

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

ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ
МЕХАНИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ВНИИМ
ВЫПУСК 37 (97)

«СТАНДАРТИЗ»
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД
1959

37(97)



КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СОЮЗА ССР

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

м 12097 а

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ВНИИМ

ВЫПУСК 37 (97)

Под редакцией
канд. техн. наук *Е. Ф. ДОЛИНСКОГО*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
«СТАНДАРТГИЗ»
МОСКВА—ЛЕНИНГРАД
1959

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
С. А. Смолич, Установки для воспроизведения значений силы	5
М. И. Коточигова, Точность образцовых упругих динамометров	14
М. И. Коточигова, К вопросу о выборе формы упругого тела для динамометров	25
А. И. Марциняк, Некоторые вопросы определения g методом свободного падения тел	42
В. С. Шкалик, Виброгасящий фундамент для точных измерений	49
А. Н. Королева, А. Д. Загатина, Методы измерения шкал малых размеров	53
А. Д. Загатина, Л. А. Соловьева, С. С. Товчигречко, С. И. Торопин, Исследование температурных коэффициентов удлинения маятниковых стержней, изготовленных из пивара завода «Эталон»	59
С. С. Товчигречко, Исследование и учет периодических ошибок микрометрических винтов экзаменаторов уровней	74
Н. В. Трофимова, Контактный метод сравнения штриховых мер с концевыми	86
М. И. Дрига, Тепловой (термомолекулярный) манометр	97
С. С. Степанов, Зависимость чисел твердости по Роквеллу от геометрических параметров конусного наконечника	106
Г. А. Маляров, Выбор и калибрование капилляров для абсолютного вискозиметра	112
Г. А. Маляров, Определение вязкости воды при температуре 20°С	125
Г. А. Маляров, Л. П. Степанов, Влияние на вязкость воды растворенного в ней воздуха	141
Н. А. Чесноков, Определение константы вискозиметра типа ВУ по воде и по маслу	144
Л. П. Степанов, Новая градуировка гидростатических весов безменного типа (весов Вестфала)	149

Технический редактор Р. Г. Польская Корректор О. А. Соколов

Сдано в производство 12/VII 1958 г. Подписано к печати 23/IV 1959 г.

Тираж 2000 экз. Печ. л. 9,5. М-23284 Формат 70×108^{1/16}.

Заказ 428.

Типография № 6 УПП Лесовпаргоза, Ленинград, ул. Моисеенко, 10

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник содержит статьи, освещающие результаты ряда работ в области механических измерений, которые выполнены во ВНИИМ в последние годы.

Четыре работы — А. И. Марциняка, Г. А. Малярова и Г. А. Малярова и Л. П. Степанова — дают результаты исследований по уточнению физических констант (ускорение силы тяжести и вязкость воды), имеющих метрологическое значение.

В работах С. А. Смолыча и М. И. Коточиговой рассмотрены вопросы создания эталонной установки, воспроизводящей единицу силы в пределах до 10^5 кгс, и повышения точности упругих динамометров.

Статья М. И. Дрига относится к созданию образцовой аппаратуры в области вакуумметрии.

Статья С. С. Степанова посвящена вопросу, связанному с повышением точности измерений твердости и потому имеющему большое прикладное значение.

Статья Н. Л. Чеснокова содержит материал, доказывающий, что проверка вискозиметров типа ВУ по маслам нерациональна.

Статья Л. П. Степанова дает новую, более рациональную, чем прежняя, методику поверки весов Вестфала.

Статья В. С. Шкаликова относится к вопросам антивибрационной защиты, имеющим большое значение при точных измерениях.

В статье М. И. Коточиговой «К вопросу о выборе формы упругого тела для динамометров» изложены результаты исследования поляризационным методом на прозрачных моделях распределения напряжений в ряде типовых динамометров и сделаны соответствующие заключения.

В статье Н. В. Трофимовой приведены исследования разработанного метода сравнения и сопоставлены результаты измерений ряда штриховых мер и шкал: 1) путем их сравнения с концевой мерой, предварительно измеренной в длинах световых волн; 2) путем их сравнения с штриховыми эталонами длины.

В статье А. И. Королевой и А. Д. Загатиной даны описание и исследование видоизмененного прибора ИЗА-2, приспособленного для точного

сравнения двух шкал. Кроме того, приведены данные о способах повышения точности измерения исходных шкал.

В статье А. Д. Загатиной, Л. А. Соловьевой, С. С. Товчигречко, С. И. Торопина рассмотрены многочисленные результаты измерения температурных коэффициентов удлинения маятниковых стержней абсолютным компараторным методом.

В статье С. С. Товчигречко приведены исследования погрешностей микрометрических винтов ряда экзаменаторов и указаны методы их учета.

Считаю необходимым отметить, что последние пять статей редактировала проф. д-р техн. наук М. Ф. Романова.

Е. Ф. Долинский

УСТАНОВКИ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ СИЛЫ

Современный уровень развития техники предъявляет повышенные требования к точности измерения усилий. Все чаще возникает необходимость измерять большие усилия, выражающиеся сотнями и тысячами тонн. Поэтому весьма актуальной является задача разработки методов и аппаратуры для воспроизведения и передачи значений силы с целью поддержания единства измерения в стране.

Воспроизведение значений силы может быть осуществлено различными методами. Для этой цели могут быть использованы тепловые, электромагнитные и другие физические явления, однако до настоящего времени применяют только метод непосредственного нагружения, так как в современных условиях он является наиболее точным, хотя и связан с некоторыми неудобствами; из них основные: а) величина силы непосредственно зависит от ускорения силы тяжести в данном пункте, вследствие чего определение силы привязано к определенному месту; б) невозможность воспроизведения усилий, направленных не в вертикальном направлении; в) громоздкость грузов, необходимых для воспроизведения больших усилий, выражающихся сотнями или тысячами тонн.

Главную область, в которой необходимо воспроизведение и измерение силы, составляют машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Высокая точность измерения силы нужна для определения пределов прочности, текучести, пропорциональности и других характеристик. Согласно ГОСТ 1497—42 «точность показаний нагрузки» у испытательных машин определяется погрешностью в $\pm 1\%$. При ответственных испытаниях указанная точность недостаточна и погрешность должна быть понижена до $\pm 0,5\%$.

подавляющее большинство испытательных машин строится с предельной нагрузкой до 100 тс. Поэтому диапазон усилий до 100 тс следует считать «основным», в котором должна быть обеспечена наибольшая точность и надежность воспроизведения и измерения силы. Такие нагрузки могут быть получены в эталонной установке до 100 тс методом непосредственного нагружения. Вследствие многоступенчатости поверочной схемы при передаче значений силы от эталонной установки до рабочей машины происходит накопление погрешностей, величина которых возрастает примерно в 50 раз. Следовательно, погрешность воспроизведения силы на эталонной установке в основном диапазоне должна быть не более 0,01%.

При непосредственном нагружении воспроизводимое усилие будет равно:

$$P = \frac{mg}{g_0} \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_m}\right) = \frac{mg}{g_0} k, \quad (1)$$

где m — масса гирь будет определяться многократными измерениями на специальных равноплечих весах, по точности соответствующих техническим весам 2-го класса с образцовыми гирями 3-го разряда;

g — местное значение ускорения силы тяжести;

g_0 — значение ускорения силы тяжести, определенное в Потсдаме;
 $g_0 = 9,80665 \text{ м/сек}^2$;

ρ_n — плотность воздуха;

ρ_m — плотность материала гирь;

$$k = 1 - \frac{\rho_n}{\rho_m}.$$

Поэтому предельную погрешность определения массы следует принять равной 0,05 кг (при доверительной вероятности 99,7%).

Предельные значения погрешностей остальных величин, входящих в выражение (1), можно принять равными: $\Delta g = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/сек}^2$; $\Delta \rho_n = 3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$; $\Delta \rho_m = 50 \text{ кг/м}^3$ (для стали).

Общая погрешность воспроизводимого значения силы будет:

$$D_p = \sqrt{D_m^2 + D_g^2 + D_k^2} < 0,005\%.$$

Если принять, что погрешность значения силы, возникшая вследствие трения в шаровой опоре, составляет $D_{оп} = 0,005\%$, то суммарная погрешность установки может быть оценена:

$$D = \sqrt{D_p^2 + D_{оп}^2} = 0,007\%.$$

Таким образом, при самых неблагоприятных условиях суммарная погрешность установки не будет превышать 0,01%, т. е. указанной выше величины.

Применение метода непосредственного напряжения целесообразно во всех случаях, когда требуется воспроизведение усилий с наивысшей точностью и постоянством, т. е. прежде всего для эталонных и поверочных работ в области механических измерений.

Рациональное устройство эталонной или образцовой установки должно обеспечивать воспроизведение и измерение усилий в условиях непрерывного возрастания нагрузки от нуля до максимума и затем убывания ее до нуля. Режим работы такой установки можно выразить схемой I:

$$0\% - 10\% - 20\% \dots 90\% - 100\% - 90\% \dots 20 - 10\% - 0\%.$$

Однако большинство существующих установок не может работать по приведенной выше схеме I, что, по нашему мнению, является их существенным недостатком. Режим работы этих установок можно выразить схемой II:

$$0\% - 10\% - 0\% - 20\% - 0\% - 30\% - 0\% \text{ и т. д.}$$

Такое устройство эталонных силовых установок частично оправдывается тем, что образцовые силоизмерительные машины 2-го разряда в большинстве случаев могут работать как по схеме I, так и по схеме II. Поэтому сами они могут быть аттестованы по схеме II и тем не менее градуировка образцовых динамометров на них может производиться по схеме I.

Все же более предпочтительным является устройство эталонных силовых установок, работающих по схеме I, которые более универсальны и удобны в работе. Заметим, что установки, работающие по схеме I, могут работать также по схеме II.

Ниже рассмотрены наиболее характерные схемы нагружающих устройств установок с непосредственным нагружением.

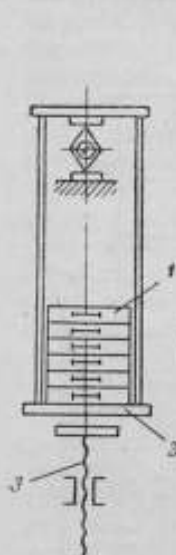


Рис. 1.

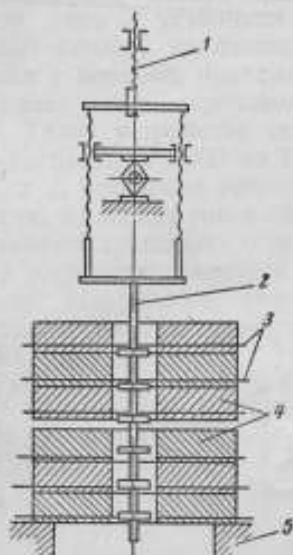


Рис. 2.

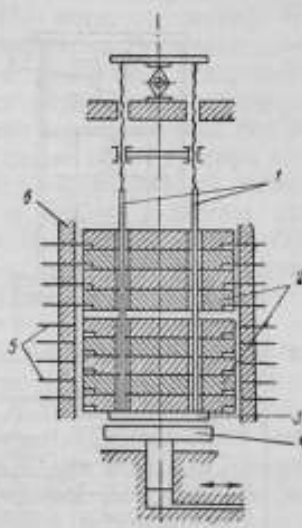


Рис. 3.

На рис. 1 изображена схема простейшего нагружающего устройства, применяемого в установках до 250 кгс. Здесь гири 1 определяемого веса накладываются вручную на поддон 2. Для приложения нагрузки к динамометру служит винтовой домкрат 3. Нагружение производится по схеме I. Недостатком такого устройства является наложение гирь вручную, что требует значительного физического напряжения оператора и не гарантирует плавности приложения нагрузки.

Для более значительных нагрузок, например в образцовых приборах Бринелля до 3000 кгс, применяют нагружающее устройство по схеме, изображенной на рис. 2. Подвешивание гирь 4 к грузовой штанге 2 осуществляется с помощью шиберов 3, перемещаемых вручную по радиальным пазам, сделанным в гирях. Гири, не подвешенные к грузовой штанге, лежат на раме основания 5 установки. Опускание штанги при переключении гирь, а также подъем ее и опускание при приложении нагрузки к динамометру, осуществляются винтовым подъемником 1. Нагружение производится по схеме II. Помимо основного недостатка данного устройства — нагружения только по схеме II, конструкция его не может быть применена в больших установках, в которых управление должно осуществляться с пульта. Так как шиберы находятся на самих гирях, то перемещение их можно осуществить только вручную.

На рис. 3 изображена схема нагружающего устройства эталонной силовой установки до 10 000 кгс. Гири 2, участвующие в нагружении, лежат на поддоне 3, укрепленном на нижних концах грузовых штанг 1.

Гири, не участвующие в нагружении, лежат на шиберах 5, перемещаемых по направляющим, имеющимся в колоннах 6 установки. Подъем всех гирь, необходимый для переключения шиберов, а также подъем и опускание поддона с гирями при приложении и снятии нагрузки на динамометр осуществляются посредством гидравлического подъемника 4, расположенного внизу установки. Нагружение производится только по схеме II, что является основным недостатком этой установки. Кроме того, нижнее расположение подъемника допускает качание грузовой

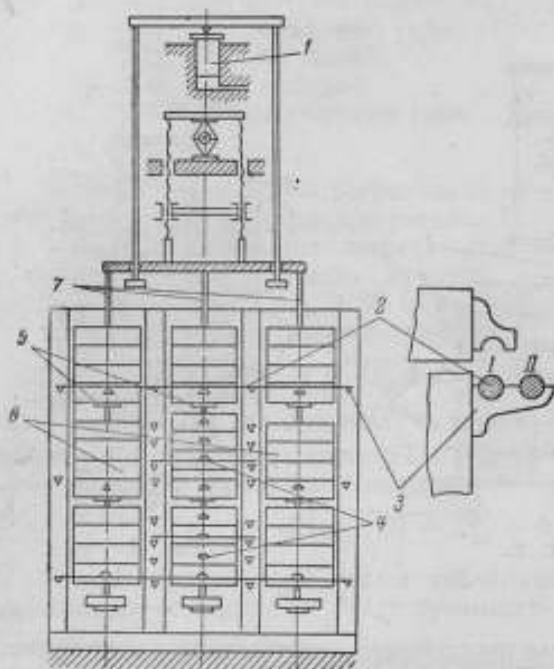


Рис. 4.

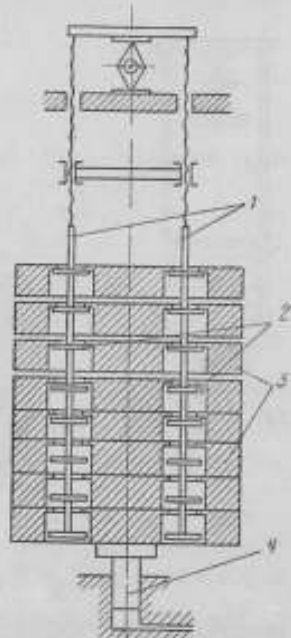


Рис. 5.

рамы, вследствие чего возможно эксцентричное приложение нагрузки к динамометру. Механизм перемещения шиберов в этой установке с помощью системы тросов громоздок и мало надежен.

Также несовершенно и притом весьма примитивно по конструкции нагружающее устройство силовой установки до 50 000 кгс, построенной в Англии. Схема нагружающего устройства показана на рис. 4. Гири 6 весом каждая по 1000 кгс имеют прямоугольную форму и расположены в три ряда. Для переключения нагрузок все гири с помощью гидравлического подъемника 1 приподнимаются вверх. Затем у тех гирь, которые должны быть подвешены к грузовым штангам 7, стальные стержни 2, расположенные по концам гирь, перекадываются в гнезда, имеющиеся на неподвижных кронштейнах 3 колонн из положения I в положение II. Тогда при опускании те из гирь, у которых стержни остались в положении I, своими кронштейнами 4 будут опираться на неподвижные кронштейны. Там же, где стержни переложены в положение II, гири повиснут на поддонах 5 грузовых штанг, и их вес создаст нагрузку, приложенную к динамометру. Кронштейны на гирях и колоннах, а также соответствующие им стальные стержни имеются в таком количестве

и расположены таким образом, что возможно приложить любую нагрузку от 3000 до 50 000 кгс через 1000 кгс. Нагружение производится только по схеме II. Установка является неудобной в работе вследствие необходимости каждый раз вручную переключать из одного положения в другое стальные стержни, вес которых составляет 20 кг и более.

Одной из наиболее совершенных является силовая установка до 10 000 кгс системы Гоппе. Схема нагружающего устройства этой установки показана на рис. 5. На грузовых штангах 1 имеются опорные тарелки 2 по числу гирь 3 установки. Расстояние между соседними тарелками несколько больше толщины гирь. По мере опускания гири поочередно, начиная с верхней, повисают на тарелках грузовых штанг. Подъем и опускание гирь производится с помощью гидравлического домкрата 4. Такое устройство позволяет осуществлять возрастание или убывание нагрузки от 1000 до 10 000 кгс через 1000 кгс без разгрузки до нуля, т. е. установка работает по схеме I. Когда гири висят на грузовых штангах, то между ними образуется зазор, равный расстоянию между тарелками грузовых штанг за вычетом толщины гирь. Недостатком этого устройства является невозможность получения большого числа ступеней нагружения. Значительное же увеличение количества гирь вследствие необходимости зазоров между ними сильно увеличило бы общую высоту установки.

Видоизменением установки Гоппе является установка до 50 350 кгс (110 000 фунтов), принадлежащая Национальному бюро стандартов (США), схема которой изображена на рис. 6. Нагружающее устройство этой установки в момент приложения нагрузки представляет собой гирлянду из гирь 4, соединенных между собой посредством опорных стержней 5 со шляпками, укрепленными на верхней плоскости каждой гири. Верхняя гиря с помощью короткой грузовой штанги 3, имеющей на конце шляпку, соединяется с рамкой 2 реверсора. Нижняя гиря в ненагруженном состоянии лежит на плоском основании 6. При подъеме рамки посредством гидравлического подъемника 1 вверх гири — одна за другой, начиная с самой верхней, — приподнимаются, образуя между собой зазоры. Таким образом, к рамке может быть приложена непрерывно возрастающая по ступеням нагрузка. Нагружение производится по схеме I. Указанный выше дефект установки Гоппе — недостаточное большое число возможных ступеней нагружения — относится и к данной установке. Это послужило причиной того, что позже установка была модернизирована путем добавления 9 малых грузов (на схеме не показаны). Это все же не дало возможности получать все нагрузки по схеме I. Большая часть возможных нагрузок может быть получена только при частичном разгрузении, т. е. по схеме II. Следует отметить, что примененное в данном устройстве верхнее расположение подъемника обеспечивает более правильное приложение нагрузки к динамометру.

Рассмотренные выше схемы нагружающих устройств недостаточно универсальны. Даже те из них, которые работают по схеме I, позволяют получать немногие, вполне определенные значения силы по этой схеме. Нами предложена схема нагружающего устройства*, являющаяся наиболее универсальной и вместе с тем сравнительно простой и компактной. Как видим из схемы (рис. 7), отличительной особенностью устройства является применение двух кольцевых траверз: верхней 3 и нижней 4. Каждая из траверз может механически перемещаться по ходовым винтам 2, подвешенным к верхней плите 9, охватывая при этом столку гирь 7 одинакового размера. Каждая гиря представляет собой круглый диск,

* Авторское свидетельство № 115814.

на боковой поверхности которого имеются карманы 5 для шиберов 8, а в центре — отверстие, через которое проходит грузовая штанга 1. Вокруг центрального отверстия на верхней плоскости гири имеется направляющий конический выступ, который может входить в коническое углубление на нижней плоскости вышележащей гири. Центральная штанга, проходя через отверстия в гири, заканчивается на нижнем

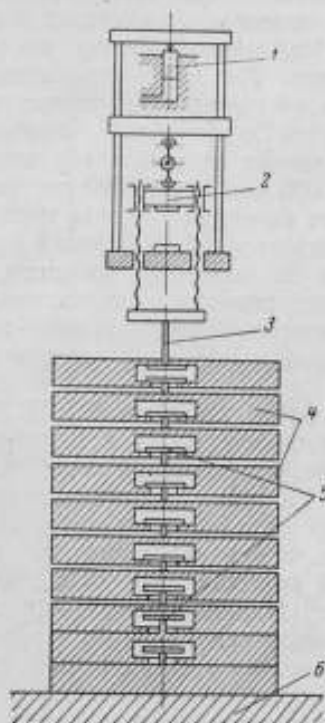


Рис. 6.

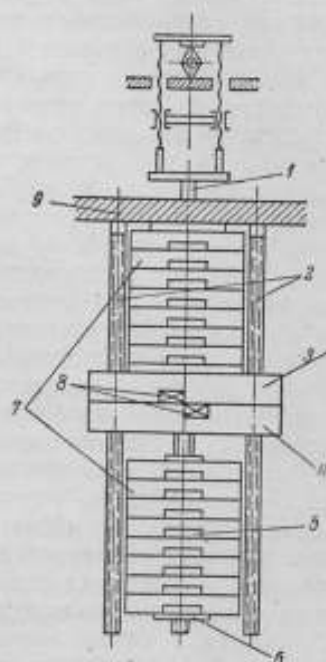


Рис. 7.

конце опорной площадкой 6. В каждой траверзе имеются механическидвигаемые и выдвигаемые шиберы 8, которые могут входить в карманы любого груза.

В исходном положении вся стопка гирь лежит на шиберах, принадлежащих обоим траверзам. При необходимости приложения нагрузки шиберы верхней траверзы выводятся из карманов нижней гири, после чего эта траверза поднимается вверх настолько, чтобы ее шиберы оказались против карманов гири, которая должна стать нижней, и вдвигаются в эти карманы. Затем нижняя траверза вместе с лежащими на ее шиберах гирями опускается вниз до тех пор, пока эти гири не улягутся на опорную площадку грузовой штанги. После этого шиберы нижней траверзы убираются, траверза быстро поднимается вверх до упора в верхнюю траверзу и шиберы нижней траверзы вдвигаются в карманы нижней гири рядом с шиберами верхней траверзы. При разгрузке эта процедура должна быть выполнена в обратном порядке.

Описанное нагружающее устройство является наиболее универсальным, так как позволяет производить нагружение по любой схеме при самых различных ступенях нагружения и различных способах приложения нагрузки. Кроме того, устройство разбирается без применения подъ-

емного крана, все гири с помощью кольцевых траверз могут быть поочередно вынуты из установки или собраны в ней.

Перечень и краткая характеристика некоторых известных нам силовых установок с непосредственным нагружением даны в таблице.

Номер рисунка, где дана схема установки	Принадлежность и место установки	Пределы измерения, кгс	Количество гирь и их состав	Степень нагружения, кгс	Схема нагружения	Суммарная погрешность, %
1	ВНИИМ, Ленинград	10 ÷ 250	20×12 + +10×1, всего 13	10	I	0,025
2	ВНИИМ, Ленинград	62,5 ÷ 3 000	250×11 + +187,5 + +62,5, всего 13	250	II	0,2
3	ВНИИМ, Ленинград	200 ÷ 10 000	1000×9 + +200×4 + +100×1, всего 14	100	II	0,025
4	ГУМ, Варшава НФЛ, Тэддингтон	3000 ÷ 50 000	1000×48, всего 48	1000	II	0,05
5	ЛИЖД, Ленинград	1000 ÷ 10 000	1000×9, всего 9	1000	I	0,025
6	НБС, Вашингтон	907 ÷ 50 350	4536×10 + +453,6×9, всего 19	453,6	I—II	0,02
7	ВНИИМ, Ленинград (проектируется)	1000 ÷ + 100 000	1000×99, всего 99	1000	I	0,01

Воспроизведение больших усилий (свыше 100 тс)

При воспроизведении значений силы свыше 100 тс нецелесообразно применение установки с непосредственным нагружением по следующим причинам:

а) объем и вес установки возрастает приблизительно пропорционально воспроизводимому усилию, поэтому такие установки чрезвычайно дороги и неудобны в эксплуатации;

б) точность воспроизведения силы в диапазоне свыше 100 тс может быть понижена вследствие того, что при сравнительно небольшом количестве имеющихся большегрузных динамометров, которые подлежат градуировке, можно обойтись единственной в стране исходной силоизмерительной машиной; вследствие этого становятся излишними некоторые промежуточные звенья поверочной схемы и потому имеется меньше оснований опасаться нарушения единства измерения силы в стране;

в) испытательные машины, развивающие усилия свыше 100 тс, применяются главным образом при механических испытаниях частей сооружений, строительных материалов и т. п., где допускается погрешность измерения силы в 2—3%. Поэтому требования к точности измерения силы в этом диапазоне могут быть снижены по сравнению с «основным» диапазоном.

