношение сформулируем так:

Сумма эквивалентов точности параметров конструктивной цепи—величина постоянная.

Это положение можно назвать законом сохранения фонда точности конструкции.

Далее сказано:

Конфигурация конструктивной цепи вместе с оптимальными люфтами позволяет нам вычислить постоянную фонда точности и эквиваленты точностей отдельных параметров, что же касается вариации параметра  $\delta p_i$ , то она зависит от состояния станочного парка завода и измерительных средств завода.

Вообще говоря, каждый завод имеет свои допуски, отвечающие местным условиям производства.

Зная предельные погрешности и умножив их на соответствующие эквиваленты, мы иногда все же можем получить сумму эквивалентов точности больше констант фонда. Это будет указывать на невозможность сборки, при наличном оборудовании, без слесарной прогонки.

Наличие закона сохранения фонда точностей конструкций не позволяет вносить изменения в линейные и угловые допуски без равноценного изменения допусков в других элементах конструктивных цепей.

Вопросами плоских зон (круги и эллипсы неточности) занимались Н. Г. Бруевич и А. П. Иванов.

## 8. Основные формулы теории точности конструкций

В 1931 г. нам не была известна структура частных производных функций, входящих в ф-лы (26), определяющие погрешность положения любой точки действительной конструкции.

В работе „О некоторых общих вопросах метрологии и теории точности механизмов“ (1948 г.) мы вскрыли структуру этих функций, пользуясь двумя методами: методом последовательных малых преобразований и методом механических аналогий.

Применяя последовательно формулы Эйлера для преобразования координат при малых углах поворота новой системы относительно старой, мы получили следующие значения вариаций координат любой точки действительной конструкции относительно базовой системы координат:

$$\left. \begin{aligned} \delta x &= \delta x_k + \Delta x_k + \Delta a_{ok} + \delta a_{ok}; \\ \delta y &= \delta y_k + \Delta y_k + \Delta b_{ok} + \delta b_{ok}; \\ \delta z &= \delta z_k + \Delta z_k + \Delta c_{ok} + \delta c_{ok}, \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

<sup>1</sup> Н. Г. Бруевич называет  $A_i$  передаточным отношением. Н. А. Калашников выражение  $A_i \delta p_i$  назвал бы действующей ошибкой.

где  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,  $\delta z$  — вариации координат любой точки  $M$  детали в нулевой системе координат, связанной с этой деталью;

$\delta x_k$ ,  $\delta y_k$ ,  $\delta z_k$  — вариации координат той же точки детали в системе координат  $k$ , связанной с базой конструкции;

$\Delta x_k$ ,  $\Delta y_k$ ,  $\Delta z_k$  — определители матрицы

$$\begin{pmatrix} \Omega_1^{(k-1)} & \Omega_2^{(k-1)} & \Omega_3^{(k-1)} \\ x_k & y_k & z_k \end{pmatrix},$$

в которой

$$\left. \begin{aligned} \Omega_1^{(k-1)} &= \sum_0^{k-1} \omega_1^{(j)}; \\ \Omega_2^{(k-1)} &= \sum_0^{k-1} \omega_2^{(j)}; \\ \Omega_3^{(k-1)} &= \sum_0^{k-1} \omega_3^{(j)}. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

$\omega_1^{(j)}$ ,  $\omega_2^{(j)}$ ,  $\omega_3^{(j)}$  — составляющие вектора перекося  $j+1$  системы координат относительно  $j$ -системы координат конструктивной цепи;

$x_k$ ,  $y_k$ ,  $z_k$  — координаты точки  $M$  в базовой системе координат.

$$\left. \begin{aligned} \Delta a_{0k} &= \sum_1^{k-1} \Delta A_{i-1}; \\ \Delta b_{0k} &= \sum_1^{k-1} \Delta B_{i-1}; \\ \Delta c_{0k} &= \sum_0^{k-1} \Delta c_{i-1}, \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

где  $\Delta A_{i-1}$ ,  $\Delta B_{i-1}$ ,  $\Delta C_{i-1}$  — соответствующие определители матрицы

$$\begin{pmatrix} \Omega_1^{(i-1)} & \Omega_2^{(i-1)} & \Omega_3^{(i-1)} \\ a_{i,i+1} & b_{i,i+1} & c_{i,i+1} \end{pmatrix}$$

для  $i = 1, 2, 3, \dots, k-1$ ;

$a_{i, i+1}, b_{i, i+1}, c_{i, i+1}$  — линейные параметры преобразования координат при переходе от  $i$  к  $i+1$  системе координат.

$$\left. \begin{aligned} a_{ok} &= \sum_0^{k-1} a_{i, i+1}; \\ b_{ok} &= \sum_0^{k-1} b_{i, i+1}; \\ c_{ok} &= \sum_0^{k-1} c_{i, i+1}; \end{aligned} \right\} (30)$$

Основные формулы теории точности конструкций, выведенные в 1930 г. методом последовательных малых преобразований координат, в 1948 г. были выведены методом механического моделирования, на основании некоторой аналогии между конструктивной цепью и идеальным, или воображаемым, шарнирным механизмом. Мы этот воображаемый шарнирный механизм, изображенный на рис. 10, представляем в виде системы абсолютно твердых раздвижных стержней, соединенных универсальными шарнирами, позволяющими смежным стержням поворачиваться относительно друг друга на малый угол вокруг любой оси, проходящей через центр шарнира.

Мы назвали этот воображаемый шарнирный многозванный механизм с числом степеней свободы  $N = 6k + 3$  универсальным компаратором для сличения конструктивных цепей.

Такой компаратор мы можем мысленно совместить с полигоном конструктивной цепи. Очевидно, что раздвижение стержня, изображаемого вектором  $\bar{l}_{i, i+1}$ , соответствует изменению расстояния между последовательными началами координат  $O_i$  и  $O_{i+1}$ , а малый поворот  $i+1$  стержня относительно  $i$  стержня соответствует повороту триэдра  $O_{i+1} X_{i+1} Y_{i+1} Z_{i+1}$  относительно триэдра  $O_i X_i Y_i Z_i$ . Перемещение  $\delta r$  точки  $M$  относительно неподвижной системы координат, связанной с неподвижной точкой механизма  $O_k$ , равно погрешности положения точки  $M$  конструкции.

Перемещение точки  $M$  при изменении конфигурации шарнирного механизма, соответствующей идеальному полигону, в конфигурацию, соответствующую действительному полигону конструктивной цепи, весьма малы, т. е. мы можем пренебрегать квадратом чисел, измеряющих длину перемещений.

Поэтому перемещение точки  $M$  можно рассматривать как геометрическую сумму элементарных изменений положений этой точки — изменений, обусловленных изменением длины или угла поворота одного какого-либо звена.

Предполагая, что шарнирная система совмещена с идеальным полигоном конструктивной цепи, закрепим все универсальные шарниры и раздвижные устройства. Затем мы последовательно освобождаем по одному раздвижному устройству и определяем, какое произойдет изменение положения точки  $M$  в базовой системе координат при изменении длины звена. Это изменение, очевидно, равно  $\delta l_{i+1}$ . Снова закрепив освобожденное раздвижное устройство, освобождаем следующее и также определяем возможное изменение положения точки  $M$  при изменении длины звена. Снова закрепив освобожденное и освободив новое раздвижное устройство, последовательно определяем все элементарные перемещения точки  $M$ , обусловленные возможными перемещениями, допускаемыми раздвижными устройствами звеньев.

Обозначив  $\delta \vec{r}_k$  геометрическую сумму изменений положения точки  $M$  вследствие элементарных изменений, обусловленных раздвижными устройствами, имеем:

$$\delta \vec{r}_{kM}^{(1)} = \delta \vec{r}_{oM} + \delta \vec{l}_{ko};$$

или

$$\delta \vec{r}_{kM}^{(2)} = \delta \vec{r}_{oM} - \delta \vec{l}_{ok}. \quad (31)$$

Так как элементарное перемещение точки  $M$  шарнирного механизма при весьма малом изменении длины одного какого-либо звена или весьма малого поворота одного звена относительно другого звена также весьма малы, то в результате одновременного изменения всех длин звеньев и всех относительных поворотов координатных триэдров смежных звеньев полное перемещение точки  $M$  будет равно геометрической сумме элементарных перемещений.

Затем последовательно освобождаем один универсальный шарнир, при закреплении всех других универсальных шарниров и раздвижных устройств. В этом случае одна часть многозвеного шарнирного механизма превращается в твердое тело, могущее вращаться вокруг точки — центра  $O_i$  освобожденного шарнира.

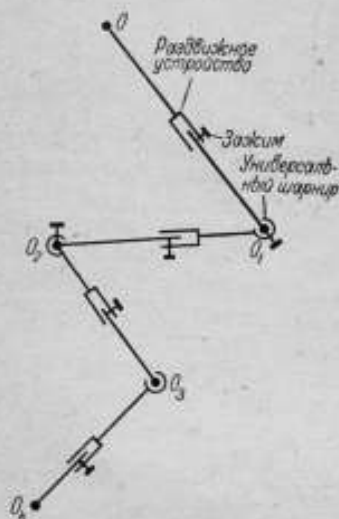


Рис. 10. Универсальный компаратор для сличения конструктивных цепей

Находим изменение положения точки  $M$  в предположении поворота твердого тела, соответствующего вектору поворота триэдра  $O_i X_i Y_i Z_i$  относительно триэдра  $O_{i-1} X_{i-1} Y_{i-1} Z_{i-1}$ , взятому с обратным знаком. (На рис. 11 вектор относительного перекоса смежных триэдров, в предположении закрепления нулевого триэдра, при закреплении  $k$ -го триэдра изменяет свой знак).

На основании известной теоремы кинематики для определения элементарного перемещения точки  $M$  твердого тела, поворачивающегося вокруг точки  $O_i$  на угол, соответствующий вектору  $\bar{\omega}^{(i)}$ ; заменяем вращение вокруг точки  $O$  таким же вращением вокруг точки  $O_k$ , с добавлением поступательного перемещения, равного обратному перемещению точки  $O$  при повороте вокруг точки  $O_k$ .

В этом сложном перемещении элементарное изменение положения точки  $M$  выражается двумя геометрическими перемещениями:

$$\begin{aligned} & - [\bar{\omega}^{(i)} \bar{r}_{kM}]; \\ & + [\bar{\omega}^{(i-1)} \bar{l}_{n,i}] \text{ или} \\ & - [\bar{\omega}^{(i-1)} \bar{l}_{i,n}]. \end{aligned}$$

Перемещение точки  $M$ , обусловленное всеми элементарными поворотами многозвенного шарнирного механизма, обозначаемое  $\delta \bar{z}_{kM}^{(2)}$ , выражается соответственно

$$\delta \bar{r}_{kM}^{(2)} = - \sum_0^{k-1} [\bar{\omega}^{(i)} \bar{r}_{kM}] - \sum_1^{k-1} [\bar{\omega}^{(i-1)} \bar{l}_{ik}]. \quad (32)$$

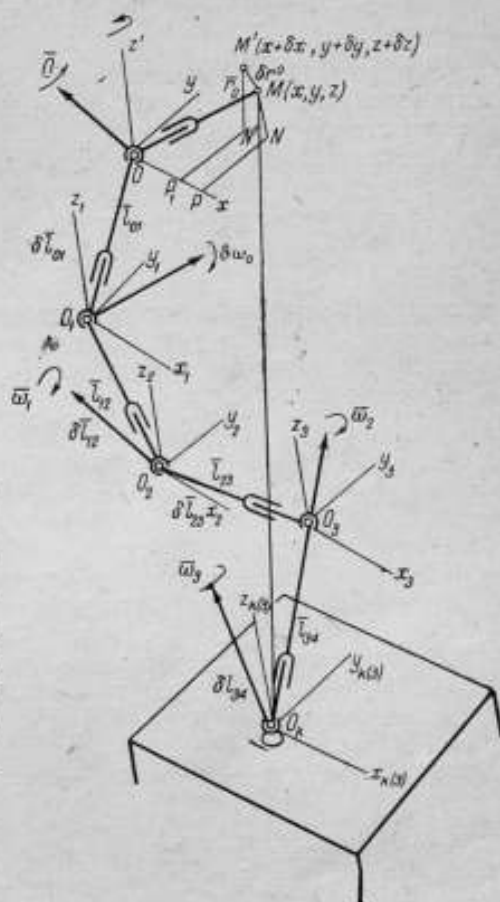


Рис. 11. К выводу основных формул теории точности конструкций методом механического моделирования



Окончательно погрешность положения точки  $M$  в базовой системе координат равна

$$\delta \bar{r}_{kM} = \delta \bar{r}_0 - \delta \bar{l}_{oK} - \sum_0^{k-1} [\bar{\Omega}^{(i-1)} r_k] - \sum_1^{k-1} [\bar{\omega}^{(i-1)} \bar{l}_{ik}]. \quad (33)$$

Эта формула идентична ф-лам (31), выведенным нами аналитически методом малых последовательных преобразований координат.

Действительно, преобразуя последнюю формулу к виду

$$\delta \bar{z}_o = \delta \bar{r}_k + \sum_0^{k-1} [\bar{\Omega}^{(i-1)} \bar{r}_k] + \sum_1^{k-1} [\bar{\omega}^{(i-1)} \bar{l}_{ik}] + \delta \bar{l}_{oK} \quad (34)$$

и переходя затем к проекциям векторов на оси базовой системы координат, констатируем, что для полного тождества выведенных двумя разными методами формул необходимо доказать следующие тождества:

$$\left. \begin{aligned} \Delta a_{oK} &= \sum_0^{k-1} \Delta A_{i-1} = \sum_1^{k-1} (\Omega_2^{(i-1)} c_{i,i+1} - \Omega_3^{(i-1)} b_{i,i+1}) \equiv \\ &\equiv \sum_1^{k-1} (\omega_2 c_{i,k} - \omega_3 b_{i,k}); \\ \Delta b_{oK} &= \sum_1^{k-1} \Delta B_i = \sum_1^{k-1} (\Omega_3^{(i-1)} a_{i,i+1} - \Omega_1^{i-1} c_{i,i+1}) \equiv \\ &\equiv \sum_1^{k-1} (\omega_3 a_{i,k} - \omega_1 c_{i,k}); \\ \Delta c_{oK} &= \sum_1^{k-1} \Delta c_i = \sum_1^{k-1} (\Omega_1^{(i-1)} b_{i,i+1} - \Omega_2^{(i-1)} a_{i,i+1}) \equiv \\ &\equiv \sum_1^{k-1} (\omega_1 b_{i,k} - \omega_2 a_{i,k}). \end{aligned} \right\} (35)$$

Эти тождества легко доказываются путем разворачивания сумм и замены  $\Omega_1^{(i-1)}$ ,  $\Omega_2^{(i-1)}$  ... и  $a_{i,k}$ ,  $b_{i,k}$  развернутыми выражениями.

Это доказательство приведено в упомянутой работе автора „О некоторых общих вопросах метрологии и теории точности механизмов“ (стр. 82—85).

Методом механического моделирования в этой работе дан вывод известной формулы Г. Майера для поправки часов за наклонность оси вращения, коллимационной ошибки и азимутальной погрешности пассажного инструмента.

Таким образом, выведенные нами основные формулы теории точности конструкций двумя независимыми методами, проверенные приложением к выводам известных соотношений, являются надежным математическим аппаратом для вычисления погрешностей положения точек конструкции в случае возможности отбрасывания величин второго порядка малости.

### 9. Теория точности конструкций и теория точности механизмов

Теория точности механизмов, как она представлена в известной монографии акад. Н. Г. Бруевича, может рассматриваться как раздел теории точности конструкций или как родственное учение, выводы которого могут быть проверены методами теории точности конструкций.

Теория точности механизмов исследует погрешности положения ведомого звена в зависимости от первичных погрешностей изготовления и зазоров.

При поступательном движении ведомого звена реального механизма погрешность положения ведомого звена определяется действительным положением прямой линии, определяющей направление поступательного движения, и положением точки отсчета перемещения.

Положение действительной прямой поступательного движения ведомого звена определяется вариациями координат двух точек этой прямой, вычисляемыми по основным формулам теории точности конструкций (рис. 12).

В случае вращательного движения ведомого звена положение звена определяется плоским углом между некоторой неподвижной прямой, проходящей через ось вращения перпендикулярно к ней, и подвижной прямой, проходящей через ось и некоторую точку, жестко связанную с ведомым звеном.

Подвижная прямая находится в плоскости, проходящей через неподвижную прямую перпендикулярно к оси вращения звена.

В действительной конструкции положение точек, определяющих положение старого начального угла ведомого звена, будет обусловлено погрешностями положения этих точек (рис. 13).

Таким образом, погрешности положения ведомого звена могут быть всегда вычислены по погрешностям положения некоторых точек механизма, определяемым по погрешностям основных размеров конструкции (по терминологии теории точности конструкций).

Изложение основ теории точности механизмов начинается с вывода уже упоминавшейся нами ф-лы (9). В качестве первого примера определения ошибки положения рассматривается кривошипный механизм.

На этом примере иллюстрируется изящный графический метод определения погрешности положения ведомого звена механизма, называемого методом преобразованного механизма.

Метод этот, однако, не является универсальным. Автор монографии „Точность механизма“ часто пользуется графо-аналитическими и чисто аналитическими методами.

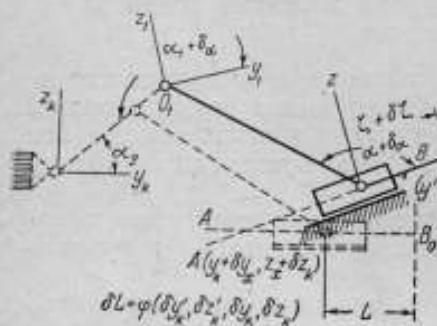


Рис. 12. Положение действительной оси поступательного движения ведомого звена механизма.

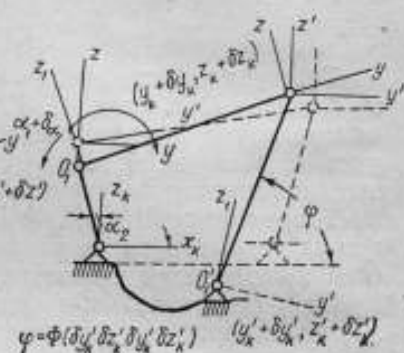


Рис. 13. Действительное положение ведомого вращающегося звена механизма.

Особенностью методов исследования в теории точности механизмов является отказ от рассмотрения вопроса о влиянии структуры звеньев, иногда представляющих сложные комплекты из нескольких деталей, из которых каждая отягощена погрешностями изготовления. Таким образом, механизм исследуется абстрактно, вне связи со всеми деталями его устройства.

Как уже было сказано выше, теория точности конструкций исходит из положения о существовании весьма сложной взаимной связи, вскрываемой при структурном анализе в виде конструктивной пространственной сетки (фермы), из которой для расчета первоначально выбирается основная конструктивная цепь.

Исследование вопроса о погрешностях положения точек конструкции мы начали в 1930 г. тоже с рассмотрения кривошипного механизма авиационного двигателя не как стилизованной принципиальной схемы абстрактного кривошипного механизма, но в связи со всеми деталями, входящими в состав основной конструктивной цепи.

## 10. Приложение теории точности конструкций к исследованию инструментальных погрешностей

В специальной части работы „О некоторых общих вопросах метрологии и теории точности механизмов“ иллюстрируется применение основных формул теории точности конструкций к исследованию инструментальных погрешностей универсального компаратора ВНИИМ, компаратора Прейпича—Барановского для измерения хронограмм, пассажного инструмента и нормального барометра.

В настоящей статье дается краткое извлечение из работы А. Н. Королевой „Разработка метода исследования некоторых эвольвентомеров“, относящееся к определению инструментальной погрешности эвольвентомера со сменными дисками на основе теории точности конструкции (рис. 14).

А. Н. Королева, выведя конструктивную цепь эвольвентомера и определив номинальные основные размеры прибора вдоль цепи (рис. 15), пишет:

„В случае реального эвольвентомера звенья конструктивных цепей, рассматриваемые как векторы, будут отличаться от соответствующих векторов идеальной конструкции вследствие наличия первичных погрешностей звеньев. Это различие будет наблюдаться как в длинах (модулях) векторов, так и в углах наклона их к осям координат базовой системы.

Вследствие первичных погрешностей звеньев конструктивной цепи произойдет в реальной конструкции эвольвентомера разрыв цепи (рис. 16) в точке контакта измерительного наконечника с боковой поверхностью зуба шестерни, если измерительный наконечник не изменит своего положения в своих направляющих“.

Этот разрыв изображен на рис. 17 и 18 в виде отрезка  $\overline{AB}$ . Под действием пружины щуп прибора переместится на величину  $\overline{BC}$ . Этот отрезок, измеренный в микронах, является инструментальной погрешностью эвольвентомера (без погрешности индикатора). Из рис. 18 видно, что

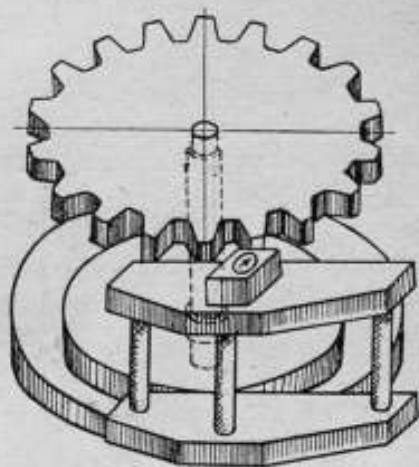


Рис. 14. Эвольвентомер со сменными дисками

отрезок  $\overline{AB}$ , как вектор, является разностью двух векторов  $\overline{OA}$  и  $\overline{OB}$ , соответственно обозначенных  $\delta r'$  и  $\delta r''$ :

$$\overline{AB} = \delta r' - \delta r''.$$

Заменяем векторы  $\delta r'$ ,  $\delta r''$  их составляющими по направлениям осей координат  $O_2\overline{X}_2\overline{Y}_2\overline{Z}_2$  и  $O_3\overline{X}_3\overline{Y}_3\overline{Z}_3$ :

$$\overline{AB} = (\delta \overline{x}_3 - \delta \overline{x}_2) + (\delta \overline{y}_3 - \delta \overline{y}_2) + (\delta \overline{z}_3 - \delta \overline{z}_2).$$

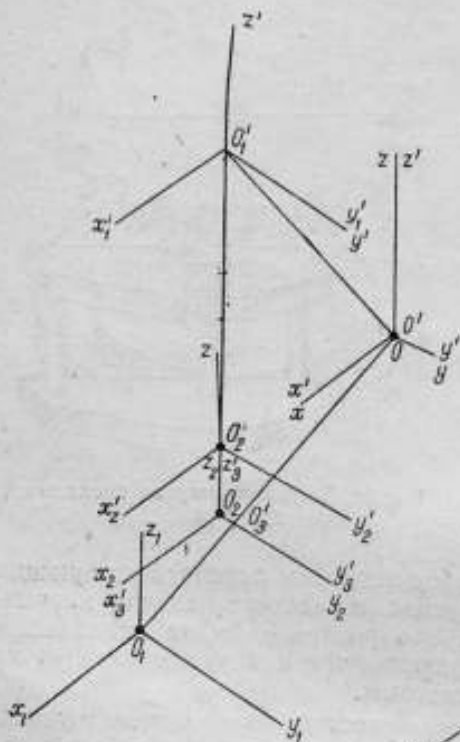


Рис. 15. Идеальная конструктивная цепь эвольвентомера со сменными дисками

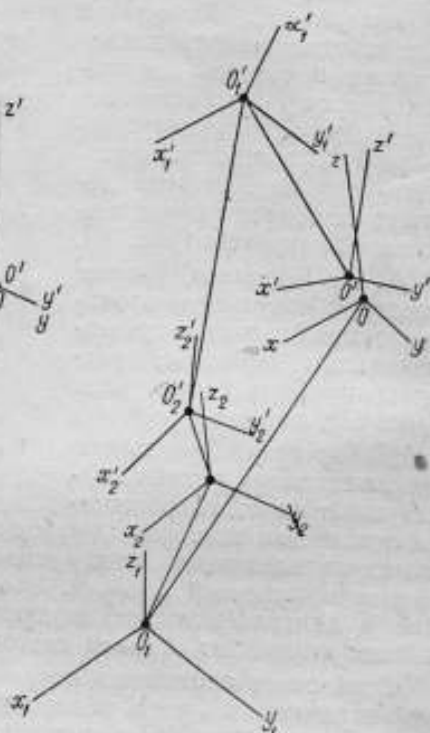


Рис. 16. Действительная конструктивная цепь эвольвентомера со сменными дисками

„Так как мы допускаем в приборе весьма малые погрешности, лежащие на пороге чувствительности измерительных приборов, то мы можем пренебречь непараллельностью  $NN_1$  и  $\overline{CB}$ , с одной стороны, и величиной,  $\overline{CC}_1$  — с другой.



В этих предположениях инструментальная погрешность измеряется числом микронов в отрезке  $\overline{CB}$ , являющемся проекцией вектора  $\overline{AB}$  на направление нормали  $NN_1$ .

Инструментальная погрешность, которую мы обозначаем через  $\Delta$ , равна:

$$\Delta = \text{пр} \langle \overline{AB} \rangle = \text{пр} (\delta x'_3 - \delta x_2)_{NN_1} + \text{пр} (\delta y'_3 - \delta y_2)_{NN_1} + \text{пр} (\delta z'_3 - \delta z_2)_{NN_1}$$

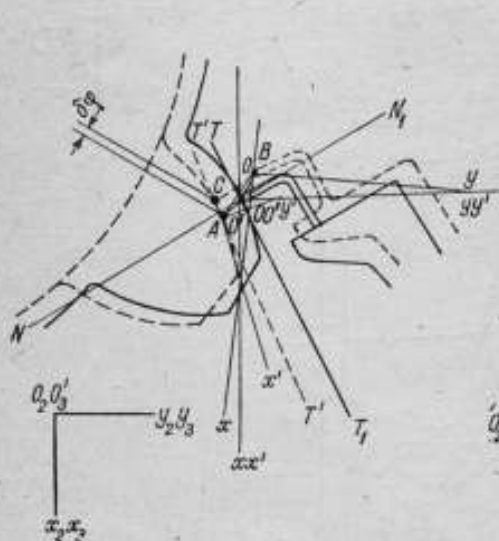


Рис. 17. Идеальное и действительное положение измерительного наконечника (щупа) эвольвентомера со сменными дисками

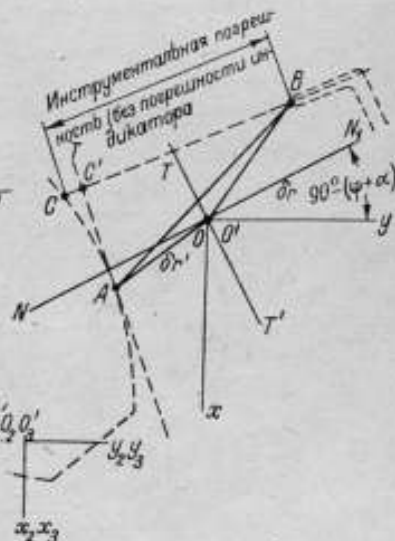


Рис. 18. Инструментальная погрешность эвольвентомера со сменными дисками

Окончательно А. Н. Королева получила:

$$\Delta = (\delta x'_3 - \delta x_2) \sin(\varphi + \alpha) + (\delta y'_3 - \delta y_2) \cos(\varphi + \alpha). \quad (36)$$

Далее в работе А. Н. Королевой сказано, что вопрос об инструментальной погрешности сводится к определению вариаций координат  $\delta x'_3$ ,  $\delta y'_3$ ,  $\delta x_2$ ,  $\delta y_2$ , которые могут быть вычислены по формулам автора

$$\left. \begin{aligned} \delta x &= \delta x_k + \Delta x_k + \Delta a_{ok} + \delta a_{ok}; \\ \delta y &= \delta y_k + \Delta y_k + \Delta b_{ok} + \delta b_{ok}; \\ \delta z &= \delta z_k + \Delta z_k + \Delta c_{ok} + \delta c_{ok}. \end{aligned} \right\}$$

где  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,  $\delta z$  — вариации координат точки конца измерительного наконечника в системе, связанной с точкой разрыва.