По нашему мнению, для воспроизведения усилий свыше 100 тс необходимо создать образцовые гидравлические силоизмерительные машины с неуплотненными поршнями на различные пределы измерений. Кроме того, должны быть созданы образцовые переносные динамометры для передачи значений силы рабочим испытательным машинам при их поверке, а также ряд образцовых динамометров повышенной точности для сличения образцовой силоизмерительной машины с эталонной установкой до 100 тс.

При передаче единицы измерения можно применить метод параллельного включения динамометров. Так, для поверки образцовой машины до 3000 тс можно создать следующий набор динамометров:

а) 3 динамометра до 100 тс, градуируемых на эталонной установке;

б) 3 динамометра до 300 тс, градуируемых по первым на машине 3000 тс, которая необходима только как силовозбудитель;

в) 4 динамометра до 900 тс, градуируемых по предыдущим на машине 3000 тс, которая необходима только как силовозбудитель.

Следует заметить, что по имеющимся данным применение метода параллельного включения динамометров лишь незначительно снижает точность поверочных средств.

Поверочная схема

Схема, соответствующая высказанным соображениям, дана на рис. 8.

Центральное место в схеме занимает «основной» диапазон усилий (до 100 тс). Основанием поверочной схемы является эталонная силовая установка с непосредственным нагружением до 100 тс. Исходными для построения схемы являются допустимые погрешности испытательных машин, которые, как указано выше, могут составлять 0,5—1%. Все остальные звенья схемы построены так, чтобы допустимая погрешность низшего звена была в 2—3 раза больше допустимой погрешности соответствующего высшего звена.

Для больших усилий (свыше 100 тс) в схеме предусмотрена образцовая силоизмерительная машина до 3000/1000 тс, с помощью которой могут быть отградуированы образцовые динамометры 3-го разряда, служащие для поверки большегрузных испытательных машин. Предполагается, что одна образцовая силоизмерительная машина до 3000/1000 тс достаточна для воспроизведения значений силы свыше 100 тс. При таких условиях для поддержания единства измерений силы в стране в диапазоне больших усилий достаточно производить периодические сличения показаний этой машины с эталонной силовой установкой до 100 тс, применяя упомянутый выше метод умножения усилий.

Такая поверочная схема может быть введена в действие с момента создания эталонной силовой установки до 100 тс и образцовой силовой измерительной машины до 3000/1000 тс.

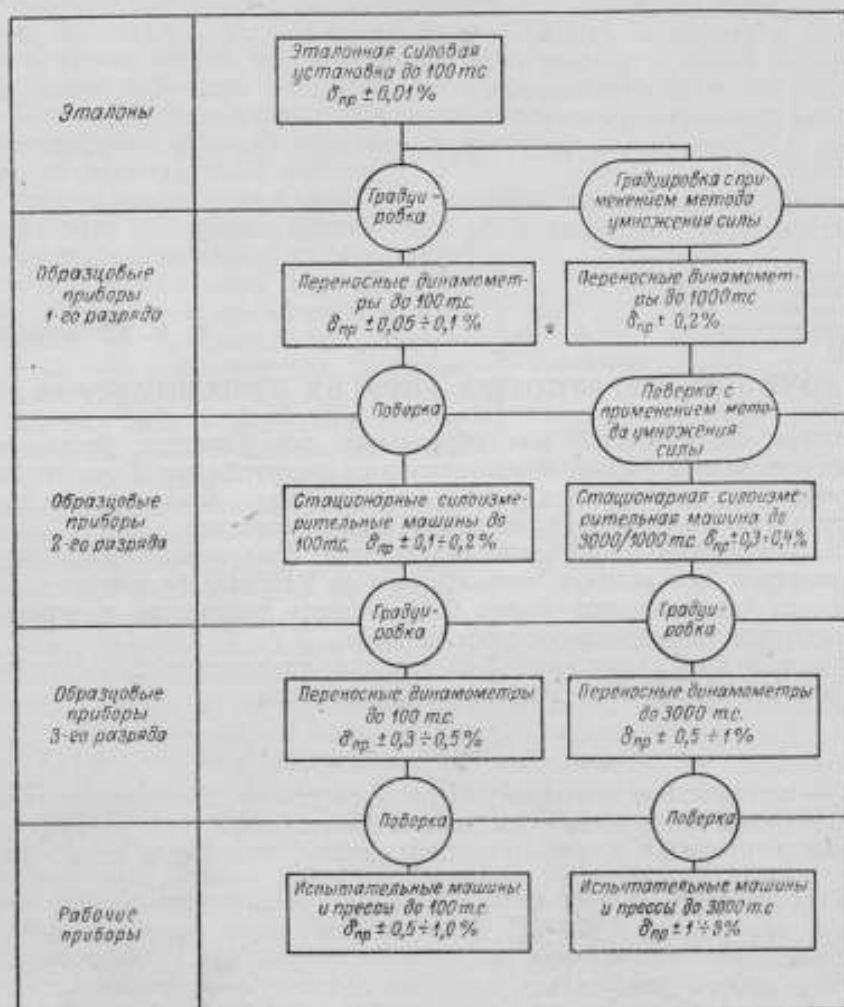


Рис. 8.

Выводы

1. Метод непосредственного нагружения в настоящее время является единственным методом воспроизведения силы с наивысшей точностью.
2. Диапазон усилий до 100 тс следует считать «основным» диапазоном, в котором должны быть обеспечены наибольшая точность и надежность воспроизведения и измерения силы. Погрешность воспроизведения силы в этом диапазоне должна быть не более 0,01%, что вполне достижимо при применении метода непосредственного нагружения.
3. Рациональный режим работы нагружающих устройств установок с непосредственным нагружением должен осуществляться по схеме I.

ТОЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВЫХ УПРУГИХ ДИНАМОМЕТРОВ

Нормы погрешностей для образцовых динамометров, регламентированные поверочной схемой и действующими инструкциями [1], составляют для динамометров 1-го разряда 0,1% от измеряемого значения, для динамометров 3-го разряда 0,5% от измеряемого значения.

Статистическая обработка результатов градуировки образцовых динамометров 3-го разряда, выполненная во ВНИИМ за период с 1949 по 1956 г., показала, что более 95% общего количества поверенных динамометров удовлетворяют этим нормам.

Далее, любой динамометр 3-го разряда, удовлетворяющий требованиям инструкции, имеет абсолютную погрешность

$$\Delta = 0,005 \cdot 0,1N,$$

где N — номинальное значение измеряемого усилия. Поэтому он может быть применен в качестве образцового динамометра 1-го разряда для нагрузок в пределах второй половины шкалы, так как в этом случае

$$\frac{\Delta}{P} = \frac{\Delta}{0,5N} = 0,1\%;$$

здесь P — измеряемое усилие.

Следует отметить, что для каждой отдельно взятой градуировки динамометра относительная вариация, как правило, не превышает 0,2% от измеряемого значения в диапазоне $0,3 \div N$, где N — номинальное усилие, измеряемое динамометром. На низких ступенях измеряемых усилий и особенно на $0,1 N$ относительная вариация в некоторых случаях достигает 0,8% от измеряемого значения, что для динамометров, бывших в употреблении, допускается инструкцией. Эти результаты указывают, что упругие динамометры при известных ограничениях могут дать высокую точность.

Инструкция требует, чтобы диапазон усилий, измеряемых образцовыми установками и динамометрами, включал пределы измерений $0,1 N \div N$, где N — предельная нагрузка. Столь широкие пределы измерений являются существенным препятствием в осуществлении динамометров 1-го разряда. Это требование легко выполнимо только для установок, основанных на весовом методе. Для упругих динамометров, как показал опыт, постоянной является абсолютная погрешность, которая

практически не зависит от нагрузки. Поэтому погрешность, отнесенная к измеряемому значению, возрастает по закону гиперболы при равномерном уменьшении измеряемой нагрузки.

Высказанное положение экспериментально подтверждается. Действительно, из общего числа поверенных во ВНИИМ за период с 1949 по 1956 г. динамометров при исключении трех низших ступеней измерения 70% имеют вариацию показаний, не превышающую 0,1% от измеряемого значения. Аналогичным сужением диапазона измеряемых значений при повышении разряда образцовых приборов пользуются и в других областях измерительной техники.

Рассматривая результаты градуировок образцовых динамометров 3-го разряда наилучших конструкций, убеждаемся, что большинство из них на второй половине шкалы удовлетворяет требованиям 1-го разряда.

Доля поверок этих динамометров, выраженная в процентах от общего числа выполненных поверок, представлена в табл. 1.

Данные табл. 1 позволяют заключить, что из общего количества поверенных динамометров, начиная с 0,5 от номинальной нагрузки, вариация показаний соответствует требованиям, предъявляемым к образцовым динамометрам 1-го разряда, для подавляющего большинства градуировок.

Итак, для осуществления динамометра 1-го разряда следует уменьшить диапазон измеряемых усилий. Кроме того, по аналогии с другими приборами, снабженными равномерной шкалой, можно предложить употребление приведенной погрешности, т. е. введение классов точности. Эта характеристика отражает картину действительных погрешностей динамометров и дает возможность более широкого применения.

Переходя к оценке погрешностей образцовых динамометров, отметим, что основным источником погрешностей динамометра является несовершенство формы упругого элемента, вызывающее недопустимую концентрацию напряжений¹. Удачный выбор формы упругого элемента повышает точность динамометра. Расчет формы упругого тела и величины деформации при предельной нагрузке для большинства существующих конструкций динамометров выполнен Н. Г. Токарем. Существенное требование к конструкции переносного динамометра — портативность его при сохранении требуемой точности и стабильности показаний.

Общая погрешность упругих динамометров складывается из следующих составляющих:

- 1) погрешность передаточного механизма, отражающаяся на стабильности показаний динамометров;
- 2) погрешность отсчета по прибору, измеряющему упругую деформацию;
- 3) температурные погрешности;
- 4) погрешность, связанная с влиянием времени выдержки динамометра под нагрузкой;

Таблица 1

Динамометр	Доля поверок в %, удовлетворяющих требованиям 1-го разряда при нагрузках	
	0,5 от номинальной	номинальной
Токаря	86	93
Хабера	88	92
Вацау	84	88
ЛИМСХ	77	86

¹ См. статью автора: «К вопросу о выборе формы упругого тела для динамометров» (стр. 29 настоящего сборника).

5) погрешность, вызванная несовпадением оси динамометра с направлением действующей нагрузки.

Оценка каждой из них позволит составить суждение о точности упругих динамометров.

Влияние передаточного механизма на точность динамометров

Повышение чувствительности измерения при пользовании данным отсчетным устройством и упругим элементом возможно путем введения передаточного механизма в виде однократного или многократного рычага.

Чувствительность измерения в однорычажной системе пропорциональна величине передаточного числа рычага. Удлинение большого плеча рычага ограничено жесткостью механизма, габаритами динамометра и допусками на предел прочности. Укорочение малого плеча ограничено качеством подгонки цапф. Из литературы [2] известно, что многократный рычаг практически не только не дает повышения точности, но служит дополнительным источником появления погрешностей: уже двойной рычаг оправдывается лишь в тех случаях, когда габариты прибора не позволяют пользоваться более длинным плечом однократного рычага или по техническим условиям малое плечо не может быть достаточно укорочено.

Практическая работа с упругими динамометрами приводит к выводу, что динамометры без передаточного механизма обладают большей стабильностью.

В связи со сказанным следует избегать использования передаточного механизма при осуществлении динамометра 1-го разряда.

Выбор устройства, измеряющего упругую деформацию динамометров

Многочисленные эксперименты показали, что оптимальное перемещение указателя прибора составляет интервал $0,2 \div 5$ мм.

Образцовые упругие динамометры имеют условную шкалу, поэтому основную роль играют воспроизводимость показаний и точность отсчета (отнесенная к измеряемому значению), зависящие главным образом от отсчетного устройства.

Из анализа существующих устройств [3] следует, что для установленных пределов измерений наиболее пригодны микроскоп, микрометр и индикатор.

Подробное исследование этих приборов показало, что все они пригодны для динамометров 1-го разряда, но в следующих пределах (мм): микроскоп Цейсса $0,5 \div 5$; микрометр $1,5 \div 5$; индикатор $1,5 \div 5$.

Высокую точность может дать интерференционный метод, но его применение осложняет конструкцию динамометра. Кроме того, использование данного метода вряд ли окажется приемлемым при передаче значения силы для некоторых из гидравлических образцовых машин, обладающих значительными вибрациями.

Рассмотренные методы измерения упругой деформации вновь приводят к выводу о необходимости сужения диапазона измеряемых динамометрами усилий или о переходе для них к погрешности от предельного значения.

Влияние температуры на показания динамометров

Величина модуля упругости, как известно, является функцией температуры. Костер [4] приводит результаты исследований 32 чистых металлов. На основании этих исследований можно установить отсутствие единой аналитической закономерности для различных металлов. В настоящее время теоретически подсчитаны модули упругости для некоторых

металлов [5], исходя из их связи в кристаллических решетках, и выведено, что отношение температурного коэффициента модуля упругости к коэффициенту теплового расширения данного металла есть величина постоянная. По данным Л. А. Гликмана, температурная зависимость модуля упругости носит параболический характер. В справочнике физических констант [6] указано, что модуль упругости изменяется от температуры по формуле

$$E = B \cdot e^{-\frac{C}{T-t}},$$

где T — температура плавления металла;
 t — температура испытания металла;
 B и C — константы металлов.

В узком диапазоне температур с достаточной степенью точности может быть принят закон линейной зависимости модуля упругости от температуры.

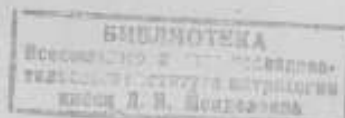
Американские стандарты [7] указывают, что модуль упругости уменьшается на 0,05% при повышении температуры на 1°С для сталей, содержащих не более 5% специальных элементов. Приведенный результат не всегда согласуется с результатами градуировок динамометров различных систем и конструкций. Подтверждение сказанному дает табл. 2, где приведены результаты градуировок динамометров различных конструкций, выполненных при различных температурах. Как видно из табл. 2, температурный коэффициент для различных динамометров

Таблица 2

Динамометр			Номера градуировок	t_i , °C	A_{t_i}	α_{t_i} , %
номер	система	предельная нагрузка, тс				
149	Токаря	5	1	20,5	843,0	—
			2	20,5	843,0	—
			3	22,0	843,3	0,02 ₅
250	Хабераера	10	1	16,0	433,0	0,05 ₀
			2	20,0	434,0	—
			3	22,2	434,2	0,02 ₅
			4	22,0	434,4	0,04 ₅
			5	22,0	434,4	0,04 ₅
1	ГЗИП	50	1	12,3	440,1	0,04 ₀
			2	20,0	441,6	—
			3	23,2	442,2	0,04 ₅
132	ГЗИП	5	1	20,4	920,0	0,04 ₀
			2	20,5	920,1	0,05 ₀
			3	22,4	921,0	0,05 ₀
3177	Вацау	10	1	14,0	2123,7	0,05 ₅
			2	20,0	2130,7	—

t_i — температура градуировки в °C;
 A_{t_i} — средний отсчет по динамометру в делениях шкалы при температуре t_i °C;
 α_{t_i} — температурный коэффициент динамометра, вычисленный по формуле

$$\alpha_{t_i} = \frac{A_{t_i} - A_{20}}{A_{20}} \cdot \Delta t_i \cdot 100\%$$
 где A_{20} — отсчет по динамометру при 20°С.



меняется в пределах $0,02\% \div 0,05\%$ при изменении температуры на 1°C . Следовательно, при изменении температуры на 10°C (предел, допускаемый инструкцией 20—49) показания динамометра могут измениться на $0,25\text{—}0,55\%$.

Верхний предел этой величины превышает погрешность, допустимую не только для динамометров 1-го разряда, но даже и для динамометров 3-го разряда.

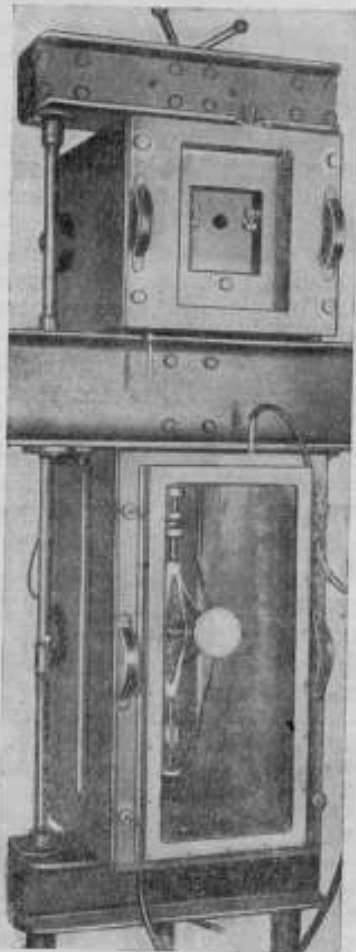


Рис. 1. Общий вид термокамер.

Зависимость показаний динамометров от температуры определяется не только изменением модуля упругости, но также наличием в динамометре деталей из разнородного материала с разными коэффициентами линейного расширения и рядом других факторов.

Исследования динамометров систем Токаря, Хабера и Вацау позволили решить следующие задачи:

1) установить продолжительность температурного выравнивания упругих тел различной конфигурации до температуры окружающей среды (20°C);

2) оценить изменение показаний динамометров после длительного пребывания их в нестандартных температурных условиях;

3) установить зависимость между показаниями данного динамометра, градуируемого при различных температурах.

Для решения этих задач необходимо было обеспечить надлежащее термостатирование динамометров с регулировкой температуры в пределах от 15 до 25°C [1]. С этой целью была разработана и осуществлена термокамера, которая удовлетворяла следующим условиям:

1) возможность поддержания постоянства температуры в течение длительного времени (не менее восьми часов);

2) допустимые колебания температуры должны находиться в пределах $\pm 0,5^\circ\text{C}$ от заданной температуры;

3) градуировка и отсчеты показаний по динамометру должны выполняться при закрытой термокамере.

Общий вид термокамер представлен на рис. 1. Верхняя термокамера предназначена для исследования переносных динамометров на сжатие, нижняя — для динамометров на растяжение. Обе камеры крепятся к неподвижной траверсе эталонной установки, поэтому вес их не входит в качестве дополнительного усилия к весу прилагаемых грузов.

Размеры камер в мм, приведенные ниже, обеспечивают градуировку всех известных нам конструкций динамометров (табл. 3).

Термокамера, схема которой приведена на рис. 2, представляет латунный кожух I с двойными стенками, между которыми циркулирует вода, подаваемая насосом ультратермостата системы Геплера. Темпера-

тура воды регулируется при помощи контактного термометра. Постоянство ее может поддерживаться с погрешностью, не превышающей $0,1^{\circ}\text{C}$, в течение восьми и более часов. Для уменьшения потери тепла лучеиспусканием снаружи камера покрыта алюминиевой фольгой. Для уменьшения потери тепла теплопроводностью камера обшита текстолитом и дельта-фанерой 2. Между латунной камерой и обшивкой предусмотрен теплоизоляционный слой воздуха 3 толщиной 70 мм. В боковых стенках термокамеры имеются шесть втулок 4—8 с эбонитовой изоляцией. Две из них, 4 и 5, предусмотрены для установки термометров, две другие, 7 и 8, — для ввода осветителя. На задней стенке термокамеры установлены два вентилятора (на схеме не показаны). В верхней и нижней стенках термокамеры соосно просверлены два отверстия, заканчивающиеся втулками 6—6, через которые проходят верхний и нижний

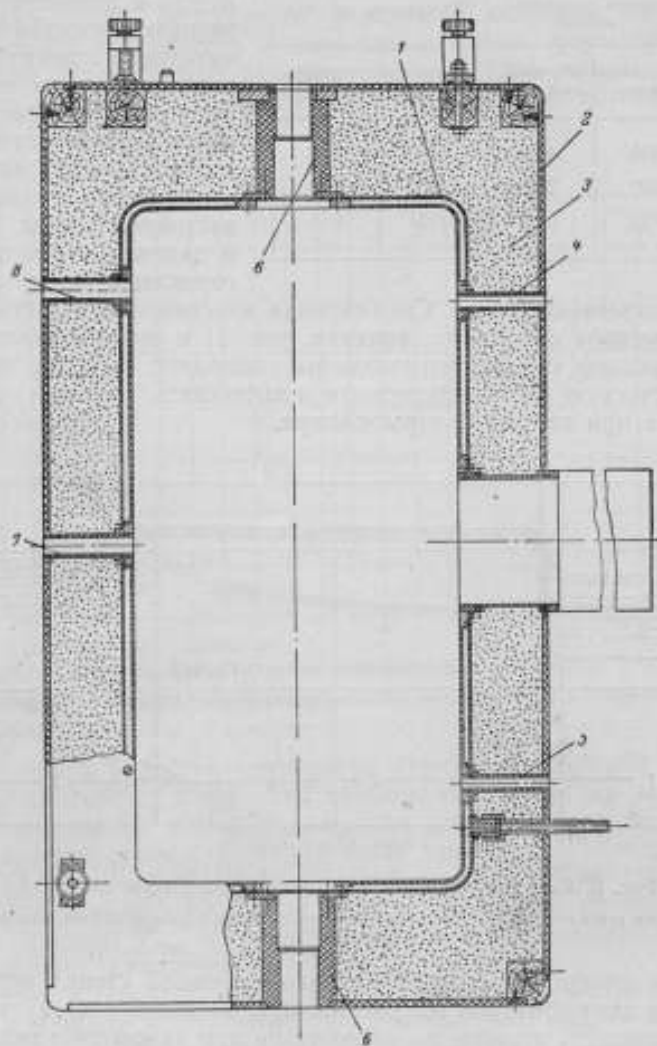


Рис. 2. Схема термокамеры.

том и дельта-фанерой 2. Между латунной камерой и обшивкой предусмотрен теплоизоляционный слой воздуха 3 толщиной 70 мм. В боковых стенках термокамеры имеются шесть втулок 4—8 с эбонитовой изоляцией. Две из них, 4 и 5, предусмотрены для установки термометров, две другие, 7 и 8, — для ввода осветителя. На задней стенке термокамеры установлены два вентилятора (на схеме не показаны). В верхней и нижней стенках термокамеры соосно просверлены два отверстия, заканчивающиеся втулками 6—6, через которые проходят верхний и нижний

винты эталонной установки, предназначенные для крепления поверяемого динамометра. Установив динамометр в термокамере, на корпус его укрепляют термомпары. Крепление термомпар осуществляли с помощью

Таблица 3

	Камера на растяжение		Камера на сжатие	
	наружная часть	внутренняя часть	наружная часть	внутренняя часть
Длина	500	455	500	455
Ширина	400	260	400	260
Высота	790	620	415	255

небольших, специально изготовленных магнитов. Крепление «горячих спаев», термомпар к динамометрам с помощью магнитов имеет значительное преимущество перед креплением термонизолирующими материалами, так как в первом случае в большей степени исключается возможность образования застойной зоны. Передняя и задняя стенки камеры изготовлены съемными и герметически закрывающимися.

Специальная двустворчатая дверка (камера для динамометров на сжатие, верхняя, рис. 1) с цилиндрическим отверстием в передней стенке термокамеры позволяет вывести за пределы камеры отсчетную часть микроскопа и выполнять отсчеты по шкале динамометра при закрытой термокамере.