Эти формулы для первой ветви конструктивной цепи с номером базовой системы координат  $k=2$  в развернутом виде, в соответствии с нашими указаниями в п. 8 „Основные формулы теории точности конструкций“, дают такие выражения:

$$\left. \begin{aligned} \delta x &= \delta x_2 - (c_{02} + c_{12}) \omega_2^{(0)} + (b_{02} + b_{12}) \omega_3^{(0)} - \omega_2^{(1)} c_{02} + \\ &\quad + \omega_3^{(1)} b_{02} - \delta a_{02}; \\ \delta y &= \delta y_2 - (a_{02} + a_{12}) \omega_3^{(0)} + (c_{02} + c_{12}) \omega_1^{(0)} - \omega_3^{(1)} a_{02} + \\ &\quad + \omega_1^{(1)} c_{02} - \delta b_{02}; \\ \delta z &= \delta z_2 - (b_{02} + b_{12}) \omega_1^{(0)} + (a_{02} + a_{12}) \omega_2^{(0)} - \omega_1^{(1)} b_{02} + \\ &\quad + \omega_2^{(1)} a_{02} - \delta c_{02}. \end{aligned} \right\} (37)$$

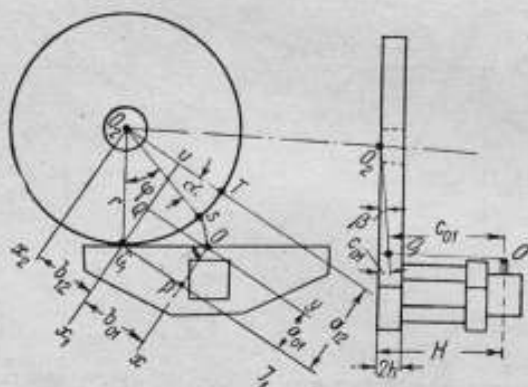


Рис. 19. Параметры преобразования координат конструктивной цепи эвольвентомера со сменными дисками

Аналогично, для второй ветви конструктивной цепи с полюсом  $k=3$  базовой системы координат имеем:

$$\left. \begin{aligned} \delta x &= \delta x'_3 - (c'_{03} + c'_{13}) \omega_2^{(0)} - (c'_{03} + c'_{23}) \omega_2^{(1)} + (b'_{03} + \\ &\quad + b'_{13}) \omega_3^{(0)} + (b'_{23} + b'_{03}) \omega_3^{(1)} - \omega_2^{(2)} c'_{03} + \omega_3^{(2)} b'_{03} - \delta a'_{03}; \\ \delta y &= \delta y'_3 - (a'_{03} + a'_{13}) \omega_3^{(0)} - (a'_{03} + a'_{23}) \omega_3^{(1)} + (c'_{03} + \\ &\quad + c'_{13}) \omega_1^{(0)} + (c'_{23} + c'_{03}) \omega_1^{(1)} - \omega_3^{(2)} a'_{03} + \omega_1^{(2)} c'_{03} - \delta b'_{03}; \\ \delta z &= \delta z'_3 - (b'_{03} + b'_{13}) \omega_1^{(0)} - (b'_{03} + b'_{23}) \omega_1^{(1)} + (a'_{03} + \\ &\quad + a'_{13}) \omega_2^{(0)} + (a'_{23} + a'_{03}) \omega_2^{(1)} - \omega_1^{(2)} b'_{03} + \omega_2^{(2)} a'_{03} - \delta c'_{03}. \end{aligned} \right\} (38)$$

Найденные значения вариаций координат должны быть подставлены в приведенную выше формулу инструментальной погрешности:

$$\Delta = (\delta x_3' - \delta x_2) \sin(\varphi + \alpha) + (\delta y_3' - \delta y_2) \cos(\varphi + \alpha). \quad (39)$$

Предварительно параметры преобразования координат должны быть вычислены по следующим таблицам (рис. 19).

Таблица 1

Первая ветвь цепи

$i$	$a_{i, i+1}$	$b_{i, i+1}$	$c_{i, i+1}$
0	$r \varphi \cos(\alpha + \varphi)$	$-r \varphi \sin(\alpha + \varphi)$	$-(H - h)$
1	$-r \sin(\alpha + \varphi)$	$-r \cos(\alpha + \varphi)$	$-h$

Таблица 2

$k$	$x_n$	$y_n$	$z_n$
2	$a_{02} = a_{01} + a_{12}$	$b_{02} = b_{01} + b_{12}$	$c_{02} = c_{01} + c_{12}$

Таблица 3

Вторая ветвь цепи

$i$	$a'_{i, i+1}$	$b'_{i, i+1}$	$c'_{i, i+1}$
0	$r \varphi' \cos(\alpha' + \varphi')$	$-r \varphi' \sin(\alpha' + \varphi')$	0
1	0	0	$-\left[L + \frac{l_1}{2} - \frac{l_2}{2}\right]$
2	0	0	$-h$

Таблица 4

$k$	$x_3'$	$y_3'$	$z_3'$
3	$a'_{03} = a'_{01} + a'_{12} + a'_{23}$	$b'_{03} = b'_{01} + b'_{12} + b'_{23}$	$c'_{03} = c'_{01} + c'_{12} + c'_{23}$

А. Н. Королева вычислила инструментальную погрешность эвольвентомера с неподвижной оправкой и сменными дисками:

$$r_0 = 56,382 \text{ мм}; \quad \alpha = 1^\circ \text{С}; \quad \varphi = 20^\circ.$$

Значения параметров преобразования координат приведены в следующих таблицах.

Первая ветвь цепи, мм

Таблица 1а

$i$	$a_{i,i+1}$	$b_{i,i+1}$	$c_{i,i+1}$
0	17,986	-6,870	-37,000
1	-20,204	-52,637	-4,000

$$x_{02} = -2,318 \text{ мм}; \quad y_{02} = -59,507 \text{ мм}; \quad z_{02} = 41,000 \text{ мм}.$$

Вторая ветвь цепи, мм

Таблица 3а

$i$	$a'_{i,i+1}$	$b'_{i,i+1}$	$c'_{i,i+1}$
0	17,886	-6,870	0
1	0	0	-34,000
2	0	0	-4,000

$$x'_3 = 17,986 \text{ мм}; \quad y'_3 = -32,000 \text{ мм}; \quad z'_3 = -32,000 \text{ мм}.$$

Вычисление инструментальной погрешности было произведено А. Н. Королевой в приложении следующих допущений: „Отклонения в размерах могут быть измерены современными приборами.“

Поэтому погрешность, выражаемая общей формулой, в которую входят 40 независимых первичных погрешностей вследствие вариаций длин звеньев конструктивной цепи и перекосов звеньев, принципиально определима“.

На стр. 125 своей работы А. Н. Королева говорит:

„Из факта отсутствия отклонений указателей приборов мы не можем делать выводы об отсутствии инструментальной погрешности эвольвентомера. Мы можем лишь утверждать, что

каждая из 40 первичных погрешностей лежит за порогом чувствительности приборов и что их сумма при неблагоприятном сочетании (теоретически мало вероятном — В. М.) может дать ощутимую погрешность измерения<sup>1</sup>.

И далее: „Допустим, что каждое звено конструктивной цепи может быть измерено при помощи измерительных приборов с порогом чувствительности 1 микрон для линейных измерений и 1" — для угловых измерений.

Определим инструментальную погрешность в предположении, что вариации отдельных звеньев конструктивной цепи лежат за порогом чувствительности измерительных приборов, применяемых при этих измерениях<sup>1</sup>.

В этом предположении А. Н. Королева получила значение инструментальной погрешности эвольвентомера со сменными дисками и неподвижной оправкой  $\pm 7,2$  мк.

Нет необходимости для вычисления разворачивать основные формулы теории точности конструкций в общем виде, как это делает А. Н. Королева, и подставлять численные значения в развернутые формулы в общем виде.

Вычисления становятся значительно проще, если развернутые формулы сразу получать уже после предварительной подстановки численных значений в матрицы и вычисления соответствующих определителей.

### Выводы

Основы теории точности конструкций, заложенные 20 лет тому назад еще в б. Главной палате мер и весов, в настоящее время получили свое обоснование и оформление в выводе автором основных формул теории точности конструкций.

Эти формулы позволяют определять инструментальные погрешности измерительных приборов еще в процессе их проектирования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Г. Махровский, Допуски для длин, Стандартизация и рационализация, 1932.
2. Н. Г. Бруевич, О точности конструкций, АН СССР, 1941.
3. Б. А. Балахнин, О размерных цепях, ОНТИ, 1934.
4. А. П. Иванов, Методика построения механизмов машин-автоматов, „Автоматика и телемеханика“, 1937, № 5.

<sup>1</sup> Подчеркнуто мною. В. М.



### О ПОСТРОЕНИИ КРИВОЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СУММЫ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ С НЕИЗВЕСТНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ВЕРОЯТНОСТИ

Задача построения кривой распределения суммы случайных погрешностей измерения с неизвестной плотностью вероятности была сформулирована автором в 1933 г. Решение этой задачи было доложено автором первой Всесоюзной конференции по вопросам взаимозаменяемости, созванной в ВИМС Всесоюзным комитетом по стандартизации весной 1934 г., и до последнего времени не было опубликовано. В связи с быстрым внедрением в науку и технику методов математической статистики решение этой задачи в настоящее время представляет интерес не только для специалистов в области линейных измерений, в среде которых она возникла. Так как в течение последних пятнадцати лет не появлялось работ, посвященных постановке и решению вопроса о геометрическом построении кривой распределения суммы случайных погрешностей измерения с неизвестной плотностью вероятности, то автор считает своим долгом в сокращенном виде опубликовать часть содержания своего доклада на тему «К вопросу о влиянии погрешностей эталонирования на характер посадок (опыт приложения теории вероятностей)\*», представляющую, по его мнению, интерес для метрологии [1].

В докладе следовало ответить на вопрос, какова вероятность наибольшей суммы погрешностей измерения в процессе эталонирования. Под процессом эталонирования в 1934 г. понимался процесс передачи размера от интерференционной установки, воспроизводящей длины световой волны красной линии кадмия, к изделию через эталонную концевую меру (Э), измеренную абсолютным интерференционным методом, рабочую эталонную концевую меру (РЭ), измеренную относительным интерференционным методом, образцовую концевую меру (ОК), измеренную техническим интерференционным методом, справочный калибр (СК), измеренный на оптиметре, и рабочий калибр (РК), также измеренный на оптиметре (рис. 1).

Согласно исследованию Г. В. Варлиха (1934 г.), каждая ступень эталонирования отягощена четырьмя случайными погрешностями, так что при эталонировании по схеме 1933 г. мы имеем двадцать случайных погрешностей.

Вероятность той или иной суммарной ошибки, в том числе и максимальной, должна исчисляться как вероятность совпадения 20 случайных событий.

Одно перечисление 20 факторов уже должно внушать сомнение в целесообразности вести расчеты в области допусков в предположении почти недостоверного сочетания экстремальных значений отдельных ошибок.

Большое количество факторов до некоторой степени облегчает решение вопроса о вероятности максимальной ошибки при отсутствии статистических данных о кривых распределения для отдельных факторов. К решению поставленной задачи можно подойти методом последовательного приближения, формулируя различные гипотезы о характере распределения той или иной случайной величины. Во всяком случае, если нельзя разрешить проблемы с абсолютной точностью, то все же можно указать пределы вероятности, позволяющие сделать соответствующие практические выводы.

Первоначально Г. В. Варлих дал следующую формулу для вычисления наибольшей суммарной погрешности эталонирования:

$$\Delta = \sum_1^n (\Delta a_i + \Delta b_i + \Delta c_i + \Delta d_i), \quad (1)$$

где  $\Delta a_i$ ,  $\Delta b_i$ ,  $\Delta c_i$  и  $\Delta d_i$  — четыре случайные погрешности на каждой  $i$ -й ступени эталонирования. Эти погрешности заключены в определенные пределы.

Ф-ла (1) дает весьма большую погрешность, если подойти к ее использованию не с точки зрения статистики. Если в этой формуле взять предельные значения, то оказывается, что, например, для калибров диаметром 50 мм по первому классу точности поле погрешностей (суммарное) больше поля допусков

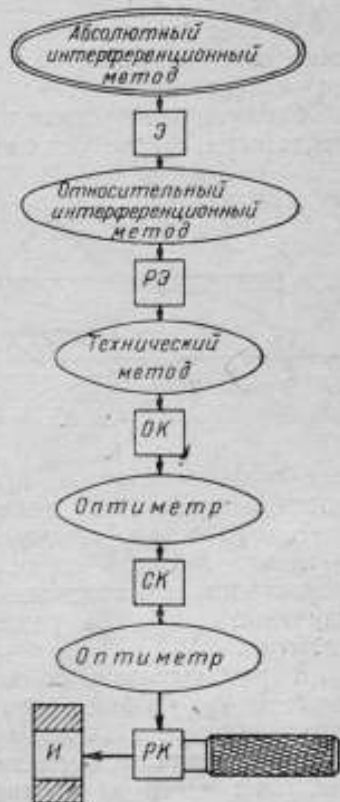


Рис. 1.

на неточность изготовления, т. е. погрешность эталонирования не оставляет никакого производственного допуска.

В первоначальной формуле Г. В. Варлиха имелось 20 величин, могущих принимать любые значения (независимо друг от друга) в некоторых пределах.

Весьма сомнительно, чтобы эти 20 величин одновременно получили крайние значения и тем обусловили максимальную погрешность эталонирования.

Вполне естественно было поэтому попытаться проанализировать, как часто возможны эти крайние значения с точки зрения статистики.

Статистическое исследование таких вопросов, как известно, ведется на основе так называемых кривых распределения.

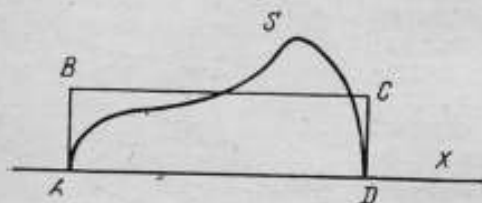


Рис. 2.

Кривая распределения какой-либо случайной величины есть геометрическое изображение зависимости между этой величиной и частотой или вероятностью ее появления.

По оси абсцисс откладывают отрезки, пропорциональные значению случайной величины, а по

оси ординат — отрезок, пропорциональный частоте или вероятности значения этой величины.

Как известно, вероятность того, что некоторая случайная величина лежит в пределах от  $x$  до  $x + dx$ , равна  $P(x)dx$ . Вероятность же совпадения двух или нескольких независимых случайных событий равна произведению вероятностей этих событий.

В рассматриваемом нами случае, например, вероятность совпадения крайних значений факторов, обуславливающих экстремальные значения суммарной погрешности, равна произведению двадцати вероятностей, значения которых мы должны были бы взять из соответствующих кривых распределений, представляющих собой оформление какого-то статистического опыта.

Таким образом, предпосылкой для применения статистических методов является наличие статистического наблюдения.

Так как в 1934 г. не было достаточного опытного материала для построения кривых распределения, то для решения поставленной задачи пришлось воспользоваться гипотезой равномерного распределения погрешностей.

Так, например, вместо кривых распределений с максимумом где-то в промежутке между экстремальными значениями, принято распределение по прямой, параллельной оси  $X$ . Вместо кривой  $ASD$ , в виде первого приближения введена прямая

ВС на основании следующего соображения: если и в этом предположении вывод не будет неблагоприятным, то тем более благоприятным он был бы, если бы мы имели вместо кривой равновероятных отклонений кривую распределения с минимальными значениями на пределах (рис. 2).

Поставленная задача была решена специальным графическим методом, который может быть применен и за пределами рассматриваемой конкретной задачи.

В своем исследовании, с целью упрощения задачи, не вносящего большой ошибки, мы приняли общее число погрешностей эталонирования равным 15; это тем более допустимо в настоящее время, когда нас интересует не схема эталонирования 1933 г., а метод построения кривой распределения суммы случайных величин с неизвестной плотностью вероятности.

Наибольшие значения 15 погрешностей эталонирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наибольшие значения погрешностей эталонирования

Номер ступени	Наибольшие погрешности в миллимикронах		
	$\Delta a_i^{(0)}$	$\Delta b_i^{(0)}$	$\Delta c_i^{(0)}$
1	20	2,3	5
2	30	3,45	10
3	100	11,5	20
4	400	23	20
5	400	23	40

Формулу Г. В. Варлиха можно представить в таком виде:

$$\Delta = \sum_1^n (\Delta a_i^{(0)} \theta_i + \Delta b_i^{(0)} \theta_i'' + \Delta c_i^{(0)} \theta_i'''). \quad (2)$$

где

$\Delta a_i^{(0)}$ ,  $\Delta b_i^{(0)}$  и  $\Delta c_i^{(0)}$  — значения, указанные в табл. 1;

$\theta_i$  — коэффициент использования наибольшего значения, удовлетворяющий условию

$$-1 \leq \theta \leq +1.$$

Задавая пятнадцать произвольными значениями для  $\Delta$ , мы получим одно из важнейших значений, вероятность кото-

рого будет равна произведению пятнадцати вероятностей, взятых из соответствующих кривых распределений.

Представим выражение (2) в таком виде:

$$\Delta = \left\{ \left[ (\Delta a_1^{(0)} \theta_1' + \Delta a_2^{(0)} \theta_2' + \Delta a_3^{(0)} \theta_3') + (\Delta a_4^{(0)} \theta_4' + \Delta a_5^{(0)} \theta_5') \right] + \right. \\ \left. + \left[ (\Delta b_1^{(0)} \theta_1'' + \Delta b_2^{(0)} \theta_2'' + \Delta b_3^{(0)} \theta_3'') + (\Delta b_4^{(0)} \theta_4'' + \Delta b_5^{(0)} \theta_5'') \right] \right\} + \\ \left. + \left[ (\Delta c_1^{(0)} \theta_1''' + \Delta c_2^{(0)} \theta_2''' + \Delta c_3^{(0)} \theta_3''') + (\Delta c_4^{(0)} \theta_4''' + \Delta c_5^{(0)} \theta_5''') \right]. \right\} \quad (3)$$

Ф-ла (3) показывает, что вопрос об определении вероятности совпадения пятнадцати случайных значений может быть

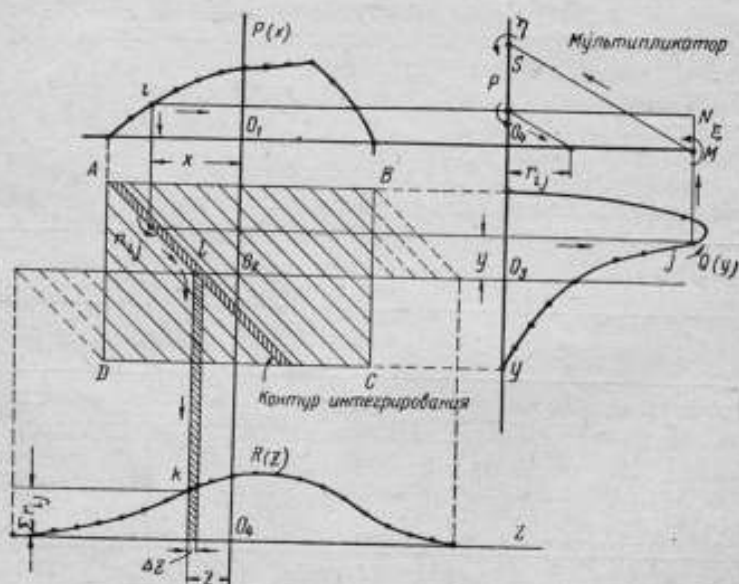


Рис. 3.

сведен к последовательному нахождению кривых распределения только двух слагаемых.

Для построения суммарной кривой распределения двух величин поступаем таким образом (рис. 3):

1. Строим поле интегрирования в виде прямоугольника  $ABCD$ , стороны которого соответственно равны удвоенным предельным отклонениям.

2. Строим две кривые распределения со взаимно перпендикулярными осями частот параллельно сторонам поля интегрирования.

3. Приняв точку пересечения осей  $x$  и  $y$  кривых распределения, проводим оси мультипликатора  $O\xi$  и  $O\eta$ .



4. Под полем интегрирования располагаем оси координат суммарной кривой распределения.

5. Проводим ряд весьма близких параллельных прямых, наклоненных к оси под углом в  $45^\circ$ , если масштаб кривых распределения одинаков.

6. Отмечаем ряд точек на одной кривой распределения, проводим ординаты и продолжаем их до пересечения с какой-либо одной из прямых пункта 5 в точке  $n_{ij}$ .

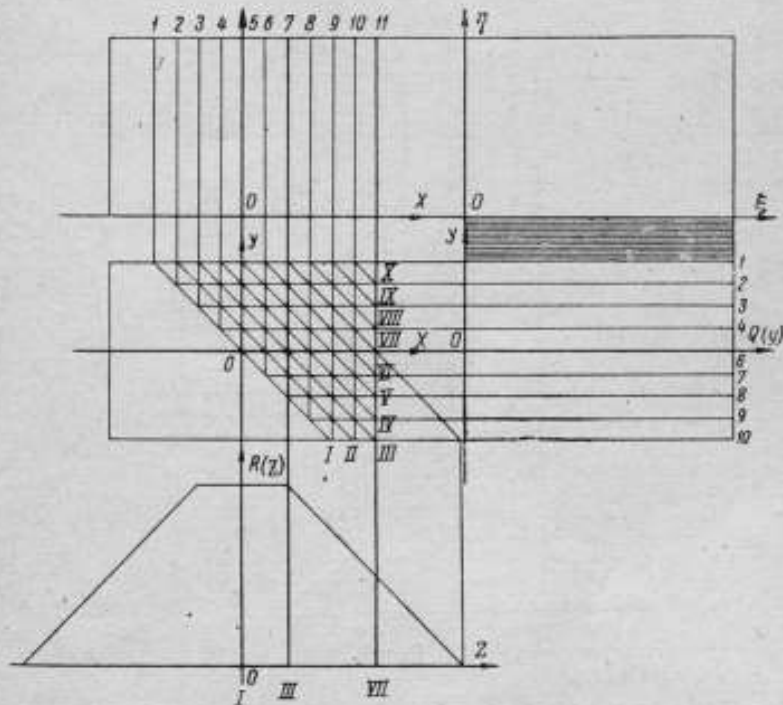


Рис. 4.

7. Из точек пересечения, указанных в пункте 6, проводим под прямым углом к первым ординатам прямые до пересечения со второй кривой распределения в точке  $j$ .

8. Через соответственные точки кривых проводим прямые, параллельные осям случайных величин, до пересечения их в поле мультипликатора в точке  $N$  (рис. 3).

9. Строим поле мультипликатора, проводя через вершины кривых распределения прямые, параллельные осям случайных величин.

10. Соединяем точку  $M$  мультипликатора с точкой  $S$ , выбранной из соображений удобства масштаба для дальнейших построений.

11. Проводим через точку  $p$  прямую, параллельную  $SM$ .  
 12. Просуммировав все отрезки  $r_{ij}$ , соответствующие одной из контурных прямых, откладываем сумму, как ординату суммарной кривой распределения для абсциссы, соответствующей абсциссе пересечения контурной прямой с осью  $O_2O_3$ .  
 Обоснование распределения приведено в приложении.

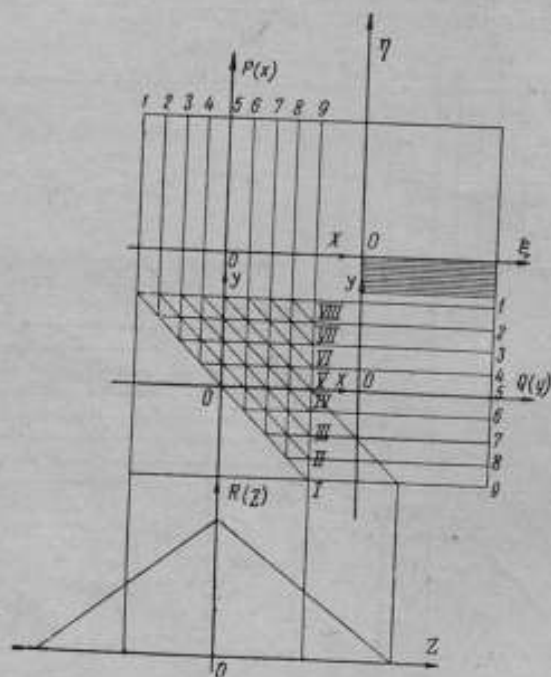


Рис. 5.

Уже суммирование только двух слагаемых (рис. 4—6) показывает, что вероятность крайних значений близка к нулю.

Результативное построение показывает, что распределение погрешностей эталонирования близко к кривой Гаусса (рис. 7).

### ПРИЛОЖЕНИЕ

Пусть даны две случайные величины  $A$  и  $B$ , которые могут принимать значения, максимально различающиеся соответственно на  $2a$  и  $2b$ . Кривые рис. 8 и 9 изображают соответственные кривые распределения отклонений от средних значений.

Мы ставим себе задачу найти кривую распределения отклонений суммы случайных величин.

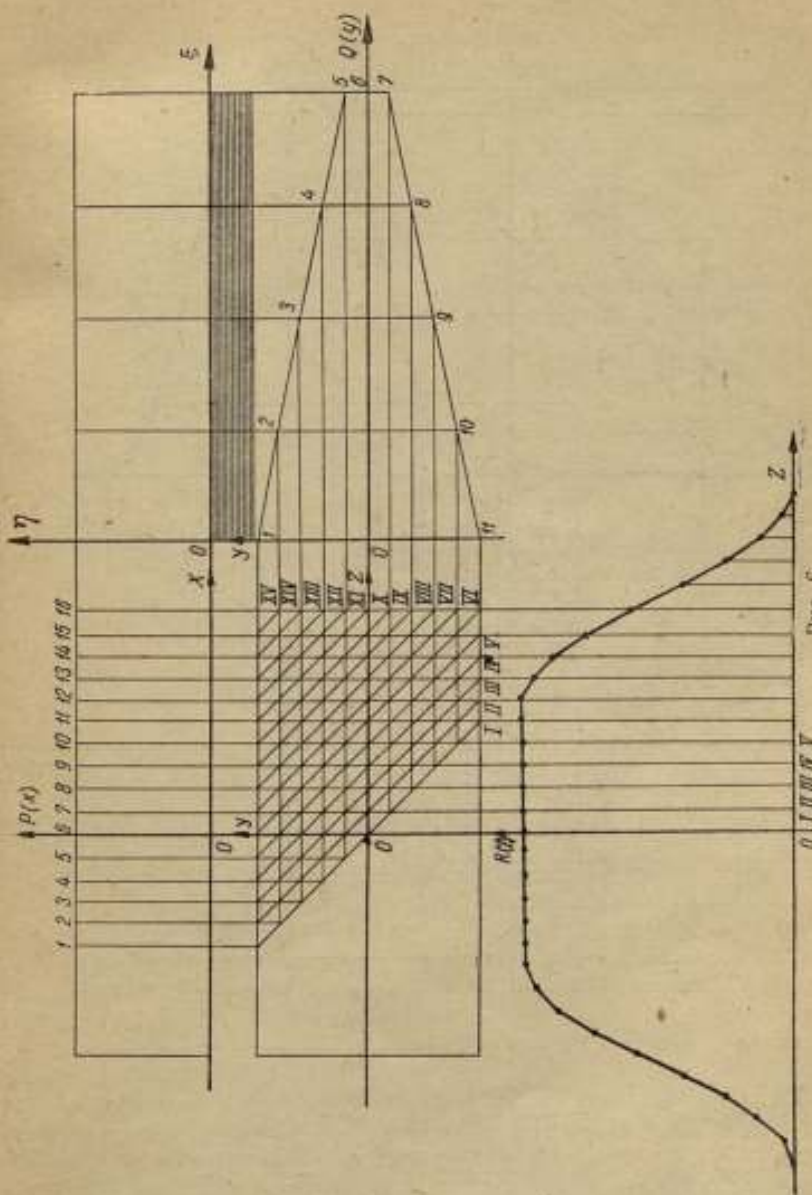


Рис. 6.

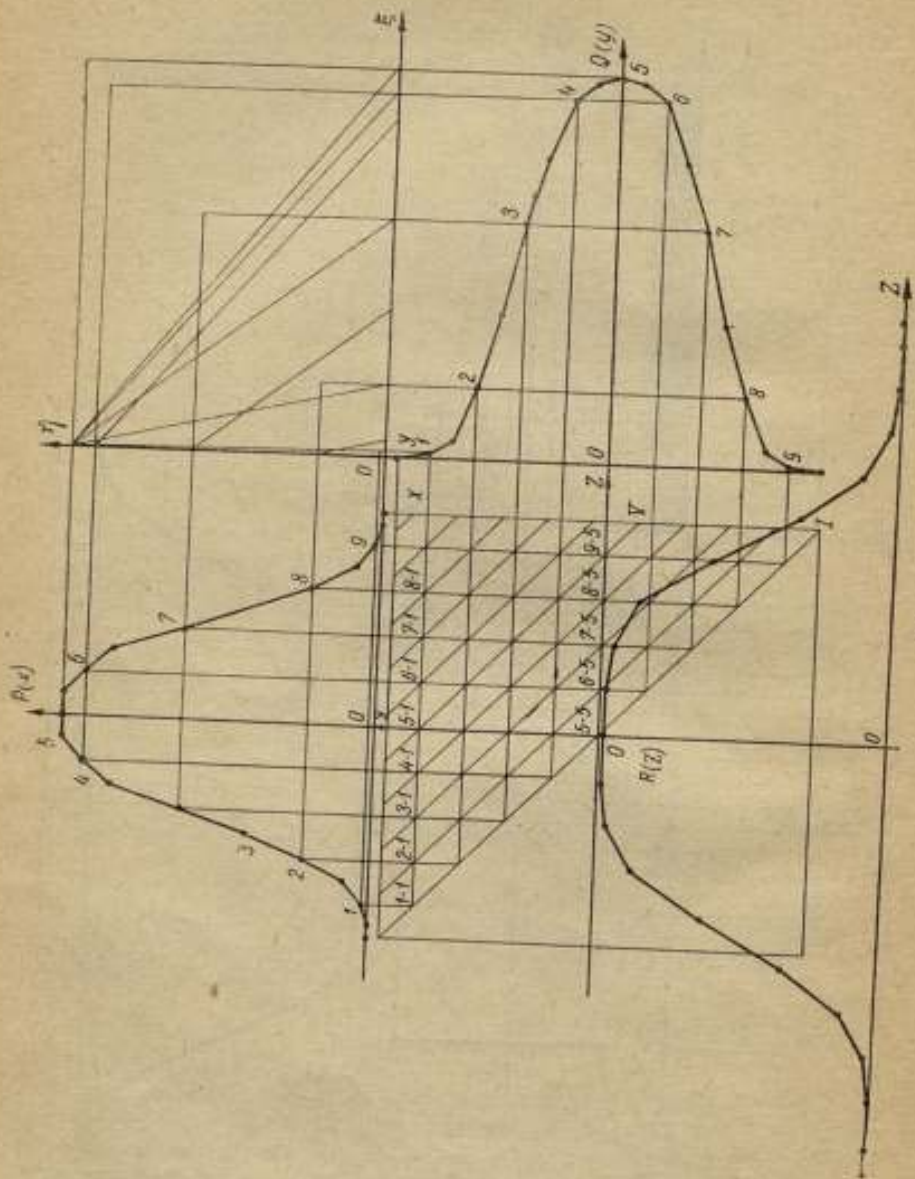


Рис. 7.

Пусть рис. 10 изображает искомую кривую распределения. Тогда  $R(z) \Delta z$  представит вероятность суммы отклонений  $x + y$  в пределах

$$z - \frac{1}{2} \Delta z < x + y < z + \frac{1}{2} \Delta z. \quad (4)$$

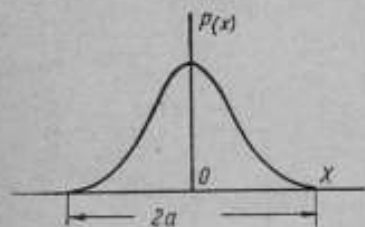


Рис. 8.

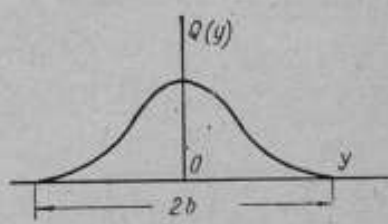


Рис. 9.

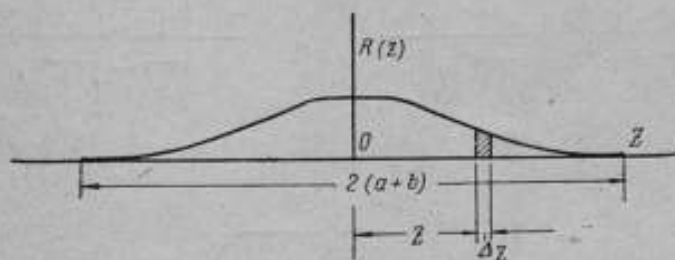


Рис. 10.

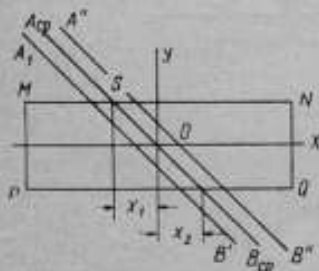


Рис. 11.

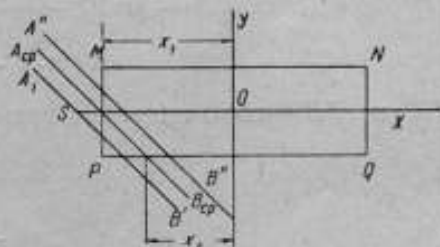
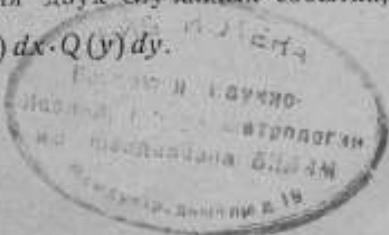


Рис. 12.

Вероятность отклонения  $A$  в пределах от  $x$  до  $x + dx$  будет  $P(x) dx$ ; соответственно вероятность отклонения  $B$  в пределах от  $y$  до  $y + dy$  будет  $Q(y) dy$ .

Вероятность же положения одновременно этих значений, как вероятность совпадения двух случайных событий, будет

$$P(x) dx \cdot Q(y) dy.$$





Наконец, вероятность получения неравенства (4) будет

$$R(z) \Delta z = \int_{x_1}^{x_2} P(x) dx \int_{y_1}^{y_2} Q(y) dy. \quad (5)$$

Для определения пределов интегрирования обратимся к рис. 11. Пусть линия  $A_{cp}B_{cp}$  изображает прямую

$$x + y = z; \quad (6)$$

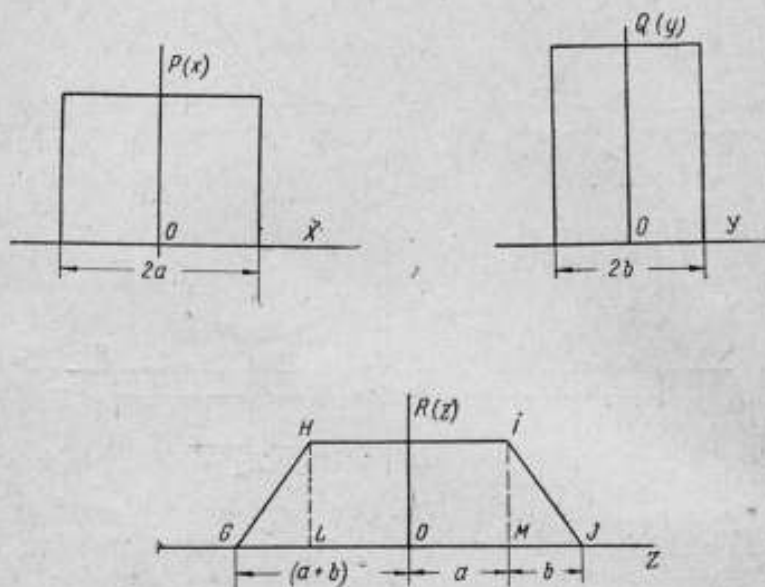


Рис. 13.

$A'B'$  и  $A''B''$ —соответственно прямые

$$\left. \begin{aligned} x + y &= z - \frac{1}{2} \Delta z; \\ x + y &= z + \frac{1}{2} \Delta z. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Тогда

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= z - \frac{1}{2} \Delta z - x; \\ y_2 &= z + \frac{1}{2} \Delta z - x; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= z - b; \\ x_2 &= z + b. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

### Случай I

Равенство (9) имеет место только в том случае, когда  $A_{cp} B_{cp}$  пересекает  $MN$  (в точке  $S$ ); в случае же пересечения  $MP$  (рис. 12)

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= z-b; \\ x_2 &= a. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

### Случай II

Таким образом, окончательно имеем

$$R(z) \Delta z = \int_{z-b}^{z+b} P(x) dx \int_{z-\frac{1}{2}\Delta z-x}^{z+\frac{1}{2}\Delta z-x} Q(y) dy \quad (11)$$

в первом случае и

$$R(z) \Delta z = \int_{z-b}^a P(x) dx \int_{z-\frac{1}{2}\Delta z-x}^{z+\frac{1}{2}\Delta z-x} Q(y) dy \quad (12)$$

во втором случае.

Пример. Пусть (фиг. 13)

$$P(x) = \text{const} = p \text{ и } Q(y) = \text{const} = q,$$

По формулам (8) и (9) для случая I

$$R(z) \Delta z = p \cdot q \cdot \int_{z-b}^{z+b} dx \int_{z-\frac{1}{2}\Delta z-x}^{z+\frac{1}{2}\Delta z-x} dy = p \cdot q \cdot \int_{z-b}^{z+b} dx \cdot \Delta z = 2pq \cdot \Delta z;$$

для случая II

$$R(z) \Delta z = pq \int_{z-b}^a dx \int_{z-\frac{1}{2}\Delta z-x}^{z+\frac{1}{2}\Delta z-x} dy = pq \int_{z-b}^a dx \Delta z = pq(a+b-z) \Delta z.$$

Очевидно, площадь  $GHIJ$  должна быть равна 1.

Имеем:  $2ap = 1$ ;  $2bq = 1$ .

Далее, площадь  $GHIJ$  = площадь  $HIML$  + 2 площадь  $IJM$  =  $2(a-b)2pq + 2b \cdot 2pq = 2 \cdot 2pq [b(a-b) + b] = 4abpq = 1$ , что и требовалось доказать.

### ЛИТЕРАТУРА

А. А. Чечулин, Оценка точности измерений, Баку, 1942

## ИЗМЕРЕНИЕ ТОЧНЫХ ШТРИХОВЫХ МЕР НА СТЕРЕОКОМПАРАТОРЕ<sup>1</sup>

### 1. Введение

Требования к точности линейных измерений с каждым годом повышаются, и в соответствии с этим непрерывно должны совершенствоваться методы измерений и приборы измерительной техники.

Штриховые меры, представляющие материальное воспроизведение единицы длины, имеют некоторые преимущества перед другими видами мер. Во-первых, они имеют подразделения с дробными или кратными значениями единиц длины; во-вторых, при измерении отпадает необходимость непосредственного касания штрихов меры, таким образом исключаются влияния измерительного давления и износа меры.

Штриховые меры длины широко применяются во всех областях техники и науки не только в виде общеизвестных эталонных, образцовых и рабочих измерительных линейек, но штриховыми шкалами высокой степени точности все больше оснащаются всевозможные измерительные приборы и устройства, в особенности — оптические измерительные приборы.

В оптических измерительных приборах, где штриховые линейные шкалы используются при большом увеличении, требования к точности делений очень высоки и в ряде случаев приближаются к точности метрологических эталонов и образцовых мер. К штриховым мерам очень высокой степени точности относятся также линейки для особо точных станков, например, эталонные линейки для делительных машин, по которым с учетом поправок их делений, методом копирования производится изготовление делений разных изделий высокой точности.

Представление о требуемой точности выполнения точных штриховых мер длины могут дать следующие цифры. Допу-

<sup>1</sup> Статья написана М. К. Дубинским по заданию ВНИИМ.

скаемые предельные погрешности расстояний оси любого штриха от оси нулевого штриха для делений на металле:

$$\begin{aligned} \text{а) } \pm \left( 0,010 + \frac{L}{100\,000} \right) \text{ мм; } & \text{б) } \pm \left( 0,005 + \frac{L}{200\,000} \right) \text{ мм;} \\ & \text{в) } \pm \left( 0,002 + \frac{L}{500\,000} \right) \text{ мм.} \end{aligned}$$

Допускаемые погрешности штриховых шкал оптических приборов для линейных измерений:

$$\pm \left( 0,001 + \frac{L}{100\,000} \right) \text{ мм и даже } \pm \left( 0,0005 + \frac{L}{200\,000} \right) \text{ мм.}$$

$L$ —длина интервала от нулевого штриха в мм.

Вышеприведенные допускаемые погрешности делений показывают, какие высокие требования предъявляются к значительной части штриховых мер длины. Методы же измерения погрешностей делений естественно должны обеспечивать значительно большую точность определения действительной длины всех подразделений штриховых мер. Поэтому необходимо остановиться на вопросе о современной точности определения погрешностей делений штриховых мер.

## 2. Методы сличения точных штриховых мер

Измерение штриховых мер длины производится непосредственным сравнением измеряемой меры с образцовой мерой или эталоном на приборах, называемых компараторами. Сравнимые меры отличаются друг от друга на весьма малые величины, не превышающие 10—20 мк; при сличении двух мер нужно производить измерение малых разностей интервалов этих мер, полагая, что расстояние между оптическими осями микроскопов компаратора остается неизменным. Микроскопы устанавливаются на один и тот же соответственный штрих: левый микроскоп I—на штрих эталона, правый микроскоп II—на штрих измеряемой меры.

Наблюдения производятся двумя наблюдателями по два приема наблюдений на каждого, причем запись производит второй наблюдатель. Каждый отдельный прием наблюдений заключается в следующем:

- а) три наведения по окуляр-микрометру на нулевой штрих эталона (микроскоп I);
- б) три наведения на нулевой штрих измеряемой меры (микроскоп II);
- в) под микроскопы подводятся конечные штрихи проверяемого интервала делений;
- г) шесть наведений на штрих эталона (микроскоп I);

д) шесть наведений на штрих измеряемой меры (микроскоп II).

Обратным ходом каретки под микроскопы опять подводятся нулевые штрихи мер и производятся по три наведения на нулевые штрихи эталона и измеряемой меры по микроскопам I и II.

По исследованиям Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии [1] экспериментальными данными установлено и теоретически доказано, что существующая метрологическая система передачи верной длины методом сличения штриховых мер дает довольно большое накопление погрешностей.

Для штриховых метров разных разрядов получаются следующие наибольшие погрешности определения действительной длины:

рабочие метрологические эталоны метра  $\pm 0,35$  мк;

образцовый метр 1-го разряда (сличение в воде)  $\pm 2,3$  мк;

образцовый метр 1-го разряда (сличение в воздухе)  $\pm 3,6$  мк.

Таким образом, для соблюдения указанных выше высоких требований к точным штриховым мерам в ряде случаев необходимо производить компарацию их не по образцовым мерам, а непосредственно по рабочим эталонам.

Наибольшая погрешность определения действительной длины при сличении штриховых мер с плоскопараллельными концевыми мерами (с притертыми боковичками, на которых нанесены штрихи) может быть выражена по исследованиям ВНИИМ эмпирической формулой

$$\pm (0,25 + 1,5 \cdot 10^{-6} L) \text{ мк.}$$

При длине меры в один метр погрешность при измерении по этому методу таким образом также достигает величины  $\pm 1,75$  мк.

Погрешности определения действительной длины штриховых мер современными методами сличения даже высшей метрологической точности, как можно видеть из приведенных данных, значительно больше погрешностей определения действительной длины плоскопараллельных концевых мер по абсолютному интерференционному методу, которые равны:

для плиток до 100 мм:  $\pm (0,05 + 0,5 \cdot 10^{-6} L) \text{ мк};$

для плиток свыше 100 мм:  $\pm (0,05 + 0,8 \cdot 10^{-6} L) \text{ мк}.$

Таким образом, по точности измерений, а также вследствие большой трудоемкости методы измерения точных штриховых мер на метрологических компараторах не удовлетворяют современным требованиям к точности прецизионных штриховых мер.

Компаратор для измерения штриховых мер с использованием стереоскопического эффекта дает возможность производить



измерение погрешностей делений прецизионных штриховых мер с большим числом подразделений во много раз быстрее, чем на обычных компараторах. При этом наибольшая погрешность определения действительной длины этих мер не превышает погрешности определения на метрологических компараторах.

Для правильного понимания особенностей измерения штриховых мер на стереокомпараторе и приводимых в статье математических зависимостей необходимо коротко рассмотреть основные свойства глубинного зрения или стереоскопического восприятия, тем более, что в литературе в применении к данному виду измерений этот вопрос освещен недостаточно.

### 3. Стереоскопическое зрение

Представление о взаимном расположении предметов по дальности при наблюдении одним глазом основывается на сравнении их размеров, освещенности и относительной видимости: из одинаковых по размерам предметов ближе тот, который кажется больше; при одинаковом освещении более близкий предмет кажется более светлым и т. д.

Природа ощущения и оценки глубины пространства при зрении одновременно двумя глазами или стереоскопическое восприятие совершенно отлично от наблюдения одним глазом. Современное и имеющее наибольшее значение для понимания работы приборов объяснение возникновения стереоскопического эффекта заключается в следующем.

Линия прямого видения (зрительная линия или линия визирования) — линия, соединяющая фиксируемую точку пространства с серединой центральной ямки желтого пятна на сетчатке глаза.

Места сетчатки глаза, называемые соответственными, характеризуются тем, что возбуждение их дает ощущение одного объекта в поле зрения. Соответственными точками являются центральные ямки и все точки, лежащие в одном и том же направлении и на одном и том же расстоянии от центральной ямки. Если изображения предмета падают на другие точки, — возникает ощущение двойственного изображения.

Но если несоответствие раздраженных точек сетчатки не превосходит определенной небольшой величины и, кроме того, в каждом глазу эти точки находятся по одну сторону от цен-

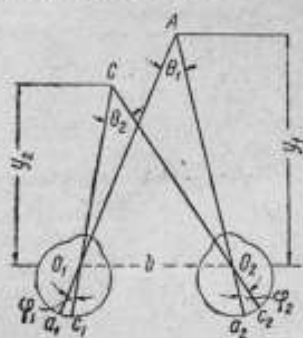


Рис. 1. Стереоскопическое зрение

тральной ямки (слева или справа), вместо двоения возникает впечатление удаленности объекта по сравнению с фиксируемым.

Рассматривая точку  $A$  (рис. 1), глаза поворачиваются так, что изображения этой точки окажутся в центральных ямках желтого пятна „ $a_1$ “ и „ $a_2$ “. При данном сведении линий прямого видения под углом  $\theta_1$ , изображения другой точки пространства  $C$ , находящейся ближе и сбоку, получается на сетчатке глаз в точках  $c_1$  и  $c_2$ . Эти точки не соответственные, но обе расположены по одну сторону от центральных ямок, поэтому точка  $C$  будет видна без двоения на другом удалении.

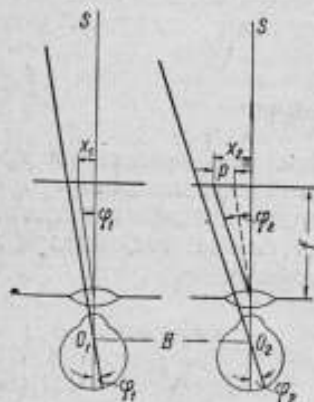


Рис. 2. Схема стереоскопа

Если больший угол  $\varphi$  (в данном случае  $\varphi_2$ ) лежит в височной половине сетчатки, — точка  $C$  кажется ближе, а если в носовой половине, — точка  $C$  кажется дальше точки  $A$ .

Смещение изображений на сетчатке одного глаза по сравнению с изображением на сетчатке другого определяется не одним элементом сетчатки, а группой их. Поэтому бинокулярная оценка разности расстояний между точками пространства необычайно точна, аналогично повышенной разрешающей силе глаза при наблюдении смещения штрихов шкалы и нониуса.

Если рассматриваемая точка находится далеко, то зрительные линии обоих глаз направлены параллельно. Изображение получается в центральной ямке, причем точка видна в одном и том же месте пространства независимо от того, попадает ли изображение на сетчатку одного глаза или обоих глаз.

Угол между линиями, соединяющими данную точку пространства с центрами вращения глаза  $O_1$  и  $O_2$ , называется параллактическим углом. Величина этого угла зависит от расстояния между центрами вращения глаза  $O_1$  и  $O_2$  (базы наблюдения невооруженными глазами).

Так как параллактические углы обычно малы, можно принять

$$\operatorname{tg} \theta_1 \approx \theta_1 \approx \frac{b}{y_1} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \theta_2 \approx \theta_2 \approx \frac{b}{y_2}.$$

Разность параллактических углов

$$\Delta \theta = \Delta \varphi = \theta_1 - \theta_2 = \frac{b}{y_1} - \frac{b}{y_2} = \frac{b(y_2 - y_1)}{y_1 y_2} \approx \frac{b \cdot \Delta y}{y^2}, \quad (1)$$

где

$\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2 = \varphi_1 - \varphi_2$  — разность параллактических углов;

$b = O_1O_2$  — база;

$\Delta y = y_2 - y_1$  — стереоскопическая глубина поля.

Из ф-лы (1) следует, что для повышения чувствительности нужно по возможности увеличить базу  $b$  и уменьшить расстояние  $y$ .

В оптических приборах первое требование выполняется за счет удлинения базы в несколько раз, а второе требование — за счет увеличения изображения оптической системой.

При наблюдении в стереоскопический прибор глаза смотрят неподвижно, и визирные линии  $O_1S$  и  $O_2S$  направлены перпендикулярно базе (рис. 2). Ограничимся только такими точками поля зрения, расстояние которых по фронту от вертикальных плоскостей, проведенных через линии  $O_1S$  и  $O_2S$ , малы по сравнению с базой. Координаты изображений точки  $A$  в фокальной плоскости будем считать от этих вертикальных плоскостей  $O_1S$  и  $O_2S$ . Если координаты  $x_1$  и  $x_2$  равны друг другу — линии визирования будут параллельны. В зависимости от величины этих координат меняется только угол наклона линий визирования относительно оптических осей.

При разной величине координат  $x_1$  и  $x_2$  линии визирования непараллельны. Вследствие неравенства углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  возникает зрительное впечатление более далекой или более близкой точки пространства в зависимости от того, будет ли больший из углов в височной или носовой половине сетчатки.

Разность параллактических углов

$$\Delta \theta = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{x_1}{f} - \frac{x_2}{f} = \frac{x_1 - x_2}{f} = \frac{p}{f}, \quad (2)$$

где

$p = x_1 - x_2$  — линейный параллакс;

$f$  — фокусное расстояние микроскопа.

#### 4. Устройство стереокомпаратора

Минимальная ощущаемая глазами разность параллактических углов или порог глубинного зрения при благоприятных условиях наблюдения, после достаточных упражнений, как показывает опыт, для 60% наблюдателей в среднем равен величине от 2 до 5 угловых секунд. Для наблюдателей с нормальным зрением порог глубинного зрения не превышает 10 угловых секунд [3].

Таким образом, чувствительность стереоскопического зрения очень велика и во много раз повышается применением оптической системы. Стереоскопическое восприятие разницы глубин положено в основу особого метода измерения штрихо-

вых мер длины на специально сконструированном для этой цели стереокомпараторе (рис. 3).

Стереокомпаратор представляет собой специальный стереоскоп, в котором вместо линз установлен бинокулярный микроскоп с двумя объективами.

В поле зрения каждого окуляра имеется стереоскопическая марка.

Одной из основных частей стереокомпаратора является подвижная каретка *I*, которая может передвигаться по точным

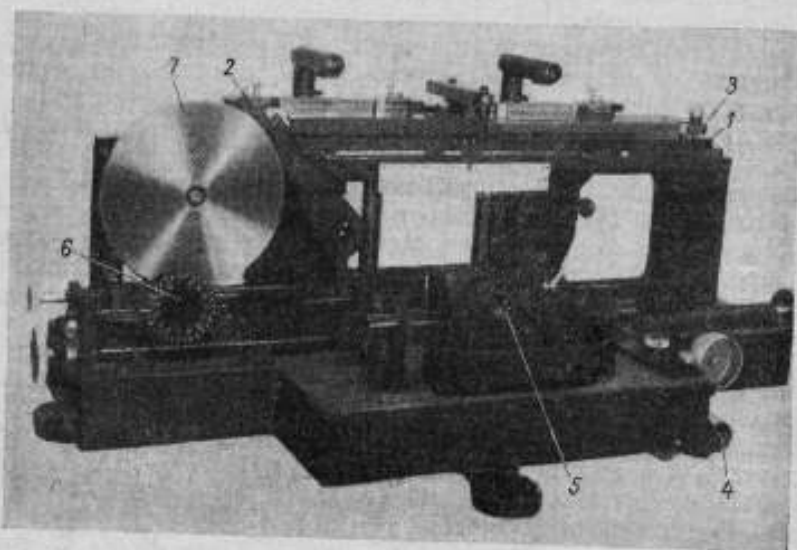


Рис. 3. Стереокомпаратор для измерения штриховых мер длины  
1—каретка; 2—столик образцовой меры; 3—столик измеряемой меры; 4—регистрирующее устройство; 5—бинокулярная часть; 6—отсчетный диск нулевого положения; 7—коррекционный диск

направляющим прибора вправо и влево. На этой каретке установлены два столика 2 и 3 для образцовой и измеряемой линейной меры. Каждый из этих столиков тремя регулировочными опорными винтами может быть выверен так, чтобы плоскость нанесения делений штриховой меры заняла правильное положение в плоскости предметов микроскопов. На каждом из столиков штриховая мера устанавливается между двумя колодочками с продольными и поперечными регулировочными винтами.

Поперечные винты дают возможность выверить каждую меру по азимуту, чтобы ось меры была параллельна направлению движения каретки и штрихи были правильно установлены в поле зрения микроскопов.

Продольными регулировочными винтами можно установить меры на столике так, чтобы начальные штрихи образцовой и измеряемой мер были грубо совмещены в поле зрения прибора по глубине с плоскостью измерительных марок.

Для последовательной установки соответствующих штрихов делений механизм перемещения каретки дает возможность по желанию быстро передвигать ее или пользоваться устройством для точной установки каретки.

Столики в местах установки начальных штрихов делений обеих мер связаны друг с другом особыми тягами из инвара,

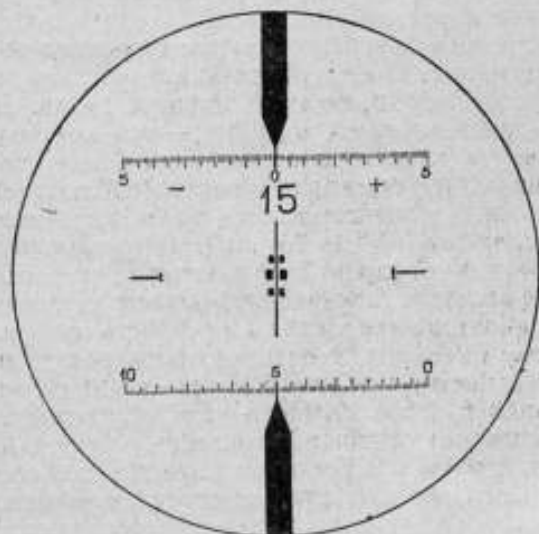


Рис. 4. Поле зрения стереокомпаратора

коэффициент линейного расширения которого очень мал. Благодаря такому устройству колебания температуры не могут вызывать смещения нулевого положения мер.

Штриховые меры устанавливаются на столики (делениями вниз) над объективами микроскопов, которые входят в продольное окно в каретке и обоих столиках. Микроскопы также связаны друг с другом тягами из инвара. Благодаря этому при колебаниях температуры взаимное положение оптических осей микроскопов остается неизменным.

При измерении образцовая и измеряемая меры расположены как продолжение одна другой по одной линии, деления их находятся в одной плоскости, в полном соответствии с принципом продольного компаратора. Это обеспечивает получение минимальных погрешностей измерения.