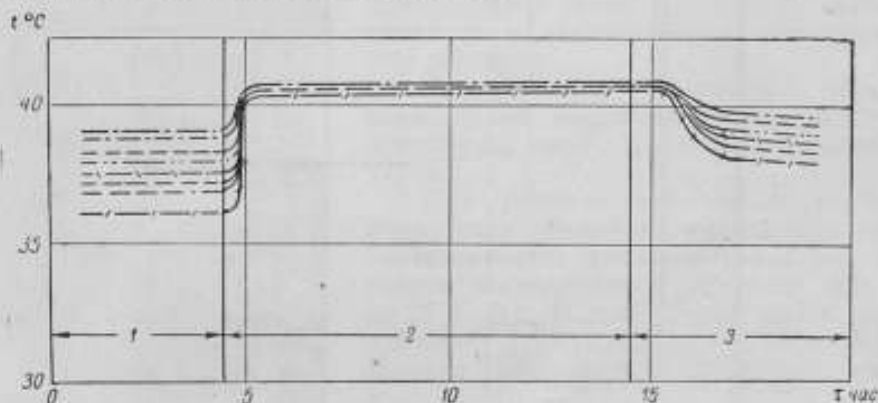


Рис. 3. Распределение температур по объему термокамеры:

1 — до включения вентилятора; 2 — при включенном вентиляторе; 3 — после выключения вентилятора.

Наличие смотрового стекла в другой съемной стенке термокамеры (камера для динамометров на растяжение, нижняя, рис. 1) также позволяет производить отсчеты по индикатору при закрытой камере.

Корректировка начального положения индикатора, крепление термомпар и другие операции могут быть выполнены через боковое отверстие без снятия передней или задней стенок.

Результаты исследования распределения температур по объему термокамеры изображены на рис. 3 и представляют весьма удовлетворительную картину, так как менее чем через час после включения вентилятора наступает выравнивание температур с погрешностью, не превышающей $\pm 0,5^\circ$. При исследовании был охвачен диапазон температур $10 \div 40^\circ \text{C}$.

Были созданы две термокамеры: одна для поверки и исследования динамометров на растяжение, другая — на сжатие. Термокамеры

обеспечивают осуществление и поддержание постоянства температуры в пределах $10 \div 40^\circ \text{C}$ с погрешностью, не превышающей $\pm 0,5^\circ \text{C}$, в течение более чем 10 часов.

Время, необходимое для температурного выравнивания упругих динамометров

Согласно теории регулярного режима [8] основное свойство процессов простого охлаждения и нагревания можно формулировать так: по истечении достаточного времени после начала охлаждения наступает регулярный режим, отличительной особенностью которого является

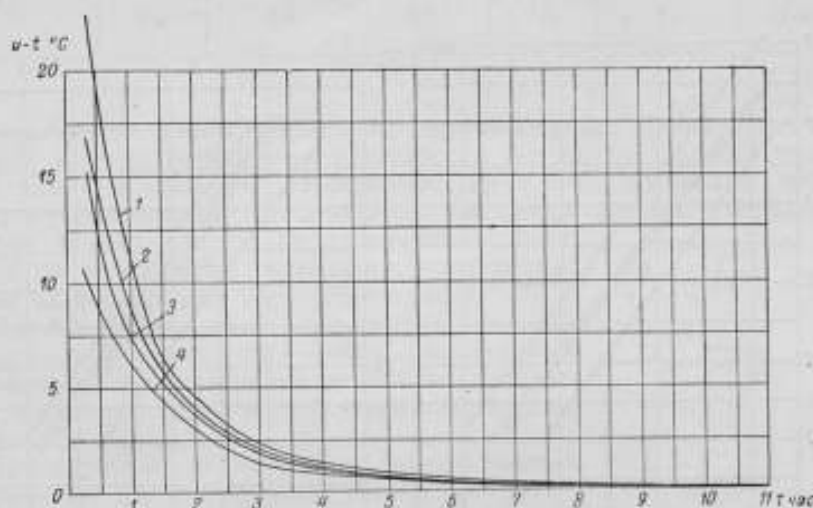


Рис. 4. Температурное выравнивание цилиндра:

1 — центра цилиндра; 2 — боковой поверхности; 3 — верхнего торца; 4 — нижнего торца.

то, что логарифм разности температур (любой точки тела) и окружающей среды изменяется с течением времени по линейному закону. Экспериментальная оценка темпа охлаждения динамометров без вывода их из строя неосуществима. Поэтому было проведено исследование охлаждения цилиндра, эквивалентного наиболее массивным деталям упругого элемента динамометра. Эта замена позволила производить измерения температуры в любой точке цилиндра путем высверливания в нем соответствующих отверстий.

Диаметр и высота исследуемого цилиндра составляли 60 мм. Цилиндр помещали в термостат при температурах $t_{\text{нач}} = 45, 50, 55, 60$ и 70°C на 8—10 час., считая, что за указанный срок происходит полный прогрев цилиндра. Далее нагретый цилиндр помещали в термостат с температурой $t = 20^\circ \text{C}$. Размещение термодатчиков по цилиндру было следующим: одна термодатчик помещалась в высверленной полости, в центре цилиндра; две термодатчики с помощью магнитов укреплялись на верхнем торце цилиндра; одна термодатчик — на боковой поверхности, и один термодатчик прижимался весом цилиндра к изолятору, на который был установлен цилиндр. Через каждые 30—60 мин. регистрировалась температура до тех пор, пока не наступало температурное равновесие с требуемой степенью точности.

На рис. 4 приведены графики температурного выравнивания различных точек цилиндра, предварительно прогретого до 70°C .

Аналогичные кривые были получены и для других разностей температур $u_{нач} - t$, причем $u_{нач}$ изменялась от 45 до 70° С.

Аналитически они могут быть выражены в виде экспоненциальной зависимости:

$$u_{нач} - t = e^{-\frac{1}{m} A \tau}$$

где A — постоянная величина, не зависящая от времени и температуры;

τ — время, час.;

m — темп регулярного режима в $\frac{1}{\text{час}}$.

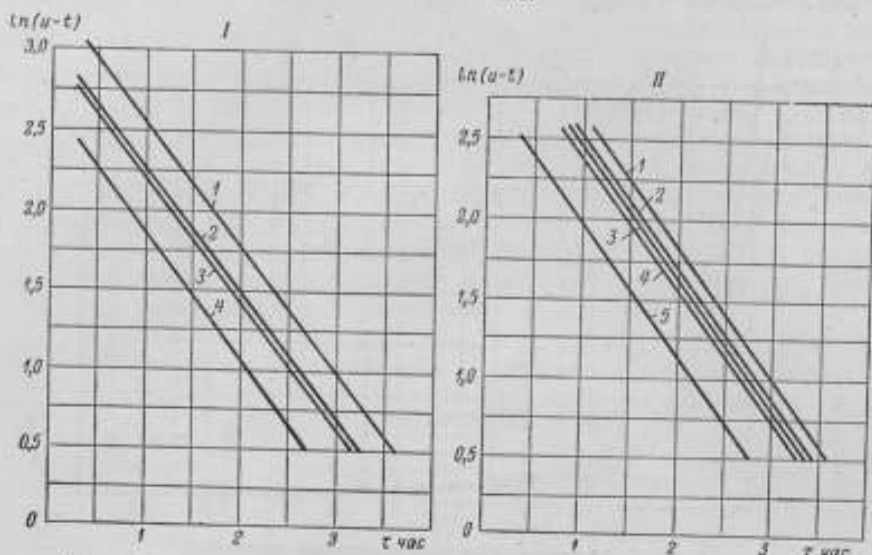


Рис. 5. Графоаналитическое определение темпа регулярного режима:

I — цилиндр: 1 — центр цилиндра; 2 — боковая поверхность; 3 — верхний торец; 4 — нижний торец.
II — динамометр в точках: 1 — касания упругого элемента динамометра с шаровой опорой; 2 — на противовесе микроскопа; 3 — на держателе шкалы динамометра; 4 — на упругом элементе динамометра; 5 — на держателе микроскопа.

В результате графоаналитических преобразований этих кривых на рис. 5 (I) представлено семейство прямых, угол наклона которых характеризует темп регулярного режима $m = 0,81 \frac{1}{\text{час}}$. Среднее значение темпа регулярного режима для различных значений $u_{нач}$ в пределах 45 ÷ 70° С составило

$$m_{\text{ср}} = (0,85 + 0,05) \frac{1}{\text{час}} \quad (2)$$

Чтобы установить время, необходимое для температурного выравнивания, следует прологарифмировать уравнение (1) и решить его относительно τ :

$$\tau = \frac{1}{m} \ln \frac{A}{u-t}$$

Ниже приведены значения времени температурного выравнивания, полученные экспериментальным и расчетным путем (табл. 4).

Таким образом, задание начальной температуры среды, в которой находилось исследуемое тело, позволяет с погрешностью, не превышающей 1 час, определить время, необходимое для достижения температур-

Таблица 4

Разность температур $u_{нач} - t, ^\circ\text{C}$	Время для $u - t = 0,5^\circ\text{C}$, час.			Время для $u - t = 0,2^\circ\text{C}$, час.		
	расчетное	экспериментальное		расчетное	экспериментальное	
		цилиндр	динамометр		цилиндр	динамометр
5	3,0	—	—	4,5	—	—
10	3,5	—	—	5,5	—	—
20	4,5	4,8	5,0	6,0	6,5	6,5
30	5,0	5,0	5,5	6,5	6,8	7,0
50	6,0	5,5	6,0	7,5	8,0	8,0

ного равновесия динамометра и окружающей среды. При этом не существенно, в каких точках — на поверхности или внутри данного изотропного тела — определять температуру его. Это позволило перейти к экспериментальному решению поставленной задачи — определения времени температурного выравнивания динамометров по результатам измерения температуры только на поверхности упругого элемента.

Диапазон начальных температур, который варьировали от -30 до $+60^\circ\text{C}$, практически включает в себя возможные изменения температуры в течение года на территории Советского Союза.

Исследуемые динамометры выдерживались в термостате или холодильном шкафу при заданной температуре в продолжение 8—10 час. Затем динамометр устанавливали в помещении с температурой окружающей среды $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Термопары, как и в случае с цилиндром, крепились к динамометру магнитами; размещение их показано на рис. 6. Дальнейший ход эксперимента проводили по аналогии с опытами над цилиндром.

Результаты исследований графически представлены на рис. 7 и 8. Если отбросить начальные участки иррегулярного режима, то можно заметить подобие кривых температурного выравнивания. Как термообогрев, так и охлаждение динамометров приближаются к закону экспоненциальной зависимости.

Графоаналитическое определение темпа регулярного охлаждения динамометра Вацау 3177 для $u_{нач} = 70^\circ$ представлено на рис. 5 (II). При построении графиков применена полулогарифмическая анаморфоза. Среднее значение темпа регулярного режима $m = (0,84 \pm 0,05) \frac{1}{\text{час}}$.

практически совпало с темпом регулярного режима исследуемого нами цилиндра [ср. уравнения (2) и (3)]. Таким образом, установлена возможность определения темпа регулярного режима динамометров по измерению температуры на его поверхности. Экспериментально полученные значения времени, достаточные для выравнивания температуры тела с температурой окружающей среды, различны для различных исходных разностей температур $u_{нач} - t$ и даны в табл. 4.

Приведенные данные указывают, что работу с динамометрами следует производить на следующий день после доставки его на пункт

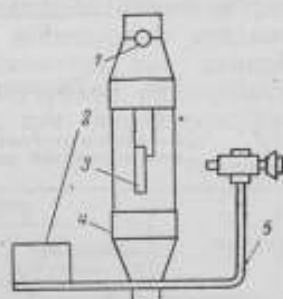


Рис. 6. Размещение термопар на динамометре.

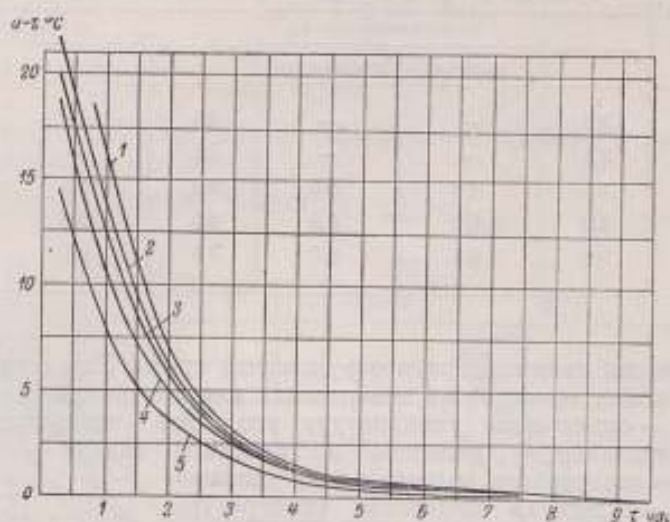


Рис. 7. Температурное выравнивание динамометра при охлаждении в точках:

1 — касания упругого элемента с шаровой опорой; 2 — на противовесе; 3 — на держателе отсчетной шкалы динамометра; 4 — на упругом элементе динамометра; 5 — на держателе микроскопа.

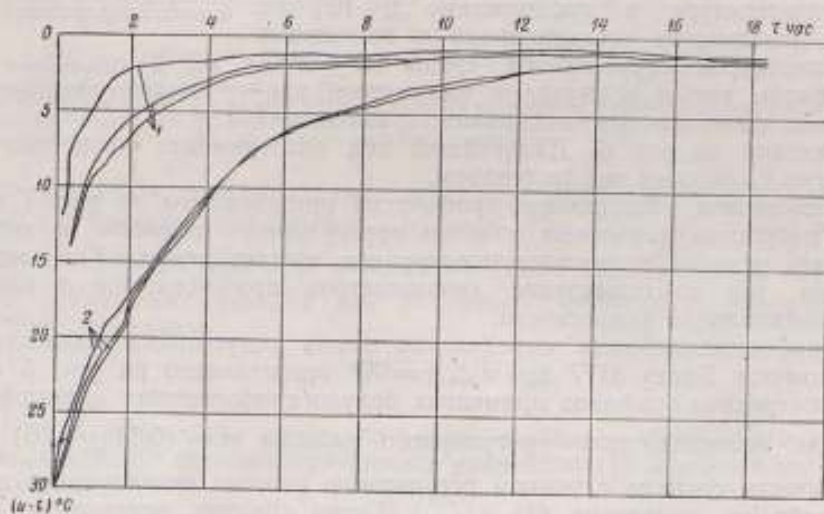


Рис. 8. Температурное выравнивание динамометра при нагревании в различных точках:

1 — динамометра № 3178; 2 — динамометра № 120.

исследования, если разность температуры доставленного динамометра и помещения, где будут выполняться работы, превышает 10°C .

Сходимость результатов градуировок динамометров, выполненных до и после температурных исследований в диапазоне $-30 \div +70^{\circ}\text{C}$, дает основание сделать заключение о том, что длительное пребывание динамометров при температуре, отличной от 20°C , не влияет на их показания.

Температурный коэффициент упруго напряженного динамометра

Созданные термокамеры позволили осуществить градуировку группы динамометров при различных температурах. Регистрация температуры в процессе исследования осуществлялась с помощью термометров и группы термпар. Диапазон температур, в котором выполнялась каждая из градуировок, находился в пределах $+12 \div +30^{\circ}\text{C}$. В каждом опыте постоянство температуры поддерживалось с погрешностью, не превышающей $0,5^{\circ}\text{C}$. К градуировке не приступали до тех пор, пока не наступало температурное равновесие между динамометром и окружающей средой, т. е. пока разность температур, измеряемая термпарами в течение 1—2 час., не превышала $0,5^{\circ}\text{C}$. После этого на каждой ступени нагружения снимали по десяти отсчетов показаний динамометра. Колебания температуры в процессе градуировки исследуемых динамометров не превышали $0,2^{\circ}\text{C}$. Для каждого динамометра при данной температуре было выполнено не менее трех градуировок различными наблюдателями. По окончании серии градуировок при данной температуре устанавливали новый режим в термокамере. Вновь добивались температурного равновесия и проводили аналогичную серию наблюдений. Для каждого динамометра было выполнено по три-четыре серии таких наблюдений при температурах $+15$, $+20$, $+25$ и $+30^{\circ}\text{C}$. Полученные результаты позволили перейти к определению величины изменения показаний динамометра, приходящейся на 1°C . В связи с этим для каждой ступени нагружения была составлена система совокупных уравнений, включающих температурный коэффициент.

Средние значения температурного коэффициента α_t упруго напряженных динамометров приведены в табл. 5.

Итак, в рассмотренном диапазоне температур для исследованных нами динамометров можно принять закон прямо пропорционального изменения показаний их в зависимости от температуры. Средний температурный коэффициент исследованных динамометров, выраженный в процентах, составляет 0,03 на 1°C .

Следовательно, показание упругого динамометра при любой температуре A_t в диапазоне $15 \div 25^{\circ}\text{C}$ может быть найдено по формуле:

$$A_t = A_{20} [1 + \alpha (t - 20)],$$

где A_{20} — отсчет по динамометру при $+20^{\circ}\text{C}$;
 t — температура в диапазоне $+15 \div +25^{\circ}\text{C}$;

Таблица 5

Динамометр			α_t
номер	система	предельная нагрузка, тс	
3178	Вацлау	10	0,0003 ₁
513	Хаберер	6	0,0003 ₂
529	"	3	0,0003 ₃
120	Токарь	10	0,0002 ₀

Для динамометров Вацлау найденное значение коэффициента в пределах допустимых погрешностей совпадает с результатом, полученным Хормутом [10].

α_t — температурный коэффициент динамометра, находящегося в напряженном состоянии $\alpha_t = (0,0003 \pm 0,00015) \frac{1}{\text{град}}$.

Из приведенной формулы следует, что допустимые отклонения температуры в процессе градуировки динамометра должны не превышать для 1-го разряда 1°C , для 3-го разряда 5°C .

Полученные данные вполне согласуются с результатами статистической обработки градуировок других динамометров, выполненных при различных температурах, и с теоретическими определениями температурного модуля упругости других исследователей. Согласно работам [4—7, 9] температурный коэффициент модуля упругости стали и упругих динамометров находится в пределах $0,0002 \div 0,0005$ при изменении температуры на 1°C .

Влияние времени выдержки на показания динамометров

Инструкцией 20—49 предусмотрена предварительная пятиминутная выдержка динамометра под предельной нагрузкой. Некоторые гидравлические образцовые установки по конструктивным особенностям не обеспечивают или не допускают пятиминутной выдержки. Для них пяти-

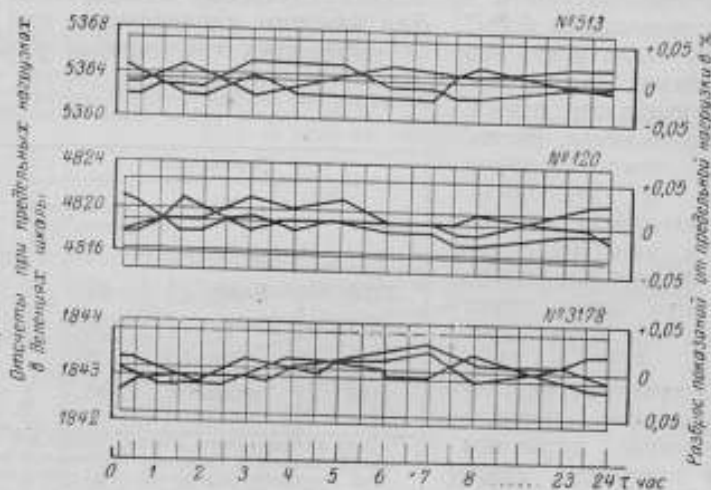


Рис. 9. Влияние времени выдержки на показания динамометра.

минутная выдержка заменена трехкратным обжатием на предельную нагрузку. Допустимость этой замены подтверждена проведенными нами опытами.

Дальнейшие исследования заключались в том, что к поверяемому динамометру прикладывалась предельная нагрузка и через каждые 30—60 мин. снимался отсчет.

Результаты наблюдений с группой динамометров различных конструкций (рис. 9) позволили прийти к выводу, что если отсчет показаний взят спустя более чем через 1 мин. после приложения (снятия) нагрузки, то время выдержки в пределах погрешностей, допустимых для динамометров 1-го разряда, не оказывает влияния на их показания. Указанное справедливо при условии отсутствия внешних помех — таких, как толчки и вибрации, которые могут исказить показания прибора.

В практике работы с динамометрами не исключена возможность их перегрузки. Результаты градуировки динамометров, получивших перегрузку, обычно теряют стабильность показаний во времени. Выполняя поверку динамометра, получившего перегрузку, поверитель может не заметить этой неисправности. Поэтому в поверку необходимо принимать динамометры с результатами предыдущей градуировки. Если последние отсутствуют, то нельзя ручаться за надежность поверки.

Влияние угла перекоса на показания динамометра

Влияние перекосов на показания динамометров были исследованы путем градуировки их при различных углах наклона оси динамометров по отношению к действующей нагрузке: $\alpha_1 = 0^\circ$ (вертикальное положение), $\alpha_2 = 12,5'$, $\alpha_3 = 30'$ и $\alpha_4 = 58'$.

Сравнение результатов выполненных градуировок позволило установить отклонение показаний динамометров, градуированных при различных углах наклона, от результатов градуировки в вертикальном положении их (табл. 6).

Таблица 6

Угол перекоса, мин.	0	12,5	30	58
Отклонения, %	0	0,06	0,18	0,34

Экстраполируя полученные значения отклонений показаний динамометра от номинального значения в зависимости от угла перекоса, можно заключить, что при угле перекоса, не превышающем $5'$, величина этого отклонения будет ничтожно мала по сравнению с погрешностью, допустимой для динамометров 1-го разряда.

Заключение

Выполненные исследования показали возможность создания образцовых динамометров 1-го разряда с датчиком в виде упругого тела при условии сужения диапазона измеряемых значений.

Главной составляющей общей погрешности динамометра является случайная погрешность, так как составляющая систематических погрешностей при соблюдении ряда условий, рассмотренных выше, может быть доведена до пренебрежимо малой величины. Исключение составляет систематическая погрешность передаточного механизма, устранение которой крайне затруднено, так что применение этого механизма в динамометрах 1-го разряда нежелательно.

Время температурного выравнивания динамометров находится в пределах $2 \div 16$ час. в зависимости от массивности упругого элемента, разности температур тела и окружающей среды, а также от требуемой точности температурного выравнивания.

Температурный коэффициент напряженных динамометров составляет $0,0003 \frac{1}{\text{град}}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Контроль машин и приборов для механических испытаний металлов, сост. Бейль С. Я. и Фяцченко Д. И., Металлургиздат, Л. — М., 1949.
2. Беридт Г., Основы и приборы технических линейных измерений, пер. с нем., Госиздат, М. — Л., 1953.
3. Городецкий И. Е., Основы механических измерений в машиностроении, Машгиз, М., 1950.
4. Koster W., Die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls, Zeitschrift Metallkunde, Bd. 39, H. 1, 1948.
5. Фридман Я. Б., Механические свойства металлов, Оборонгиз, М., 1952.
6. Сборник физических констант, под ред. Дорфмана А. Г. и Фриша С. Е., ОНТИ, М. — Л., 1948.
7. Американские стандартные методы испытания металлов, пер. с англ., Каталогиздат НКМ СССР., ГИТТЛ, М., 1939.
8. Кондратьев Г. М., Регулярный тепловой режим, М., 1954.
9. Normuth K., Der Einfluss der Temperatur auf mechanische Kraftmessgeräte, «Feingeräte Technik», Bd. 7, H. 4, 1958.

М. И. КОТОЧИГОВА

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ФОРМЫ УПРУГОГО ТЕЛА ДЛЯ ДИНАМОМЕТРОВ

Выбор компактной и надежной формы упругого тела тесно связан с вопросами исследования распределения напряжений в динамометре. Желательно, чтобы в выбранной форме напряжения распределялись как можно более равномерно. При этом весьма существенно свести к минимуму концентрации напряжений.

Наиболее наглядным и пригодным для исследования распределения напряжений является метод фотоупругости. Этот метод позволяет не только дать качественную оценку напряженного состояния, но и количественно подсчитать величину напряжений, возникающих в упругом теле.

Основные положения метода фотоупругости

Изотропная прозрачная пластинка под действием приложенных к ней внешних сил приобретает свойства кристаллической анизотропной пластинки, т. е. становится двояколучепреломляющей. Экспериментально установлено, что разность хода δ этих двух лучей, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях в пределах упругости пропорциональна разности главных напряжений и определяется по формуле

$$\delta = c \cdot b_m (\sigma_1 - \sigma_2), \quad (1)$$

где c — оптическая постоянная материала (в нашем случае $c = 16 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{кг}$);

b_m — толщина модели (в нашем случае $b_m = 5 \text{ мм}$);

$\sigma_1 - \sigma_2$ — разность главных напряжений.