Поля зрения обоих микроскопов сведены в середину при-



бора, и наблюдатель в бинокулярную часть *Б* может видеть оба поля одновременно. Если смотреть только одним глазом, в левом окуляре видны марки, изображение штриха образцовой меры и нижняя шкала с индексом. В правом окуляре видны марки, изображение штриха измеряемой меры и верхняя шкала с индексом.

На рис. 4 показано поле зрения в том виде, в каком наблюдатель видит его при зрении обоими глазами одновременно. В центре поля видны стереоскопические марки в виде трех пар квадратиков. При наблюдении обоими глазами наблюдатель видит эти стереоскопические марки как бы висящими в пространстве и уходящими вдаль.

Для измерений обычно пользуются центральной парой прямоугольников марки. Две другие пары квадратиков искусственно создают перспективу предметов, идущих вдаль. Ими иногда пользуются для измерений, например—при контроле нулевого положения через каждое определенное количество штрихов.

Для правильной установки по глазам наблюдателя окуляры особым рычажком устанавливаются на межзрачковое расстояние (в пределах от 55 до 75 мм). Неправильная установка окуляров по глазам приводит к потере стереоскопичности. Имеет также большое значение правильная установка каждого окуляра по диоптрийной шкале на резкость изображения. При этом установку окуляров желательно производить по каждому глазу в отдельности, так как при некоторой разности фокусных расстояний правого и левого глаз помимо быстрой утомляемости несколько снижается точность измерений.

Для каждого из микроскопов имеются две системы освещения мер. Одна система предусмотрена для освещения делений на стекле и других прозрачных материалах проходящим светом. Вторая система дает наружное освещение штрихов на металле или другом непрозрачном материале. Таким образом, переключая освещение, можно производить измерения штриховых линейных мер любого вида.

Для повышения точности измерений желательно иметь на образцовой и на измеряемой мерах штрихи примерно одинаковой толщины. При некоторой разнице в толщинах штрихов сличаемых мер рекомендуется совмещать штрихи серединами, а не по краю штриха.

### 5. Измерение делений на стереокомпараторе

Принцип работы прибора основан на схеме по рис. 2.

Из окуляров бинокулярного микроскопа выходят параллельные пучки лучей, поэтому глаза не аккомодированы. Так как оптические оси окуляров раздвинуты на межзрачковое расстояние,—глазные оси параллельны друг другу и перпендикулярны базе.

Рассматриваемая глазами стереоскопическая марка в виде двух квадратиков при параллактическом угле, очень близком к нулю, дает мнимое изображение одной стереоскопической марки на бесконечности. Это изображение марки служит в приборе индексом.

При рассматривании левым глазом изображения штриха образцовой меры и правым глазом изображения штриха измеряемой меры создается зрительный образ одного штриха, расположенного в пространстве несколько ближе или дальше плоскости мнимого изображения стереоскопической марки.

Перед началом измерений сличаемые меры устанавливаются при помощи регулировочных винтов так, чтобы общее мнимое изображение нулевых штрихов их получалось примерно посередине между прямоугольниками стереоскопической марки.

Для точного совмещения общего изображения нулевых штрихов обеих мер с плоскостью марок наклоняют плоскопараллельную пластинку, установленную в качестве оптического компенсатора в ходе лучей левого микроскопа, и смещают таким образом изображение начального штриха, пока общее мнимое изображение нулевых штрихов обеих мер и стереоскопические марки будут казаться расположенными на одной глубине, т. е. линейный параллакс штрихов  $p = x_1 - x_2 \approx 0$ , точнее говоря, будет равен параллаксу марок.

После такой установки нулевого положения в поле зрения микроскопов вводятся следующие соответственные штрихи обеих мер. Общее мнимое изображение этих штрихов будет казаться расположенным пространственно в плоскости стереоскопических марок только в том случае, если их линейный параллакс  $p = x_1 - x_2$  будет равен линейному параллаксу марок. В противном случае изображение штриха будет казаться ближе или дальше марки. В этом случае, вращая измерительный барабан, наклоняют плоскопараллельную пластинку, установленную в качестве измерительного оптического компенсатора в ходе лучей правого микроскопа, и приводят изображение штриха измеряемой шкалы в такое положение, чтобы штрих и марка казались расположенными на одной глубине. По верхней шкале в поле зрения прибора (рис. 4) производится отсчет (в десятых долях микрона).

Из рис. 2 ясно, что линейный параллакс  $p = x_1 - x_2$  не меняется, если каждая из координат изменится на одну и ту же величину. Поэтому установка изображения штриха точно посередине между прямоугольниками марки — необязательна.

Измерительный оптический компенсатор в виде плоскопараллельной пластинки дает возможность с помощью относительно грубой механической передачи получать очень малые смещения изображения штриха. Таким образом совмещение с плоскостью марок можно производить легко и с большой точностью.

Кроме определения погрешностей делений измеряемой меры по сравнению с образцовой, непосредственно в процессе измерений на стереокомпараторе можно вводить поправки самой образцовой меры. Для этого в ходе лучей левого микроскопа, кроме оптического компенсатора нулевого положения, установлена вторая наклоняемая плоскопараллельная пластинка в качестве оптического компенсатора коррекции. Устанавливая наклон этой пластинки по шкале в нижней части поля зрения (рис. 4), вводят поправку соответствующим смещением изображения штриха образцовой меры.

Поправки интервалов образцовой меры можно также вводить автоматически, путем установки в стереокомпараторе особого коррекционного диска 7 (рис. 3).

Для записи измеренных погрешностей имеется устройство для регистрации их на бумажной ленте 4 (рис. 3).

## 6. Точность измерений на стереокомпараторе

В метрологических компараторах на точность измерений оказывают влияние наклон одного из микроскопов, погрешность винта окуляр-микрометра и погрешность наведения на штрих. Наблюдение приходится вести одним глазом, что повышает утомляемость по сравнению с бинокулярным зрением в стереокомпараторе.

В стереокомпараторе бинокулярный микроскоп неподвижен. Возможный наклон микроскопа остается одинаковым при определении нулевого положения и при измерении каждого деления. Таким образом, погрешность измерения от наклона микроскопа исключается.

В метрологических компараторах наибольшая разность значений отдельных отсчетов у одного наблюдателя доходит до 0,6—0,9 *мк*. Только путем большого числа наведений на каждый штрих снижается погрешность измерения за этот счет.

По исследованиям ВНИИМ [1] погрешность измерения по этой причине при 48 наведениях на каждый штрих составляет  $\pm 0,07$  *мк*, т. е. практически  $\pm 0,1$  *мк*.

Как указывалось выше, точность совмещения мнимого изображения штрихов с плоскостью стереоскопических марок очень велика. Для достаточно тренированного измерителя порог глубинного зрения—от 2 до 5 секунд и никогда не превышает 10 угловых секунд. При такой величине порога глубинного зрения погрешность измерения по причине неточности совмещения изображения штриха с марками равна:

$$\Delta = 0,000048 \cdot f = 0,000048 \cdot \frac{D}{N} = \frac{0,000048 \cdot 250}{117} = 0,0001 \text{ мк,}$$

где

$f = \frac{D}{N}$  — фокусное расстояние микроскопа;

$D = 250$  мм — расстояние наилучшего зрения;

$N = 117^{\times}$  — увеличение микроскопа.

Установка нулевого положения производится по среднему значению из 3—5 совмещений изображений нулевых штрихов с маркой, и погрешность совмещения незначительна. Но если даже учитывать ее и в этом случае равной  $\pm 0,0001$  мм, общая погрешность по причине неточного совмещения с маркой равна

$$\pm 0,0001 \sqrt{2} = \pm 0,00014 \text{ мм.}$$

Длительный опыт измерений точных штриховых мер длины с миллиметровыми делениями показывает, что при исполнении измерений двумя наблюдателями сходимость их отсчетов на стереокомпараторе очень велика, разность обычно составляет 0,2—0,3 мк и не превышает 0,5 мк.

В то же время при измерениях на метрологических компараторах только при условии большого числа наведений разность средних арифметических значений у двух наблюдателей достигает 0,3—0,5 мк.

Измерения на стереокомпараторе производятся во много раз быстрее, чем на метрологических компараторах. Это сокращение длительности измерений особо важно при большом числе делений, так как уменьшает влияние колебаний температуры.

Образцовые штриховые меры, по которым производится сравнение измеряемых мер, могут быть аттестованы с особо высокой степенью точности по плоскопараллельным концевым мерам на специальном интерференционном приборе [6]. При повышенной точности определения поправок делений образцовой шкалы стереокомпаратор дает возможность значительно приблизить точность определения действительной длины интервалов штриховых мер к точности определения действительного размера плоскопараллельных концевых мер интерференционными методами.

## 7. Выводы

Точность определения погрешностей делений штриховых мер по сравнению с делениями образцовых мер (без учета поправок самой образцовой меры) при измерении на стереокомпараторе приближается к лучшим результатам измерений на метрологических компараторах, при значительно меньшей затрате времени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Барнинов, Современное состояние эталонов длины и методы точного измерения длины, Изд. ВНИИМ, Л. 1941.
  2. А. И. Тудоровский, Теория оптических приборов, АН СССР, 1937.
  3. С. В. Кравков, Глаз и его работа, Биомедгиз, 1936.
  4. Оптика в военном деле, Изд. АН СССР и Гос. оптич. инст-та, т. I, 1945.
  5. Стереоскопатор для измерения линейных штриховых шкал, Описание и руководство к пользованию, сост. М. К. Дубинский, 1948.
  6. „Optik“, Zeitschrift für das gesamte Gebiet der Licht und Elektronenoptik, Stuttgart, V. 4, 1948/49, N. 4/5.
-



М. Л. БРЖЕЗИНСКИЙ

## НЕКОТОРЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА

#### 1. Специальная установка для опытных работ

Теоретические основы метода изложены автором в статьях [1] и [2].

Для исследования зависимости между величиной исходного давления  $H$ , площадью сечения жиклеров  $S$ ,  $G$  и показаниями  $h$  прибора была сконструирована и построена специальная установка, схематически представленная на рис. 1, состоящая из камеры 1, баллона с водой 2, водяного манометра 4 и компрессора 17. Детали конструкции камеры показаны на рис. 2. Воздух от компрессора по трубопроводу 16, пройдя через жиклеры, которые выполняют роль глушителей, поступает в трубу, которая открытым своим концом погружена в баллон с водой. Поступающий из компрессора воздух вытесняет из трубы воду до открытого ее конца (рис. 1), создавая таким образом постоянное давление, определяемое высотой столба воды  $H$ . Далее воздух под постоянным давлением, через головной жиклер  $G$ , поступает через воздухопроводы 6, 7 к водяному манометру 4 и измерительному жиклеру  $S$  (рис. 1). Такое устройство обеспечивает возможность легко и быстро производить смену головного жиклера  $G$  через отверстие в камере, вывинчивая пробку. В качестве баллона служила медная труба длиной 1 м и диаметром около 130 мм. Получение разных значений  $H$  достигалось за счет высоты столба воды в сосуде. Водяной манометр резиновой трубкой 6 соединялся с камерой 1; отсчет высоты столба производился по шкале 5 с миллиметровыми делениями. Камера 1 через воздухопровод 7 соединялась с измерительным жиклером  $S$ , укрепленным на штативе 13 вертикального оптиметра. Перемещением стола оптиметра 9 в вертикальном направлении достигалось получение различных значений зазора  $l$  между жиклером  $S$  и измерительной плоскостью стола.

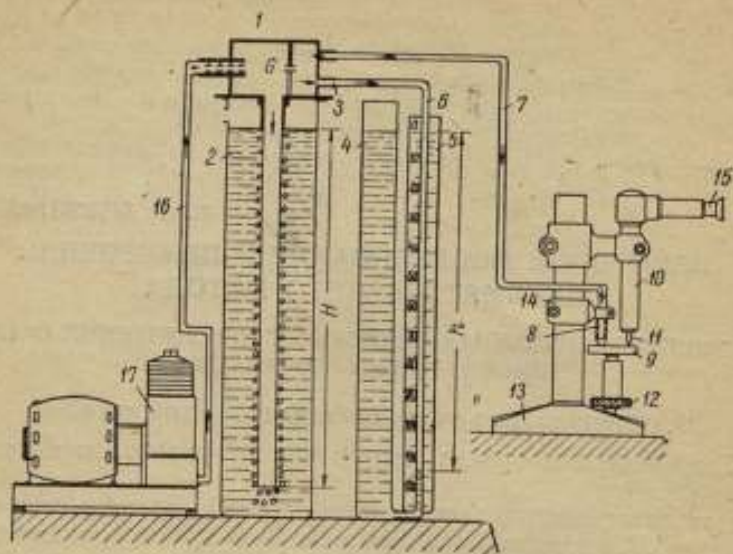


Рис. 1. Установка для изучения пневматического метода

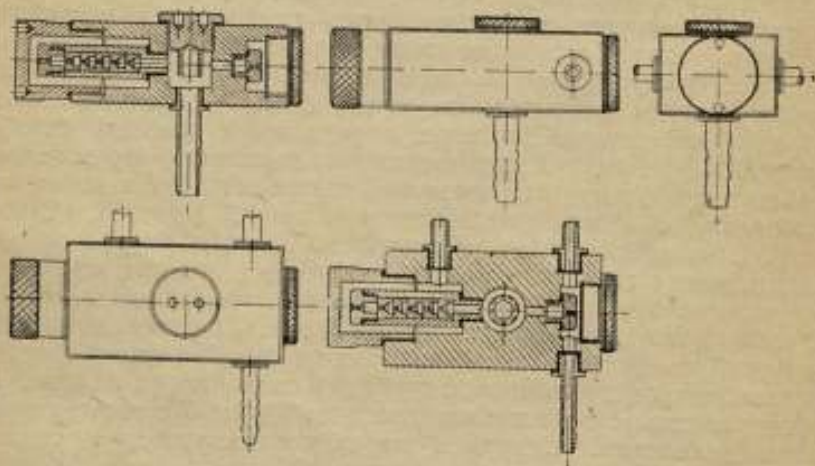


Рис. 2. Пневматическая камера

## 2. Исследование зависимости между $h$ , $S$ , $G$ и $H$

Для подтверждения основных теоретических положений, устанавливающих зависимость между показанием прибора  $h$ , величиной исходного давления  $H$  и площадью сечения жиклеров  $S$  и  $G$ , было произведено исследование пневматической установки при разных значениях  $H$ ,  $G$  и  $S$ . Как уже было отмечено, в конструкции опытной установки была предусмотрена возможность смены головного жиклера  $G$ , измерительного  $S$  и получение разных значений давления  $H$ .

Фиксация зазоров  $l$  измерительного жиклера  $S$  осуществлялась на столике вертикального оптиметра по схеме, представленной на рис. 1.

Измерительный жиклер  $S$  укреплялся на стойке вертикального оптиметра при помощи держателя  $14$  таким образом, что его плоскость могла быть установлена параллельно плоскости стола  $9$ . Микровинтом  $12$  можно было легко изменять величину зазора  $l$  между жиклером и плоскостью стола с интервалами через  $0,001$  м. Величина этого зазора точно фиксировалась по шкале трубки оптиметра  $10$ , измерительный штифт которой  $11$  находился в контакте с плоскостью стола. Это позволило быстро и с достаточно высокой точностью изменять величину зазора  $l$  от нулевого значения до требуемой величины. Таким образом, при определенных значениях  $H$ ,  $G$  и  $S$  снимались показания  $h$  по шкале водяного манометра  $6$  (рис. 1), отвечающие различным значениям зазора  $l$ .

Исследования произведены для значений  $H=800$  и  $500$  мм водяного столба, диаметров головных жиклеров  $G=1,03$  мм,  $0,56$  мм,  $0,48$  мм и  $0,38$  мм и диаметров измерительного жиклера  $S=4$  мм,  $2$  мм и  $1$  мм. Произведенные исследования при разных сочетаниях величины исходного давления  $H$  и площади сечения  $S$  и  $G$  дали возможность не только опытным путем подтвердить основные теоретические выводы и проследить за динамикой процесса, но и установить те оптимальные значения для  $G$  и  $S$ , при которых пневматический метод может быть применен для тех или иных целей.

Графики функций даны на рис. 3, 4, 5.

## 3. Анализ кривых

Проанализируем данные, полученные в результате исследования пневматического прибора.

При рассмотрении основных теоретических положений значение  $h$  в функции от площади сечения жиклеров  $S$  и  $G$  было установлено формулой

$$h = \frac{H}{\left(\frac{n}{m}\right)^2 \left(\frac{S}{G}\right)^2 + 1},$$

из которой видно, что  $h$  не будет линейной функцией от  $S$ , а следовательно, и от измеряемой величины  $l$  (так как площадь сечения измерительного жиклера  $S$  связана с  $l$  уравнением  $S \text{ мм}^2 = 2\pi rl$ ).

Следовательно, теоретически шкала прибора не может быть равномерной.

В табл. 1 даны значения измеряемой линейной величины  $l$  и соответствующие показания по шкале прибора  $h$  при исходном давлении  $H = 800 \text{ мм}$  водяного столба, диаметре головного

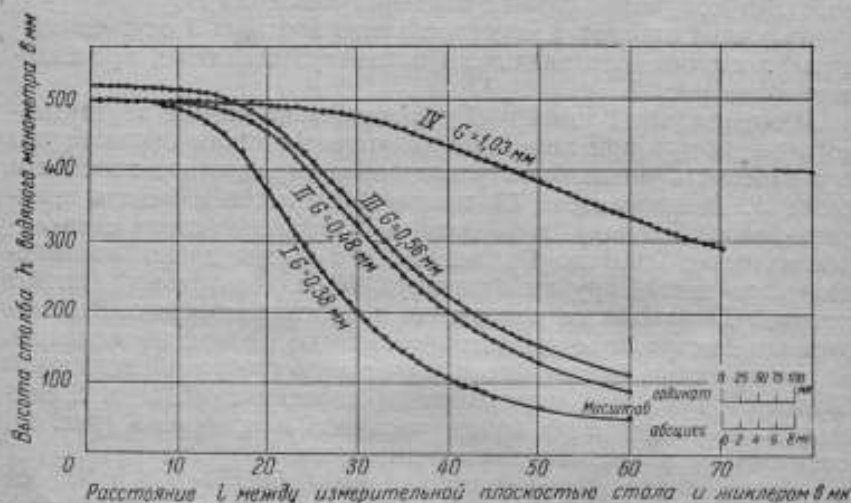


Рис. 3. Кривые градуировки пневматической камеры для  $H = 500 \text{ мм}$ ,  $S = 4 \text{ мм}$ .

жиклера  $G = 0,48 \text{ мм}$  и диаметре измерительного жиклера  $S = 4 \text{ мм}$ .

На рис. 3 построены графики зависимости  $h$  от  $l$  при  $H = 500 \text{ мм}$ , диаметре измерительного жиклера  $S = 4 \text{ мм}$  для четырех значений диаметров головного жиклера  $G$ .

Здесь зависимость между  $h$  и  $l$  практически приближается к линейной; далее, по мере увеличения  $l$  значения  $h$ , соответствующие одному и тому же значению  $l$ , начинают резко уменьшаться. Этот характер зависимости между  $h$  и  $l$  является общим для всех практически применяемых значений  $H$ ,  $G$  и  $S$ . Как видно из графиков и из цифровых данных градуировочных таблиц, с уменьшением диаметра жиклера  $G$  значения  $h$ , отвечающие одному и тому же значению  $l$ , увеличиваются, т. е. чувствительность прибора обратно пропорциональна диаметру жиклера  $G$ .

На рис. 4 построены кривые для тех же значений жиклеров, но при большем исходном давлении  $H = 800 \text{ мм}$ . Здесь все кривые имеют больший угол наклона к оси абсцисс. Сле-



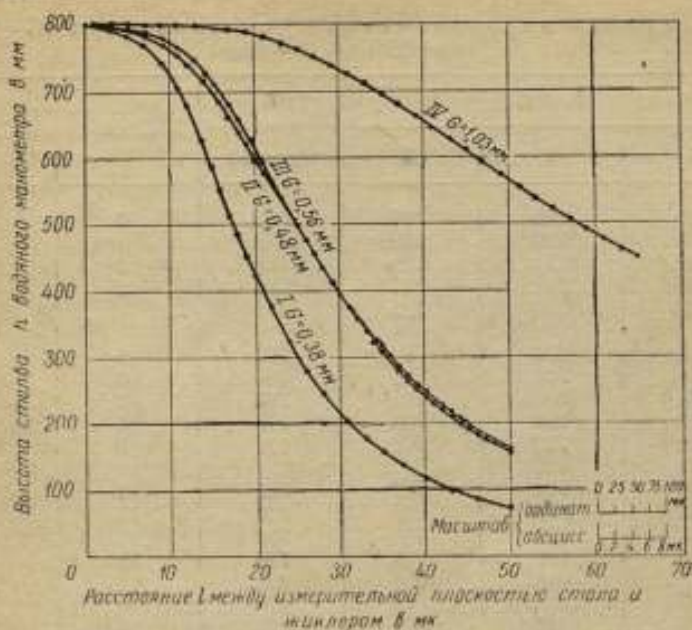


Рис. 4. Кривые градуировки пневматической камеры для  $H=800$  мм,  $S=4$  мм

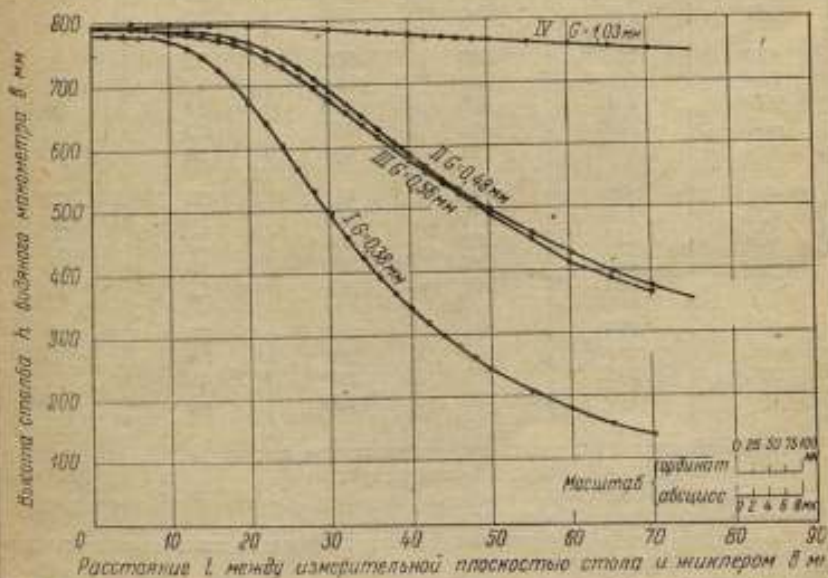


Рис. 5. Кривые градуировки пневматической камеры для  $H=800$  мм,  $S=1$  мм



Таблица 1

Градуировка пневматической установки при  $H = 800$  мм;  
 $G = 0,48$  мм,  $S = 4$  мм

$h, \text{мм}$			$h$	$l, \text{мк}$	$C, \text{мм}$
1	2	3			
800	800	800	800	0	—
798	799	799	799	1	1
797	797	798	797	2	2
795	796	797	798	3	1
797	795	795	795	4	1
793	793	794	793	5	2
790	790	791	790	6	3
785	785	785	785	7	5
779	778	778	778	8	7
772	772	772	772	9	6
760	762	762	761	10	11
749	750	750	750	11	11
784	735	734	734	12	16
716	718	719	718	13	16
698	698	699	698	14	20
676	675	675	675	15	23
653	653	653	653	16	22
628	629	628	628	17	25
605	604	604	604	18	24
581	580	580	580	19	24
557	556	556	556	20	24
532	533	533	533	21	23
510	510	509	510	22	23
486	488	487	487	23	23
464	464	464	464	24	23
441	440	441	441	25	23
420	419	420	420	26	21
400	400	399	400	27	20
381	379	380	380	28	20
360	361	362	361	29	19
344	344	344	344	30	17
272	268	269	270	35	15
211	212	209	211	40	12
169	166	168	168	45	9

$H$  — Исходное давление в миллиметрах вод. ст.;  
 $h$  — высота столба водяного манометра;  
 $G$  — головной жиклер;  
 $S$  — измерительный жиклер;  
 $l$  — зазор между измерительной плоскостью стола оптиметра и плоскостью жиклера;  
 $C$  — высота столба, отвечающая одному микрону (цена деления по шкале водяного манометра).

довательно, при прочих равных условиях, с увеличением давления  $H$  возрастает чувствительность прибора.

На рис. 5 даны графики при тех же значениях жиклеров  $G$ , давлении  $H=800$  мм, но для диаметра измерительного жиклера  $S=1$  мм, т. е. в четыре раза меньшем, чем в предыдущем случае, где  $S=4$  мм. Здесь мы наблюдаем более плавное изменение, т. е. с уменьшением диаметра  $S$  уменьшается чувствительность прибора.

Резюмируя изложенное, можно сказать: чувствительность пневматического метода возрастает с увеличением исходного давления  $H$ , площади сечения измерительного жиклера  $S$  и с уменьшением площади сечения головного жиклера  $G$ .

Опытные данные оказались весьма ценными и не только подтвердили теоретические выводы, но и позволили установить, с одной стороны, предельные значения диаметра  $G$ , при котором прибор еще может работать, а с другой — на основании этих данных можно подобрать те наивыгоднейшие сечения жиклеров  $S$  и  $G$ , при которых прибор будет иметь требуемую чувствительность на участки кривой, где зависимость между  $h$  и  $l$  близка к линейной.

## II. ПРОВЕРКА ТОЧНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ МЕТОДА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СЛИЧЕНИЯ КОНЦЕВЫХ МЕР

### 4. Специальный столик для сравнительных измерений концевых мер

Результаты исследования опытной пневматической установки показали, что у приборов этого типа легко может быть достигнута весьма высокая чувствительность при хорошей стабильности в показаниях.

Для подтверждения этого было произведено сличение концевых мер, с последующей их аттестацией интерференционным методом.

Для этой цели был сконструирован специальный столик, схематически представленный на рис. 6, состоящий из вертикальной металлической стойки 1, на которой крепятся две подвижные пластины 3, 4; нижняя пластина 4 служит опорой для концевой меры 7, верхняя 2 имеет три отверстия (измерительных жиклера  $S$ ), которые соединяются через воздухопровод 5 с камерой пневматического прибора, а через последнюю — с водяным манометром 6.

Установка столика на требуемый номинальный размер в пределах от 0 до 100 мм производилась по концевой мере, за счет перемещения пластин по направляющим стойки. Измерительный жиклер  $S$  у столика был предусмотрен из трех отверстий диаметром по 6 мм каждое; этим преследовалось, во-первых, повышение чувствительности прибора (так как результирую-

щий диаметр жиклера будет 18 мм), во-вторых, отверстия жиклеров, будучи расположены по всей длине измерительной плоскости концевой меры, дают возможность, включая каждый

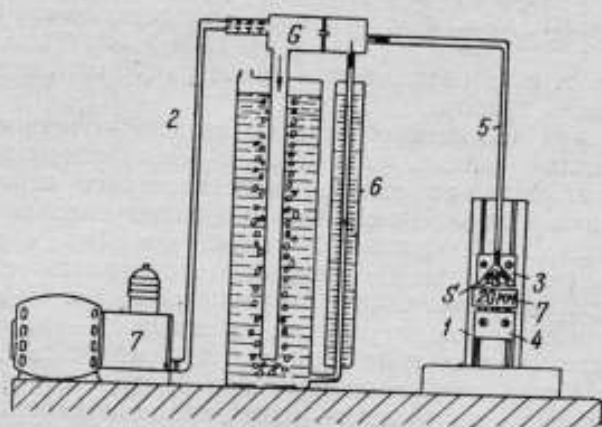


Рис. 6. Схема прибора для измерения концевых мер с высокой точностью

из жиклеров в отдельности, по разности их показаний определить отклонение от параллельности измеряемой концевой меры.

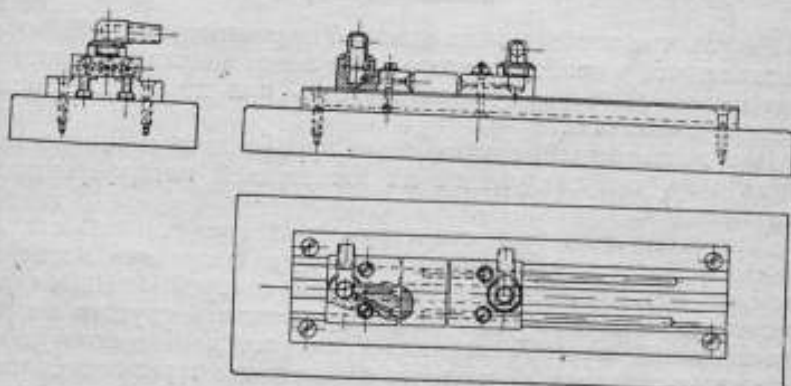


Рис. 7. Пневматический столик

На нижней опорной плоскости столика предусмотрены три кольцевых доведенных площадки с малой поверхностью; тем самым было обеспечено постоянство контакта между мерой и плоскостью столика. Конструктивное оформление столика представлено на рис. 7.

## 5. Измерение концевых мер

Столик для измерения концевых мер был предварительно проградуирован, т. е. определена цена деления по шкале водяного манометра. Градуировка производилась на той же установке, которая применялась для исследования пневматического метода (см. схему на рис. 1). В этом случае пластинка 3 с из-

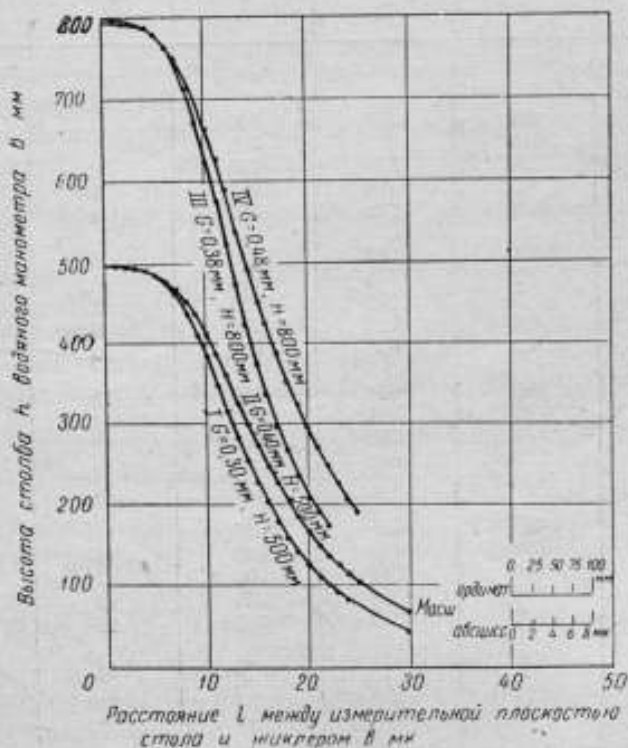


Рис. 8. Кривые градуировки прибора

мерительными жиклерами (рис. 6) укреплялась на штативе вертикального оптиметра, зазор  $l$  между плоскостью стола и жиклером фиксировался по шкале оптиметра, а соответствующие значения  $h$  отсчитывались по шкале водяного манометра.

На рис. 8 даны графики результатов градуировки прибора для измерения концевых мер. Градуировка произведена для двух значений исходного давления  $H = 500 \text{ мм}$  и  $H = 800 \text{ мм}$  вод. ст. при двух диаметрах головного жиклера  $G = 0,38 \text{ мм}$  и  $G = 0,48 \text{ мм}$ .

Сравнение концевых мер производилось при  $H = 800 \text{ мм}$  и  $G = 0,48 \text{ мм}$  (кривая IV, табл. 2). При этом жиклере прибор



Таблица 2

Градуировка пневматической установки  
для измерения концевых мер с высокой точностью  
 $H = 800$  мм;  $G = 0,48$  мм;  $S = 18$  мм

$h$ , мм			$h$ , средн.	$l$ , мк	$C$ , мм
1	2	3			
800	800	800	800	0	—
799	799	799	799	1	1
796	796	797	796	2	3
793	794	794	794	3	2
787	790	790	789	4	5
780	780	780	780	5	9
767	768	768	768	6	12
751	750	751	751	7	17
727	726	726	726	8	25
697	695	695	696	9	30
661	661	661	661	10	35
625	623	621	623	11	38
582	580	580	281	12	42
541	539	539	540	13	41
495	496	497	496	14	44
461	456	455	457	15	39
419	418	419	419	16	38
385	386	385	385	17	34
355	353	354	354	18	31
322	322	326	323	19	31
296	296	297	296	20	27
273	272	271	272	21	24
243	249	244	247	22	25
233	228	221	228	23	19
210	209	202	207	24	21
192	192	182	189	25	18

$H$  — Исходное давление в миллиметрах вод. ст.

$h$  — высота столба водяного манометра;

$G$  — головной жиклер;

$S$  — измерительный жиклер (с тремя отверстиями  $\varnothing 6$  мм каждое);

$l$  — зазор между измерительной плоскостью стола оптиметра и плоскостью жиклера;

$C$  — высота столба, отвечающая одному микрону (цена деления по шкале водяного манометра).



показал хорошую стабильность и достаточно высокую чувствительность. Для градуировочной кривой IV в диапазоне зазоров от 13 до 17  $\mu\text{к}$  мы имеем практически равномерные деления на шкале манометра, при увеличении на этом участке в 40 000 крат, т. е. изменению линейной величины  $l$  на 1  $\mu\text{к}$  соответствует изменение высоты столба  $h$  на 40  $\text{мм}$  по шкале водяного манометра. Так как при сличении мер высоких классов точности приходится иметь дело с разностями, не превышающими 2—3  $\mu\text{к}$ , то мы имеем возможность в данном случае пользоваться чувствительным равномерным участком шкалы. В других случаях, конечно, шкала может быть использована на большем участке.

При анализе кривых в п. 3 была уже отмечена особенность пневматического метода, состоящая в том, что при малых значениях зазора  $l$  прибор не обладает достаточной чувствительностью. Поэтому измерения должны производиться при некотором начальном зазоре  $l_0$ .

В нашем случае величина начального зазора, согласно данным градуировки (табл. 2) и графика рис. 8, была принята 13  $\mu\text{к}$ .

Практически это осуществлялось следующим образом: подвижные пластины 3, 4 (рис. 6) столика устанавливались по концевой мере, номинальный размер которой превышал на 13  $\mu\text{к}$  размер мер, предназначенных для сличения.

После этого образцовая и сличаемая меры поочередно помещались на столике и, в зависимости от разности в их размерах, изменялась величина зазора между плоскостью меры и жиклерами  $S$ , давая соответствующие изменения в показаниях по шкале водяного манометра.

## 6. Точность измерений концевых мер пневматическим методом

При решении вопроса о точности измерения концевых мер пневматическим методом, как во всех случаях при определении точности метода, мы стремились по возможности исключить систематические погрешности, так как теория, основанная на законе случайных ошибок, требует, чтобы каждое полученное при измерении числовое значение было освобождено от неварьирующихся погрешностей путем введения соответствующих поправок. Некоторые же из неварьирующихся погрешностей, сопутствующих измерениям, ввиду их малости отдельно нами не учитывались; к таковым относятся погрешности определения цены деления шкалы прибора и погрешности, вызываемые изменением барометрического давления.

Учитывая, что в практике измерений будут подвергаться сличению концевые меры с разной степенью чистоты измерительной поверхности и это различие может вносить некоторую погрешность, сравнивались меры разной степени чистоты—от

Номинальные размеры сличаемых мер	Измеренная разность						
	1	2	3	4	5	6	7
9 мм образцовая ф. Иогансон; сличаемая ф. Н. W.	0,40	0,44	0,46	0,44	0,41	0,44	0,46
12 мм образцовая ф. Иогансон знак „О“; сличаемая ф. Иогансон знак X	0,58	0,63	0,58	0,60	0,55	0,58	0,59
20 мм образцовая ф. Иогансон знак „О“; сличаемая ф. Иогансон знак V	0,67	0,68	0,72	0,69	0,65	0,62	0,73
100 мм образцовая Н. W.— 1; сличаемая Н. W.— 2	0,25	0,35	0,22	0,27	0,25	0,22	0,35
100 мм образцовая ф. Иогансон; сличаемая ф. Иогансон ААЕ	1,45	1,50	1,42	1,45	1,55	1,52	1,42
100 мм образцовая ф. Иогансон; сличаемая Н. W.— 1	0,80	0,75	0,82	0,87	0,85	0,90	0,75

Данные результатов измерений двух групп кон вторая группа мер — меры номинального размера 100 мм. Средняя квадратическая погрешность

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{N-n}}$$

где  $N = 30$  (число всех измерений) и  $n = 3$  (число мер).

\* Разность мер, получаемая при интерференционных измерениях.

мер в мк			Среднее значение разности	$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{N-n}} \quad \nu = \pm 3\sigma$
8	9	10		
0,44	0,40	0,44	0,43 (0,39)*	} $\sigma = \pm 0,026 \text{ мк}; \quad \nu = 3\sigma = \pm 0,08 \text{ мк}$
0,58	0,59	0,58	0,59 (0,57)*	
0,68	0,60	0,68	0,67 (0,63)*	
0,25	0,30	0,35	0,28 (0,31)*	} $\sigma = \pm 0,054 \text{ мк}; \quad \nu = 3\sigma = \pm 0,162 \text{ мк}$
1,47	1,45	1,60	1,48 (1,55)*	
0,77	0,80	0,85	0,82 (0,86)*	

цельных мер. Меры первой группы номинальных размеров — 9, 12 и 20 мм, ратичная погрешность единичного измерения вычислена по формуле

штриховой до зеркальной; кроме того, сравнивались меры разных фирм, с целью учета влияния максимально возможной разности коэффициентов термического удлинения.

Сличение шести концевых мер номинальных размеров 9, 12, 20 и 100 мм производилось в термостатной комнате при температуре  $+20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}$ . Каждому измерению предшествовала новая настройка прибора, а в некоторых случаях—и поверка цены деления шкалы. Таким образом было получено по десять независимых сличений каждой пары мер.

В табл. 3 приведены результаты сличений шести пар мер. При обработке результатов меры номинальных размеров 9, 12, и 20 мм отнесены к одной совокупности объектов.

Полученные результаты показывают, что пневматический метод может быть применен для сравнительных измерений концевых мер по 2-му разряду.

### III. ПРИМЕНЕНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 7. Пневматическая установка с самопишущим манометром

В результате дальнейших исследований пневматического метода оказалось возможным применение его для автоматической регистрации показаний записью на ленту. Автором была скон-

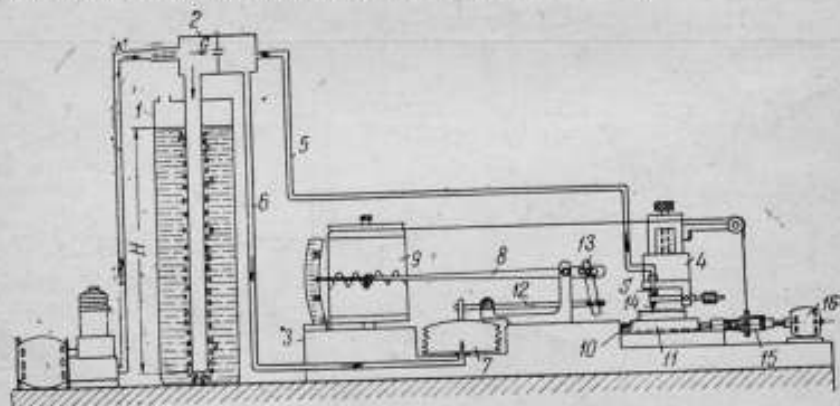


Рис. 9. Кинематическая схема пневматического профилографа

струирована и построена опытная установка с самопишущим манометром, схематически представленная на рис. 9, состоящая из водяного регулятора давления 1, пневматической камеры 2, самопишущего манометра 3 и измерительной головки 4.

Камера 2 через воздухопровод 5 соединяется с измерительным жиклером 5 и воздухопроводом 6 с чувствительной гофрированной коробкой 7 самопишущего манометра.

При изменении величины зазора у жиклера  $S$  будет изменяться давление в камере 2, с которой соединена коробка манометра 7, воспринимающая изменение давления и через систему рычагов 12, 13 приводящая в движение стрелку с пером 8. Таким образом, показания манометра могут быть записаны на бумажной ленте, укрепленной на барабане 9. Нетрудно видеть, что эта схема отличается от рассмотренной в п. 1 пневматической установки тем, что в данном случае вместо водяного манометра применен мембранный самопишущий манометр.

Как будет видно из дальнейшего, применение пневматического прибора с самопишущим манометром оказалось весьма эффективным в тех случаях, когда требуется непрерывная регистрация измерительного процесса, как, например, в случае измерения сложных геометрических форм или микрогеометрии поверхности.

### 8. Применение пневматического метода для измерения микрогеометрии поверхностей

Изучение пневматической установки с самопишущим манометром показало возможность применить его для измерения микрогеометрии поверхностей. На схеме рис. 9 представлена измерительная головка 4, предназначенная для измерения чистоты обработки металлических поверхностей по методу ошупывания иглой.

Исследуемый образец 10 укрепляется на столике 11; игла 14, жестко связанная качающимся рычагом, приводится в контакт с исследуемой поверхностью. Столик вместе с образцом, при помощи микровинта 15 и мотора 16, получает поступательное движение. При этом острей иглы следит за профилем поверхности, и в зависимости от степени неровностей рычаг будет перемещаться в вертикальной плоскости, изменяя при этом величину зазора у измерительного жиклера  $S$  и тем самым вызывая изменение давления в камере 2, которое воспринимается манометром.

При поступательном движении столика с изделием приводится в движение барабан 9 манометра, и перо на бумажной ленте воспроизводит профиль исследуемой поверхности в увеличенном масштабе.

В зависимости от величины жиклеров  $G$  и  $S$ , исходного давления  $H$  и передаточных рычагов манометра кратность увеличения можно изменять в больших пределах. В нашей опытной установке увеличение могло быть получено до 4000 $\times$ . При этом чувствительность прибора была достаточна для измерения шлифованных поверхностей.

На рис. 10,а представлены профилограммы, снятые с образцов разной обработки, при увеличении в 2000 $\times$ . На рис. 10,б дана профилограмма при увеличении 3000 $\times$ .



Цена деления на шкале манометра определялась в результате градуировки, которая производилась по методу, примененному при градуировке прибора для измерения концевых мер

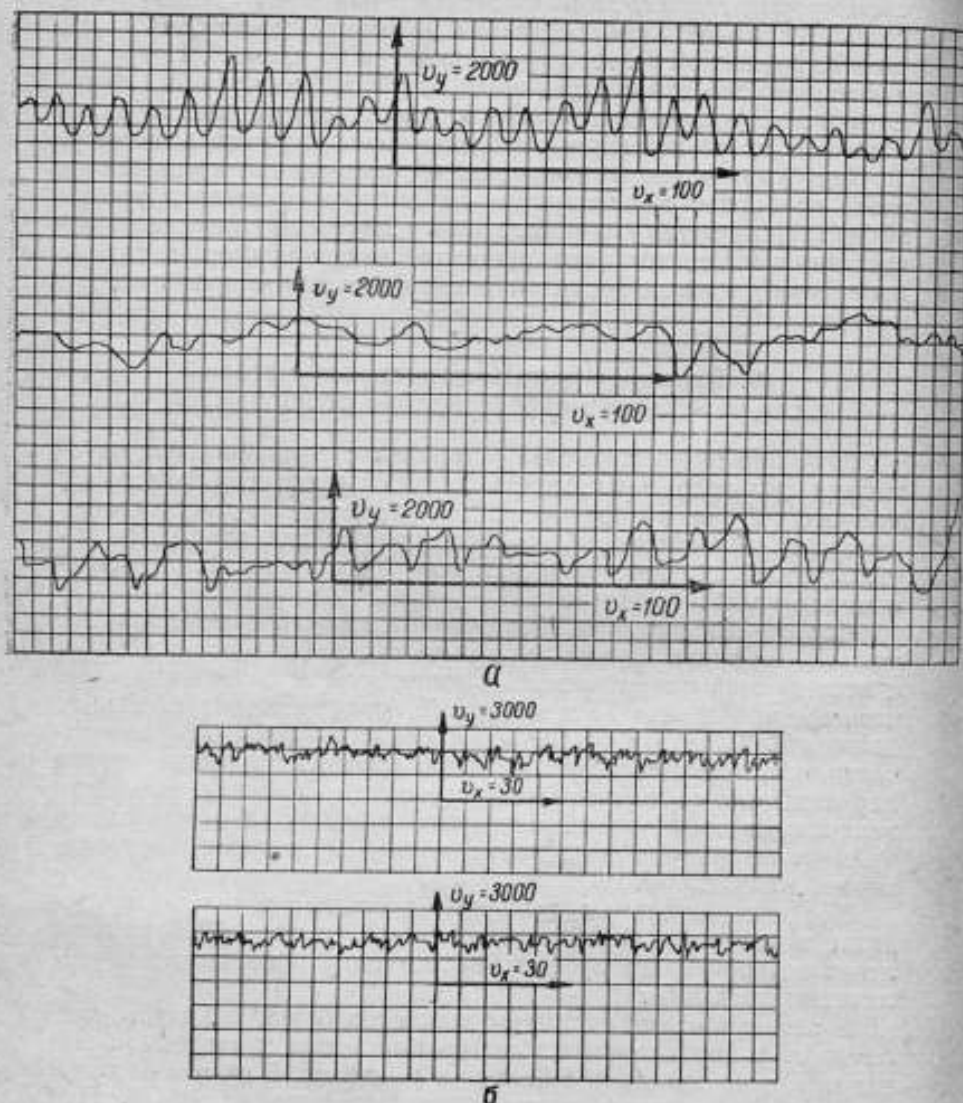


Рис. 10. Профилограммы

(см. п. 5). В этом случае измерительная головка укреплялась на штативе вертикального оптиметра, а щуп рычага приводился в контакт с плоскостью столика. Величина зазора между изме-



рительным жиклером  $S$  и рычагом изменялась подъемом и опусканием стола, а значения зазоров отсчитывались по шкале оптиметра; для каждого значения зазора фиксировалось положение стрелки по шкале манометра.

На рис. 11 даны градуировочные кривые, полученные при исходном давлении  $H = 800$  мм вод. ст., измерительном жик-

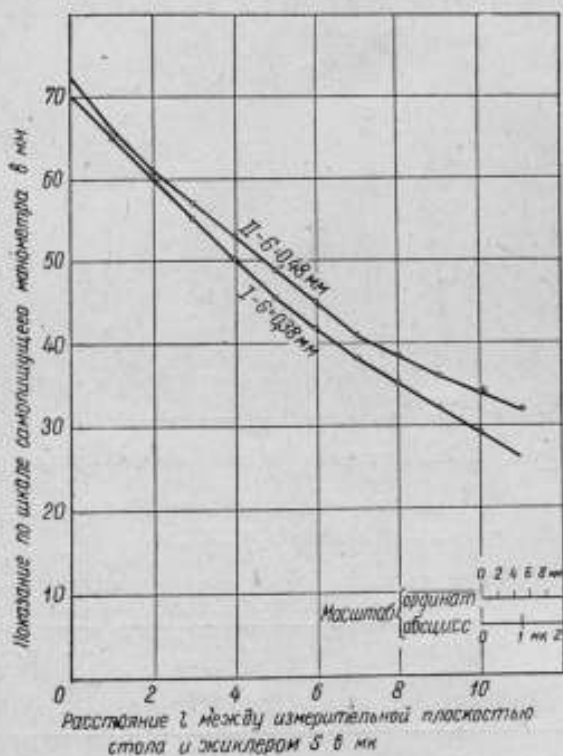


Рис. 11. Кривые градуировки самопишущего манометра

лере  $S$  площадью сечения  $14$  мм<sup>2</sup> и двух значениях головного жиклера  $G = 0,48$  мм и  $G = 0,38$  мм.

Заметим, что градуировка производилась от начального зазора, при котором прибор имел уже достаточную чувствительность; в данном случае он был равен  $13$  мк. Из графиков и градуировочных таблиц видно, что для указанных значений жиклеров шкала манометра будет практически равномерной в пределах шести микронов. При этих данных мы получаем увеличение  $4000\%$ , т. е. одному микрону будет соответствовать  $4$  мм на шкале самопишущего манометра. Придавая соответствующие значения жиклерам, можно получить разные увеличения. Кроме того, манометрическая коробка может быть рас-

считана на большую чувствительность и изготовлена с прямой характеристикой; в этом случае мы будем иметь на всем диапазоне равномерную шкалу.

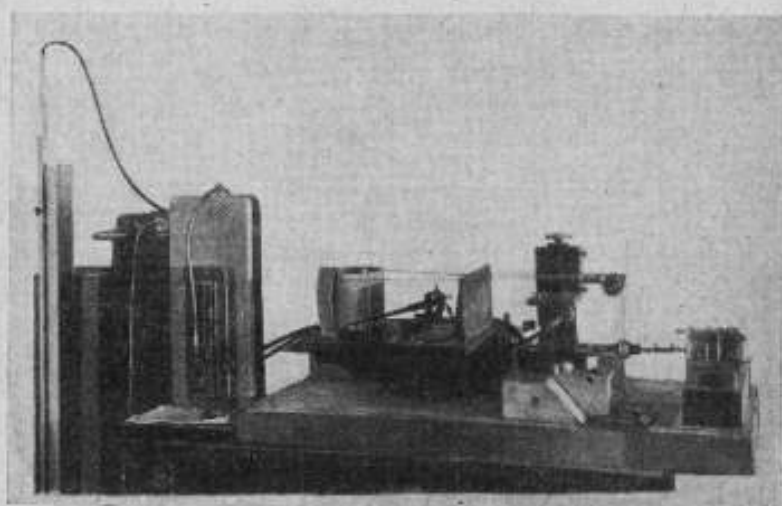


Рис. 12. Макет пневматического профилографа

Рабочий макет прибора, представленный на рис. 12, применяется для оценки качества поверхностей.

Градировка самопишущего манометра  
 $H = 800 \text{ мм}$ ,  $G = 0,38 \text{ мм}$ ,  $S = 7 \times 2 = 14 \text{ мм}^2$

Таблица 4

Показания самописца				Среднее значение	$l, \text{мк}$	$C, \text{мм}$
1	2	3	4			
70	70	72	71	71	14	—
66	63	66	65	65	15	6
60	59	61	61	60	16	5
54	54	55	56	55	17	5
49	49	51	51	50	18	5
45	45	46	46	45,5	19	4,5
41	41	42	42	41,5	20	4
37	38	38	38	38	21	3,5
34	35	35	35	35	22	3
31	32	32	32	32	23	3
28	29	29	29	29	24	3
25	26	26	26	26	25	3

$l$  — зазор между плоскостью стола оптиметра и плоскостью жиклера;  
 $C$  — интервалы по шкале самописца в мм, отвечающие одному микрону.

Таблица 5

	Показания по шкале самопишущего манометра в мм					
	1	2	3	4	5	6
На участке шкалы 0+5 мм	+5,67	+5,77	+5,88	+5,67	+5,73	+5,63
На участке шкалы 0-5 мм	-4,83	-4,80	-4,83	-4,83	-4,83	-4,73
На участке шкалы 0+15 мм	+14,67	+14,67	+14,40	+14,67	+14,57	+14,50

	Показания по шкале самопишущего манометра в мм				Среднее значение	$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{N-1}}$ $v = 3\sigma$
	7	8	9	10		
На участке шкалы 0+5 мм	+5,47	+5,67	+5,73	+4,67	+5,68	$\sigma = \pm 0,09$ $v = 3\sigma =$ $= \pm 0,27$
На участке шкалы 0-5 мм	-4,93	-4,87	-5,00	-5,00	-4,86	
На участке шкалы 0+15 мм	+14,67	+14,53	+14,77	+14,50	+14,60	

### 9. Точность и стабильность показаний пневматического профилографа

Проверка самопишущего манометра была произведена по концевым мерам на разных участках шкалы. Проверка производилась с соблюдением условий работы самописца, т. е. при вращении барабана и с записью показаний на ленту.

Показания самописца проверены на трех участках шкалы: 0+5 мм; 0-5 мм и 0+15 мм. На каждом участке шкалы сделано по 10 независимых измерений, которые производились каждый раз при новой установке нуля и в разное время; температура в период измерений изменялась в пределах  $20^{\circ} \pm 2^{\circ}$ ; наибольшее изменение барометрического давления за этот период было 42,5 мм.

На основании полученных данных, приведенных в табл. 6, подсчитаны средняя квадратичная и предельная погрешности самопишущего манометра.

## Градуировка самопишущего манометра

$$H = 800 \text{ мм}; G = 0,48 \text{ мм}; S = 14 \text{ мм}^2$$

Показания самописца в мм			Среднее значение	I в мк	C в мк
1	2	3			
70	71	72	72	19	
66	65	67	66	20	6
61	60	62	61	21	5
57	56	58	57	22	4
53	52	54	53	23	4
50	48	50	49	24	4
46	44	45	45	25	4
42	40	41	41	26	4
40	38	39	39	27	3
37	36	36	36	28	3
36	34	34	34	29	2
32	32	32	32	30	2

I — зазор между плоскостью стола оптиметра и плоскостью жиклера;  
C — интервалы по шкале самописца в мм, отвечающие одному мк.

Из сопоставления отдельных значений можно видеть, что разность в показаниях прибора не выходит из пределов одного деления шкалы, что при увеличении  $3000^*$  соответствует  $0,33 \text{ мк}$ . При всех десяти измерениях начальное и конечное показания прибора, при полном обороте барабана, либо полностью совпадают, либо смещались не более чем на  $0,5-1$  деление шкалы. Это показывает хорошую стабильность прибора.

Высокая точность и стабильность самопишущего манометра были достигнуты за счет хорошего качества гофрированной коробки и тщательной пригонкой с сборкой цапф передаточных рычагов. Необходимо отметить, что полученные результаты относятся только к самопишущему манометру; погрешность же профилографа будет несколько больше, так как профилограмма будет содержать, кроме погрешностей самописца, погрешности острия иглы, измерительного давления и т. п. Эти погрешности присущи всякому профилографу, работающему по методу ощупывания иглой.

Имея только рабочий макет прибора, мы ограничились исследованием точности и стабильности пневматического метода (если не считать единичных сравнений с оптическим профилографом и двойным микроскопом).

На рис. 13 показаны профилограммы, снятые дважды с од-



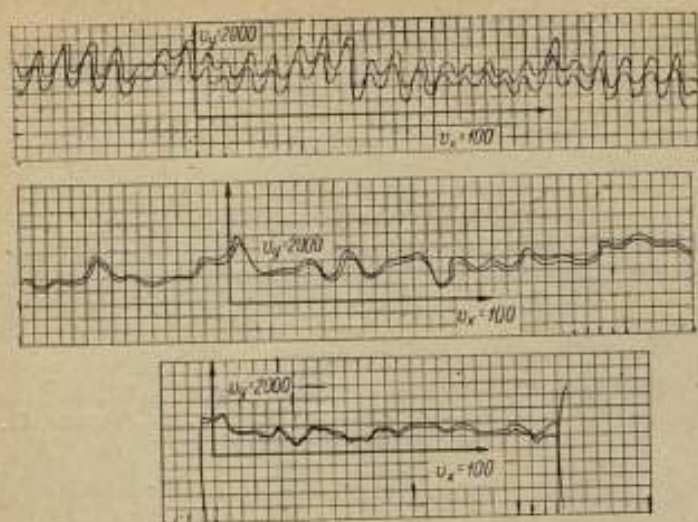


Рис. 13. Профилограммы

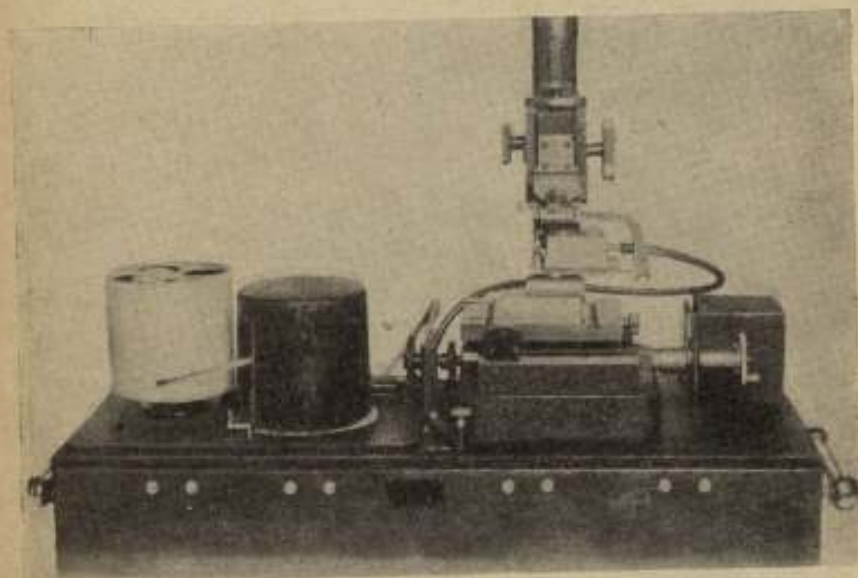


Рис. 14. Пневматический профилограф



ного и того же участка поверхности, наглядно показывающие стабильность прибора.