Для количественного определения разности главных напряжений необходимо наблюдать интерференцию двух лучей, возникающих при двойном лучепреломлении. В таком случае о напряженности в данной точке модели можно судить по порядку интерференции проходящей через эту точку полосы. Оптическая разность хода лучей равна:

$$\delta = n \cdot \lambda, \quad (2)$$

где n — порядок полосы интерференции;

λ — длина волны монохроматического света в мкм.

Из уравнений (1) и (2) следует, что разность главных напряжений в модели равна:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_{\text{мод}} = \frac{n\lambda}{cb_m} \quad (3)$$

Для перехода от напряжений в модели к напряжениям в динамометрах применяют законы механического и геометрического подобия модели и динамометра. При этом разность главных напряжений равна:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_{\text{ст}} = (\sigma_1 - \sigma_2)_{\text{мод}} \frac{P_{\text{лпм}} \cdot b_m}{P_m \cdot b} \quad (4)$$

где $P_{\text{лпм}}$ — предельная нагрузка на динамометр;
 P_m — предельная нагрузка на модель;
 b, b_m — соответственно толщины динамометра и модели.

Экспериментальное исследование распределения напряжений в моделях динамометров

Для экспериментального исследования распределения напряжений по сечению упругого тела были изготовлены плоские модели наиболее распространенных и интересных конструкций динамометров из целлулоида (рис. 1, а—г).

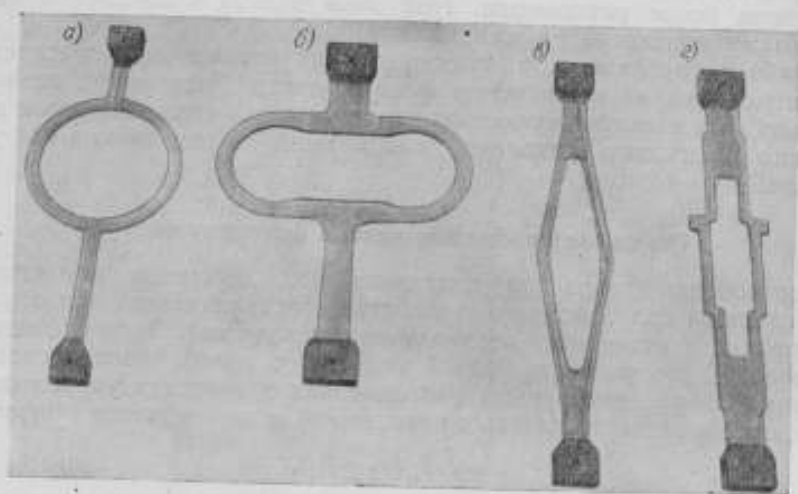


Рис. 1. Модели конструкций динамометров.

1. Модель 1 (рис. 1, а), форма упругого тела которой — круглое кольцо положена в основу образцовых динамометров Англии и Америки (кольца Ольсена).

В нашей модели участок сопряжения кольца с галтелями отличается от колец Ольсена, и распределение напряжений на этом участке не характеризует напряженное состояние указанных динамометров.

2. Модели 2 и 3, выполненные в виде замкнутого кривого бруса, изображены на рис. 1, б. Эта форма упругого тела получила широкое распространение в динамометрии и, в частности, применена в конструкциях динамометра Д-3 (модель 2), динамометра типа Вацау (модель 3) и других.

3. Вытянутый ромб конструкции Хаберера — модель 5 (рис. 1, в). Динамометры этой конструкции зарекомендовали себя хорошим постоянством показаний во времени.

4. Динамометр сложной конфигурации — модель 4 (рис. 1, г) конструкции Токаря.

Последний обладает наибольшей деформацией из числа известных нам динамометров при отсутствии интегрирующих передаточных механизмов.

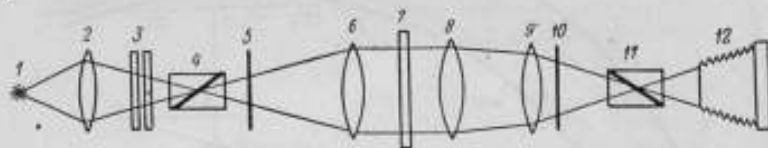


Рис. 2. Схема оптики поляризационно-проекционной установки ППУ-4.

1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — теплофильтр и светофильтр; 4 — поляризатор; 5, 10 — слюдяные пластины ($\frac{\lambda}{4}$); 6, 8 — линзы; 7 — модель; 9 — проекционный объектив; 11 — анализатор; 12 — фотокамера.

Для всех моделей геометрические размеры, за исключением толщины, выполнены в натуральную величину.

Для получения возможности сравнения результатов исследования характера напряженного состояния для различных моделей, а следовательно, и динамометров, был выполнен предварительный расчет предельных нагрузок, которые следует прикладывать к каждой из моделей с учетом коэффициентов геометрического и механического подобия. В табл. 1 приводим результаты расчета нагрузок, которые следует приложить к каждой модели.

Таблица 1

Конструкция модели	Предельная нагрузка на динамометр $P_{\text{ДП}}$, кгс	Толщина динамометра, мм	Нагрузка на модели, кгс
Круглое кольцо	3 000	51	22,012
Тип Д-3	3 000	45	24,900
Вацау	10 000	65	19,173 *
Токарь	10 000	50	49,800 *
Хаберер	6 000	46	48,704

* Действительные нагрузки в этих моделях пришлось уменьшить во избежание поломки модели.

Исследование моделей выполнялось на оборудовании и при непосредственном участии сотрудников лаборатории оптического метода ЛГУ имени А. А. Жданова.

Была использована проекционно-поляризационная установка типа ППУ-4 (рис. 2). Исследования выполнялись как в белом, так и в монохроматическом свете. Интерференционная картина при прохождении белого света фиксировалась на цветную пленку.

Интерференционная картина в монохроматическом свете при различных длинах волн, $\lambda = 436, 546, 578$ и 644 мкм, фиксировалась на черно-белые пластинки.

В наших опытах слюдяные пластины были исключены. Вместо них мы применяли метод двойной экспозиции при скрещенном и параллельном положениях плоскостей поляризации. На одну и ту же пластинку при равных интервалах времени мы экспонировали дважды. При скрещенных николях: первая экспозиция соответствовала взаимному положе-

нию лимбов поляризатора и анализатора $0-0^\circ$, вторая — положению $45-45^\circ$. При параллельных николях: первая экспозиция соответствовала взаимному положению лимбов поляризатора и анализатора $0-90^\circ$, вторая $45-135^\circ$.

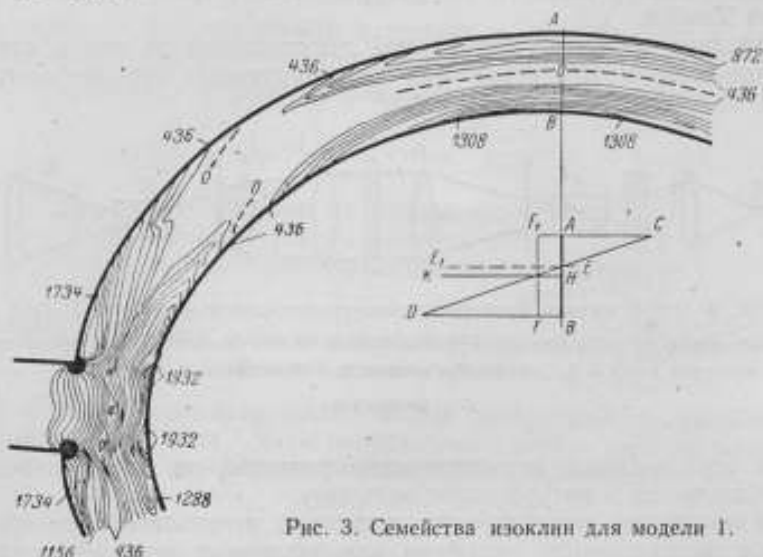


Рис. 3. Семейства изоклин для модели 1.

В результате эксперимента, выполненного с пятью моделями, мы получили 53 различных фотоснимка, из них 7 цветных, представляющих собой изохромы подвергнутого исследованию узла; каждый из 56 черно-

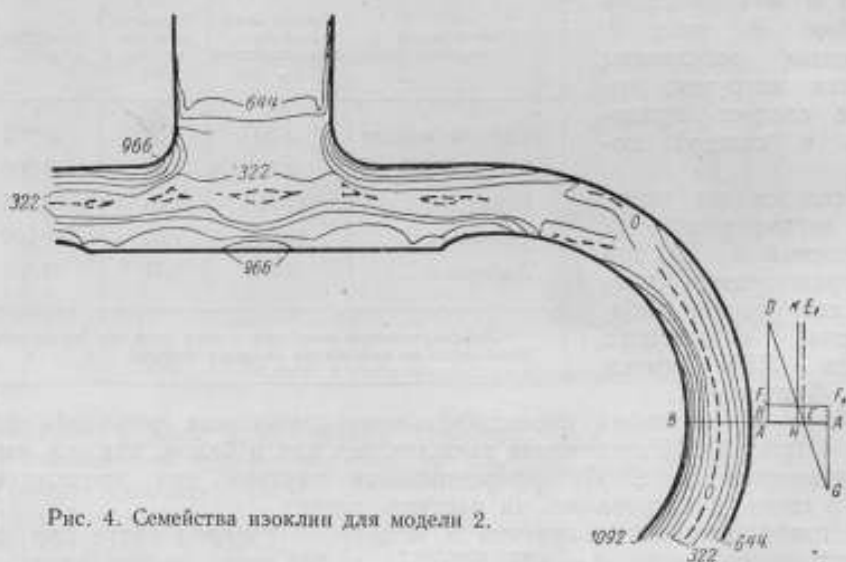


Рис. 4. Семейства изоклин для модели 2.

белых снимков представляет собой семейство изоклин, соответствующих различным длинам волн монохроматического света, проходящего через нагруженную модель.

На рис. 3—7 изображены с помощью эпидиаскопа семейства изоклин для каждой модели. Для расшифровки полученных результатов

и обозначения порядка полос интерференции мы пользовались цветными фотоснимками. Они легко позволили отличить изоклины от особых точек и установить положение полосы интерференции нулевого порядка. Порядок

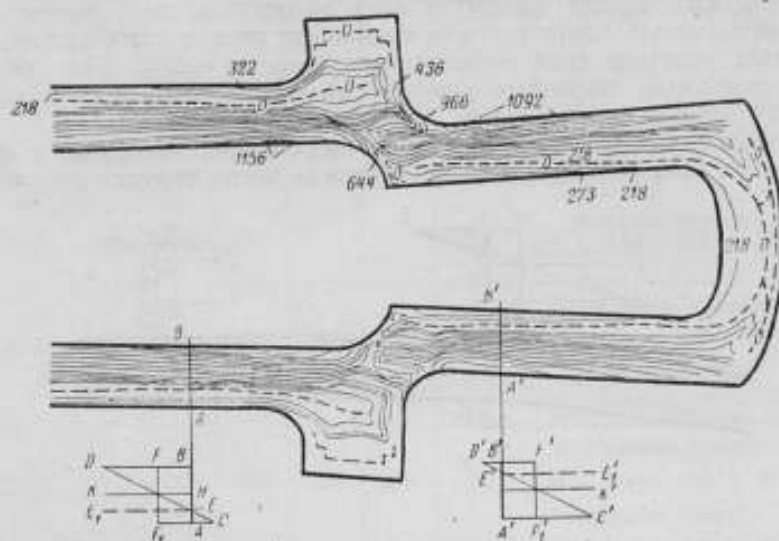


Рис. 5. Семейства изоклин для модели 3.

док интерференции определялся путем подсчета на черно-белом фотоснимке числа интерференционных полос, расположенных между нулевой полосой и данной изоклиной. Каждая изоклина на рис. 3—7 в соответ-

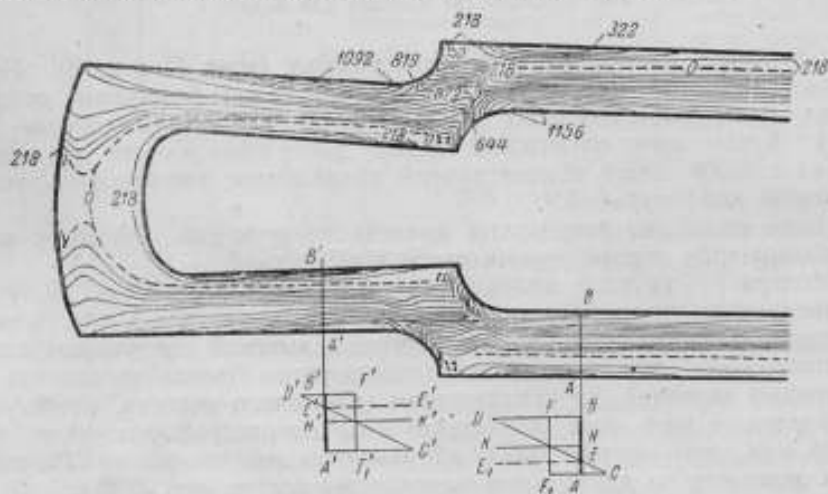


Рис. 6. Семейства изоклин для модели 4.

ствии с ее порядком интерференции обозначена цифрой. Зная порядок интерференции n и длину волны λ примененного монохроматического света, можно подсчитать и напряжение модели t в данной точке. В табл. 2 и на рис. 8 слева приведены значения напряжений t модели и натуры для наиболее характерных и интересных для всех динамометров зон напряжений. При этом были выделены следующие

- зоны: 1) *A* и *B*, соответствующие точкам приложения нагрузки; 2) *B*, соответствующая участкам наибольшего растяжения модели; 3) *Г*, соответствующая точкам перегиба, где момент меняет знак.

Эпюры изгибающих моментов всех замкнутых скоб имеют одну общую характерную особенность, а именно, на концах симметрично расположенных участков скоб моменты различны по знаку. Это обстоятельство позволило применить упрощенный способ отыскания моментов статически неопределимых рамок.

Сопоставление теоретических эпюр изгибающих моментов с фотодиаграммами напряжений показывает прежде всего хорошее совпадение

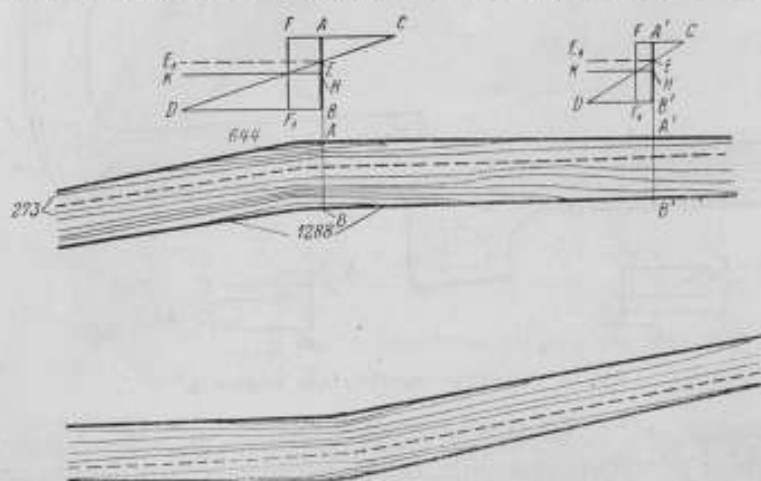


Рис. 7. Семейства изоклины для модели 5.

точек перегиба на эпюрах и фотодиаграммах (зона *Г*, рис. 8). Номинальные значения напряжений, определенные по формулам сопротивления материалов, хорошо совпадают с экспериментальными (см. ниже). Кроме того, оптический метод дает возможность установить участки с наибольшей концентрацией напряжения для пружин рассматриваемых конфигураций.

Ниже приводим результаты анализа напряжений, имеющих место в динамометрах перечисленных выше конструкций.

Модель 1 — круглое кольцо (рис. 3 и 8). В зоне *A* мы получили затемненные по углам участки, характеризующие переход к пластической деформации. Это явление свидетельствует о высокой степени концентрации напряжений при вершине входящего угла. Модель выполнена без переходных галтелей. За исключением указанного участка, наибольшее напряжение в этой зоне характеризуется оптической разностью хода в 1734 мик, что соответствует напряжению на модели в 216 кг/см^2 , а при пересчете на динамометр напряжение составляет 2900 кг/см^2 .

В зоне *B* максимальное расчетное напряжение составляет 3230 кг/см^2 .

В зоне *B* след нейтрального слоя¹ делит модель по ширине на две

¹ Линия пересечения нейтрального слоя (где нормальные напряжения равны нулю) с плоскостью поперечного сечения динамометра. Самое смещение следа нейтрального слоя к контуру свидетельствует о наличии большей или меньшей степени приближения деформации скобы к случаям линейного растяжения или сжатия. Этим свойством мы воспользуемся в дальнейшем для нахождения следа нейтрального слоя и растягивающих и изгибающих напряжений.

Таблица 2

Конструкция	Зона А			Зона Б			Зона В			Зона Г		
	модель		натура	модель		натура	модель		натура	модель		натура
	σ	τ	τ	σ	τ	τ	σ	τ	τ	σ	τ	τ
Кольцо в зоне прямых углов переход к пластиче- ской деформации	1932 242 3236			1308 164 2239			546 68 914			внутренний контур		
	1734	216	2902	872 109 1493			436 54 746			внешний контур:		
Тип-Дз	1932 242 3236			1911 239 3201			1288 148 2157 322 40 539			внутренний контур:		
							819 102 1372			внешний контур:		
Вацау	966 121 4830			966 121 4830			1092 136 5460 322 40 1610			внутренний контур:		
							644 80 3220 322 40 1610			внешний контур:		
Токарь верхняя	218 27 545			273 34 682 1156 144 2888			872 109 2180			(наибольшее на- пряжение в цен- тральной зоне дан- ного участка на контуре)		
				1092 136 2730 322 40 805								
Токарь нижняя	218 27 545			322 40 805 1156 144 2888			966 120 2415					
				1092 136 2730 322 40 805								
Хабсер							1288 148 2157 644 80 1079			внутренний контур:		
							644 80 1079 273 34 457			внешний контур:		

части. Наибольшее напряжение на внутреннем контуре составляет 2240 кг/см^2 (1308 ммк), на внешнем — 1500 кг/см^2 (872 ммк).

В зоне Г, соответствующей на эпюре моментов углу $\theta = 50^\circ 30'$ (рис. 3 и 8), происходит перемена знака изгибающих моментов и теоретически напряжения должны равняться нулю; на значительном участке модель остается практически ненапряженной. Полосы интерференции здесь сильно размыты и разрежены. Наибольшим напряжением на границе этой зоны отмечена оптическая разность хода порядка 546 ммк, что соответствует напряжению в динамометре в 914 кг/см^2 . Более подробная расшифровка распределения напряжений во всех динамометрах дана в табл. 2, на рис. 8 и на соответствующих фотодиаграммах напряжений на рис. 3—7.

Модели 2 и 3, динамометры Д-3 и Вацау (рис. 4 и 8). Во избежание разрушения к модели 3 была приложена нагрузка, втрое меньшая расчетной, поэтому результаты определения порядка полос интерференции

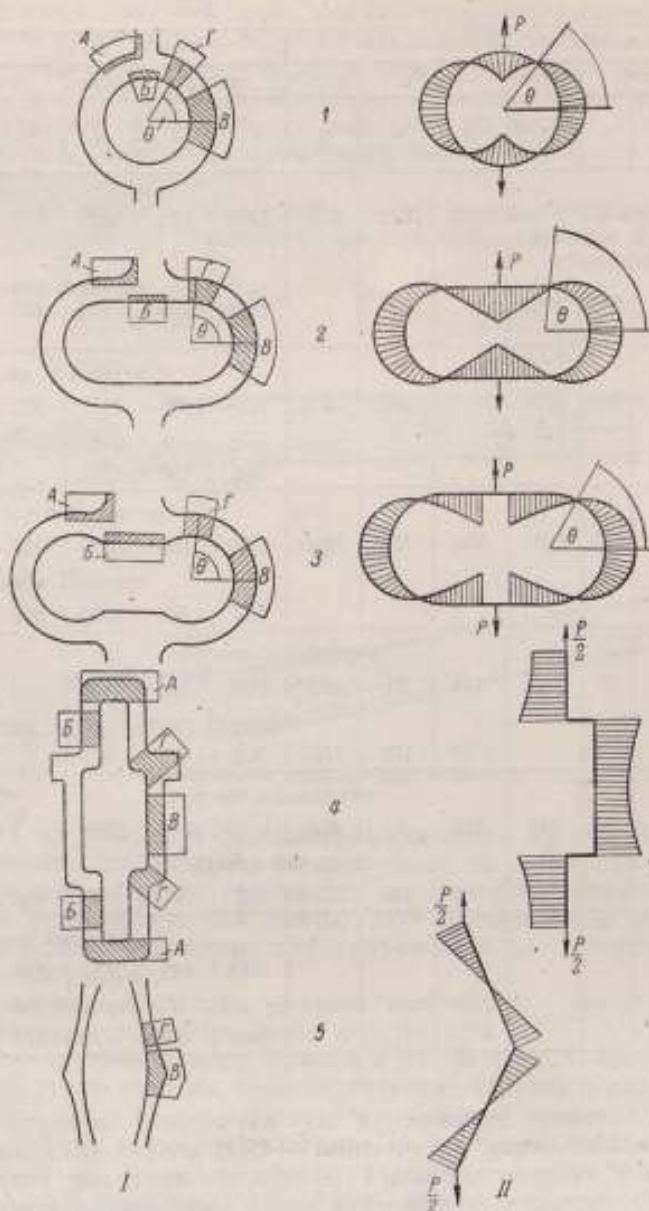


Рис. 8. Распределение напряжений в упругих динамометрах.

I — зоны и характеристика упругих элементов: 1 — модель 1, $P_{\text{lim}} = 3 \text{ тс}$, $\Delta l_{\text{max}} = 0,85 \text{ мм}$, $m = 2,2 \text{ кг}$; 2 — модель 2, $P_{\text{lim}} = 3 \text{ тс}$, $\Delta l_{\text{max}} = 0,75 \text{ мм}$, $m = 3,5 \text{ кг}$; 3 — модель 3, $P_{\text{lim}} = 10 \text{ тс}$, $\Delta l_{\text{max}} = 1,70 \text{ мм}$, $m = 8,7 \text{ кг}$; 4 — модель 4, $P_{\text{lim}} = 10 \text{ тс}$, $\Delta l_{\text{max}} = 5,30 \text{ мм}$, $m = 4,5 \text{ кг}$; 5 — модель 5, $P_{\text{lim}} = 6 \text{ тс}$, $\Delta l_{\text{max}} = 1,08 \text{ мм}$, $m = 2,5 \text{ кг}$; II — эпюры моментов: 1 — $M = \frac{P}{2} \left(\cos \varphi - \frac{2}{\epsilon} \right)$, $\varphi = 50^\circ 30'$; 2 — $M = \frac{P}{2} [D - \rho (1 - \cos \varphi)]$, $\varphi = 87^\circ 20'$; 3 — $M = \frac{P}{2} [D - (\rho - x)]$, $\varphi = 63^\circ$; 4 — $M = \frac{P}{2} (l - \delta + y)$; 5 — $M = \frac{c}{\text{ch}(kl)} [\text{ch}(kl) - 1]$, $y = \frac{c}{\text{ch}(kl)} [\text{ch}(kl) - 1]$; $\delta = \frac{P}{2} x \sin \varphi$; P_{lim} — предельная нагрузка в тоннах силы, Δl_{max} — деформация при предельной нагрузке; m — масса динамометра в кг.

на модели при пересчете на динамометр утраивались. Эти модели представляют более благоприятную картину распределения напряжений.

В зоне *A* галтель плавно сопряжена с кривым брусом, остаточная деформация на обеих моделях отсутствует. Правда, в модели 2 это напряжение остается максимальным и составляет 3236 кг/см^2 .

В модели 3 благодаря утолщению галтели и увеличению радиуса закругления напряжение в зоне *A* перестает быть максимальным и составляет 4830 кг/см^2 .