В настоящее время заводом „Эталон“ изготовлен первый опытный образец пневматического профилографа (рис. 14).

### Выводы

Исследования макета показывают, что пневматический профилограф дает хорошие результаты; благодаря простоте конструкции и возможности быстро получать профилограмму он может найти широкое применение для оценки качества поверхности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Труды ВНИИМ, Вып. 1 (46), Изд. ВНИИМ, Л., 1941.
  2. Лоинтомаш, кн. 7, Приборы для измерения длин и углов. Машгиз, Л., 1948.
-

## О ПРИМЕНЕНИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ БОЛЬШИХ ДЛИН В МАШИНОСТРОЕНИИ

### 1. Метод непосредственного измерения

Развитие крупного машиностроения сделало необходимым разработку методов и средств измерения деталей, размеры которых зачастую превышают 5—6 м. Для измерения таких длин, которые называются большими длинами, могут быть использованы приемы и методы линейных измерений, применяющиеся при проведении геодезических работ.

Методика линейных измерений в геодезии разработана достаточно хорошо, и в наиболее точных работах, при измерении базисов длиной от нескольких сот метров до нескольких километров, средняя относительная погрешность получаемых результатов достигает величины порядка  $\pm 1 \cdot 10^{-6}$  —  $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ . Вполне естественна поэтому и попытка использовать практику геодезических линейных измерений для измерения больших длин в машиностроении.

При решении поставленной задачи необходимо было иметь в виду, что рассматриваемые нами большие длины, порядка 5—6 м и больше, применительно к геодезии являются длинами весьма малыми. Поэтому необходимо учитывать ряд факторов, которые при проведении геодезических работ если и имеют, то очень малое значение. С точки зрения геодезии эта задача может быть сформулирована, как измерение малой длины в цеховых условиях с наибольшей возможной точностью. В настоящей статье мы кратко опишем и приведем результаты выполненных нами в этом направлении работ, обратив внимание на их особенности.

Непосредственное измерение длины крупной детали может быть произведено при помощи стальной рулетки, шкаловой ленты или мерной проволоки со шкалами на концах.

Применение стальной рулетки для определения больших размеров на машиностроительных заводах уже имеет довольно широкое распространение, но методика этих измерений несовершенна. Причины, которые являются источником различных

погрешностей измерений, не устраняются, и результаты измерений поэтому содержат в себе весьма значительные погрешности. Малая точность результатов измерения ленточными мерами привела к тому, что в заводской практике ленточные меры применяются только для грубых измерений.

Методика этих измерений такова, что даже сравнительно невысокие требования, предъявляемые к точности получаемых результатов, в большинстве случаев практики не могут быть выполнены. Исключив же возможность появления этих погрешностей, точность результатов можно повысить в значительной степени.

Основными источниками погрешностей при измерении ленточными мерами являются:

а) Применение для измерений неповеренных по образцовым мерам лент или рулеток. Это не позволяет ввести соответствующую поправку за погрешность номинального значения меры, которая может достигать нескольких миллиметров.

б) Неправильное натяжение ленты или рулетки во время измерения.

в) Провес ленты или рулетки, если во время измерений она не лежит на плоскости.

г) Погрешности температурные.

д) Погрешности отсчета по шкале рулетки или ленты.

Кратко остановимся на значении каждой из указанных причин.

а) Технические условия на изготовление стальных рулеток и требования Инструкции Комитета по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР для поверки ленточных мер длины допускают к выпуску двадцатиметровые рулетки с погрешностями в общей длине их до  $\pm 5$  мм, а в длине однометровых интервалов — до  $\pm 1$  мм.

Применение для измерений неповеренных рулеток ведет к появлению погрешностей в результатах измерений в несколько миллиметров, только из-за того, что действительная длина интервалов рулетки неизвестна. Необходимость организации периодической поверки стальных рулеток, предназначенных для применения в заводской практике, совершенно очевидна. На ряде заводов, например на Ново-Краматорском машиностроительном заводе имени И. В. Сталина, такая поверка рулеток была организована в центральной измерительной лаборатории завода еще в довоенные годы.

Поверка рабочих стальных рулеток длиной 20 м может производиться на стенных компараторах простого устройства с погрешностью не более  $\pm 0,5$  мм на всю длину.

Представляется целесообразным изготовление специальных стальных рулеток с нарезными штрихами, по типу образцовых рулеток 1-го разряда, пригодных для проведения измерений повышенной точности. Поверка 20-метровой стальной рулетки

с нарезными штрихами может производиться с погрешностью не более  $\pm 0,2$  мм на всю длину.

При необходимости точность определения действительной длины рулетки может быть еще более повышена.

б) Ленточные меры длины изготавливаются из эластичного материала и во время измерения должны находиться под определенным натяжением. При проверке стальных рулеток натяжение их производится с силой 5 кг. При измерении рулеткой в цеховых условиях они обычно натягиваются от руки, что вызывает появление погрешностей, так как изменение силы натяжения рулетки на 1 кг изменяет длину 20-метровой рулетки на величину порядка 1,0 — 0,5 мм.

в) Во время проверки рулетка или лента обычно лежит на горизонтальном столе. Если во время измерения рулетка имеет только две точки опоры, то в результате измерения необходимо ввести поправку  $\Delta l$  за разность между длиной хорды и рулетки.

Для 20-метровой рулетки, при натяжении ее с силой  $P = 5$  кг, поправка за провес рулетки  $\Delta l$  равна — 0,8 мм.

г) Источниками температурных погрешностей измерения являются: отклонение температуры рулетки от температуры изделия, отклонение температуры измерения от нормальной температуры  $t = 20^\circ \text{C}$ , при которой обычно производится проверка рулетки, и отсутствие точных значений температурных коэффициентов как рулетки, так и изделия. Величина этих температурных погрешностей зависит от длины измеряемого изделия, и поэтому при измерении больших длин они приобретают большое значение и ими нельзя пренебрегать, хотя температурные коэффициенты стальных рулеток и изделий обычно близки между собой.

д) Погрешности отсчета зависят от величины наименьшего деления шкалы рулетки и от качества обработки грани края измеряемого изделия. Если рулетка имеет миллиметровые подразделения, то отсчет по рулетке может производиться на глаз с точностью до 0,2 мм. Погрешность самих миллиметровых подразделений рулетки, согласно техническим условиям, не может быть более  $\pm 0,2$  мм.

Приведенные данные позволяют подсчитать наибольшую возможную погрешность результата измерения стальной рулеткой.

Наибольшая погрешность результата измерения 8-метрового изделия не превысит величину  $\pm 0,43$  мм, что соответствует относительной погрешности  $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ .

Измерение с такой точностью уже во многих случаях может удовлетворить требованиям практики технических измерений больших длин.

Сказанное подтверждается результатами измерений, выполненных в производственных условиях.

При проверке правильности монтажа одного крупного объекта нами производились многократные измерения расстояния

между срезами двух металлических балок. Расстояние, равное примерно 16 м, измерялось стальной рулеткой, имеющей миллиметровые подразделения, изготовленной ХБК Дзержинского РЖУ (г. Ленинград). Во время измерения лента рулетки натягивалась с силой 5 кг, для чего к обоим ее концам, на стальной проволоке, перекинутой через шарикоподшипниковый ролик, подвешивались гири в 5 кг. Ребра балок, расстояние между которыми измерялось, перед измерениями никакой дополнительной обработке не подвергались. Отсчеты производились с оценкой долей миллиметра на глаз до 0,1 мм двумя наблюдателями, одновременно по обоим концам измеряемого расстояния.

Измерение каждого расстояния повторялось не менее трех раз. Всего было измерено более 300 длин. В табл. 1 приводятся значения средней квадратичной погрешности 101 ряда измерения.

Таблица 1

Распределение средних квадратичных погрешностей ряда измерений

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений в мм	0	±0,1	±0,2	±0,3	±0,4	±0,5	±0,6	±0,7	±0,8	±0,9	±1,0
Число рядов измерений, имеющих такую среднюю квадратичную погрешность	14	15	31	25	4	6	3	1	1	0	1

Среднее значение средней квадратичной погрешности ряда измерений равно  $\pm 0,24$  мм. Точность измерений значительно повысилась, когда измерялось расстояние между двумя тонкими штрихами толщиной 0,1 + 0,05 мм, нанесенными на тех же балках. В табл. 2 показано распределение значений средней квадратичной погрешности ряда измерений по 31 ряду таких измерений.

Таблица 2

Распределение средних квадратичных погрешностей ряда измерений повышенной точности

Величина средней квадратичной погрешности ряда измерений в мм	от ±0,06	от ±0,11	от ±0,16	свыше 0,20
	до ±0,10	до ±0,15	до ±0,20	
Число рядов измерений, имеющих такую среднюю квадратичную погрешность	16	7	6	2



Средняя величина средней квадратичной погрешности ряда измерений в этом случае равна  $\pm 0,12$  мм.

Вторая группа измерений отличалась от первой тем, что в первом случае отсчет по рулетке производился по грубо обработанному ребру балки, а во втором — по тонкому штриху. Сравнивая значения средней квадратичной погрешности первой и второй групп измерений, можно определить степень влияния на результат измерения качества обработки ребра изделия, по которому производится отсчет. Эта погрешность равна  $\pm 0,22$  мм.

## 2. Методы посредственного измерения

Посредственные (косвенные) методы измерения длин применяются в тех случаях, когда непосредственное (прямое) измерение либо невозможно совсем, либо точность получаемых результатов недостаточна.

Из посредственных методов измерения расстояний, применяющихся в геодезии, к наиболее точным относятся метод триангуляции и метод дальномерно-базисной (параллактической) полигонометрии, разработанный проф. В. В. Даниловым.

Метод триангуляции заключается в построении сети треугольников, измерение углов которых производится геодезическими угломерными приборами. Производится также непосредственное измерение мерным прибором одной стороны какого-либо из треугольников. Эта сторона, называемая базисом триангуляции, обычно выбирается в наиболее удобном для ее непосредственного измерения месте. Длины всех остальных сторон треугольников, а также и координаты вершин треугольников вычисляются путем решения треугольников по формулам тригонометрии. Ряды треугольников иногда заменяются рядами геодезических четырехугольников, в которых измеряются углы, образованные сторонами и диагоналями. Одна из сторон такого ряда также выбирается для непосредственного измерения и является базисом триангуляции.

В цеховых условиях применения метода триангуляции для измерения длины какого-либо изделия наиболее удобным оказалось построение именно такого геодезического четырехугольника, одной из сторон которого является искомая длина.

Метод дальномерно-базисной полигонометрии, в приложении его к измерению больших длин в машиностроении, практически сводится к тому же методу триангуляции.

Рассматриваемый метод измерения больших длин может быть назван способом цеховой триангуляции.

Проведенные нами работы показали, что наиболее удобными являются показанные на рис. 1 и 2 схемы расположения базиса по отношению к определяемой длине.

По первой схеме (рис. 1) создается геодезический четырехугольник  $ABCD$ , где сторона  $CD$  есть определяемая длина  $l$ ;

сторона  $AB$  — базис  $S$ ;  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$  и  $\beta_2$  — углы, подлежащие измерению. Измерение углов при точках  $C$  и  $D$  не производится и обычно бывает практически невозможно. Вычисление искомой длины  $l$  производится по одной из ф-л (1):

$$l^2 = S^2 \left[ \frac{\sin^2(\beta_1 + \beta_2)}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2 + \alpha_2)} + \frac{\sin^2 \beta_1}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2 + \beta_1)} - 2 \frac{\sin(\beta_1 + \beta_2) \sin \beta_1 \cos \alpha_1}{\sin(\beta_1 + \beta_2 + \alpha_2) \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \beta_1)} \right];$$

$$l^2 = S^2 \left[ \frac{\sin^2 \alpha_2}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2 + \alpha_2)} + \frac{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2 + \beta_1)} - 2 \frac{\sin \alpha_2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos \beta_2}{\sin(\beta_1 + \beta_2 + \alpha_2) \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \beta_1)} \right] \quad (1)$$

При осуществлении второй схемы расположения базиса  $AB$ , подобной схеме звена паралактической полигонометрии, ба-

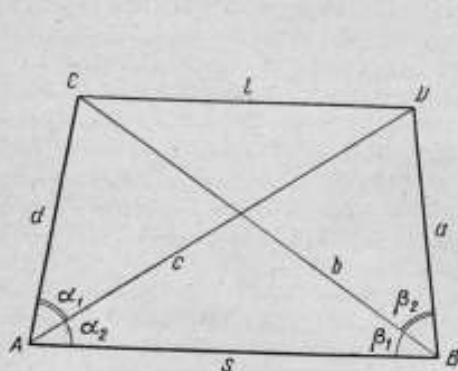


Рис. 1

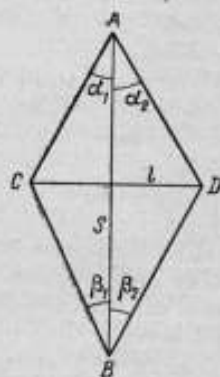


Рис. 2

зис располагается перпендикулярно направлению определяемой длины  $CD$  (рис. 2).

Применяя вторую схему, вычисление искомой длины производят по ф-лам (2), аналогичным ф-лам (1):

$$l^2 = S^2 \left[ \frac{\sin^2 \beta_1}{\sin^2(\alpha_1 + \beta_1)} + \frac{\sin^2 \beta_2}{\sin^2(\alpha_2 + \beta_2)} - 2 \frac{\sin \beta_1 \cdot \sin \beta_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}{\sin(\alpha_1 + \beta_1) \cdot \sin(\alpha_2 + \beta_2)} \right];$$

$$l^2 = S^2 \left[ \frac{\sin^2 \alpha_1}{\sin^2(\alpha_1 + \beta_1)} + \frac{\sin^2 \alpha_2}{\sin^2(\alpha_2 + \beta_2)} - 2 \frac{\sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 \cos(\beta_1 + \beta_2)}{\sin(\alpha_1 + \beta_1) \cdot \sin(\alpha_2 + \beta_2)} \right] \quad (2)$$

Базис длиной не менее 5 м выбирается вблизи подлежащего измерению изделия так, чтобы расстояние концов базиса от изделия было не менее 5 м. Практически, конечно, и положение и длина базиса прежде всего обуславливаются размерами и положением самого измеряемого изделия.

Измерение базиса может производиться стальной рулеткой или специальными мерными проволоками со шкалами на концах. Во время измерения базиса рулетка или проволока должны находиться под натяжением с силой 5 кг или 10 кг. Такое натяжение осуществляется подвеской гири на тонкой стальной проволоке, перекинутой через ролики специальных штативов.

При измерении базиса должна учитываться поправка на негоризонтальность положения линии базиса и связанный с этим наклон рулетки или проволоки во время измерения. Введение этой поправки необходимо потому, что при помощи теодолита измеряются горизонтальные углы, и все вычисляемые по этим горизонтальным углам длины сторон треугольников являются проекциями этих сторон на горизонтальную плоскость.

Наибольшая погрешность измерения базиса длиной в 8 м будет складываться из следующих погрешностей:

1) погрешность поверки рулетки на длине  $8 \text{ м} \pm 0,08 \text{ мм}$ ;

2) погрешность за непостоянство и неправильность силы натяжения  $\pm 0,02 \text{ мм}$ ;

3) температурные погрешности при условии учета температуры с точностью до  $\pm 0,5^\circ \pm 0,04 \text{ мм}$ ;

4) погрешности вычисления поправки на наклон рулетки  $\pm 0,01 \text{ мм}$ ;

5) погрешности отсчетов по концам рулетки  $\pm 0,07 \text{ мм}$ .

Пользуясь формулой закона накопления средних погрешностей измерений, имеем, что  $\sigma_s = \pm 0,12 \text{ мм}$ ; средняя относительная погрешность измерения базиса равна  $\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$ .

Без особых затруднений точность измерения базиса может быть повышена:

а) применением рулеток с нарезными штрихами или мерных проволок со шкалами на концах;

б) применением комплекта, состоящего из двух-трех стальных рулеток или мерных проволок;

в) повышением точности поверки рулеток или проволок. Компарирование проволок или рулеток, длина которых кратна 3—4 м, может производиться на специальных геодезических компараторах. Погрешность такого компарирования не превысит  $\pm 0,02 - \pm 0,03 \text{ мм}$ ;

г) применением специальных блочных станков для подвески натяжных грузов, что позволит производить натяжение рулетки с погрешностью не более  $\pm 0,1 \text{ кг}$  и тем самым сделать погрешность за непостоянство и неправильность силы натяжения пренебрегаемой.

Наибольшая погрешность измерения в этом случае будет равна  $\sigma_s = \pm 0,07 \text{ мм}$ , что соответствует средней относительной погрешности  $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ . Если измерение базиса производилось бы

двумя проволоками, то погрешность определения средней длины базиса понизилась бы до  $\sigma_s = \pm 0,05$  мм.

Измерение углов производится теодолитом, устанавливаемым на головке специальных штативов или массивных изделий. Теодолит должен быть поверен.

Применительно к нашим условиям особое внимание при проверке теодолитов уделяется юстировке и проверке правильности имеющихся у прибора приспособлений для его центрирования, правильности хода фокусирующей линзы трубы, точности приведения вертикальной оси вращения в вертикальное положение, а горизонтальной оси вращения трубы — в строго горизонтальное положение. Так как главными источниками погрешностей измерения угла в цеховой триангуляции, когда измеряются углы с очень короткими сторонами, является несовершенная центрировка теодолита, погрешности редукции и неправильности хода внутренней фокусирующей линзы.

Если при проведении геодезических работ, когда стороны измеряемых углов имеют большую длину, центрирование теодолита с точностью до 1 мм не вызывает заметных погрешностей, то при измерении углов со сторонами длиной менее 10 м эти погрешности становятся недопустимыми. Для того, чтобы погрешность измерения угла, вызываемая внецентренностью теодолита, не превышала  $\pm 0",5$ , необходимо значительно повысить точность центрирования теодолита, доводя ее до  $\pm 0,05$  мм.

При проведении геодезических работ погрешность за внецентренность является погрешностью систематической и введением в результат измерения соответствующей поправки — исключается. В цеховых измерениях, даже при самом тщательном центрировании теодолита, введением поправки исключить погрешность за внецентренность теодолита нельзя, так как само определение элементов внецентренности с необходимой для вычисления этой поправки точностью становится невозможным ввиду малости этих элементов. Более правильно поэтому будет погрешность за внецентренность теодолита рассматривать как погрешность случайного характера.

Исходя из этого положения, было признано целесообразным производить центрирование теодолита заново в каждом новом приеме измерения углов.

Проводившийся нами полный анализ точности угловых измерений показывает, что если при проведении точных геодезических работ погрешность измерения углов не превосходит величин порядка  $\pm 0",5$ , то в условиях цеховой триангуляции, при применении приборов той же точности, эта погрешность увеличивается до  $\pm 1,5-2",0$ .

Приняв, что измерение базиса в цеховой триангуляции производится с погрешностью, не превышающей  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ , погреш-



ность измерения углов определяется величиной не более  $\pm 2''$ , можно вычислить возможную при этих условиях погрешность определения длины метсдом цеховой триангуляции.

Дифференцируя ф-лы (1) или (2) и полагая, что измеряемая длина равна 8 м, базис и стороны треугольников имеют длину, равную 6 м, получим, что наибольшая возможная погрешность измерения при указанных условиях не будет превосходить величину порядка  $\pm 5 \cdot 10^{-5} + \pm 7 \cdot 10^{-5}$ .

### 3. Опытные измерения

Соображения о возможности применения геодезических приборов и методов для измерения длин порядка 6—10 м были подтверждены результатами опытных измерений, произведенных как в лабораторных, так и в цеховых условиях.

В лабораторных условиях производилось измерение некоторого условного изделия длиной около 8 м, а в производственных условиях были произведены измерения двух крупных изделий (размерами около 8 м) на Ново-Краматорском машиностроительном заводе имени И. В. Сталина. Произведено было также измерение фермы длиной около 18,5 м на одном из ленинградских строителств.

Для опытных измерений в одном из больших помещений лаборатории ВНИИМ были установлены два базисных штатива с целиками, расстояние между которыми, равное 8 м, представляло собою длину  $l$  некоторого условного изделия.

Измерение расстояния между перекрестиями целиков производилось двояким способом: непосредственно — при помощи стальной рулетки и посредственным способом — методом триангуляции.

Измерение длины  $l$  двояким путем позволило провести сравнение полученных результатов и тем самым оценить точность самих измерений.

Измерение базиса и искомой длины производилось стальной рулеткой № 1507, многократно поверявшейся на стенном компараторе ВНИИМ при свободном провесе для двух интервалов 0—8 м и 0—13,5 м (табл. 3). Средние квадратичные погрешности определения действительной длины поверенного интервала рулетки, вычисленные при обработке результатов поверки, не превышают  $\pm 0,05$  мм. Учитывая погрешности образцовой рулетки ВНИИМ, можно считать, что наибольшая погрешность поверяемого интервала не превысит  $\pm 0,15$  мм.

Измерение рулеткой производилось при ее свободном провесе. Отсчеты на рулетке производились по 5 раз, с оценкой десятых долей миллиметра на глаз, на разных участках шкалы. При измерении учитывалась температура воздуха, и в результате вводилась соответствующая поправка. Вводилась также поправка за наклон рулетки, вызываемый различной высотой



Таблица 3

Результаты поверки стальной рулетки № 1507  
на стенном компараторе ВНИИМ

Дата поверки	Измеряемый интервал рулетки в м			
	0—13,5		0—8,0	
	Действительная длина интервала при $t = 20^\circ \text{C}$ , свободном провесе и натяжении 10 кг в мм	Отклонение от среднего результата в мм	Действительная длина интервала при $t = 20^\circ \text{C}$ , свободном провесе и натяжении 10 кг в мм	Отклонение от среднего результата в мм
24/1 1941 г.	—	—	8000 + 3,12	- 0,12
27/1 1941 г.	13500 + 5,28	+ 0,06	8000 + 3,28	+ 0,04
14/1 1941 г.	+ 5,17	- 0,05	+ 3,24	0,0
14/1 1941 г.	+ 5,23	+ 0,01	+ 3,22	- 0,02
26/1 1941 г.	+ 5,20	- 0,02	+ 3,34	+ 0,10
	13500 мм + 5,22 мм		8000 мм + 3,24 мм	

базисных целиков. Средняя квадратичная погрешность измерения базиса рулеткой, вычисленная по разностям результатов двойных измерений, до и после измерения углов, для десяти таких измерений (табл. 4) оказалась равной  $\pm 0,14$  мм. Отбрасывая же результаты шестого измерения, как промах, имеем, что  $\sigma = \pm 0,09$  мм.

Таблица 4

Результаты двойных измерений длины базиса (в мм)

№ п. п.	Дата измерений	Длина базиса до измерения углов	Длина базиса после измерения углов	Разность результатов измерений
1	1/II	8087,03	8087,24	+ 0,21
2	2/II	13462,90	13462,98	+ 0,08
3	2/II	8086,41	8086,50	+ 0,09
4	12/II	13484,84	13485,14	+ 0,30
5	12/II	8136,89	8136,75	- 0,14
6	13/II	13668,41	13667,94	- 0,47
7	16/II	13430,60	13430,61	+ 0,01
8	19—20/II	8074,16	8074,15	- 0,01
9	19—20/II	13459,20	13459,25	+ 0,05
10	24/II	11926,07	11926,09	+ 0,02

Общая погрешность результата измерения базиса, принимая и наибольшую возможную погрешность поверки рулетки во время лабораторных измерений, была равна  $\pm 0,17$  мм.

Измерение углов производилось оптическим теодолитом, который до начала работ подвергался тщательному исследованию и поверке.

Средняя квадратичная погрешность измерения угла, вычисленная различными путями (по отклонениям отдельных приемов от среднего, по колебаниям двойной коллимационной погрешности), оказалась равной  $\pm 0",9$  и  $\pm 1",2$ .

При измерении углов применялось как оптическое, так и механическое центрирование теодолита.

Вычисление искомой длины производилось по ф-лам (1), развернутым в специальную вычислительную схему, на арифмометре, с применением таблицы натуральных тригонометрических величин или при помощи таблиц семизначных логарифмов.

В табл. 5. приводятся результаты восемнадцати измерений. Преобладание отрицательных по знаку разностей между результатами, полученными непосредственным измерением рулеткой и вычисленными по данным цеховой триангуляции, указывает на наличие какой-то систематической погрешности, равной в среднем  $-0,2$  мм. Источником этой погрешности могло быть "увлечение лимба", имеющее место у оптических теодолитов и вызывающее некоторое преуменьшение измеряемых углов.

Систематическая погрешность могла быть также и результатом погрешностей поверки разных интервалов рулетки.

Средняя квадратичная погрешность результатов измерения была вычислена двойным путем. В первом случае вычисление производилось по разностям результатов измерений, полученных непосредственным и посредственным способами, исключая 18-е измерение, как грубое, и во втором случае — по разностям двойных измерений одной и той же длины (табл. 6). Средняя квадратичная погрешность оказалась равной в первом случае  $\sigma \pm 0,23$  мм, а во втором случае  $\sigma \pm 0,22$  мм. Близкое совпадение значений средней квадратичной погрешности, вычисленных двумя различными путями, говорит о том, что погрешности поверки интервалов рулетки не сказались на результатах измерения.

Средняя относительная погрешность результатов опытных измерений определяется величиной порядка  $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ , что полностью подтверждает расчеты наибольшей погрешности предлагаемого метода измерений.

Возможность проведения опытных измерений в цеховых условиях была предоставлена Ново-Краматорским машиностроительным заводом имени И. В. Сталина. В качестве объектов, подлежащих измерению, мы избрали две крупных детали:

Результаты измерений

Таблица 5

№ п. п.	Дата производства измерения	Длина определяемого расстояния, полученная в результате непосредственного измерения рулеткой	Вычисленная длина определяемого расстояния	Разность между вычисленной длиной и измеренной непосредственно
1	29/I 1941 г.	8090,54	8090,50	-0,04
2	1/II 1941 г.	8087,14	8087,20	+0,06
3	2/II 1941 г.	8086,44	8086,15	-0,29
4	12/II 1941 г.	8136,84	8136,86	+0,02
5	13/II 1941 г.	8118,98	8118,91	-0,07
6	13/II 1941 г.	8118,98	8118,71	-0,27
7	15/II 1941 г.	7708,53	7708,00	-0,53
8	16/II 1941 г.	7711,63	7711,29	-0,34
9	16/II 1941 г.	7711,63	7711,43	-0,20
10	17/II 1941 г.	8185,87	8185,82	-0,05
11	18/II 1941 г.	7690,98	7690,28	-0,70
12	19/II 1941 г.	8074,05	8073,82	-0,23
13	19/II 1941 г.	8074,05	8074,13	+0,08
14	20/II 1941 г.	8074,05	8073,98	-0,07
15	21/II 1941 г.	8119,92	8120,12	+0,20
16	22/II 1941 г.	8119,92	8119,42	-0,50
17	24/II 1941 г.	8119,92	8119,27	-0,65
18	24/II 1941 г.	8119,92	8118,72	-1,20
Средняя разность между вычисленной и измеренной длиной -0,20 мм.				

Результаты двойных измерений (в мм)

Таблица 6

№ п. п.	Результат первого косвенного измерения	Результат второго косвенного измерения	Разность между первым и вторым измерениями	Примечание
1	8118,91	8118,71	-0,20	Результаты, полученные при измерениях в условиях лаборатории
2	7711,29	7711,43	+0,14	
3	8073,98	8074,13	+0,15	
4	8073,98	8073,82	-0,16	
5	8119,42	8119,27	-0,15	
6	8119,42	8120,12	+0,70	
7	8062,64	8062,21	-0,42	
8	18590,70	18599,60	-0,10	Результаты измерения на Н.-Краматорском заводе имени И. В. Сталина Результаты измерения на строительстве

шкив и зубчатое колесо, диаметры которых несколько превышали 8 м. Одновременно производилось измерение этих изделий средствами центральной измерительной лаборатории завода. В лаборатории завода имелись штихмасы длиной только до 8 м. Для того, чтобы иметь возможность произвести сравнение результатов измерений, полученных двумя различными методами, в качестве объектов исследования были избраны изделия, размеры которых не превышали 8 м.

При измерении наружного диаметра шкива концы измеряемого диаметра обозначались лекальными линейками, ребра которых являлись визирными приспособлениями при измерении углов. Базис длиной 8 м был выбран недалеко от шкива и располагался по первой схеме. Расстояние между ребрами лекальных линеек было получено двумя независимыми измерениями с двух базисов. Измерение углов производилось теодолитом. Теодолит при измерении углов устанавливался на тубингах. На верхней поверхности тубингов, предварительно зачищенной, были нанесены керном конечные точки базиса. Измерение базиса производилось рулеткой при ее свободном провесе и натяжении с силой 10 кг.

Углы измерялись способом круговых приемов шестью приемами. Перед каждым приемом заново производилась центрировка теодолита. Средняя квадратичная погрешность измеренных углов в среднем равна  $\pm 2''{,}5$ . Измерения температуры воздуха вблизи шкива производились все время и были начаты за 4 часа до начала измерений. За время измерений температура изменилась с  $+18,0^\circ$  до  $+21,7^\circ$  С.

Так как изготовление шкива было окончено более чем за сутки до начала измерений, мы полагали, что шкив принял температуру цеха с точностью до  $1^\circ$  С. Вычисления дали следующие результаты: по первому базису получено 8062,64 мм и по второму базису 8062,21 мм. Среднее взвешенное значение диаметра шкива было принято равным 8062,47 мм.

Измерение того же диаметра шкива производилось при помощи штихмаса с микрометрической головкой. Длина штихмаса была определена сравнением с длиной „штихмаса-установочника“, составленного из двух четырехметровых микрометрических штихмасов, каждый из которых предварительно был проверен на 6-метровой машине лаборатории завода.

Измеренная при помощи штихмаса длина диаметра шкива оказалась равной 8061,95 мм, что отличается от полученных нами результатов на 0,52 мм.

Измерение диаметра зубчатого колеса необходимо было произвести непосредственно на станке, так как это колесо состояло из двух разъединившихся после снятия со станка сегментов. Ввиду срочности работ по изготовлению колеса, для проведения измерений было предоставлено сравнительно мало времени, и измерение диаметра нами производилось во время



работы станка. Измерение колеса работниками заводской лаборатории производилось уже после того, как станок прекратил работу.

Измерение диаметра произведено было только один раз и по одному базису. Средняя квадратичная погрешность измеренного угла равна в среднем  $\pm 4''$ . Увеличение погрешности измерения угла произошло из-за того, что визирование производилось непосредственно на грани изделия, а не на ребро лекальной линейки, как это было в первом случае.

Температурные условия в этот день были очень хорошими. За время измерений температура изменялась в пределах  $1^\circ$ .

Второй особенностью произведенного измерения было то, что колесо обрабатывалось на зуборезном станке в вертикальном положении. Это, как оказалось, является наиболее благоприятным случаем для применения метода цеховой триангуляции. В результате измерения нами было получено значение диаметра колеса  $7829,87 \text{ мм}$

Измерение диаметра колеса с помощью штихмаса и микрометров лабораторией завода и контролером цеха производилось дважды по частям, также на станке. При первом измерении было получено  $7829,40 \text{ мм}$ , а при втором  $7829,66 \text{ мм}$ . В среднем имеем  $7829,53 \text{ мм}$ , что отлично от нашего результата на  $+0,34 \text{ мм}$ .

Расхождения между результатами, полученными геодезическим методом и с помощью штихмаса, вполне объяснимы и по своей величине могли бы оказаться и значительно большими, ибо это расхождение является расхождением результатов, полученных двумя совершенно различными путями. В случае применения геодезических приемов передача абсолютного размера от государственного эталона — метра № 28 — происходила по линии штриховых мер длины, а при измерении штихмасом — по линии концевых мер.

Наибольшая возможная погрешность передачи единицы длины к измеряемому изделию как в первом, так и во втором случае может быть равна  $\pm 0,6 - 0,7 \text{ мм}$ .

Измерение значительно большей длины при помощи цеховой триангуляции было произведено на одном из ленинградских строителств. В этом случае оказалось необходимым определить трудно доступное для непосредственного измерения расстояние на металлической ферме, равное примерно  $18,5 \text{ м}$ . Расстояние между стержнями было измерено по двум  $15\text{-метровым}$  базисам, длина которых измерялась стальной рулеткой. Углы были измерены со средней квадратичной погрешностью около  $\pm 2'',5$ .

Вычисления дали следующие результаты: по первому базису было получено  $18599,6 \text{ мм}$  и по второму базису  $18599,7 \text{ мм}$ . Расхождение полученных результатов оказалось совершенно незначительным. Этого можно было ожидать, так как чем



больше будет измеряемая длина, тем погрешность измерения ее геодезическими методами будет меньше. Сам процесс измерения при этом совершенно не усложняется.

### Выводы

Результаты произведенных опытных измерений в цеховых и лабораторных условиях полностью доказали возможность использования геодезических методов для измерения больших длин.

При этом, как было показано, выявились и некоторые особенности применения этих методов измерений, выгодно отличающие их от методов, применяемых на заводах в данное время.

К ВОПРОСУ О ПЕРЕСМОТРЕ ГОСТ 2789-45

„ЧИСТОТА ПОВЕРХНОСТЕЙ. МИКРОГЕОМЕТРИЯ  
ПОВЕРХНОСТИ. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ“

Необходимость пересмотра ГОСТ 2789-45, разработанного во время Великой Отечественной войны, в связи с небывалым в истории прогрессом в области технологии и измерительной техники не нуждается в особой аргументации — недочеты этого ГОСТ непосредственно ощущаются всеми, близко стоящими к внедрению этого ГОСТ.

Предпосылкой рационального пересмотра ГОСТ 2789-45 мы считаем разработку соответствующей терминологии. Предлагаемый проект терминологии составлен в соответствии с современными взглядами на научную терминологию, как на орудие научного мышления, способствующего систематизации знаний и дальнейшему прогрессу изучаемой области (Д. С. Лотте, Образование системы научно-исследовательских терминов. Известия Академии наук СССР, Отделение технических наук, 1948, № 5, стр. 727).

Терминология не является простым перечнем терминов — названий, а представляет систему слов и словосочетаний, отображающую внутреннюю связь предметов и их свойств.

В основу предлагаемой терминологии положена классификация понятий, с которыми приходится оперировать в области оценки качества обработанных поверхностей не только в настоящее время, но с которыми вероятно придется иметь дело в ближайшем будущем в связи с высокими темпами развития современной техники.

Автор считает свой проект предварительным, не лишенным многих недостатков. Среди этих недостатков прежде всего следует отметить громоздкость терминов в виде более или менее сложных словосочетаний. Одной из причин этой громоздкости является необходимость пользоваться при описании реальных поверхностей немногочисленными терминами классической геометрии, приспособленной к описанию идеально гладких поверхностей сравнительно простой формы.

Понятие „качество поверхности“ или „шероховатость“ чуждо классической геометрии. Между тем, с развитием механической технологии и измерительной техники в машиностроении крепнет убеждение в том, что имеется незаполненная пропасть между образами научной геометрии и реальными геометрическими формами, создаваемыми на современных прецизионных станках при пользовании точнейшими инструментами.

Поэтому ощущается необходимость создания новой геометрии — геометрии действительности (реальной геометрии) с более богатой терминологией, чем в классической геометрии.

До разработки такой реальной геометрии приходится мириться с отмеченными неудобствами.

Опыт в области изучения реальных поверхностей составляет содержание одной из глав современной механической технологии, изучающей способы обработки поверхностей в процессе изготовления изделия заданной геометрической формы.

Это обязывает нас прежде всего дать определения следующих понятий: „реальная (действительная) поверхность“ (5), „способ обработки поверхности“ (7), „изделие“ (2) и „геометрическая форма“ (1) (в скобках указаны порядковые номера терминов в предлагаемом проекте терминологии).

Для раскрытия содержания этих понятий оказалось необходимым, с точки зрения логики, дать еще определения следующих понятий: „теоретическая поверхность изделия“ (3) и „неровность (неправильности) поверхности“ (4).

Определения этих основных понятий механической технологии металлов, пластиков и других машиностроительных материалов составляет содержание раздела 1 „Основные понятия“.

При разработке этого раздела предполагались известными нижеследующие определения понятий, встречающихся в тексте проекта терминологии:

„физическое тело“ (1), определяемое в учебниках физики; „математическая поверхность“, как абстрагированный от действительности предмет аналитической или проективной геометрии, и понятие „размер“.

Слово „размер“ (5) употреблено в метрологическом смысле, как расстояние между измерительными поверхностями прибора (микрометра, штанген-циркуля и т. д.)

При таком понимании слова „размер“ классическое учение о допусках и посадках игнорировало наличие шероховатости. В сущности, при измерении деталей приборами с измерительными поверхностями, перекрывающими неровности (шероховатость), мы получаем представление не о „действительной поверхности“ (5), а об „оггибающей поверхности“ (10), скрывающей под собой шероховатость. Отсюда очевидно важное значение оггибающей поверхности изделия,

как базы для измерения шероховатости, не доступной для макрогеометрических измерительных приборов.

Этими соображениями, мы полагаем, достаточно мотивировано наличие в проекте терминологии раздела 2 „Огибающая и опорная поверхности изделия“.

В основу терминологии этого раздела положено понятие „пробный участок обработанной поверхности“ (8).

К этому понятию, кроме понятия „огибающая поверхность изделия“ (10), тяготеют понятия, относящиеся к математико-статистической обработке результатов измерения „глубин неровностей“ (49) под огибающей поверхностью изделия.

В этом же разделе дано определение важного термина „точки и линии экстремальной кривизны огибающей поверхности“ (12). Введение этого термина необходимо для разграничения области микрогеометрии от области макрогеометрии (волнистости). Действительная поверхность имеет волнистость, если ее огибающая поверхность имеет большее число точек и линий экстремальной кривизны, чем теоретическая поверхность (см. также п. 37).

По поводу разделов терминологии „2. Огибающая и опорная поверхность“, „6. Элементы следов обработки и их геометрические параметры“, „7. Профиль поверхности пробного участка“ и „8. Приближенные значения показателей качества поверхности“ необходимо сделать следующее общее замечание.

В этих разделах подчеркивается, что качество поверхности (шероховатость) есть свойство поверхности, а не линии (профиля), т. е. качество поверхности определяется топографией (рельефом) поверхности, а не отдельным „профилем поверхности пробного участка данного направления“ (70). Оценка качества поверхности по профилю есть лишь частный вид оценки качества поверхности.

Для строго научного определения основного понятия предлагаемого проекта терминологии — понятия „качество (чистота) обработанной поверхности на данном участке“ (50) и других понятий раздела 5 („Качество обработанной поверхности и его показатели“) оказалось необходимым введение двух разделов: „3. Следы нормального способа обработки“ и „4. Закономерные и случайные пороки поверхности“.

В разделе 3 дана классификация следов обработки, как неровностей, свойственных данному виду обработки и принимаемых во внимание при оценке качества поверхности.

Наличием термина „Незакономерные следы обработки“ (19) подчеркивается случайный характер размеров следов обработки некоторых способов (например, шлифования), оправдывающий



применение математико-статистических методов оценки качества поверхности (в частности, применение показателя  $H_{ск}$ ).

При наличии же термина „закономерные следы обработки поверхности“ возникает сомнение в целесообразности оценки качества поверхности показателем  $H_{ск}$ , особенно при отсутствии прибора для непосредственного отсчета этого показателя.

В разделе 4 дана классификация „пороков поверхности изделия“, как отступлений от теоретической поверхности, не свойственных нормальному способу обработки и не учитываемых при оценке качества поверхности (30).

Особенного внимания заслуживают пороки формы, выявляющиеся в отсутствии подобия между огибающей поверхностью и теоретической поверхностью изделия (32).

Качество поверхности согласно пп. 50 и 53, а также примечанию к п. 57 является сложным свойством, достаточно полно характеризуемым, по крайней мере, семью показателями.

Научная терминология, как система понятий в учении о качестве обработанных поверхностей, должна содействовать прогрессу этой дисциплины согласно современным взглядам на научную терминологию, как было сказано в начале статьи.

В свете этой системы понятий нам представляется необходимым пересмотр ОСТ на допуски и посадки. С момента утверждения ОСТ идея допуска, содействовавшая прогрессу современного машиностроения, получила весьма существенное развитие.

Уже вскоре после утверждения национальных систем допусков и посадок, в связи с повышением требований к изготовлению авиационных и автомобильных двигателей, выявилась необходимость выделить в поле допуска погрешность формы и погрешность, обуславливаемую наличием шероховатости, сглаживающейся в процессе эксплуатации.

Это сглаживание шероховатости влечет за собой изменение характера посадки.

В настоящее время измерительная техника позволяет измерять и пороки формы и качество поверхности, чего не было во время разработки ОСТ на системы допусков и посадок.

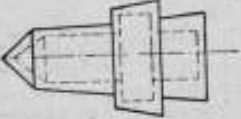
Нам представляется необходимым комплексный пересмотр положений о допусках и посадках, о допусках на погрешность формы и о качестве поверхности.

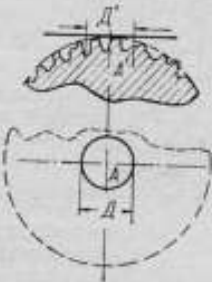

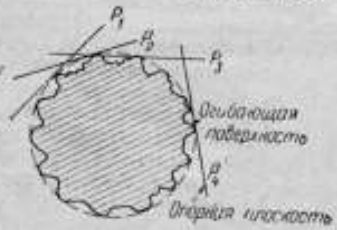
Основной предпосылкой такого пересмотра должна быть разработка научной терминологии, относящейся к допускам и посадкам, согласованной с терминологией по качеству поверхности.

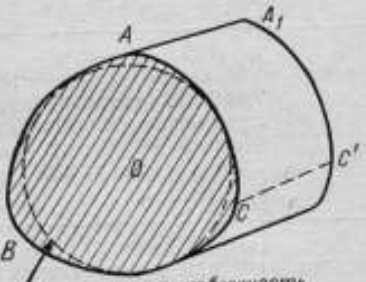
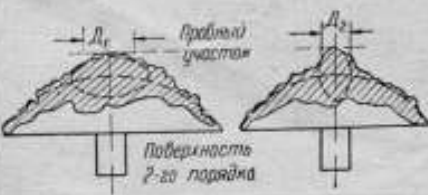
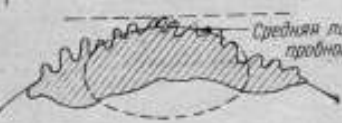
Ниже мы приводим полностью проект терминологии в учении о качестве поверхности.

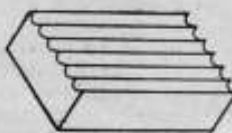



№ п. п.	Термины	Определения
I. Основные понятия		
1	<p>Геометрическая форма</p> 	<p>Совокупность поверхностей частей геометрического тела, на которые может быть разделена поверхность тела с целью точного или приближенного отнесения их к простейшим, в математическом или технологическом отношении, видам поверхностей</p>
2	<p>Изделие</p> 	<p>Материал, которому искусственно придана определенная целесообразная геометрическая форма</p>
3	<p>Теоретическая поверхность изделия</p>	<p>Совокупность математических поверхностей, определяемых размерами чертежа изделия без допусков</p>
4	<p>Неровности поверхности</p> 	<p>Геометрические образования из материала изделия на его поверхности, не предусмотренные чертежом или техническими условиями</p>

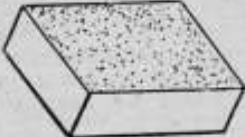


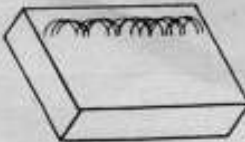

№ п. п.	Термины	Определения
5	Действительная (реальная) поверхность изделия 	Поверхность изделия со всеми неровностями и отступлениями в размерах от теоретической поверхности
6	Обработанная поверхность изделия	Действительная поверхность, которой придана определенная геометрическая форма, одним или несколькими из следующих способов: 1) отделением обрабатываемого материала (снятием стружки, электроэрозионным способом, травлением, расплавлением и т. д.); 2) перемещением части обрабатываемого материала без отрыва от общей его массы (обработка давлением: прокаткой, накаткой, ковкой); 3) путем применения для оформления материала готовой формы (литье, штамповка, прессование порошкообразных материалов); 4) путем наращивания материала на поверхность заготовки (покрытия); 5) путем придания блеска поверхности (механическая полировка); 6) путем притирки (добавочные операции).
7	Нормальный способ обработки данного материала	Способ обработки данного материала кондиционированной однородности инструментом в должном состоянии, на рационально выбранном станке, при режиме, исключающем вибрацию станка, инструмента и изделия, большую чем допускаемая техническими условиями.

№ п. п.	Термины	Определения
2. Огибающая и опорная поверхности изделия		
8	<p>Пробный участок обработанной поверхности</p> 	<p>Часть исследуемой поверхности, для которой отклонения точек теоретической поверхности от касательной плоскости в центре этой поверхности столь малы по сравнению с отклонениями неровностей, что могут быть не приняты в расчет при решении конкретной задачи исследования</p>
9	<p>Опорная плоскость пробного участка поверхности</p> 	<p>Плоскость, воспроизводимая пробной стеклянной пластиной, опирающейся на точки изделия внутри пробного участка</p>
10	<p>Огибающая поверхность изделия</p> 	<p>Огибающая поверхность положений опорной плоскости на всех пробных участках поверхности</p>

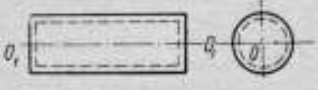



№ п. п.	Термины	Определения
11	Опорная поверхность изделия	<p>Огибающая поверхность изделия после приработки с поверхностью сопряженной детали.</p> <p>Примечание. В дальнейшем прилагательное „обработанная“ к слову „поверхность“ опускается.</p>
12	<p>Точки и линии экстремальной кривизны поверхности</p>  <p>Теоретическая поверхность AA<sub>1</sub>, BB<sub>1</sub>, CC<sub>1</sub> - Линии экстремальной кривизны</p>	<p>Точки и линии наибольшей и наименьшей кривизны поверхности</p>
13	<p>Средняя поверхность пробного участка поверхности</p>  <p>Поверхность 2-го порядка</p>	<p>Поверхность 2-го порядка (эллипсоид, гиперболоид, параболоид, сфера, плоскость) с кривизной и ориентировкой относительно поверхности пробного участка, обуславливающими наименьшее среднее квадратичное расстояние от точек обработанной поверхности до определяемой поверхности 2-го порядка.</p>
14	<p>Средняя линия пробного участка поверхности данного направления</p>  <p>Средняя линия пробного участка</p>	<p>Кривая 2-го порядка (эллипс, гипербола, парабола, окружность, прямая), получающаяся в пересечении средней поверхности пробного участка нормальной плоскостью, проходящей через прямую перпендикулярную к опорной плоскости участка</p>

№ п. п.	Термины	Определения
15	Средняя поверхность изделия	Огибающая средних поверхностей пробных участков изделия
3. Следы нормального способа обработки		
16	Следы обработки поверхности (штриха)	Неровности, свойственные данному виду обработки
17	Закономерные следы обработки поверхности	Однородные следы обработки, расположенные в определенном порядке (следы токарной обработки, фрезерной обработки и т. п.).
18	Незакономерные следы обработки поверхности	Следы разнообразной формы, разных размеров и случайных направлений (следы опиловки, зачистки наждачной бумагой, очистки пескоструем и т. п.).
19	Непрерывные следы обработки поверхности 	Следы, непрерывно проходящие через всю обработанную поверхность
20	Прерывистые следы обработки поверхности 	Следы обработки, не проходящие через всю обработанную поверхность



№ п. п.	Термины	Определения
21	<p>Точечные следы обработки поверхности</p> 	<p>Прерывистые следы, воспринимаемые глазом как точки</p>
22	<p>Круговые следы обработки поверхности</p> 	<p>Следы, образованные при вращательном движении инструмента в системе изделия</p>
23	<p>Спиральные следы обработки поверхности</p> 	<p>Следы, образованные при движении инструмента по спирали в системе изделия</p>
24	<p>Циклоидальные следы обработки поверхности</p> 	<p>Следы, образованные при движении инструмента по циклоиде в системе изделия</p>
25	<p>Винтообразные следы обработки поверхности</p> 	<p>Следы, образованные при движении инструмента по винтовой линии в системе изделия.</p>

№ п. п.	Термины	Определения
26	Параллельные следы обработки поверхности	Следы обработки, не пересекающиеся между собой
27	Равномерные следы обработки поверхности	Параллельные следы одинаковой формы, расположенные на равном расстоянии друг от друга
28	Волнообразность поверхности 	Свойство обработанной поверхности с равномерными следами обработки
4. Закономерные и случайные пороки поверхности		
29	Пороки поверхности изделия	Отступления от теоретической поверхности, не свойственные нормальному способу обработки данного материала
30	Закономерные пороки поверхности изделия	Пороки, обусловленные побочными нормальными способами обработки и принципиально устраняемыми причинами
31	Пороки формы изделия	Закономерный порок, характеризующийся отсутствием подобия между отгибающей поверхностью и теоретической поверхностью изделия
32	Конусность 	Закономерный порок формы изделия, когда при обработке цилиндрической поверхности получается коническая поверхность.

№ п. п.	Термины	Определения
33	<p data-bbox="301 291 437 326">Овальность</p> 	<p data-bbox="603 291 942 449">Закономерный порок формы изделия, когда при обработке вместо круглой цилиндрической поверхности получается цилиндрическая поверхность с овальным сечением</p>
34	<p data-bbox="277 502 462 538">Бочкообразность</p> 	<p data-bbox="603 502 942 679">Закономерный порок формы изделия, когда при обработке вместо цилиндрической поверхности получается поверхность вращения, образующей которой служит дуга кривой, обращенной вогнутостью к оси</p>
35	<p data-bbox="301 749 449 784">Корсетность</p> 	<p data-bbox="603 749 942 926">Закономерный порок формы изделия, когда при обработке вместо цилиндрической поверхности получается поверхность вращения, образующей которой служит дуга кривой, обращенная выпуклостью к оси</p>
36	<p data-bbox="252 1093 498 1128">Волнистость (огранка)</p> 	<p data-bbox="603 1093 942 1270">Закономерный порок формы, искажающий теоретическую цилиндрическую и коническую поверхности вследствие образования нескольких, параллельных оси, линий экстремальной кривизны, огибающей поверхности</p>
37	<p data-bbox="209 1437 566 1490">Случайные пороки поверхности изделия</p>	<p data-bbox="622 1428 954 1499">Пороки, обусловленные случайными для данного вида обработки причинами</p>

№ п. п.	Термины	Определения
38	Царапины	Случайный порок поверхности в виде следа, оставленного на поверхности изделия при движении в системе изделия постороннего для данного вида обработки твердого предмета
39	Вмятины	Случайный порок формы в виде следа от вдавливания в изделие твердого предмета, постороннего для данного вида обработки
40	Пятно	Случайный порок в виде наслоения на поверхности изделия постороннего материала
41	Ямка	Случайный порок в виде заметного для невооруженного глаза углубления вследствие выкрашивания
42	Точка	Ямка, заметная при рассмотривании через лупу с трехкратным увеличением
43	Раковины	Случайный порок поверхности изделия, обусловленный вскрытием при обработке внутреннего порока материала
<b>5. Качество обработанной поверхности и его показатели</b>		
44	Шероховатая поверхность	Поверхность со следами обработки, воспринимаемыми глазом или осязанием средним наблюдателем
45	Гладкая поверхность	Поверхность со следами обработки, не воспринимаемыми глазом или осязанием средним наблюдателем

№ п. п.	Термины	Определения
46	Техническая гладкая поверхность	Поверхность, следы обработки которой не оказывают влияния на функциональное назначение поверхности в конструкции
47	Техническая ровная поверхность	Поверхность, неровности которой не влияют на кинематику относительного движения по ней сопряженной детали
48	Глубина неровности в данной точке пробного участка поверхности	Расстояние от этой точки до опорной плоскости пробного участка
	<p>Пробный участок D Прямая опорная плоскость Г - глубина A, B, C - опорные точки</p>	
49	Качество (чистота) обрабатываемой поверхности на данном пробном участке	Свойство неповрежденной пороками поверхности, определяемое формой, направлением и числом следов на единицу поверхности и глубиной следов всей выбранной совокупности точек поверхности
50	Качество поверхности на данном направлении пробного участка	Качество поверхности, определяемое точками выбранной прямой опорной плоскости пробного участка
51	Качество поверхности основных направлений	Качество поверхности вдоль направления следов обработки и качество поверхности в направлении, перпендикулярном к направлению следов обработки



№ п. п.	Термины	Определения
52	Показатели качества поверхности	<p>Следующие качественные и количественные признаки поверхности:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) глубина следов пробного участка;</li> <li>2) форма следов обработки (профиль);</li> <li>3) закономерность следов обработки;</li> <li>4) число следов на единицу длины или площади;</li> <li>5) взаимное расположение следов обработки;</li> <li>6) отражательная способность поверхности</li> </ol>
53	Производные показатели качества поверхности	<p>Необходимые для разных научных и технических целей количественные показатели в виде непосредственных результатов математико-статистической обработки данных измерения глубины следов обработки или в виде функций этих результатов</p>
54	Характеристика поверхности данного пробного участка	<p>Описание качества и пороков пробного участка</p>
<p>6. Элементы следов обработки и их геометрические параметры</p>		
55	<p>Выступ следа обработки поверхности</p> 	<p>Поверхность следа обработки выше (наружу от изделия) средней поверхности изделия, проводимой таким образом, что объем материала над ней равен объему пустот под ней</p>
56	<p>Впадина следа обработки поверхности</p>	<p>Поверхность следа обработки ниже (внутри изделия) средней поверхности</p>

№ п. п.	Термины	Определения
57	Вершина следа обработки поверхности	Наиболее удаленная от средней поверхности точка выступа следа обработки
58	Дно следа обработки поверхности	Наиболее удаленная от средней поверхности точка впадины следа обработки
59	Поверхность выступов обработки данного пробного участка 	Поверхность, равно отстоящая от средней поверхности и проходящая через наиболее удаленную вершину следа обработки
60	Поверхность впадин следов обработки данного пробного участка	Поверхность, равноотстоящая от средней поверхности и проходящая через наиболее глубокое дно следа обработки
61	$H_1$ — высота вершины следа обработки 	Расстояние от вершины следа обработки до средней поверхности
62	$H_2$ — глубина дна следа обработки	Расстояние от дна следа обработки до средней поверхности
63	$G_{\text{наиб}}$ — наибольшая глубина следов обработки данного участка	Наибольшая сумма $H_1 + H_2$ для данного участка