В зонах *B* этого же участка напряжение еще меньше, чем в зоне *A*, что обеспечено благодаря утолщению прямолинейного участка кривого бруса.

В зоне *B* след нейтральной линии делит модель по ширине на 2 части, от которых напряжения в направлении контура возрастают. Максимальное напряжение имеет место на внутреннем контуре, достигая 2157 кг/см^2 в динамометре Д-3 и 5460 кг/см^2 в динамометре Вацау.

Критической зоне *Г* соответствует на эпюре изгибающих моментов для модели 2 $\theta = 87^\circ 20'$, а для модели 3 $\sim \theta = 63^\circ$. Полосы интерференции сильно разрежены. Наибольшее напряжение на модели 2 характеризуется оптической разностью хода в 322 мкм , что соответствует напряжению в динамометре типа Д-3 539 кг/см^2 , в динамометре Вацау 1610 кг/см^2 .

Модель 4, динамометр конструкции Токаря (рис. 5, 6 и 8). По той же причине, что и для модели 3, нагрузка, прилагаемая к модели, в 1,5 раза меньше расчетной. Поэтому результаты подсчета порядка интерференции следует увеличивать в 1,5 раза.

Отметим, что напряжение во всех участках (рис. 5, 6) данной модели (за исключением галтелей) распределено значительно равномернее, чем у трех предыдущих моделей.

На участке приложения нагрузки в зоне *A* как в верхней, так и нижней части напряжение модели характеризуется оптической разностью хода в 218 мкм , что соответствует напряжению на модели 27 кг/см^2 , а в пересчете на динамометр 545 кг/см^2 . Возможно, что эти участки вполне можно было бы укоротить, облегчив тем самым вес динамометра, если только при этом не возникает невыгодное перераспределение нагрузки по плечам (упрочнение обосновано физически).

Зоны *B* и *B* данной модели соответствуют участкам практически чистого изгиба — полосы интерференции почти параллельны. Направления изгибов на этих участках находятся в полном соответствии с эпюрой изгибающих моментов в данной модели. В зонах *B* направления изгибов противоположны направлению изгибающих моментов, имеющих место на участках *B* (рис. 8). В связи с этим в зоне *B* наибольшее напряжение на внешнем контуре достигает 2730 кг/см^2 как для верхней, так и для нижней части динамометра.

Максимальное напряжение наблюдается на внутреннем контуре зоны *B*, достигая 2888 кг/см^2 .

В зоне *Г*, где эпюра моментов меняет свой знак, след нейтральной линии прижимается к контурам модели. Область сочленения двух балок является наиболее напряженным участком данной зоны. Наибольшее напряжение на этом участке равно 2415 кг/см^2 для нижней части модели и 2180 кг/см^2 для верхней части модели. В последнем случае напряжение несколько меньше за счет того, что верхний участок усилен «отводами» для заделки «флажков».

Изоклиническая картина данной формы упругого тела подтверждает рациональность ее в смысле компактности динамометра. Динамометр

отличается значительным уменьшением веса по сравнению с величинами измеряемых деформаций и усилий.

Картина изоклин, которые, кстати сказать, в зонах чистого изгиба совпадают с изостатами (траекториями главных напряжений), визуально и численно подтверждает правильность выполненного расчета формы упругого тела.

Если стать на позицию возможности дальнейшего усовершенствования данной формы упругого тела (используя метод фотоупругости), данную модель следовало бы несколько видоизменить: срезать ненапряженные углы в зоне *G*, незначительно уменьшить толщину балок в зонах *B* по сравнению с толщиной их в зоне *B* и незначительно ослабить участки *A*. Все эти изменения не представляют принципиальных усовершенствований и нужны лишь для облегчения веса конструкции. Но учитывая технические и технологические неточности в процессе изготовления упругого тела, данную форму упругого тела можно признать практически безупречной.

Модель 5, динамометр конструкции Хаберера (рис. 7 и 8). Распределения напряжений в этой модели сходны с распределением напряжений в модели 4.

В зоне *B* след нейтральной линии делит модель на две части (рис. 7). Максимальное напряжение имеет место на внутреннем контуре и составляет 2157 кг/см^2 , напряжение на внешнем контуре составляет 1830 кг/см^2 . В зоне *G* напряжения составляют 1079 кг/см^2 .

По поводу данной модели можно сделать следующие замечания. Использование в качестве элементов упругого тела балок равного сопротивления обеспечили весьма равномерное распределение напряжений по всему сечению упругого тела; это служит положительной характеристикой данной модели.

Для данного типа динамометров по сравнению с рассмотренными ранее величины наибольших разностей главных напряжений в любом сечении данной модели имеют наименьшее значение. Это позволяет заключить, что динамометры данной конструкции работают с недогрузкой, т. е. расчет динамометров типа Хаберера выполнен с большим запасом прочности.

Подсчет растягивающих и изгибающих напряжений динамометров

Для определения растягивающих и изгибающих напряжений динамометров воспользуемся методом поперечных сечений напряженных участков модели.

В наиболее интересных участках для каждой из фотодиаграмм напряжений модели мы графическим построением нашли след нейтральной линии, а также величины растягивающего (сжимающего) и изгибающего напряжений (рис. 3—8). С этой целью на любом участке модели проводим сечение *AB*. В соответствующих масштабах откладываем отрезки: по горизонтали — ширину модели *AB*; по вертикали от точек *A* и *B* — соответствующие разности главных напряжений: *AC* — на внешнем, *BD* — на внутреннем контуре. Соединив прямой * точки *C* и *D*, получим эпюру распределения напряжений по сечению *AB*. Точка пересечения прямой *CD* с прямой *AB* — точка *E* — соответствует следу нейтральной линии *EE*. Прямая *FF*, параллельная и проходящая

* Строго говоря, эта линия будет прямой лишь в случае чистого изгиба при одновременном действии изгиба и растяжения или сжатия; след линии, проходящей через точки *C* и *D*, не будет прямолинейным.

через точку пересечения прямой CD с перпендикуляром HK к середине отрезка AB , отсекает от отрезка BD отрезок BF , равный по величине растягивающему напряжению в данном сечении. Разность $(BD - BF)$ представляет величину изгибающего напряжения на внутреннем контуре. Этот метод позволяет отдельно установить величины растягивающих (сжимающих) и изгибающих напряжений и осуществить сравнение значения напряжений, полученных экспериментальным и расчетным путем, с применением формул сопротивления материалов. Ниже, в табл. 3, приводим сравнительные результаты максимальных напряжений в динамометрах, полученные экспериментальным и расчетным путем. Формулы

Таблица 3

Конструкция динамометра	Максимальное напряжение, кг/см ²						
	расчетное			экспериментальное			
	формула для расчета	$\sigma_{изг}$	$\sigma_{раст}$	σ_{max}	$\sigma_{изг}$	$\sigma_{раст}$	σ_{max}
Круглое кольцо	$\frac{1.908 \cdot P \cdot r}{bh^2}$			4750			более 3230
Тип Д-3	$\frac{P}{2} \left[\frac{r(\pi-2) + 2/r + l^2}{\pi r + 2l} + \right. \\ \left. - r + l \right]$	—	—	4809	2713	550	3263
Вапау		—	—	6500	4660	800	5460
Токарь	$\frac{P}{2bh} \left(1 + \frac{bl}{h} \right)$	3960	890	4950	2030	870	2900
Хаберер	$\frac{P}{2bh_0} \left(\frac{bl \sin \alpha}{h_0} + \cos \alpha \right)$	2539	802	3341	1457	700	2157

Обозначения, принятые в таблице:

- $\sigma_{изг}$ — изгибающее напряжение;
- $\sigma_{раст}$ — растягивающее напряжение;
- σ_{max} — наибольшее напряжение;
- P — предельная нагрузка;
- b — толщина динамометра;
- h — ширина динамометра;
- r — радиус закругления средней линии динамометра;
- l — длина элемента упругого тела динамометра;
- α — угол при вершине между элементами динамометра Хаберера.

для расчета напряжений были заимствованы нами частично из курса С. П. Тимошенко, Сопротивление материалов, том 2, ОГИЗ, 1946, частично из диссертации Н. Г. Токаря, Упругие динамометры, служащие для проверки испытательных машин, 1948.

Как видно из табл. 3, напряжения в исследованных нами конструкциях упругих динамометров, полученные экспериментально, меньше напряжений, полученных расчетным путем.

Заключение

Итак, нами рассмотрены основные принципиально различные формы упругих динамометров, распределение напряжений в которых соответствует случаю плосконапряженного состояния. В нашу работу не включен случай растяжения плоской пластины, поскольку решение этой задачи приводится почти во всех курсах фотоупругости. В этом случае

представляет интерес лишь краевой эффект, однако в соответствии с принципом Сен-Венана (Тимошенко С. П., Теория упругости, ОНТИ, 1937, стр. 43—63), что способ приложения нагрузки может вызвать существенное изменение местных напряжений, но оказывает ничтожное влияние на напряжение в точках, расстояние до которых достаточно велико (более толщины пластины). Напряжения на расстоянии, большем чем толщина пластины, оказываются равномерно распределенными.

Кроме того, в нашей работе рассмотрение напряженного состояния скоб сложной конфигурации представляет больший интерес, чем рассмотрение напряжений в плоской пластине, вследствие того, что скоба обеспечивает наибольшую величину абсолютного значения измеряемой деформации; благодаря этому уменьшается относительная погрешность измерения и делаются второстепенными погрешности, вызванные упругими несовершенствами материала. Последние весьма существенны при точных измерениях малых по абсолютной величине деформаций пластин (стержня).

Сходимость результатов исследования распределения напряжений методом фотоупругости с результатами расчета напряжений в этих же динамометрах другим объективно независимым методом — по формулам сопротивления материалов — приводит нас к следующим выводам:

1. Наилучшей формой упругого тела из числа исследованных явилась скоба динамометра Токаря; в этом динамометре достигнуты:

а) наибольшая по абсолютному значению деформация при предельной нагрузке;

б) наибольшая равномерность распределения напряжений по любому сечению упругого элемента динамометра;

в) отсутствие значительных концентраций напряжений в нем.

2. Весьма близким к этому динамометру по качественной характеристике напряженного состояния является динамометр конструкции Хаберера, но абсолютное значение его деформации при предельной нагрузке почти втрое меньше, чем в динамометре Токаря.

3. Самой неудачной из числа рассмотренных следует признать модель в форме кольца. В нем имеют место концентрации напряжений в зоне приложения нагрузки, и особенно у галтелей, характеризующие нарушение линейно напряженного состояния.

4. Для сравнительной оценки динамометров в табл. 2 приведены значения весов, предельных нагрузок и деформаций упругого элемента (исключая интегрирующие передаточные механизмы) при предельной нагрузке. Сопоставление этих характеристик показывает, что наиболее рациональное использование материала имеет место в динамометре Токаря.

При осуществлении опытных образцов динамометров 1-го разряда на основании выводов 1, 2 и 4 мы использовали упругий элемент динамометров Токаря, изменив лишь метод измерения величины упругой деформации. Обработка результатов градуировки опытных динамометров 1-го разряда подтверждает правильность выбора формы упругого элемента, произведенного на основании настоящего исследования.

Подводя итоги характеристики упругих форм различных динамометров, отметим, что динамометры, как правило, представляют собой упругие элементы, симметричные по отношению к действующей нагрузке. Сюда следует включить и тела, симметричные относительно оси вращения — цилиндры (полые и сплошные). Как отмечалось ранее, в упругих динамометрах желательно иметь при сохранении портативности наибольшую деформацию, величина которой служит мерой создаваемого усилия. Но для различных пределов измерений вероятнее

всего потребуется применять упругие элементы различных конструкций. Для подтверждения сказанного заметим, что упругое тело в форме кольца, дающее деформацию в 1 мм при нагрузке 100 тс, должно иметь вес порядка 200 кг и диаметр около 500 мм. Нам представляется, что прежде чем рекомендовать форму упругого элемента динамометра, необходимо произвести классификацию в зависимости от пределов измерения.

Как нам кажется, наилучшей формой упругого тела является наиболее приближающаяся при нагрузке к простейшему линейно-напряженному состоянию.

Поэтому, говоря о перспективах дальнейшего развития динамометрии, мы считаем желательным продолжать исследование прозрачных моделей упругих динамометров (предполагаемых на нагрузки свыше 100 тс) в форме цилиндров, труб с различными толщинами стенок, сплошных и составных. Особый интерес представляет изучение краевого эффекта, контактных напряжений и влияния поверхностного трения. Это выходит за рамки исследования плосконапряженного состояния и переходит в область решения задач объемно-напряженного состояния динамометров методом фотоупругости.

А. И. МАРЦИНЯК

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ g МЕТОДОМ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ТЕЛ

Последние 100 лет абсолютная величина ускорения силы тяжести g определялась только при помощи оборотных маятников. Современное развитие техники дает возможность измерять абсолютное значение g с наименьшей точностью методом свободного падения тел. Последнее доказано работой, законченной в 1956 г. во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ), где применялись два независимо разработанных метода свободного падения. В настоящее время ведутся, но еще не закончены, определения g методом свободного падения тел в Англии, Канаде, Франции и ФРГ.

Вопросы теории определения g способом свободного падения очень слабо освещены как в нашей, так и в зарубежной литературе. Особенно мало обращено внимания на источники систематических погрешностей.

Настоящая статья посвящена рассмотрению некоторых основных источников систематических погрешностей, специфически присущих методу определения g по свободному падению тела, имеющего форму линейки или жезла.

Все шесть независимо разработанных до настоящего времени в разных странах вариантов способа свободного падения (в Англии, Канаде, Франции, ФРГ и два в СССР) предусматривают падение тела, имеющего форму линейки с делениями, либо форму жезла, покрытого фотоэмульсией.

Основанием пяти из шести упомянутых вариантов является одна из следующих двух схем.

1. Источник света 5 (рис. 1) и реперный штрих 6 (световая щель) расположены неподвижно, как и вакуумная камера 1. Фотопленка 3 (светочувствительный слой) расположена на падающем теле 2 (жезде). При падении жезла 2 в вакуумной камере 1 на светочувствительный слой 3 проектируется при помощи оптического устройства, не показанного на схеме, изображение реперного штриха 6 (щели), освещаемого периодическими вспышками лампы 5. Изображения щели проходят через окно 4 внутрь вакуумной камеры и попадают на жезл. На жезле после его падения и проявления изображений получается ряд поперечных штрихов, возрастающее расстояние между которыми отражает закон свободного падения. Измерив расстояния между штрихами и зная вели-

чину соответствующих интервалов времени между вспышками лампы, можно определить значение g .

2. Падающее тело 2 (рис. 2) является линейкой с делениями, которая освещается периодическими вспышками лампы 7 через окно 6 вакуумной камеры 1. Оптическое устройство, не показанное на схеме, проецирует изображение реперного штриха 3 и освещаемой через окно 6 линейки 2 на фотопленку 4, перематываемую с одной катушки на другую. На фотопленке после ее проявления получается ряд фотографий реперного штриха на фоне делений линейки, что дает возмож-

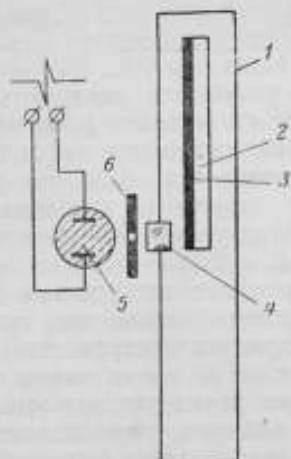


Рис. 1. Схема определения g способом свободного падения жезла.

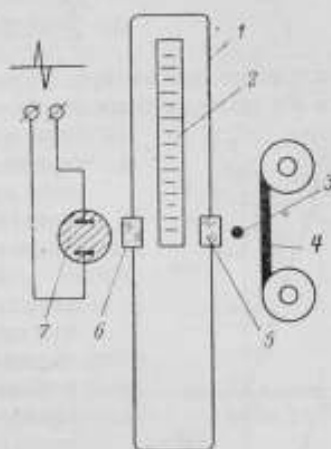


Рис. 2. Схема определения g способом свободного падения линейки.

ность отсчитать положения падающей линейки в моменты вспышки лампы. Зная эти положения и соответствующие интервалы времени между вспышками лампы, можно определить значение g .

Рассмотрим систематические погрешности, вызываемые: 1) падением жезла (или линейки), имеющего наклон к вертикали; 2) отклонением от горизонтальности оптической оси устройства, проецирующего изображение световой щели на падающий жезл (рис. 1) или фотографирующего падающую линейку (рис. 2).

Пусть жезл ab (или линейка), лежащий в плоскости XOY , составляет в начальный момент падения угол α с вертикальной осью YU (рис. 3) и пусть оптическая ось O_1O составляет с горизонтальной осью XX угол β . Начало координат O выберем в той точке, где в начальный момент падения находится нижний конец жезла и через которую проходит оптическая ось O_1O .

Разберем сначала случай, когда жезл не вращается при падении, т. е. случай, когда угол α остается постоянным, и жезл в конце падения займет положение a_1b_1 (рис. 3).

Действительная длина пути aa_1 жезла, который он при падении пройдет по вертикали, составит

$$h_1 = l(\cos \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} \beta), \quad (1)$$

где l — длина ab жезла.

Если пренебречь тем обстоятельством, что имеются наклоны жезла и оптической оси, и при определении g по уравнению $h_1 = \frac{g}{2} l^2$ вместо h_1 подставить l , то относительная погрешность определения g составит

$$\frac{\delta g}{g} = \frac{l - h_1}{h_1}. \quad (2)$$

Ввиду малой величины углов α и β , можно положить $\cos \alpha = 1 - \frac{1}{2} \alpha^2$, $\sin \alpha = \alpha$ и $\operatorname{tg} \beta = \beta$.

Тогда

$$\frac{\delta g}{g} \approx \frac{1}{2} \alpha (\alpha - 2\beta). \quad (3)$$

В настоящее время при определении g средняя квадратичная погрешность Sg должна быть не более $\pm 0,001 \text{ см/сек}^2$. Это условие вместе с уравнением (3) позволяет найти предельные значения углов α_{\max} , β_{\max} , при которых они не внесут ощутимых систематических погрешностей в результат. Соответствующий расчет дает $\alpha_{\max} = \beta_{\max} = 2'$.

Исключение влияния углов α и β на результат возможно только при соответствующей юстировке аппаратуры, так как измерение этих углов во время опыта с целью расчета поправок практически невыполнимо. Приведенные данные показывают, насколько тщательно должна быть выполнена юстировка аппаратуры. Жезл, висющий до падения, должен иметь наклон к вертикали под углом, не превышающим $\pm 2',0$, и оптическая ось проекционного устройства также не должна отклоняться от горизонтали на угол, превышающий $\pm 2',0$; при этом ось жезла и плоскость линейки или плоскость жезла, покрытая светочувствительным слоем, должны быть параллельны между собой.

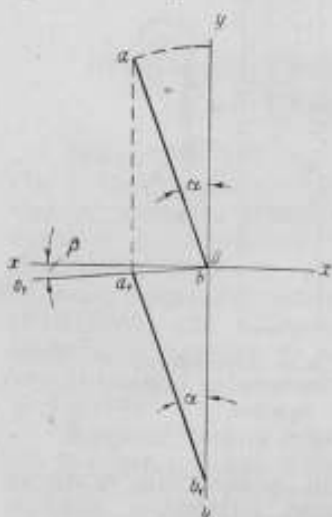


Рис. 3. Схема к расчету погрешностей, возникающих при падении жезла, имеющего постоянный наклон к вертикали.

Рассмотрим вопрос, каким должно быть сбрасывающее устройство, чтобы обеспечить выполнение указанных требований. На рис. 4 приводится схема сбрасывающего устройства, примененного автором и позволяющего свести к необходимому минимуму рассмотренную погрешность.

На неподвижной оси 2 жестко сидят пусковой рычажок 1 и собачка 3, упирающаяся в зуб 5 сбрасывающего рычага 10, который под действием цилиндрической винтовой пружины 6 стремится повернуться на оси 4 по стрелке В до упора 7, чему препятствует собачка 3. В сбрасывающий рычаг 10 запрессована игла 11, на которой висит головка жезла 9, имеющая вкладыш 12 с коническим углублением, вершина которого имеет сферическую форму и опирается на иглу 11. Головка жезла 9 имеет отверстие 8 для прохода сбрасывающего рычага при его движения по стрелке В. На схеме, с целью придания ясности, головка жезла показана повернутой на 90° вокруг вертикальной оси по отношению к ее действительному положению.

Действие сбрасывающего механизма происходит следующим образом.

При нажатии по стрелке *A* на пусковой рычажок *1* этот рычажок поворачивается вокруг оси *2*, и собачка *3* выходит из зацепления с зубом *5*. Вследствие этого пружина *6* с силой поворачивает сбрасывающий рычаг *10* вокруг оси *4* по стрелке *B* до упора *7*.

Ускорение, которое сообщается при помощи пружины *6* игле *11*, в 5—8 раз превосходит ускорение силы тяжести, а поэтому жезл на мгновение оказывается свободно висющим в пространстве и после этого начинает свободно падать.

В момент сбрасывания жезл не испытывает горизонтального толчка. Достигается это тем, что острие иглы *11* и центр оси *4* лежат на одной горизонтали, что обеспечивает вертикальное направление скорости острия иглы в момент начала движения. Других связей, кроме иглы, жезл не имеет, и поэтому невозможно возникновение горизонтальных толчков где-либо в другом месте жезла. Разумеется, сбрасывание жезла происходит тогда, когда его качания на острие полностью прекратятся.

Для исключения вздрагивания рычага *10* при сбрасывании собачка *3* установлена так, чтобы ее конец двигался в радиальном направлении по отношению к центру оси *4*, а зубу *5* приданы очень малые размеры.

Предварительные испытания сбрасывающего механизма, построенного по описанной схеме, и проведенные опыты показали удовлетворительную работу этого устройства.

Все другие возможные устройства сбрасывающего механизма — электромагнитный сбрасыватель, сбрасывание с помощью пережигания нити или расплавления током тонкой проволоочки, отскакивание зажимов и пр. — не могут обеспечить такую малую площадку соприкосновения жезла с опорой, как рассматриваемое острие иглы, при которой диаметр площадки не превышает 0,006 см. Кроме того, игла является универсальным шарниром, допускающим качание жезла в любой плоскости, проходящей через вертикальную ось, и тем самым обеспечивает расположение точки подвеса жезла и его центра тяжести на одной вертикали при любом числе подвешиваний жезла после его юстировки. Реакция в точке опоры направлена также по вертикали ввиду того, что кинематическая пара острие — кратер выполнена так, что имеет практически идеально гладкую поверхность соприкосновения.

Показателем того, насколько малы потери энергии в этом устройстве, являются результаты опытов по колебаниям жезла в вакуумной камере. Нижний конец жезла, имевшего длину 1 м, после подвешивания колебался с размахом около 3 мм, и эти колебания длились приблизительно 6 час. до полной остановки. Малая потеря энергии при колебаниях характеризует ничтожность величины угла застоя и, следовательно, строгую вертикальность висящего на острие иглы жезла.

Сбрасывание жезла, как уже упоминалось, происходит путем быстрого отвода вниз иглы, на которой висит жезл. В момент отрыва иглы жезл, может в общем случае, иметь какое-то движение, хотя и происходящее с очень незначительной скоростью. Основной причиной этого движения является вздрагивание сбрасывающего механизма, который из-за наличия в его деталях мелких неточностей, допущенных при изготовлении и сборке, а также из-за упругих деформаций его частей может при посредстве иглы сообщить жезлу незначительный толчок

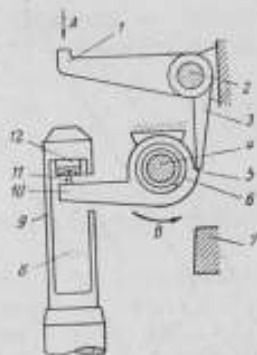


Рис. 4. Схема сбрасывающего устройства.

в момент, непосредственно предшествующий его свободному падению. Толчок вызовет движение жезла, которое можно рассматривать как поступательное перемещение центра тяжести жезла и вращение жезла с постоянной угловой скоростью относительно оси, проходящей через центр тяжести. Ввиду отсутствия связей при свободном падении движение будет продолжаться во все время полета жезла. Не вдаваясь в подробное рассмотрение этого движения, отметим только, что систематическую погрешность может вызвать одна лишь составляющая этого движения — вращение жезла на угол α вокруг горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести $O_{ж}$ жезла и перпендикулярной к оси XX проекционных устройств (рис. 5).