№ п. п.	Термины	Определения
64	$H_{\text{ск}}$ — среднее квадратичное отклонение от средней поверхности данного участка	$H_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{F_0} \int_0^{F_0} H^2 dF}, \quad (1)$ <p>где  <math>F_0</math> — площадь пробного участка;  <math>dF</math> — дифференциал площади пробного участка;  <math>H</math> — расстояние от точки обработанной поверхности до соответствующего элемента средней поверхности</p>
65	$ H _{\text{ср}}$ — среднее арифметическое отклонение от средней поверхности данного участка	$ H _{\text{ср}} = \frac{1}{F_0} \int_0^{F_0}  H  dF, \quad (2)$ <p>где  <math>F_0</math> — площадь пробного участка;  <math>dF</math> — дифференциал площади пробного участка;  <math> H </math> — абсолютное значение расстояния от точки обработанной поверхности до соответствующего элемента средней поверхности</p>
66	$\Gamma_{\text{ср}}$ — средняя глубина следов обработки всей поверхности	<p>Среднее (арифметическое) значение наибольших глубин всех пробных участков поверхности всего изделия</p> $\Gamma_{\text{ср}} = \frac{1}{F_1} \sum_1^n \Gamma_{i \text{ наиб}} \Delta F_i, \quad (2A)$ <p>где  <math>F_1</math> — площадь всей средней поверхности;  <math>\Gamma_{\text{наиб}}</math> — наибольшая глубина для пробного участка, для которого <math>\Delta F_i</math> — дифференциал его площади</p>

№ п. п.	Термины	Определения
67	$(H_{\text{ср}})_{\text{ср}}$ — среднее квадратичное отклонение от средней поверхности для всей поверхности	$(H_{\text{ср}})_{\text{ср}} = \frac{1}{F_1} \int_0^{F_1} H_{\text{ср}} dF, \quad (3)$ <p>где</p> <p><math>F_1</math> — площадь всей обработанной поверхности;</p> <p><math>H_{\text{ср}}</math> — среднее квадратичное отклонение для пробного участка с дифференциалом площади <math>dF</math>, равное [8]</p>
68	$( H_{\text{ср}} )_{\text{ср}}$ — среднее арифметическое отклонение от средней поверхности для всей поверхности	$( H_{\text{ср}} )_{\text{ср}} = \frac{1}{F_1} \int_0^{F_1}  H_{\text{ср}}  dF, \quad (4)$ <p>где</p> <p><math>F_1</math> — площадь средней поверхности;</p> <p><math> H_{\text{ср}} </math> — среднее арифметическое для пробного участка с дифференциалом площади <math>dF</math>.</p>
7. Профиль поверхности пробного линейного участка		
69	Профиль поверхности пробного участка данного направления	<p>Кривая пересечения поверхности пробного участка плоскостью, перпендикулярной к опорной плоскости и проходящей через прямую данного направления</p> 
70	Средняя линия профиля	Линия пересечения плоскости профиля со средней поверхностью изделия
71	Линия выступов профиля	Линия пересечения плоскостью профиля поверхности выступов следов обработки

№ п. п.	Термины	Определения
72	Линия впадины профиля	Линия пересечения плоскостью профиля поверхности впадин следов обработки
73	Впадина профиля	Часть профиля ниже средней линии
74	Выступ профиля	Часть профиля выше средней линии
75	Дно впадины профиля	Наиболее удаленная от средней линии профиля точка впадины профиля
76	Вершина выступа профиля	Наиболее удаленная от средней линии профиля точка выступа профиля
77	$h_1$ — высота выступа профиля	Расстояние от вершины профиля до средней линии
78	$h_2$ — глубина впадины профиля	Расстояние от вершины профиля до средней линии
79	$h$ — глубина следа в плоскости профиля	Сумма $h = h_1 + h_2 \quad (5)$ для данного участка профиля
80	$h_{ск}$ — среднее квадратичное отклонение следов обработки от средней поверхности в плоскости профиля	$h_{ск} = \sqrt{\frac{1}{S_0} \int_0^{S_0} h^2 ds}, \quad (6)$ <p>где  <math>S_0</math> — длина средней линии;  <math>h</math> — расстояние точки профиля от средней линии, для которой соответствующий дифференциал <math>ds</math></p>



№ п. п.	Термины	Определения
81	Среднее арифметическое отклонение от средней линии профиля (точка поверхности в плоскости профиля)	$ h _{\text{ср}} = \frac{1}{S_0} \int_0^{S_0}  h  ds, \quad (7)$ <p>где  <math>S_0</math> — длина средней линии профиля;  <math> h </math> — абсолютное значение расстояния от точки профиля, для которой соответствующий дифференциал дуги профиля <math>ds</math></p>
8. Приближенные значения показателей качества поверхности		
82	Приближенные значения показателей качества поверхности	Значения показателя качества поверхности, вычисленные для приблизительно построенных средних поверхностей пробных участков конечных размеров и для конечного числа пробных точек
83	Приближенный профиль поверхности	<p>Профиль, у которого кривые линии — средняя линия и линия выступов и впадин — заменены прямыми линиями следующим образом:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) средняя линия проведена параллельно среднему направлению теоретического профиля поверхности таким образом, что сумма площадей, ограниченных кривыми выступов и средней линией, равна сумме площадей, ограниченных кривыми впадин и средней линией;</li> <li>2) линия выступов проведена через наиболее удаленную вершину выступа параллельно средней линии;</li> <li>3) линия впадин проведена через наиболее удаленное дно впадины</li> </ol>

*В. Г. МАХРОВСКИЙ и М. Ф. ГРЕЧКО*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СУБЪЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИ

### Введение

До изобретения современных приборов для измерения чистоты обработанных поверхностей чистоту отделки на металлообрабатывающих заводах оценивали на глаз или осязанием. Эти субъективные методы оценки чистоты поверхностей до первой империалистической войны были единственными и вполне достаточными для уровня развития механической технологии металлов того времени.

Сущность этих методов заключается в сравнении испытуемой поверхности с поверхностью образцовой детали или куска металла, вырезанного из детали. По мнению высококвалифицированных рабочих, этим способом, при достаточной тренировке, можно было обнаружить разницу в глубинах следов обработки порядка десятых микрона.

С появлением специальных приборов для измерения чистоты поверхностей и дальнейшим развитием механической технологии в направлении повышения качества отделочных операций, прежние методы оценки чистоты отошли на задний план. С введением в практику стандартной классификации поверхностей по количественному критерию у многих работников заводов создавалось неверное представление, будто бы без приборов в настоящее время нельзя выдерживать качество поверхности в соответствии с ГОСТ 2789-45.

Создалось такое положение, что в течение почти трех лет с начала действия ГОСТ лишь немногие заводы, обеспеченные соответствующей аппаратурой, внедрили этот ГОСТ в свою практику. Вместе с тем началась и здоровая реакция против немотивированного во многих случаях увлечения инструментальной проверкой чистоты отделки: некоторые заводы начали изготавливать образцы чистоты по ГОСТ 2789-45 для бесприборной оценки качества поверхности изделий. В связи с этим воз-

ник вопрос, в каких пределах и условиях можно пользоваться оценкой на глаз и по осязанию.

Ответить на этот вопрос и было целью настоящего исследования.

## 2. Методика исследования

В распоряжении лаборатории имеются два набора из 14 цилиндрических образцов чистоты в каждом. Эти наборы, изготовленные для специального назначения, оказались удобными для проведения психотехнического испытания рабочих, служащих и научных сотрудников завода „Эталон“, ВНИИМ и Управления уполномоченного Комитета по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР при Ленинградском облисполкоме.

Целью психотехнического испытания было получение статистического материала, отсутствующего в литературе, для соответствующих выводов о чувствительности глаза и ногтя к разнице в глубинах высоко обработанных образцов.

Четыре образца каждого набора были обработаны на токарном станке и шесть образцов были изготовлены на круглошлифовальном станке. Некоторые из этих образцов слегка зачищались наждачной бумагой. Четыре образца были отделаны доводкой. Длина образца — 100 мм, диаметр образца — 20 мм.

Таблица 1

Данные образцов первого набора

Номер образца	Условный номер образца	Метод обработки	$H_{\text{мин}}$	Класс по ГОСТ 2789-45
1	19	Токарная обработка	22	4
2	21		29	4
3	24		19	5
4	17		1,04	9
5	16	Шлифование	2,32	8
6	11		1,84	8
7	14		0,6	10
8	12		0,5	10
9	13		0,7	10
10	18	Доводка	0,4	11
11	23		0,3	11
12	22		0,06	13
13	15		0,03	14
14	20		0,3	11

Данные образцов второго набора

Таблица 2

Номер образца	Условный номер образца	Метод обработки	$H_{\max}$	Класс по ГОСТ 2789-45
1	29	Токарная обработка	28	4
2	31	" "	33	4
3	34	" "	14	5
4	27	" "	0,9	10
5	26	Шлифование	1,3	9
6	21	" "	0,8	10
7	54	" "	0,6	11
8	42	" "	0,4	11
9	43	" "	0,5	11
10	28	Доводка	0,3	12
11	33	" "	0,25	12
12	32	" "	0,12	13
13	25	" "	0,12	13
14	30	" "	0,16	13

В табл. 1 и 2 приведены данные о методах обработки и чистоте отделки образцов двух наборов.

Каждый образец на торце имел номер. При испытании первоначальные номера были заклеены бумагой, на которой были обозначены новые условные номера случайно выбранными числами.

Из образцов первого набора составлены следующие группы:

Группа  $A_1$ 

Порядковый номер 1 3 5 7 8 11 18  
Условный номер 19 24 16 13 14 23 15

Группа  $B_1$ 

Порядковый номер 2 4 6 8 10 12 14  
Условный номер 21 17 11 12 18 22 20

Группа  $C_1$ 

Порядковый номер 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14  
Условный номер 19 21 24 17 16 11 14 12 13 18 23 22 15 20

Из образцов второго набора были составлены следующие группы для каждого испытуемого:

Группа  $A_2$ 

Порядковый номер 1 4 7 10 13  
Условный номер 29 27 54 28 25

Группа  $B_2$ 

Порядковый номер 2 5 8 11 14  
Условный номер 31 26 42 33 30

Группа С<sub>2</sub>

Порядковый номер	1	3	5	7	9	11	13
Условный номер	29	34	26	54	43	33	25

Группа Д<sub>2</sub>

Порядковый номер	2	4	6	8	10	12	14
Условный номер	31	27	21	42	28	32	30

В психотехническом испытании принимали участие следующие группы работников ВНИИМ, завода „Эталон“ и Управления уполномоченного Комитета мер и измерительных приборов при Лениблсполкоме (табл. 3).

Таблица 3

## Состав групп испытуемых

№ п. п.	Наименование профессии	Число человек
1	Научные сотрудники оптической лаборатории и лаборатории измерения длины в машиностроении . . . . .	25
2	Госповерители Управления уполномоченного . . . . .	10
3	Механики завода „Эталон“ . . . . .	13
4	Токари, шлифовщики и распределители работ завода „Эталон“ . . . . .	5
5	Контролеры ОТК завода „Эталон“ . . . . .	5
6	Научные сотрудники лабораторий: времени, массы, акустической, механической, термометрической, магнитной и манометрической . . . . .	21
7	Курсанты-госповерители . . . . .	20
8	Конструкторы и технологи . . . . .	4
	Всего . . . . .	103 чел.

Испытание заключалось в следующем. Каждому испытуемому последовательно выдавались из названных выше групп образцы, с предложением разложить их в порядке возрастающей шероховатости. При этом испытуемым рекомендовалось производить сравнительную оценку образцов как на глаз, так и ногтем. В случае расхождений в оценке этими двумя методами, например, блестящих образцов рекомендовалось предпочтение отдавать испытанию ногтем. После раскладки образцов старший научный сотрудник лаборатории записывал условные номера в журнал. Пример записи приведен в табл. 4. (Цифры в скобках, соответствующие первоначальным номерам образцов, вписывались в таблицу при обработке результатов испытания).



Серия группы А<sub>1</sub>

№ п. п.	Фамилия, и. о. участников испытания	Номера мест раскладки образцов в порядке чистоты отделки						
		1	2	3	4	5	6	7
		Условные номера образцов						
1	Зубрилин П. П. . . .	19 (1)	24 (3)	16 (5)	13 (7)	14 (8)	15 (11)	23 (13)
2	Соломин А. Б. . . .	19 (1)	24 (3)	16 (5)	13 (7)	14 (8)	23 (13)	15 (11)
3	Беликова Н. П. . . .	19 (1)	24 (3)	16 (5)	14 (8)	13 (7)	23 (13)	15 (11)
4	Виноградова В. Р. . .	19 (1)	24 (3)	16 (5)	13 (7)	14 (8)	15 (11)	23 (13)

Записи результатов в журналах были обработаны следующим образом. После внесения в журнал первоначальных но-

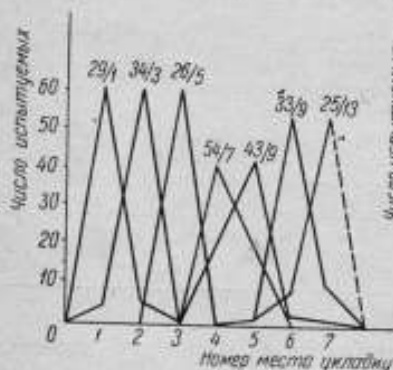


Рис. 1. Кривые распределения мест укладки образцов чистоты поверхности группы С<sub>2</sub>

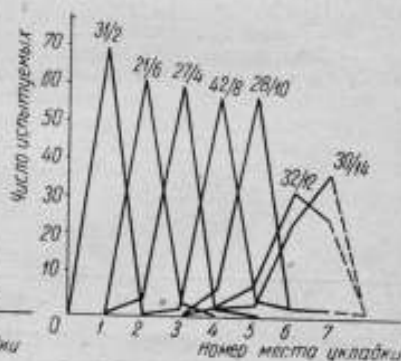


Рис. 2. Кривые распределения мест укладки образцов чистоты поверхности группы Д<sub>2</sub>

меров образцов в каждом вертикальном столбце подсчитано количество образцов каждого условного номера.

Ниже, в качестве примера, приводится табл. 5, содержащая обработку серии группы С<sub>2</sub>.

По результативным таблицам типа табл. 6 построены диаграммы, изображенные на рис. 1—2. Каждой строке этой таблицы соответствует некоторая ломаная линия распределения

Таблица 5

Номера мест раскладки образцов в порядке возрастающей чистоты отделки						
1	2	3	4	5	6	7
Условные номера образцов и количества						
26—62	29—5	25—67	25—1	25—2	25—8	25—56
34—5	34—62		43—20	33—1	33—56	33—10
			54—46	43—44	43—2	43—1
				54—20	54—1	

образца данного условного номера по позициям в ряду возрастающей чистоты отделки. У вершин ломаных линий распределения указаны условные номера образцов и первоначальные номера образцов.

Табл. 5 ниже представлена в другом виде (табл. 6).

Таблица 6

Условные номера образцов	Номера мест раскладки образцов в порядке возрастающей чистоты отделки							Итого
	1	2	3	4	5	6	7	
Количество образцов на разных местах								
25	—	—	—	1	2	8	56	67
26	—	—	67	—	—	—	—	67
29	62	5	—	—	—	—	—	67
33	—	—	—	—	1	56	10	67
34	5	62	—	—	—	—	—	67
43	—	—	—	20	44	2	1	67
54	—	—	—	46	20	1	—	67

### 3. Анализ результатов исследования

При испытании участникам предлагалось из всех возможных перестановок (укладок) образцов найти основную перестановку, наименее уклоняющуюся от перестановки, отвечающей возрастающей чистоте отделки образцов. Поэтому естественно при анализе обратиться к теории перестановок.

Если имеется  $n$  целых чисел натурального ряда  $1, 2, 3, \dots, n$ , то, как известно, из этих чисел можно составить

$$P_n = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n = n!$$

Перестановок или последовательностей  $n$  чисел, вообще не следующих порядку натурального ряда, за исключением одной перестановки

$$1, 2, 3, \dots, (n-1) n.$$

Такую перестановку принято называть основной перестановкой.

Каждую конкретную перестановку можно характеризовать количеством беспорядков, считая, что в основной перестановке число беспорядков равно нулю. Беспорядком в теории детерминантов принято называть тот факт, что большее число в перестановке из  $n$  чисел натурального ряда стоит впереди какого-

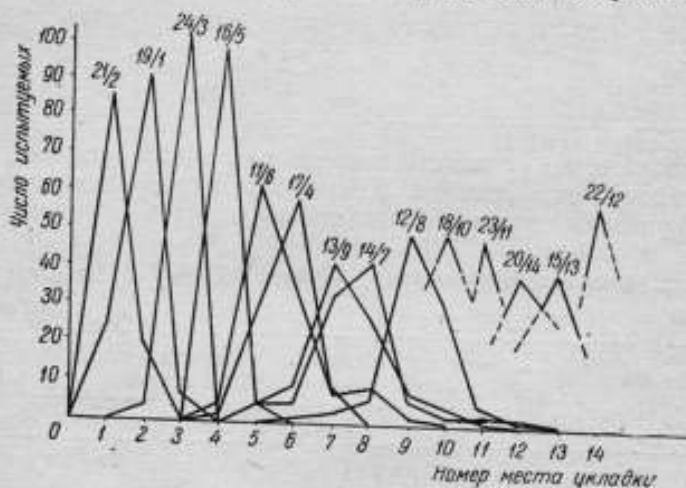


Рис. 3. Кривые распределения мест укладки образцов чистоты поверхности группы  $C_2$

либо меньшего числа. Так, например, в перестановке из четырех элементов 1, 2, 3 и 4

$$4 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 1$$

мы имеем следующие беспорядки:

4 стоит впереди 2, 3 и 1 . . . 3 беспорядка  
 2 стоит впереди 1 . . . . . 1 беспорядок  
 3 стоит впереди 1 . . . . . 1 беспорядок

Всего . . . 5 беспорядков

Из рассмотрения рис. 1 видно, что наибольшие числа в распределениях следуют порядку первоначальных номеров образцов:

Серия группы  $C_2$  29/1 — 34/3 — 26/5 — 54/7 — 43/9 — 33/11 — 25/13.

На рис. 2 мы наблюдаем нарушение порядка первоначальных номеров образцов или, пользуясь терминологией теории детерминантов, наблюдаем один беспорядок в основной перестановке первоначальных номеров:

Серия группы  $D_2$  31/2 — 21/6 — 27/4 — 42/8 — 33/10 — 32/12 — 30/14.

На рис. 3 мы также констатируем нарушение порядка последовательности первоначальных порядковых чисел, а именно, наблюдаем 6 беспорядков:

Серия группы  $C_1$  21/2—19/1—24/3—16/5—11/6—17/4—13/9—14/7—12/8—18/10—23/11—20/14—15/13—22/12.

Результаты измерения  $H_{\text{макс}}$  на двойном микроскопе Линника (см. табл. 1) также вскрывают несоответствие ряда первоначальных цифр уменьшению  $H_{\text{макс}}$ .

Измерение  $H_{\text{макс}}$  второго набора образцов на интерференциальном микроскопе не обнаружило разницы между образцами

21/6—27/4.

Вероятно, при одинаковом ощущении при оцупывании ногтем образец 27/4, как более блестящий, ставился выше образца 21/6. Ввиду затруднительности точно установить разность  $H_{\text{макс}}$  для образцов 20/14—15/13—22/12, мы отдаем предпочтение порядку образцов, отображенному на рисунках.

Таким образом, первый вывод, к которому пришли в результате статистического исследования и непосредственного измерения, следующий.

Для установления в первом наборе полного соответствия ряда порядковых номеров образцов ряду возрастающей чистоты обработки необходимо несколько изменить последовательность первоначальных номеров, руководствуясь результатами исследования, графически представленными на рис. 1—3, т. е. условные номера первого набора должны быть расположены в такой последовательности:

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14  
21 19 24 16 11 17 13 14 12 18 23 20 15 22.

Установив этот исправленный порядок образцов чистоты первого набора, мы отметили во всех журналах ошибки, допущенные испытуемыми.

Число допущенных при раскладке образцов чистоты ошибок мы считали равным числу беспорядков в перестановках первоначальных номеров образцов при раскладке по местам

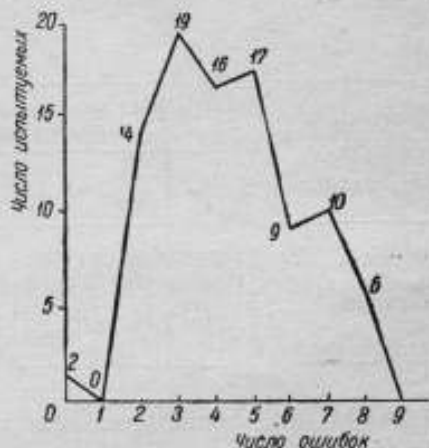


Рис. 4. Кривая распределения ошибок при укладке образцов чистоты поверхности группы  $C_1$ .

в порядке возрастающей чистоты. Действительно, укладка обычно начиналась с грубого первого образца, и, после легкой безошибочной укладки нескольких грубых образцов, испытуемый темпы раскладки снижал и следующий выбранный образец сравнивал с остальными, еще не уложенными.

Таким образом, актом укладки он констатировал то, что укладываемый образец по чистоте отделки ниже всех остальных еще не уложенных образцов.

Пример такой обработки журналов показан в табл. 7.

Таблица 7

Фамилия, и. о. участника испытания	Номера мест укладки образцов в порядке возрастающей чистоты отделки											Число ошибок (беспорядков)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Орлов К. К.	21 (1)	19 (2)	24 (3)	14 (8)	13 (9)	12 (10)	18 (11)	20 (12)	23 (13)	15 (14)	22 (15)	0
Соколов З. В.	21 (1)	24 (2)	19 (3)	13 (7)	23 (8)	12 (9)	14 (14)	18 (11)	22 (12)	20 (13)	15 (10)	4

Результаты такой обработки журналов испытаний приведены ниже:

Число допущенных ошибок	Число допустивших ошибки
0	7
2	14
3	22
4	16
5	19
6	9
7	10
8	6

Итого 103

Соответствующий график расположения ошибок изображен на рис. 4.

Распределение ошибок по группам участников психотехнического испытания приведено в табл. 8.

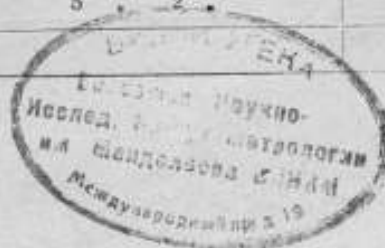
Как видно из таблицы, наименьшее среднее число ошибок сделали рабочие завода „Эталон“, причем один шлифовщик—стахановец разложил образцы безошибочно. Наибольшее число ошибок допустили госповерители Управления—5,1. Одинаковое число ошибок (4,7) допустили группа научных сотрудников разных лабораторий ВНИИМ и группа курсантов.

Правда, в первой группе имеется сотрудник, допустивший



Таблица 8

№ п. п.	Наименование профессии	Число участников	Число допущенных ошибок	Среднее число ошибок
1	Научные сотрудники оптической лаборатории и лаборатории мер длины	25	0 ошиб. 1 чел. 3 ошиб. 5 чел. 3 " 1 " 4 " 3 " 2 " 5 " 5 " 7 " 6 " 3 " 7 " 2 " 8 " 1 "	3,9
2	Госповерители Управления	10	3 ошиб. 2 чел. 5 " 4 " 6 " 1 " 7 " 2 "	5,1
3	Механики завода „Эталон“	13	1 ошиб. 3 чел. 2 " 5 " 3 " 2 " 4 " 1 " 6 " 1 " 7 " 1 "	2,7
4	Рабочие завода „Эталон“	5	2 ошиб. 1 чел. 1 " 2 " 4 " 1 " 5 " 1 "	2,2
5	Контролеры ОТК завода „Эталон“	5	1 ошиб. 1 чел. 2 " 1 " 3 " 1 " 4 " 1 " 5 " 1 "	3
6	Научные сотрудники разных лабораторий ВНИИМ	21	1 ошиб. 1 чел. 6 ошиб. 7 чел. 3 " 4 " 7 " 1 " 4 " 6 " 8 " 2 " 5 " 3 "	4,7
7	Курсанты-госповерители	20	1 ошиб. 3 чел. 5 ошиб. 2 чел. 2 " 2 " 6 " 2 " 3 " 3 " 7 " 1 " 4 " 4 " 8 " 3 "	4,7
8	Конструкторы и технологи завода „Эталон“	4	2 ошиб. 1 чел. 4 " 1 " 5 " 2 "	4
Всего		103		



всего одну ошибку, хотя раньше никакого отношения к обработанным поверхностям он не имел.

Кроме шлифовщика-стахановца, безошибочно разложила образцы лаборантка одной из лабораторий ВНИИМ, указанной в группе I рассматриваемой таблицы. Эта лаборантка до поступления во ВНИИМ никакого отношения к обработке металлов не имела.

Возвращаясь к табл. I, мы видим, что разница в 0,1 мк ощущается, сотые же доли микрона, как правило, субъективными методами не улавливаются.

### Выводы

Исследование подтвердило мнение многих научных и заводских работников о том, что оценку чистоты поверхностей, по крайней мере для продукции завода до 8-го класса включительно, можно производить на глаз и осознанно — путем сравнения с образцами чистоты, поверенными соответствующими приборами.

Корректор *А. Г. Букреева*

Подписано к печати 16/II 1951 г. М 18821 Формат бумаги 60 × 92<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Печ. л. 8<sup>1</sup>/<sub>4</sub>. Уч.-изд. л. 7,7. Тираж 1001 экз. Заказ № 3562

Типография № 2 Управления издательств и полиграфии Исполкома  
Ленгорсовета. Ленинград. Социалистическая, 14.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
В. Г. Махровский, Метрология и теория точности конструкций . . . . .	5
В. Г. Махровский, О построении кривой распределения суммы случайных погрешностей измерения с неизвестной плотностью вероятности . . . . .	40
М. К. Дубинский, Измерение точных штриховых мер на стереокомпараторе . . . . .	52
М. Л. Бржезинский, Некоторые исследования и применение пневматического метода . . . . .	65
Л. К. Каяк, О применении геодезических методов для измерения боль-	87

### ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
26	1 снизу	$a_{i,i+1} b_{i,i+1} c_{i,i+1}$	$a_{i,k} b_{i,k} c_{i,k}$	Авт.
36	7 .	поляром	номером	.
43	1 .	важнейших	вероятных	.
51	4 .	$2(a-b) 2pq$	$2(a-b) 2pqb$	.
95	Табл. 6 (2-я графа)	18590,70	18599,60	Корр. из-ва

всего одну ошибку, хотя раньше никакого отношения к обработанным поверхностям он не имел.

Кроме шлифовщика-стахановца, безошибочно разложила образцы лаборантка одной из лабораторий ВНИИМ, указанной в группе I рассматриваемой таблицы. Эта лаборантка до поступления во ВНИИМ никакого отношения к обработке металлов не имела.

Возвращаясь к табл. 1, мы видим, что разница в 0,1 мк ощущается, сотые же доли микрона, как правило, субъективными методами не улавливаются.

### Выводы

Исследование подтвердило мнение многих научных и заводских работников о том, что оценку чистоты поверхностей, по крайней мере для продукции завода до 8-го класса включительно, можно производить на глаз и безразличным путем сав-

Корректор *А. Г. Букреева*

Подписано к печати 16/II 1951 г. М 18821 Формат бумаги 60 × 92<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Печ. л. 8<sup>1</sup>/<sub>4</sub> Уч.-изд. л. 7,7. Тираж 1000 экз. Заказ № 3562

Типография № 2 Управления издательств и полиграфии Исполкома  
Ленгорсовета. Ленинград, Социалистическая, 14.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
В. Г. Махровский, Метрология и теория точности конструкций . . .	5
В. Г. Махровский, О построении кривой распределения суммы случайных погрешностей измерения с неизвестной плотностью вероятности . . . . .	40
М. К. Дубинский, Измерение точных штриховых мер на стереокомпараторе . . . . .	52
М. Л. Бржезинский, Некоторые исследования и применение пневматического метода . . . . .	65
Л. К. Каяк, О применении геодезических методов для измерения больших длин в машиностроении . . . . .	87
В. Г. Махровский, К вопросу о пересмотре ГОСТ 2789-45. Чистота поверхностей. Микрогеометрия поверхности. Классификация и обозначения . . . . .	102
В. Г. Махровский и М. Ф. Гречко, Исследование субъективных методов оценки чистоты поверхности . . . . .	122



4 р. 60 к.



ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА  
Ленинград, Невский пр., 58