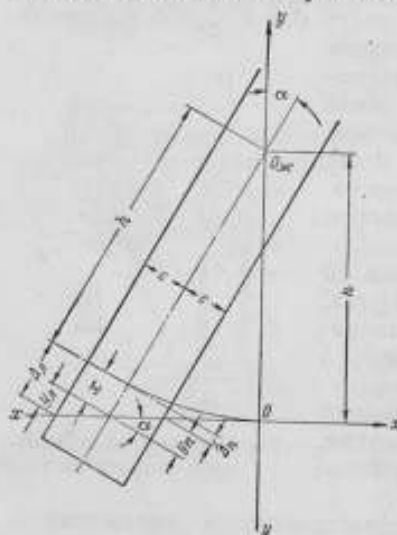


Рис. 5. Схема к расчету погрешностей, возникающих при вращении жезла при падении.

Прежде чем рассчитать погрешности, заметим следующее:

1) при опытах автора фотографирование штрихов выполнялось одновременно на две противоположные стороны жезла — правую и левую;

2) как следует из известного уравнения свободного падения

$$h = h_0 + v_0 t + \frac{g}{2} t^2, \quad (4)$$

добавление к h величин, пропорциональных времени t , не изменяет значения g ; следовательно, и погрешности, пропорциональные t , не повлияют на результат измерения g .

Для расчета погрешности примем, что до сбрасывания жезла не качался на поддерживающей игле и что в момент, непосредственно предшествующий сбрасыванию, он получил горизонтальный толчок, направленный в плоскости чертежа.

Пусть для какого-то момента времени t ордината центра тяжести жезла будет h и угол поворота будет равен α .

Тогда отклонения отметок, записанных в момент t на левой и правой сторонах жезла, от истинного положения будут равны (рис. 5):

$$\Delta_a = x + y_a, \quad (5)$$

$$\Delta_b = x - y_b. \quad (6)$$

Из чертежа следует, что

$$x = h \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) \quad (7)$$

и

$$y_a = y_b = c \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (8)$$

где c — половина ширины жезла.

Учитывая, что α всегда является очень малой величиной, можно написать:

$$x \approx \frac{1}{2} h \alpha^2, \quad (9)$$

$$y_a = y_b = c \cdot \operatorname{tg} \alpha = c \alpha. \quad (10)$$

Следовательно,

$$\Delta_A = \frac{1}{2} h \alpha^2 + c \alpha, \quad (11)$$

$$\Delta_B = \frac{1}{2} h \alpha^2 - c \alpha. \quad (12)$$

Расхождение между отметками на правой и левой сторонах составит:

$$\Delta_z = \Delta_A - \Delta_B = 2c \alpha. \quad (13)$$

Среднее арифметическое значение пути h , вычисленное по отметкам на правой и левой сторонах, будет отличаться от истинного значения на

$$\varepsilon = \frac{\Delta_A + \Delta_B}{2} = \frac{1}{2} h \alpha^2. \quad (14)$$

Отсюда видно, что как среднее арифметическое значение, так и значения h на каждой стороне не свободны от систематической ошибки, если величина ε не является ничтожно малой.

Как упоминалось ранее, добавление к значениям пути h величины, линейно зависящей от времени t , не искажает значения g . Угол α пропорционален времени t , а потому, если в уравнении (11) и (12) член $1/2 h \alpha^2$ пренебрежимо мал, то добавление Δ_A и Δ_B к h не внесет погрешности в значения g , вычисленные отдельно по записям на правой или на левой сторонах жезла или по их среднему арифметическому значению.

Не рассматривая подробно расчета величины ε , отметим, что и в этом случае, как и в рассмотренном ранее вопросе о наклоне жезла, угол α_{\max} в конце падения должен быть менее $2',0$ при условии, что $S_g = \pm 0,001 \text{ см/сек}^2$.

Подставляя значение α_{\max} в уравнение (13), получим

$$\Delta_{z \max} \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}. \quad (15)$$

Примененный жезл имел длину $l = 1 \text{ м}$, ширину $2c = 38 \text{ мм}$ и центр тяжести находился в середине длины жезла.

При этих условиях $\Delta_{z \max} \approx 23 \text{ мк}$.

Следовательно, пока расхождение длины записей между крайними отметками правой и левой сторон не превышает 23 мк , наклон жезла не вносит систематических погрешностей.

В опытах автора расхождение равнялось в среднем 8 мк , что следует приписать точному действию сбрасывающего механизма. Величину g поэтому можно было вычислять как по значениям пути, взятым по каждой стороне жезла в отдельности, так и по их среднему арифметическому.

В заключение по вопросу о вращении жезла при падении можно отметить, что применение записи на две стороны жезла дает возможность: 1) избежать систематической ошибки, контролируя наклон жезла при опыте; 2) повысить точность определения g путем вычисления среднего арифметического из записей на двух сторонах жезла.

Разумеется, противоположные грани жезла должны представлять собой параллельные плоскости.

Одновременное фотографирование обеих сторон может быть рекомендовано для всех способов определения g методом свободного падения жезла или линейки.

Методы определения значения g по свободному падению тел, осуществленные в СССР и за рубежом по схемам, показанным на рис. 1 и 2, имеют вообще очень мало специфически присущих им источников систематических погрешностей, а из имеющихся наиболее неопределенными и трудно устранимыми являются те, которые рассмотрены в настоящей статье.

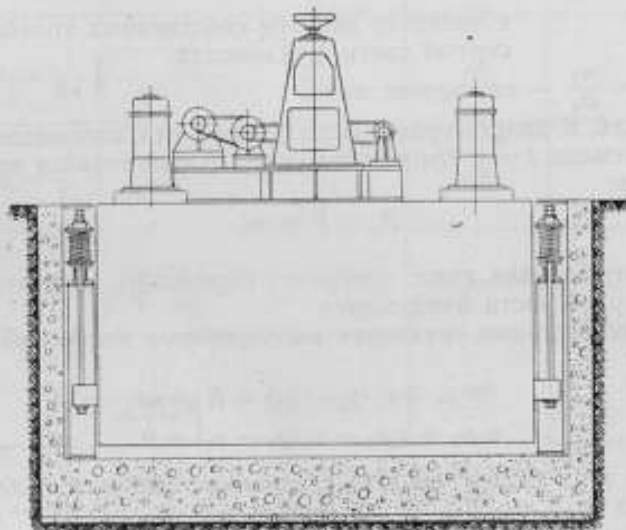
ЛИТЕРАТУРА

1. Мадиков М. Ф., Основы метрологии, М., 1949.
2. Марциняк А. И., Определение абсолютной величины ускорения силы тяжести по падению жезла в вакууме, «Измерительная техника» № 5, 1956.

В. С. ШКАЛКОВ

ВИБРОГАСЯЩИЙ ФУНДАМЕНТ ДЛЯ ТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Изготовленный во ВНИИМ виброгасящий фундамент представляет собой систему, состоящую из массы и блоков пружинных амортизаторов (см. рисунок). Устранения влияния колебаний грунта можно достигнуть двумя путями: а) большой массой фундамента; б) относительно неболь-



шой массой, но укрепленной на амортизационных пружинах. Последний путь оказался единственно приемлемым.

Основная масса 28 т укреплена на 12 пружинных блоках, в свою очередь опертых на бетонное основание массой 19 т.

Если ограничить поставленную задачу колебаниями с двумя степенями свободы, то практический интерес представляют два случая.

1-й случай — колебания грунта. Дифференциальные уравнения вынужденных колебаний для принятой колебательной системы будут

$$m_2 \ddot{y}_2 + (c_1 + c_2) y_2 - c_1 y_1 = c_2 A_0 \sin \omega t;$$

$$m_1 \ddot{y}_1 - c_1 y_2 + c_1 y_1 = 0,$$

где m_1 и m_2 — массы наддресорной и поддресорной частей фундамента;
 y_1 и y_2 — линейные смещения их центров тяжести;
 c_1 и c_2 — жесткость амортизаторов;
 c_z — коэффициент жесткости грунта;
 A_0 — амплитуда колебаний подошвы поддресорной части фундамента;
 ω — круговая частота.

Соответственно амплитуды колебания будут:

$$A_1 = \frac{A_0 \gamma^2}{\beta^2 - (1 + \gamma^2 + \mu \gamma^2) \beta^2 + \gamma^2}; \quad A_2 = \frac{A_0 (\gamma^2 - \beta^2)}{\beta^2 (1 + \gamma^2 + \mu \gamma^2) \beta^2 + \gamma^2},$$

где A_1 и A_2 — амплитуды колебаний наддресорной и поддресорной частей фундамента;

λ_1 и λ_2 — собственные частоты наддресорной и поддресорной частей фундамента;

λ_2^2 — квадрат частоты собственных колебаний монолита;

$\gamma^2 = \frac{c_1}{m_1} : \frac{c_2}{m_2} = \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2}$ — отношение квадратов частот собственных колебаний наддресорной и поддресорной частей фундамента;

$\beta^2 = \frac{\omega^2}{c_z/m_2} = \frac{\omega^2}{\lambda_2^2}$ — отношение квадрата частоты возмущающей силы к квадрату частоты собственных колебаний поддресорной части фундамента;

$\mu = \frac{m_1}{m_2}$ — отношение масс.

2-й случай. К наддресорной части фундамента, находящегося в покое, в момент времени $t=0$ приложена сила, изменяющаяся по гармоническому закону:

$$P_y = P \sin \omega t,$$

где P — возмущающая сила; требуется определить амплитуды колебаний поддресорной части фундамента.

Дифференциальные уравнения вынужденных колебаний для принятой системы:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + c_1 (y_1 - y_2) &= P \sin \omega t; \\ m_2 \ddot{y}_2 + c_2 y_2 - c_1 (y_1 - y_2) &= 0. \end{aligned}$$

Решение этих уравнений дает следующие выражения для определения амплитуд:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{[(1 + \mu) \lambda_2^2 + \mu \lambda_1^2 - \omega^2] P_y}{m_1 \Delta(\omega^2)}; \\ A_2 &= \frac{\lambda_1^2 P_y}{m_2 \Delta(\omega^2)}, \end{aligned}$$

где $\lambda_1^2 = \frac{c_1}{m_1}$; $\lambda_2^2 = \frac{c_2}{m_1 + m_2}$ — квадраты частот собственных колебаний наддресорной и поддресорной частей фундамента;

$$\Delta(\omega^2) = \omega^4 - (1 - \mu) (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \omega^2 + (1 + \mu) \lambda_1^2 \lambda_2^2.$$

Результаты расчета амплитуд колебаний наддресорной и поддресорной частей фундамента сведены в табл. 1 для 1-го случая, в табл. 2

для 2-го случая при $P_y = 3,6$ тс, частоте $f = 50$ гц. В табл. 2 F — площадь подошвы фундамента; A_2 — амплитуда колебаний монолита.

Из табл. 1 видно, что виброгасящий фундамент снижает амплитуду внешних помех от 0,1 до $6,47 \cdot 10^{-6}$ мм.

Таблица 1

A_0 , мм	0,005	0,100
$A_2 = -0,1085A_0$	$-5,43 \cdot 10^{-4}$	$-1,08 \cdot 10^{-2}$
$A_1 = 6,47 \cdot 10^{-6}A_0$	$3,24 \cdot 10^{-7}$	$6,47 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2

Расчетные формулы	Размерность	$C_2 = 2 \cdot 10^6$ т/м ²
$C_2 = C_2 F$	т/м	18 600
$\lambda_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_2}{m_1 + m_2}}$	гц	9,85
$A_2 = \frac{P_y}{C_2 - (m_1 + m_2) \omega^2}$	мм	-0,0079
$\lambda_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1}{m_1}}$	гц	1,22
$A_2 = \frac{\lambda_1^2 P_y}{m_2 \Delta(\omega^2)}$	мм	$1,25 \cdot 10^{-2}$
$A_1 = P_y \frac{(1 + \mu) \lambda_2^2 + \mu \lambda_1^2 - \omega^2}{m_1 \Delta(\omega^2)}$	мм	0,0128

Из табл. 2 следует, что при общем весе фундамента 47 тс (моноплит) амплитуда колебаний на грунте 8 мм недопустимо велика при точных измерениях. Наличие же амортизаторов позволило уменьшить амплитуду колебаний подрессорной части фундамента в 600 раз. Виброгасящий фундамент имеет собственную частоту 1,22 гц, что значительно меньше диапазона рабочих частот вибрационных установок. В случае отсутствия амортизаторов собственная частота колебаний фундамента монолита равна 10 гц, т. е. находится в диапазоне частот, при которых производится поверка виброметров.

Следует заметить, что вопрос об antivибрационных защитах имеет значительно более широкое значение, выходящее за рамки настоящей

работы. Однако в настоящее время даже метрологические лаборатории не могут указать уровень и частоты вибрационных помех, которые оказывают влияние при измерениях высокой точности. Поэтому необходимо в более широком масштабе вести работы по антивибрационной защите с целью изучения и применения устройств при точных метрологических исследованиях для защиты от воздействия тряски, неизбежной в условиях расположения лабораторий в черте города.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов А. Н., Вибрация судов, Собрание трудов, т. X, АН СССР, 1948.
2. Тимошенко С. П., Теория колебаний в инженерном деле, ОНТИ, 1931.
3. Баркан Д. Д., Динамика оснований и фундаментов, Стройиздат, 1948.

А. Н. КОРОЛЕВА, А. Д. ЗАГАТИНА

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ШКАЛ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ

Шкалы служат исходными мерами некоторых точных измерительных приборов и применяются для поверки и юстировки приборов.

В результате ряда работ, проведенных во ВНИИМ с 1950 по 1953 гг., в институтах системы Комитета налажена поверка образцовых и рабочих шкал длиной от 50 до 200 мм.

Технический прогресс вызвал повышение требований, предъявляемых к точности поверки шкал не только образцовых, но и рабочих.

Появилась необходимость в поверке шкал малых размеров, включая шкалы объектмикрометров.

Настоящая статья посвящена работам лаборатории эталонов длины ВНИИМ, целью которых являлось:

- 1) разработка метода поверки шкал малых размеров с погрешностью не более $\pm 0,5$ мк;
- 2) повышение точности поверки образцовых шкал.

Выбор метода поверки шкал малых размеров

Наиболее распространенными шкалами малых размеров являются шкалы объектмикрометров, представляющих собой стеклянные пластинки, закрепленные в металлические оправы. Шкала объектмикрометра общей длиной 1 мм имеет 100 делений. Наименьшее деление шкалы объектмикрометра равно 0,01 мм.

Объектмикрометры в настоящее время применяются для определения не только увеличения микроскопа и его линейного поля зрения, но и цены деления барабанов и отсчетных шкал микрометров в плоскости предмета у микроскопов различных типов. Объектмикрометры включаются в комплект принадлежностей некоторых приборов и служат для юстировки этих приборов. Легко можно подсчитать, что для того, чтобы определить действительную цену деления наиболее точных измерительных микроскопов с погрешностью не свыше 0,001 мк, необходимо, чтобы погрешность общей длины шкалы объектмикрометра не превышала величины 0,5 мк.

Поверка объектмикрометров различных типов показала, что погрешности общей длины шкал могут достигать величины порядка 2—3 мк.

В случаях применения объектмикрометров для каких-либо точных измерений или для целей регулировки приборов совершенно необходимо знать поправки шкал, определенные с общей погрешностью, не превышающей 0,5 мк.

Предварительные исследования по выбору способа измерения объектмикрометров

В соответствии с заданной выше точностью метода поверки объектмикрометры должны поверяться по рабочим эталонам длины или по образцовой шкале 1-го разряда (в последнем случае требуется некоторое повышение точности поверки самих образцовых шкал). Это основное положение определило дальнейшие пути по изысканию метода поверки объектмикрометров. В избранном методе поверки должна быть предусмотрена возможность сличения общей длины и подразделений шкалы объектмикрометра с соответствующими подразделениями рабочего эталона или образцовой шкалы 1-го разряда. Наименьшие подразделения у рабочих эталонов — дециметров и у шкал 1-го разряда равны 0,1 мм. Поэтому метод поверки объектмикрометров должен предусматривать также возможность поверки наименьших подразделений шкалы объектмикрометров, равных 0,01 мм.

В качестве исходных мер при поверке объектмикрометров могут служить и концевые меры соответствующей точности. Метод поверки и в этом случае должен удовлетворять указанным выше требованиям.

При выборе метода поверки объектмикрометров лаборатория рассмотрела следующие возможные способы измерения малых шкал:

- а) сличение на стереокомпараторе с рабочим эталоном длины;
- б) непосредственное измерение винтовым окулярным микрометром или микрометром со спиральной шкалой;
- в) сличение на клиновом компараторе с рабочим эталоном длины;
- г) сличение с концевыми мерами при помощи контактного интерферометра ПИУ-1;
- д) сличение на универсальном компараторе с рабочим эталоном длины;
- е) сличение на компараторе типа ИЗА-2 с рабочим эталоном длины.

Для того, чтобы установить пригодность того или иного способа измерений, были произведены опытные измерения объектмикрометров всеми способами, за исключением поверки на клиновом компараторе, так как его исследование было произведено во ВНИИК.

Осуществленные предварительные опыты, а также сведения из литературных источников дают возможность утверждать, что из всех имеющихся и изготавливаемых отечественной промышленностью измерительных приборов наиболее пригодным для поверки малых шкал является компаратор типа ИЗА-2 (после некоторого усовершенствования). Метод поверки на этом приборе наиболее прост и удобен.

Остальные методы оказались по тем или иным причинам практически непригодными. Методы а, б, в, д не обеспечивали необходимой точности результата поверки. Метод поверки по концевым мерам, хотя и может обеспечить необходимую точность поверки, значительно более сложен, требует большей затраты времени на выполнение измерений.

Метод поверки на компараторе ИЗА-2

Компаратор типа ИЗА-2 предназначается для измерения расстояний между штрихами или точками в проходящем свете в пределах до 200 мм. Прибор имеет два микроскопа, расстояние между которыми

постоянно. Для наведения на штрихи поверяемой меры служит визирный микроскоп (увеличение от 7 до 10,5×). Для наведения на штрихи шкалы прибора служит отсчетный микроскоп со спиральным микрометром. Увеличение микроскопа 62,5×. Расчетная цена деления круговой шкалы микрометра равна 1 мк. Поверка показала, что действительная цена деления этого микроскопа отличается от расчетной не более чем на 0,001 мк. Измерение производится методом продольного компарирования. Шкала прибора и поверяемая шкала устанавливаются на подвижном столе. Микроскопы во время измерения остаются неподвижными. Погрешность измерения по данным завода-изготовителя определяется формулой

$$L = \pm \left(0,9 + \frac{L}{300 - 4H} \right) \text{ мк,}$$

где L — измеряемая длина в миллиметрах, H — высота плоскости измерения объекта над плоскостью компаратора в миллиметрах. Таким образом, эта погрешность будет определяться величиной от 1 до 2 мк, что значительно превышает допустимую при поверке малых шкал погрешность.

Для повышения точности результатов измерений необходимо было произвести усовершенствование прибора ИЗА-2. Такое усовершенствование оказалось легко осуществимым и, как показали работы лаборатории, дало нужные результаты.

Визирный микроскоп компаратора ИЗА-2, увеличение которого мало и который не имеет каких-либо измерительных устройств, был заменен отсчетным микроскопом со спиральным окулярным микрометром типа ОМС. Для закрепления микроскопа после фокусировки было предусмотрено специальное зажимное приспособление. Компаратор ИЗА-2 не приспособлен для проверки шкал в отраженном свете, поэтому было изготовлено специальное осветительное устройство к микроскопу. С целью исключения погрешностей, вызываемых неправильным освещением штрихов, микроскоп был снабжен поворотным осветителем.

При проведении предварительных исследований была определена точность наведения на штрих шкал объектмикрометров при различных увеличениях микроскопа. Эти опыты показали, что наибольшая точность достигается при увеличении микроскопа порядка 125—150×.

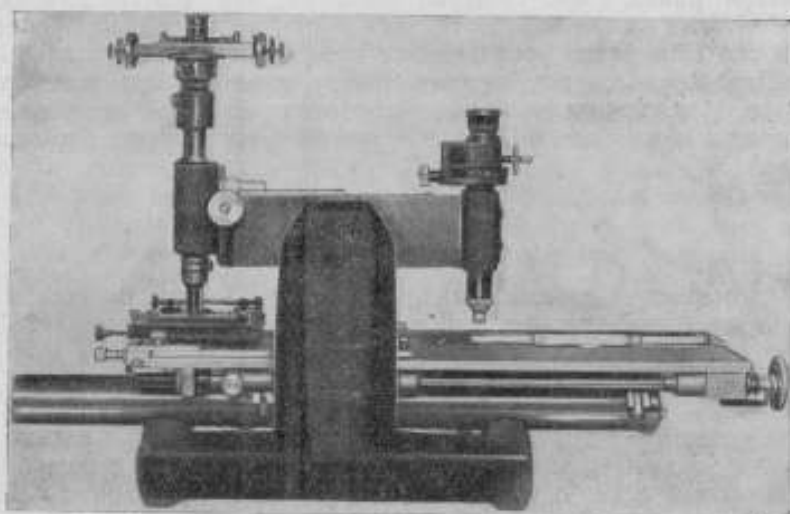
Шкала компаратора ИЗА-2 заменена образцовой шкалой 1-го разряда, имеющей дополнительную шкалу длиной 1 мм с делениями через 0,1 мм, позволяющую поверять соответствующие деления на объектмикрометре.

Изготовлен специальный предметный столик для установки объектмикрометров. Столик имеет регулировочные устройства для перемещения объектмикрометра по всем направлениям.

Изготовлен экран для защиты всего прибора и поверяемых на нем мер от влияния тепла, излучаемого наблюдателем.

Как уже указывалось, поверка наименьших подразделений шкалы объектмикрометра, равных 0,01 мк, может производиться непосредственным их измерением окулярным микрометром отсчетного микроскопа. Для более точной поверки этих подразделений оказалось возможным применить метод калибровки. Для этого был изготовлен специальный микроскоп с двойным окулярным микрометром (см. рисунок). Микроскоп имеет один объектив и два окулярных микрометра — левый и правый. Биссекторы левого и правого окулярных микрометров могут устанавливаться один относительно другого на расстояниях, равных

0,01; 0,02; 0,03 мм и т. д. в плоскости объекта. Сличая с этими интервалами последовательно соответствующие подразделения шкалы объект-микрометра, можно произвести калибровку этих подразделений.



Метод поверки объектмикрометров

Поверка объектмикрометров на усовершенствованном компараторе ИЗА-2 производится следующим образом.

Общая длина и подразделения в 0,1 мм шкалы объектмикрометра определяются сличением их с образцовой шкалой 1-го разряда методом продольного компарирования. Поверяемый объектмикрометр устанавливается на специальном столике под левым микроскопом компаратора. Под правым микроскопом устанавливается образцовая шкала. Отдельный прием измерений состоит из прямого и обратного хода. В прямом ходе сначала наблюдают начальные штрихи образцовой и поверяемой шкал, а потом конечные их штрихи. Обратный ход начинается с наблюдения конечных штрихов и заканчивается начальными. При поверке подразделений в прямом ходе последовательно наблюдаются штрихи 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; в обратном ходе стол перемещается в обратном направлении и наблюдают штрихи 1,0; 9,0; 8,0; 7,0; 6,0; ... 0.

Длина наименьших подразделений шкалы объектмикрометра, равная 0,01 мм, измеряется непосредственно окулярным микрометром.

Поверка подразделений в 0,1 мм и 0,01 мм может производиться также методом калибровки при помощи микроскопа с двойным окулярным микрометром. Эта калибровка производится путем прямого калибрования, при котором изучаемые интервалы шкалы сличаются со вспомогательными интервалами, равными одному, двум, трем и т. д. калибруемым подразделениям.

Вспомогательный интервал создается с помощью биссекторов правого и левого микрометров микроскопа. При калибровке десятых долей миллиметра в первой серии наблюдений расстояние в плоскости объекта между этими биссекторами устанавливается равным 0,1 мм, во второй серии — 0,2 мм и в последней серии — 0,9 мм. В первой серии наблюде-

ний со вспомогательным интервалом последовательно сравниваются все подразделения шкалы, равные 0,1 мм. Во второй серии — все интервалы, равные 0,2 мм, и т. д.

Общая программа наблюдений может быть представлена схемой I.

Схема I

Номер серии наблюдений	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
Длина вспомогательных интервалов, мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
Интервалы изучаемой шкалы, последовательно сравниваемые со вспомогательными интервалами, мм	0—0,1 0,1—0,2 0,2—0,3 0,3—0,4 0,4—0,5 0,5—0,6 0,6—0,7 0,7—0,8 0,8—0,9 0,9—1,0	0—0,2 0,1—0,3 0,2—0,4 0,3—0,5 0,4—0,6 0,5—0,7 0,6—0,8 0,7—0,9 0,8—1,0	0—0,3 0,1—0,4 0,2—0,5 0,3—0,6 0,4—0,7 0,5—0,8 0,6—0,9 0,7—1,0	0—0,4 0,1—0,5 0,2—0,6 0,3—0,7 0,4—0,8 0,5—0,9 0,6—1,0	0—0,5 0,1—0,6 0,2—0,7 0,3—0,8 0,4—0,9 0,5—1,0	0—0,6 0,1—0,7 0,2—0,8 0,3—0,9 0,4—1,0	0—0,7 0,1—0,8 0,2—0,9 0,3—1,0	0—0,8 0,1—0,9 0,2—1,0	0—0,9 0,1—1,0	0—1,0	

По результатам наблюдений составлялась система условных уравнений вида:

$$\left. \begin{array}{l}
 x_0 - x_1 + \lambda_1 = a_1 \quad x_0 - x_3 + \lambda_3 = a_3 \\
 x_1 - x_2 + \lambda_1 = b_1 \quad x_1 - x_3 + \lambda_3 = b_3 \\
 x_2 - x_3 + \lambda_1 = c_1 \quad x_2 - x_5 + \lambda_3 = c_3 \\
 \dots \dots \dots \quad \dots \dots \dots \\
 x_9 - x_{10} + \lambda_1 = l_1 \quad x_7 - x_{10} + \lambda_3 = i_3 \\
 \dots \dots \dots \quad \dots \dots \dots \\
 x_0 - x_2 + \lambda_2 = a_2 \quad x_0 - x_9 + \lambda_9 = a_9 \\
 x_1 - x_3 + \lambda_2 = b_2 \quad x_1 - x_{10} + \lambda_9 = b_9 \\
 x_2 - x_4 + \lambda_2 = c_2 \quad x_0 - x_{10} + \lambda_{10} = a_{10} \\
 \dots \dots \dots \quad \dots \dots \dots \\
 x_8 - x_{10} + \lambda_2 = k_2
 \end{array} \right\} (1)$$

где приняты обозначения:

$x_0, x_1, x_2, \dots, x_{10}$ — неизвестные поправки положения штрихов поверяемой шкалы;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_9$ — поправки вспомогательных интервалов (расстояния между биссекторами двойного окулярного микрометра);

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_{10}, b_1, b_2, b_3, \dots, b_9, \dots, c_1, c_2, l_1$ — свободные члены условных уравнений, получаемые при сличении соответствующих интервалов шкалы. Система уравнений (1) содержит в себе 11 неизвестных поправок интервалов поверяемой шкалы и 10 неизвестных поправок вспомога-

тельных интервалов. Обычно принимают погрешность нулевого штриха изучаемой шкалы равной: $x_0 = 0$; x_{10} должно быть известно из предварительных сличений общей длины шкалы с рабочим эталоном длины. В связи с этим λ_{10} также равно 0. Таким образом, общее число неизвестных сократится до 19.

Используя все 55 условных уравнений, полученных при калибровке для определения только 19 неизвестных, мы повысили точность определения неизвестных.

Решение системы уравнений (1) производят по способу наименьших квадратов, при этом получается 20 нормальных уравнений в виде двух систем — (2) и (3).

$$\left. \begin{array}{l} 1) \text{ II } (x_0 - x_1) + \lambda_1 + \lambda_{10} = \Delta_0 \\ 2) \text{ II } (x_1 - x_2) + \lambda_2 + \lambda_9 = \Delta_1 \\ 3) \text{ II } (x_2 - x_3) + \lambda_3 + \lambda_8 = \Delta_2 \\ 4) \text{ II } (x_3 - x_4) + \lambda_4 + \lambda_7 = \Delta_3 \\ 5) \text{ II } (x_4 - x_5) + \lambda_5 + \lambda_6 = \Delta_4 \\ 6) \text{ II } (x_5 - x_6) + \lambda_5 + \lambda_6 = \Delta_5 \\ 7) \text{ II } (x_6 - x_7) + \lambda_4 + \lambda_7 = \Delta_6 \\ 8) \text{ II } (x_7 - x_8) + \lambda_3 + \lambda_8 = \Delta_7 \\ 9) \text{ II } (x_8 - x_9) + \lambda_2 + \lambda_9 = \Delta_8 \\ 10) \text{ II } (x_9 - x_{10}) + \lambda_1 + \lambda_{10} = \Delta_9 \end{array} \right\} (2)$$

$$\left. \begin{array}{l} 1) 10 \lambda_1 - M_1 = s_1 \\ 2) 9 \lambda_2 - M_2 = s_2 \\ 3) 8 \lambda_3 - M_3 = s_3 \\ 4) 7 \lambda_4 - M_4 = s_4 \\ 5) 6 \lambda_5 - M_5 = s_5 \\ 6) 5 \lambda_6 - M_5 = s_6 \\ 7) 4 \lambda_7 - M_4 = s_7 \\ 8) 3 \lambda_8 - M_3 = s_8 \\ 9) 2 \lambda_9 - M_2 = s_9 \\ 10) \lambda_{10} - M_1 = s_{10} \end{array} \right\} (3)$$

где дополнительно приняты обозначения:

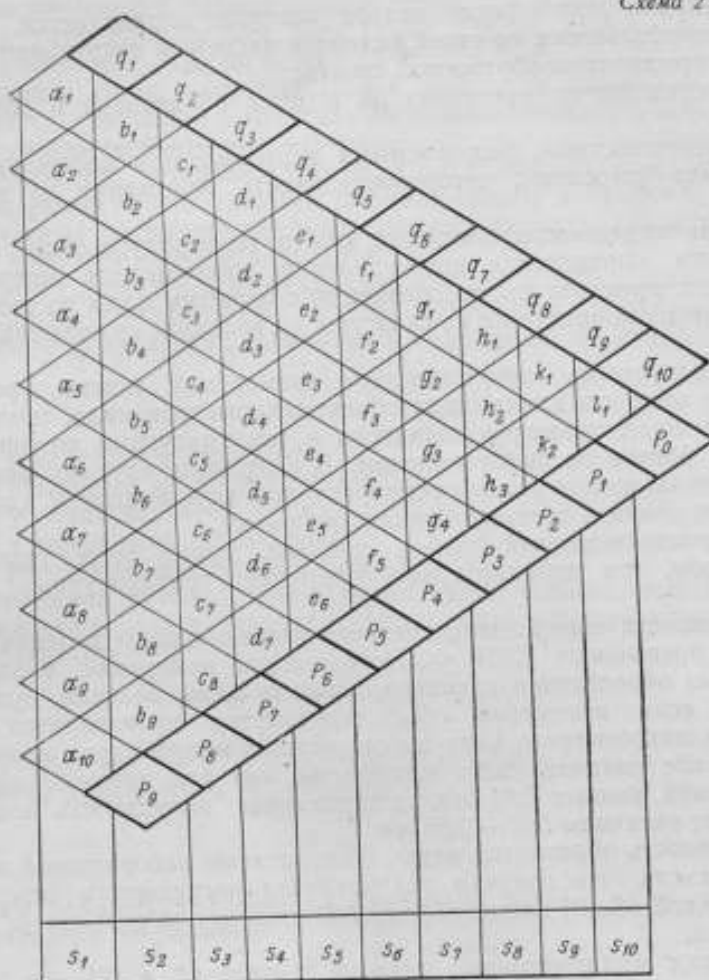
$$\begin{aligned} M_1 &= x_{10} - x_0; \\ M_2 &= M_1 + x_9 - x_1; \\ M_3 &= M_2 + x_8 - x_2; \\ M_4 &= M_3 + x_7 - x_3; \\ M_5 &= M_4 + x_6 - x_4. \end{aligned}$$

Обработку результатов калибрования удобнее всего производить по схеме, предложенной Пераром. В этом случае результаты калибрования располагаются косыми рядами в виде треугольника (схема 2). На схеме 2 $p_0, p_1, \dots, p_9; q_1, q_2, \dots, q_{10}, s_1, s_2, \dots, s_{10}$ — вычисляются по приведенным ниже формулам (4), (5) и (6). Величины s_1, s_2, \dots, s_{10} — свободные члены нормальных уравнений (3).

$$\left. \begin{array}{l} p_0 = a_1 + b_1 + c_1 + \dots + l_1 \\ p_1 = a_2 b_2 + c_2 + \dots + k_2 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ p_9 = a_{10} \end{array} \right\} (4) \quad \left. \begin{array}{l} q_1 = a_1 \\ q_2 = a_2 + b_1 \\ q_3 = a_3 + b_2 + c_1 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ q_{10} = a_{10} + b_9 + c_9 + \dots + l_1 \end{array} \right\} (5)$$

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_{10} \\ s_2 &= b_1 + b_2 + \dots + b_9 \\ s_3 &= c_1 + c_2 + \dots + c_8 \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ s_{10} &= t_1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Схема 2



Правильность вычислений p_i, q_i, s_i контролируется равенством $\sum q = \sum p = \sum s$. Свободные члены первых десяти нормальных уравнений вычисляются по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} t_0 &= p_0 \\ t_1 &= p_1 - q_1 \\ t_2 &= p_2 - q_2 \\ &\dots \dots \dots \\ t_{10} &= -q_{10} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta_0 &= t_0 - t_1 \\ \Delta_1 &= t_1 - t_2 \\ \Delta_2 &= t_2 - t_3 \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta_9 &= t_9 - t_{10} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Правильность вычислений величин по формулам (7), (8) контролируется равенствами

$$\sum \Delta = t_0 - t_{10}; \quad \sum t = 0.$$

Решение системы нормальных уравнений также производилось по схеме Перара.

Суммарная погрешность метода поверки определяется, главным образом, наибольшими по своей величине частными погрешностями:

- 1) погрешностью образцовой шкалы;
- 2) погрешностью наведения на штрихи образцовой и поверяемой шкалы;
- 3) погрешностями, вызываемыми неправильным положением сличаемых мер (перекосы, негоризонтальность положения их на столе прибора).

Другие погрешности измерений, как-то: температурные погрешности, погрешности определения цены деления микрометров микроскопов, погрешности отсчета и др., по сравнению с первыми малы по своей величине и поэтому практически не скажутся на величине суммарной погрешности.

Температурными погрешностями измерений можно пренебречь вследствие того, что длина шкал объектмикрометров мала, температура сличаемых шкал примерно одинакова и температурные коэффициенты удлинения близки по своей величине. В отдельных случаях, когда сличаемые шкалы имеют разные температурные коэффициенты удлинения, необходимо вводить соответствующие поправки.

Усовершенствованный прибор снабжен, кроме того, теплозащитным экраном, что дополнительно уменьшает температурные погрешности.

Погрешности определения среднего значения цены деления микрометров не превышают 0,001 мк. Погрешности измерений, вызываемые неточностью определения среднего значения цены деления, будут значительны, если измерение объектмикрометра производится самим окулярным микрометром. Если же окулярным микрометром измеряются только малые разности длин сличаемых мер или длина наименьших подразделений, равных 0,01 мм, то предельная погрешность измерений не превысит величины 0,03—0,05 мк.

Погрешность образцовой меры. Выполненные лабораторией исследования показали, что средняя квадратичная погрешность определения действительной общей длины образцовой шкалы 1-го разряда не превосходит 0,1 мк.

Поправки миллиметровых делений и делений в 0,1 мм у шкал 1-го разряда определяются методом калибровки, и средняя квадратичная погрешность определения этих поправок не превышает обычно 0,05 мк.

Предельная погрешность образцовой меры соответственно будет равна $\pm 0,15 \div \pm 0,3$ мк, если применять доверительную вероятность 99,7%.

Погрешность наведения биссектора на штрихи. Погрешность наведения на штрихи образцовой и поверяемой мер была определена опытным путем по многократным наблюдениям, проводившимся разными наблюдателями с различными объектмикрометрами и шкалами.

Было установлено, что предельная погрешность наведения на штрихи образцовой шкалы $\pm 0,40$ мк; предельная погрешность наведения на штрихи объектмикрометра составляет $\pm 0,03 \div 0,04$ мк.

Общая погрешность наведения на штрих при поверке объектмикрометра для одного приема измерений в среднем будет равна $\pm 0,42$ мк, для среднего из трех приемов $\pm 0,25$ мк.

Погрешности, вызываемые неправильностями установки поверяемой и образцовой мер. Поверяемая и образцовая мера могут быть установлены на подвижном столе компаратора с перекосом как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости.

Установкой мер в горизонтальной плоскости добиваются того, чтобы ось меры была параллельна ходу стола. Прямолинейность установки шкалы проверяется либо по осевым штрихам, либо по концам штрихов.

Установка шкал в горизонтальной плоскости указанным способом производится с большой точностью. Величина перекоса обычно не превышает величины 5—10 мк.

Правильность установки шкалы в вертикальной плоскости проверяется по резкости изображения штрихов шкалы в начале и конце ее. Наклон шкалы по высоте исключается либо регулировочными винтами столика, либо при помощи подкладок.

Величина перекоса в вертикальной плоскости при установке по резкости изображения зависит от глубины фокусировки микроскопа.

Глубина фокусировки может быть подсчитана по формуле

$$B = \frac{\varepsilon \cdot n \cdot \delta}{V \cdot A},$$

где V — увеличение микроскопа;

A — численная апертура объектива;

ε — угловая величина кружка рассеяния, равная 0,008;

n — коэффициент преломления;

δ — расстояние наилучшего видения.

Фактическая глубина фокусировки будет больше, чем B , потому что нормальный глаз наблюдателя может аккомодироваться в некоторых пределах B' :

$$B' = 0,001 \cdot n \cdot \bar{A} \left(\frac{\delta}{V} \right)^2.$$

Если принять, что \bar{A} — ширина аккомодации для нормального глаза равна 7 диоптриям, $\delta = 250$ мм и $n = 1$, то

$$B' = \frac{437,5}{V^2}.$$

Таким образом, погрешность установки шкалы по высоте может быть вычислена по формуле:

$$B + B' = \frac{2,0}{V \cdot A} + \frac{437,5}{V^2}.$$

Установка шкалы с перекосом вызывает значительные погрешности в результатах измерений. Эти погрешности увеличиваются с уменьшением длины поверяемой меры.

При перекосе как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях вместо действительной длины на компараторе будет измеряться ее проекция (имеется в виду, что оси микроскопов прибора параллельны между собой и вертикальны).

Погрешность, вызываемая перекосом меры, может быть подсчитана по формуле:

$$\Delta L = \frac{w^2}{2L},$$

где w — линейная величина перекося;

L — длина меры.

Как уже указывалось, установка шкалы в горизонтальной плоскости производится с погрешностью не более 0,005—0,01 мм. Поэтому величина ΔL при длине шкалы более 10 мм будет не более 0,005 мк, а при $L = 1$ мм — не более 0,05 мк.

При глубине фокусировки для микроскопа ИЗА-2 с увеличением $150\times$, равной 22 мк, в результате измерений объектмикрометра войдет погрешность, равная 0,24 мк.

Точность установки объектмикрометров под микроскопом может быть повышена, если шкалы объектмикрометров будут иметь дополнительные установочные штрихи.

Наличие дополнительных установочных штрихов дает возможность уменьшить погрешности перекося меры до

$$\Delta L = \frac{22^2}{10\,000} = \frac{480}{10\,000} \approx 0,05 \text{ мк.}$$

При проверке шкал длиной свыше 10 мм эта погрешность равна

$$\Delta L = \frac{22^2}{20\,000} = 0,024 \text{ мк}$$

и практически ее можно не принимать во внимание.

Общая предельная погрешность результата трехкратной проверки объектмикрометров на компараторе ИЗА-2 определится квадратичным суммированием рассмотренных выше трех предельных составляющих погрешностей и будет равна

$$S_{\text{lim}} = \sqrt{0,15^2 + 0,25^2 + 0,24^2} = \pm 0,38 \text{ мк,}$$

а для шкал длиной более 50 мм

$$S_{\text{lim}} = \sqrt{0,3^2 + 0,25^2} = \pm 0,40 \text{ мк.}$$

Определение погрешностей опытным путем

При определении погрешностей метода проверки объектмикрометров на компараторе ИЗА-2 опытным путем многократно измерялись общая длина и подразделения шкал нескольких объектмикрометров сличением с образцовой шкалой 1-го разряда № 5103. Поправки подразделений были определены также методом калибровки с помощью микроскопа с двойным окулярным микрометром.

Произведено было сравнение результатов измерений на усовершенствованном компараторе ИЗА-2 с результатами измерений на других образцовых установках.

В табл. 1 и 2 приводятся результаты сличения общей длины шкал объектмикрометров № 490601 и 7654 с дополнительной шкалой на образцовой шкале 1-го разряда № 5103. Средняя квадратичная погрешность ряда измерений равна соответственно $\pm 0,18$ мк и $\pm 0,20$ мк.

Проверка шкалы производилась не менее чем тремя приемами измерений. Средняя квадратичная погрешность результата в случае трех произведенных измерений будет в среднем равна $\pm 0,11$ мк.

Для определения погрешности результатов проверки подразделений шкал объектмикрометров было произведено многократное сличение отдельных интервалов шкалы объектмикрометра № 490218 с соответствующими подразделениями образцовой шкалы № 5103. В табл. 3 при-

Таблица 1

Порядковый номер приема измерений	Поправка шкалы, мк	v , мк	Порядковый номер приема измерений	Поправка шкалы, мк	v , мк
1	-1,00	+0,04	10	-1,12	-0,08
2	-0,85	+0,19	11	-1,21	-0,17
3	-0,79	+0,25	12	-0,97	+0,07
4	-1,11	-0,07	13	-0,82	+0,22
5	-1,05	-0,01	14	-1,28	-0,24
6	-0,75	+0,29	Среднее значение	-1,04	
7	-1,30	-0,26			
8	-0,99	+0,05		$\sigma = 0,18$ мк	
9	-1,31	-0,27			

Таблица 2

Порядковый номер приема измерений	Поправка шкалы, мк	v , мк	Порядковый номер приема измерений	Поправка шкалы, мк	v , мк
1	-1,38	+0,18	16	-1,80	-0,24
2	-1,60	-0,04	17	-1,64	-0,08
3	-1,31	+0,28	18	-1,83	-0,27
4	-1,70	-0,14	19	-1,35	-0,20
5	-1,46	+0,10	20	-1,27	+0,29
6	-1,53	+0,03	21	-1,62	-0,06
7	-1,40	+0,16	22	-1,20	+0,36
8	-1,68	-0,12	23	-1,82	-0,26
9	-1,53	+0,03	24	-1,92	-0,36
10	-1,84	-0,28	25	-1,34	+0,22
11	-1,75	-0,19	26	-1,24	+0,32
12	-1,70	-0,14	27	-1,40	+0,16
13	-1,64	-0,08	28	-1,70	-0,14
14	-1,39	+0,17	29	-1,47	+0,09
15	-1,56	0,00	30	-1,60	-0,04
Среднее значение				-1,56	
$\sigma = 0,20$ мк					

ведены результаты этих сличений. В табл. 4 приведены результаты четырех приемов сличения подразделений шкалы № 7654 со шкалой № 5103. По результатам этих измерений можно вычислить среднюю квадратичную погрешность данного метода измерений по формуле:

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

Таблица 3

Порядковый номер пункта измерения	Поправки шкалы и остаточные погрешности (в мк) по интервалам (в мм)																			
	0-0,1		0-0,2		0-0,3		0-0,4		0-0,5		0-0,6		0-0,7		0-0,8		0-0,9		0-1,0	
	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в
1	-0,72	-0,18	-0,08	+0,04	-0,10	-0,10	-0,37	-0,22	-0,15	-0,09	-0,23	-0,15	-0,05	-0,05	+0,23	-0,09	-0,03	-0,17	-0,30	0,00
2	-0,40	+0,14	-0,24	-0,12	+0,10	+0,10	-0,11	+0,04	-0,24	-0,18	-0,02	+0,06	-0,28	-0,22	+0,38	+0,06	+0,27	+0,13	-0,28	+0,02
3	-0,40	+0,14	-0,11	+0,01	+0,11	-0,11	-0,17	-0,02	+0,12	+0,18	-0,14	-0,06	+0,24	+0,24	+0,17	-0,15	+0,02	-0,12	-0,55	-0,26
4	-0,55	-0,01	+0,01	+0,13	-0,08	-0,08	-0,17	-0,02	-0,23	-0,17	+0,16	+0,24	-0,16	-0,16	+0,22	-0,10	+0,31	+0,17	-0,23	+0,07
5	-0,63	-0,09	-0,22	-0,10	+0,18	+0,18	+0,05	+0,20	+0,19	+0,25	-0,19	-0,11	+0,21	+0,21	+0,60	+0,28	+0,13	-0,01	-0,13	+0,17
Среднее значение	-0,52		-0,12		-0,00		-0,15		-0,06		-0,08		0,00		+0,32		+0,14			-0,30

Таблица 4

Порядковый номер пункта измерения	Поправки шкалы и остаточные погрешности (в мк) по интервалам (в мм)																			
	0-0,1		0-0,2		0-0,3		0-0,4		0-0,5		0-0,5		0-0,7		0-0,8		0-0,9		0-1,0	
	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в	По-правка	в
1	-1,54	-0,24	-1,26	-0,09	-1,17	-0,09	-1,36	-0,37	-1,29	-0,10	-1,20	-0,01	-1,63	-0,25	-1,24	-0,14	-1,86	-0,39	-1,84	-0,32
2	-1,46	-0,16	-0,97	+0,20	-0,81	+0,27	-0,73	+0,26	-1,04	+0,15	-1,23	-0,04	-1,69	-0,31	-1,20	-0,10	-1,62	-0,15	-1,55	-0,03
3	-0,71	+0,59	-1,09	+0,08	-1,08	0	-0,67	+0,32	-1,02	+0,17	-0,84	+0,35	-0,76	+0,62	-0,69	+0,41	-0,97	+0,50	-1,20	+0,32
4	-1,49	-0,19	-1,37	-0,20	-1,23	-0,15	-1,22	-0,23	-1,40	-0,21	-1,48	-0,29	-1,45	-0,07	-1,29	-0,19	-1,44	+0,03	-1,48	+0,04
Среднее значение	-1,30		-1,17		-1,08		-0,99		-1,19		-1,19		-1,38		-1,10		-1,47			-1,52

где σ — остаточные погрешности;

n — число измеряемых интервалов;

K — число повторных измерений каждого интервала.

Вычисленная по этой формуле средняя квадратичная погрешность для данных табл. 3 и 4 равна $\sigma_1 = \pm 0,22$ мк, $\sigma_2 = \pm 0,30$ мк.

Определенные опытным путем средние квадратичные погрешности результатов поверки хорошо согласуются с вычисленными значениями этих погрешностей. Таким образом, можно считать, что предельная погрешность результатов поверки объектомикрометров на усовершенствованном лабораторией компараторе ИЗА-2 будет не более $\pm 0,4$ мк, что вполне удовлетворяет поставленным нами ранее требованиям.

Несколько более точные результаты могут быть получены при поверке подразделений шкал объектомикрометров методом калибровки при помощи микроскопа с двумя окулярными микрометрами. В этом случае 19 неизвестных величин (10 поправок шкалы и 9 вспомогательных интервалов) определяются в результате решения 55 начальных уравнений.

При поверке подразделений методом калибровки имеют место следующие наибольшие погрешности:

а) погрешность определения общей длины шкалы объектомикрометра;

б) погрешность метода калибровки.

Для определения величины погрешности метода калибровки была произведена калибровка подразделений в 0,1 мм и 0,01 мм шкал объектомикрометров № 7654 и № 490601.

Произведено было две калибровки десятых долей миллиметра и четыре калибровки наименьших подразделений шкалы, равных 0,01 мм.

В табл. 5 и 6 приведены результаты этих калибровок.

Средняя квадратичная погрешность начальных уравнений при калибровке десятых долей миллиметра равна соответственно $\pm 0,09$ мк и $\pm 0,12$ мк.

Таблица 5

Интервалы, мм	Поправки интервалов, мк			Интервалы, мм	Поправки интервалов, мк		
	1-я калибровка	2-я калибровка	разность d		1-я калибровка	2-я калибровка	разность d
0—0,1	+0,73	+0,62	0,11	0—0,6	-0,79	-0,93	0,14
0—0,2	+0,39	+0,25	0,14	0—0,7	-1,23	-1,01	0,22
0—0,3	+0,05	+0,10	0,05	0—0,8	-1,78	-1,80	0,02
0—0,4	-0,02	-0,19	0,17	0—0,9	-1,69	-1,76	0,07
0—0,5	-0,37	-0,55	0,18	0—1,0	-1,65	-1,65	0,00

Весовые коэффициенты неизвестных, определяемых калибровкой, равны в среднем 0,39; средняя квадратичная погрешность вычисленных значений поправок будет равна $\pm 0,04$ мк.

Если положить, что средняя квадратичная погрешность определения общей длины калибруемой шкалы равна 0,2 мк, то общая средняя квадратичная погрешность результатов калибровки — поправок десятых долей миллиметра может быть вычислена по формуле

$$S = (S_1 + S_2 \cdot 10^{-4}L),$$

где S_1 — погрешность калибровки;

S_2 — коэффициент, зависящий от погрешности определения общей длины.

Таким образом, действительная длина интервалов 0,1 мм определена с погрешностью, в среднем равной

$$S_{0,1 \text{ мм}} = (0,04 + 0,16 : 0,1) \text{ мк} = 0,06 \text{ мк}.$$

Поправки же интервалов 0,1; 0,2; ... 0,9 мм соответственно будут определены со средней квадратичной погрешностью от 0,06 до 0,18 мк.

Таблица 6

Интервалы, мм	Поправки интервалов, мк			
	1-я калибровка	2-я калибровка	3-я калибровка	4-я калибровка
0—0,01	—0,05	+0,03	—0,06	—0,03
0—0,02	—0,03	+0,12	+0,06	+0,10
0—0,03	+0,18	+0,04	+0,39	+0,40
0—0,04	+0,32	+0,57	+0,53	+0,56
0—0,05	+0,53	+0,84	+0,82	+0,81
0—0,06	+0,40	+0,36	+0,50	+0,51
0—0,07	+0,42	+0,46	+0,41	+0,43
0—0,08	+0,67	+0,64	+0,64	+0,64
0—0,09	+0,76	+0,71	+0,67	+0,67
0—0,1	+0,68	+0,68	+0,68	+0,68

Средняя квадратичная погрешность, вычисленная по разностям двойных измерений (табл. 5), равна $\sigma = \pm 0,1 \text{ мк}$.

При калибровке подразделений, равных 0,01 мм, среднюю квадратичную погрешность определения общей исходной длины (интервала 0,1 мм) можно принять равной 0,06 мк. Положив погрешность калибровки также равной 0,04 мк, получим, что средняя квадратичная погрешность определения поправок наименьших подразделений шкалы объектомикроскопов будет

$$S_{0,01 \text{ мм}} = (0,04 + 0,02 \cdot 0,1) \text{ мк} = 0,04 \text{ мк}.$$

Средняя же квадратичная погрешность определения поправок интервалов 0,01; 0,02; 0,03 мм и т. д. до 0,09 мм будет колебаться в пределах от $\pm 0,04$ до $\pm 0,06 \text{ мк}$.

Средняя квадратичная погрешность, вычисленная по данным табл. 6 по формуле

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

равна $\pm 0,08 \text{ мк}$.

При исследовании усовершенствованного компаратора ИЗА-2 лаборатория произвела ряд дополнительных опытов. Эти опыты показали, что погрешности результатов поверки на компараторе типа ИЗА-2 шкал других номинальных размеров (длиной до 200 мм), для которых существуют методы высокой точности, также не превосходят величины $\pm 0,5 \text{ мк}$.

В табл. 7 в качестве примера приводятся результаты поверки шкалы № 73414 на компараторе ИЗА-2 и другими методами.

Таблица 7

Интервалы, мм	Данные 1955 г., полученные на компараторе типа ИЗА-2, мм	Данные 1955 г., средние из измерений на измерительной машине и стереокомпараторе, мм	Расхождение, мк
0—10	9,99973	10,00020	-0,47
0—20	20,00064	20,00032	+0,32
0—30	30,00045	30,00028	+0,17
0—40	40,00055	40,00105	-0,50
0—50	50,00120	50,00101	+0,19
0—60	60,00165	60,00155	+0,10
0—70	70,00142	70,00140	+0,02
0—80	80,00128	80,00109	+0,19
0—90	90,00143	90,00138	+0,05
0—100	100,00173	100,00120	+0,53

Предельная погрешность поверки рабочих шкал большой длины должна быть не более ± 1 мк. Расхождения же между результатами поверки этих шкал на компараторе ИЗА-2 и другими методами не превосходят этой величины.

Мероприятия по повышению точности поверки образцовых шкал I-го разряда

В последнее время промышленностью была поставлена задача повышения точности измерения образцовых шкал длиной до 200 мм. Обобщение опыта работ в этом направлении показало, что имеется возможность повысить точность поверки шкал путем ужесточения требований, предъявляемых к приборам, на которых производится поверка шкал при их юстировке и исследовании.

Образцовые шкалы I-го разряда подвергаются на стереокомпараторе сравнению со шкалой прибора. Следовательно, для повышения точности сравнения шкал следует повысить точность аттестации 200-миллиметровой шкалы стереокомпаратора № 18776.

Поправки подразделений этой шкалы определяются методом калибровки. Погрешность определения поправок в этом случае в значительной мере зависит от точности определения общей длины шкалы.

В отличие от предыдущих лет в 1955 г. было произведено определение общей длины интервалов 0—100 и 100—200 мм шкалы № 18776 сравнением с различными подразделениями эталона — копии платино-иридиевого метра М20, рабочих эталонов метра R 116 и R 86 и с рабочим эталоном дециметра Д76.

Для каждого интервала было выполнено более 20 серий измерений. Каждая серия состояла из 8—10 приемов измерений.

В табл. 8 приведены окончательные результаты измерений интервалов 0—100, 100—200 и 0—200 мм шкалы № 18776.

Средняя квадратичная погрешность окончательных результатов определения действительной длины интервалов 0—100, 100—200 и 0—200 мм лежит в пределах $\pm 0,11 \div \pm 0,08$ мк. До 1955 г. поправки интервалов 0—100 и 100—200 мм шкалы № 18776 определялись с погрешностью $S = \pm 0,20$ мк.

В связи с тем, что точность измерения шкал на стереокомпараторе в большой степени зависит от качества штрихов сличаемых шкал, в лаборатории были исследованы еще две шкалы № 5103 и 490541, имеющие штрихи различного качества. Ширина штрихов у шкалы № 18776 равна 6—7 мк, у шкалы № 5103 4—5 мк, у шкалы № 490541 2—3 мк. Благодаря этому мы имеем возможность в зависимости

Таблица 8

Интервалы шкалы № 18776, мм	0—100	100—200	0—200
Поправки интервалов шкалы № 18776, мк	+0,50	-0,36	+0,14

от ширины штрихов поверяемой шкалы выбирать в качестве исходной одну из этих трех шкал.

В 1955 г. при исследовании стереокомпаратора большое внимание было уделено вопросу определения цены деления шкал оптических микрометров

стереокомпаратора. Для этой цели специально были изготовлены две юстировочные шкалы, имеющие каждая по три штриха, соответствующих 0, 100 и 200 мм. Разности длин этих интервалов были определены на однометровом универсальном компараторе методом продольного компарирования со средней квадратичной погрешностью, равной $\pm 0,08$ мк.

Далее по этим юстировочным шкалам была определена цена деления шкал оптических микрометров микрометров стереокомпаратора.

Среднее значение цены деления шкал оптических микрометров, равное для левого 0,0965 мк и правого микрометра соответственно 0,0981 мк, определено со средней квадратичной погрешностью порядка 0,0002 мк.

Учитывая вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

1. На основании анализа различных возможных методов измерения шкал наиболее пригодным для поверки малых шкал (шкал объективных микрометров) следует признать метод продольного компарирования на видоизмененных по сравнению с конструкцией завода-изготовителя компараторах типа ИЗА-2.

2. Экспериментальное исследование метода поверки шкал малых размеров показало, что предельная погрешность результатов поверки не превышает $\pm 0,4$ мк.

3. Ряд мероприятий, выполненных лабораторией, обеспечил повышение точности поверки образцовых шкал I-го разряда примерно в два раза.

4. Следует рекомендовать обеспечить названными выше приборами лаборатории ГИМИП. Для этой цели необходимо заказать серию таких приборов. Микроскоп с двойным окулярным микрометром может быть использован не только для калибровки, но и в качестве отсчетного при сличениях поверяемой шкалы с образцовой.

А. Д. ЗАГАТИНА, Л. А. СОЛОВЬЕВА,
С. С. ТОВЧИГРЕЧКО, С. И. ТОРОПИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ УДЛИНЕНИЯ МАЯТНИКОВЫХ СТЕРЖНЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ИНВАРА ЗАВОДА «ЭТАЛОН»

В период 1950—1952 гг. на заводе «Эталон», под руководством Б. В. Блинова, освоено изготовление инварных маятниковых стержней, необходимых для выпуска высокоточных маятниковых часов типа АЧЭ. Температурный коэффициент удлинения этих стержней, обычно меньший $0,5 \cdot 10^{-6}$ 1/град., можно считать удовлетворительным по величине. Что касается устойчивости температурных коэффициентов во времени при колебаниях маятника под нагрузкой около 7 кгс (вес гири маятника), то этот вопрос оставался неисследованным. Имели место также заметные расхождения значений температурных коэффициентов инварных стержней как для иностранных (французских), так и для советских (завода «Эталон»), определенных абсолютным компараторным методом и из наблюдений хода часов во время их температурных исследований.

Высказывались предположения, что изменение коэффициентов удлинения стержней после их установки в часы происходит под влиянием механических воздействий на стержень во время сборки часов (сверловка отверстия для штифта и винтов, удары во время сборки маятника и др.), а также под действием веса гири маятника.

Вопросы поведения стержней маятника имеют прямое отношение к качеству часов, в выпуске которых участвует лаборатория времени и частоты ВНИИМ. В связи с этим возникла необходимость проведения специальных исследований инварных стержней маятника с задачей выяснить:

- 1) изменяются ли температурные коэффициенты удлинения стержней:
 - а) с течением времени без каких-либо значительных механических воздействий на стержни;
 - б) от механических воздействий на стержни (удары, тряска, сверловка в них отверстий для штифтов и др.);
 - в) от натяжения стержней гирей маятника (весом около 7 кгс) в его рабочем состоянии;
- 2) являются ли постоянными температурные коэффициенты стержней, изготовленных заводом «Эталон» из различных плавок инвара;

3) имеются ли различия в значениях температурных коэффициентов стержней, изготовленных из советского (завод «Эталон») и иностранного (например, французского) инвара.

Для данного исследования были использованы: три стержня А, Б, В, изготовленные из одной и той же плавки инвара; стержень Г, изготовленный из другой плавки, и стержень № 6, находящийся в часах АЧЭ, изготовленный из французского инвара.

Стержень Б был выбран в качестве «свидетеля» и в процессе исследования никаким воздействиям не подвергался.

Программа исследований включала:

а) многократные определения температурных коэффициентов удлинения стержней абсолютным компараторным методом на однометровом компараторе ВНИИМ; эти определения чередовались с различными механическими воздействиями на стержни (тряска, удары, выточки крючков и отверстий в стержнях, качания маятника с грузом и др.);

б) температурные исследования часов АЧЭ, с целью определения температурного коэффициента удлинения стержня по ходу часов. Исследования температурных коэффициентов абсолютным компараторным методом и обработка их результатов проведены С. И. Торопиным и А. Д. Загатиной; температурные исследования часов выполнены Л. А. Соловьевой.

При определении температурных коэффициентов стержней абсолютным методом в большую ванну компаратора, наполненную водой, помещался исследуемый стержень, а в малую ванну, также заполненную водой, помещался рабочий эталон, температурная формула которого хорошо известна. На стержнях, на площадках, расположенных на расстоянии 1 м одна от другой, нанесены специальные штрихи. Площадки, на которых наносились штрихи, не только тщательно полировались под зеркало, но и выравнивались так, чтобы их плоскости были параллельны. Ширина штрихов не более 10 мк.

В качестве исходной меры, с которой производилось сравнение стержней при разных температурах, был взят рабочий эталон, инварный метр М 318, уравнение которого имеет следующий вид:

$$l_t = 1 \text{ м} + [20,68 + (2,00 - 0,007t)t] \text{ мк},$$

где l_t — длина метра при температуре t .

Определение температурных коэффициентов производилось при шести-семи температурах в диапазоне от 0,5 до 30,0° С. Намеченная по программе исследования температура поддерживалась в ванне перед наблюдением в течение 12—14 час.

Температура стержней в большой ванне компаратора определялась по трем образцовым ртутным термометрам, аттестованным в лаборатории средних температур ВНИИМ. Температура метра М 318 в малой ванне определялась по двум образцовым термометрам, расположенным у концов метра.

Для каждого диапазона температур средний результат получили из пяти-шести приемов измерений разности длин стержня и метра М 318. Это дало возможность составить пять-шесть условных уравнений вида:

$$\Delta l_t = \Delta l_0 + [\alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2] l,$$

где Δl_t — измеренная разность между длиной исследуемого стержня при температуре наблюдения t и метром М 318 при температуре 20° С;

Δl_0 — разность длин стержня и метра М 318 при температуре 20° С;

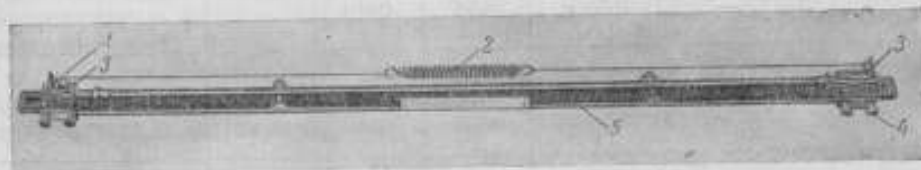
α , β — температурные коэффициенты удлинения исследуемого стержня, подлежащие определению;
 l — длина стержня, равная одному метру.

Полученная система условных уравнений решалась по способу наименьших квадратов.

Средняя квадратическая погрешность определения температурных коэффициентов равна:

$$\pm 0,03 \cdot 10^{-6} \text{ для } \alpha \text{ и } \pm 0,001 \cdot 10^{-6} \text{ для } \beta.$$

Первое определение температурных коэффициентов стержней было произведено после их изготовления на заводе «Эталон».



Во вторую серию вошли определения коэффициентов после механического воздействия на стержни. Так, например, в стержнях В и Г были выточены крючки и произведена сверловка отверстий для штифта. Затем в стержни вставлялись штифты, которые перед наблюдением во второй серии выколачивались.

Кроме того, маятник со стержнем В был установлен в часы, которые шли в течение месяца для того, чтобы выяснить, изменится ли температурный коэффициент стержня от того, что он находился под натяжением, производимым гирей маятника (весом около 7 кг).

В третью серию наблюдений вошли определения коэффициентов стержней А и В в свободном состоянии и определение коэффициента стержня Г из наблюдений по ходу часов при различных температурах.

В дальнейшем, когда выяснилось, что температурные коэффициенты удлинения стержней оказались такими же после того, как они работали под натяжением, производимым гирей маятника весом 7 кг, были проведены дополнительные определения коэффициентов стержней А и В компараторным методом. При определении стержни находились под натяжением с усилием, равным примерно 7 кг. Это определение вошло в четвертую серию. Кроме того, в четвертую серию вошли определения коэффициентов стержня Г и стержня-свидетеля В в свободном состоянии.

Приспособление для натяжения стержня состоит из блока 1, пружины 2 и двух подставок 3, жестко скрепленных посредством винтов 4 со столиком компрессора 5 (см. рисунок).

На одной из подставок установлен блок, а на другой — две шпильки для закрепления концов тонкого шнура.

Предварительно, до установки стержня в ванне была определена длина пружины при нагрузке в 7 кг. Эта длина пружины строго выдерживалась, когда производилась установка стержня в ванне для определения температурного коэффициента удлинения стержня при нагрузке в 7 кг. Отметим, что изменение длины стержня вследствие изменения растягивающего усилия пружины при изменениях температуры в ванне лежит за пределами точности измерения на компараторе.

Результаты определения температурных коэффициентов удлинения стержней даны в таблице.

Марка стержня	Дата наблюдения	Температурные коэффициенты удлинения, определенные				
		абсолютным компараторным методом				методом температурных исследований часов
		в свободном состоянии стержня		при натяжении в 7 кг		
		α	β	α	β	
А	30/XI—9/XII 1954 г.	0,39	0,002			
	13/VI—29/VI 1955 г.	0,40	0,004			
	15/X—21/X 1955 г. 10/XII—15/XII 1955 г.	0,35	0,001	0,36	0,001	
Б	13/VIII—20/VIII 1954 г.	0,35				
	6/XII—13/XII 1954 г.	0,33	0,005			
	15/X—21/X 1955 г.	0,33	0,001			
В	13/VIII—20/VIII 1954 г.	0,28				
	<i>Выточены крючки и отверстия для штифтов, после чего стержень, как часть маятника, находился около месяца в действующих часах</i>					
	6/XII—10/XII 1954 г.	0,38	0,005			
	2/VI—10/VI 1955 г. 19/VII—2/VIII 1955 г. 15/X—21/X 1955 г.	0,38 0,35	0,005 0,001	0,39	0,0053	
Г	21/VIII—25/VIII 1954 г.	0,18				
	<i>Выточены крючки и отверстия для штифтов</i>					
	30/XI—9/XII 1954 г.	0,27	0,001			
	20/VI—18/VII 1955 г.					0,47
	5/VIII—17/VIII 1955 г.	0,28	0,004			
	9/XI—17/XI 1955 г.	0,26	0,004			
<i>После сильных ударов о стержень</i>						
	6/V—16/V 1956 г.	0,26	0,001			
№ 6	7/II—1/III 1955 г.					0,48
	2/VI—10/VI 1955 г.	0,19	0,004			
	28/X—14/XII 1955 г.					0,39

Анализ результатов исследования, представленных в таблице, позволил установить следующее:

1) значения температурных коэффициентов удлинения α -стержней, изготовленных заводом «Эталон», не превосходят $0,5 \cdot 10^{-6}$ 1/град.;

2) температурные коэффициенты стержней А, Б и В, изготовленных из одной и той же плавки инвара, близки между собой и отличаются от коэффициента стержня Г, изготовленного из другой плавки;

3) коэффициенты стержней В и Г после механического воздействия на них изменились в сторону увеличения их приблизительно на $0,1 \cdot 10^{-6}$ 1/град. (около 30%);

4) температурный коэффициент стержня Б «свидетеля» за период исследования 1954—1955 гг. не изменился (в пределах точности определений);

5) коэффициент стержня В не изменился после работы в часах в течение месяца;

6) коэффициенты стержней А и В, определявшиеся как в свободном состоянии (без натяжения), так и при натяжении 7 кг, оставались неизменными в пределах точности их определений;

7) значения температурных коэффициентов удлинения стержней, определенные абсолютным компараторным методом, меньше, чем значения, полученные из температурных исследований хода часов. При вычислении температурных коэффициентов хода часов были учтены влияния температурных изменений упругих свойств и длины подвесной пружины, момента инерции маятника, а также влияния импульсного механизма на период колебания маятника. Не удалось учесть влияния изгиба маятника, так как точность определения модуля упругости инвара была недостаточна: это, по-видимому, и явилось причиной получившихся расхождений α -стержней;

8) величина коэффициента стержня № 6, изготовленного из французского инвара, близка к значению α -стержней, изготовленных из инвара завода «Эталон».

С. С. ТОВЧИГРЕЧКО

ИССЛЕДОВАНИЕ И УЧЕТ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ОШИБОК МИКРОМЕТРИЧЕСКИХ ВИНТОВ ЭКЗАМЕНАТОРОВ УРОВНЕЙ

В работе дано описание двух установок для исследования микрометрических винтов экзаменаторов уровней.

На одной из этих установок было произведено определение периодических ошибок микрометрических винтов экзаменаторов уровней в их рабочем состоянии, на другой — определение периодических ошибок, свободных от влияния на них несовпадения конца (упора) винта с его осью вращения.

Полученные графики позволяют выделить составляющую погрешности, зависящую от несовпадения конца (упора) винта с его осью вращения. На примерах показано заметное улучшение сходимости цены деления уровня, определенной с помощью различных частей оборотов винта после учета его периодических ошибок.

Введение

Как известно из исследований микрометрических винтов микроскоп-микрометров и окуляр-микрометров астрономо-геодезических инструментов, периодические и ходовые ошибки этих винтов бывают иногда весьма значительны и поэтому приходится в измерения этими винтами вводить поправки. Так как винты экзаменаторов уровней по своей конструкции несколько грубее винтов астрономо-геодезических инструментов, то естественно ожидать, что их ошибки должны быть больше, а в отдельных случаях могут быть настолько велики, что исказят измеряемые этими винтами цены делений уровней. Это обстоятельство выдвинуло вопрос исследования периодических ошибок микрометрических винтов экзаменаторов уровней. Ходовые ошибки при исследовании уровней не могут заметно влиять на цену деления, так как даваемые наклоны продольной оси уровня обычно малы и измеряются поворотом винта всегда меньше одного целого оборота.

Выбор метода для исследования периодических ошибок микрометрических экзаменаторов уровней

Как известно, кроме распространенного классического способа Бесселя [1] исследования периодических ошибок винтов астрономо-геодезических инструментов, существует ряд других способов, среди которых

наиболее выгодно выделяется способ Ридберга, опубликованный еще в 1896 г. [2].

Способ Ридберга основан на допущениях:

1) периодические ошибки в соседних 2—3 оборотах одинаковы;

2) $\sum_{i=0}^{i=q-1} \delta_i = 0$, где δ_i — поправка, соответствующая i -му отсчету по

барabanу винта, q — число вспомогательных интервалов, укладываемых целое число раз в одном или нескольких оборотах.

Эти допущения тем законнее, чем лучше качество винта, т. е. чем меньше его ошибки.

Предварительные данные по рассматриваемым винтам указывали на наличие больших периодических ошибок. Это обстоятельство привело



Рис. 1.

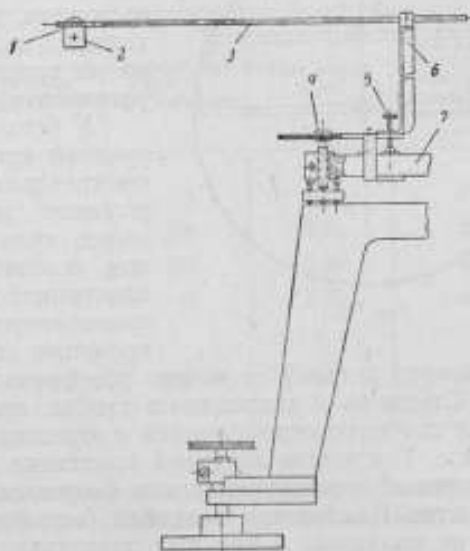


Рис. 2.

к необходимости прежде всего провести исследование, которое позволило бы решить вопрос о сравнимости точностей способов Ридберга и Бесселя для случая низкого качества винтов.

Этими двумя способами был исследован микрометрический винт окуляр-микрометра универсального астрономического инструмента «Troughton — Simms», отличавшийся низким качеством.

При исследовании по способу Бесселя в качестве вспомогательных интервалов были приняты, как обычно, $1/2$ и $3/4$ оборота; эти интервалы измерялись микрометрическим винтом через 0,1 его оборота.

При исследовании по способу Ридберга вспомогательный интервал был взят равным $1/4$ оборота, благодаря чему весь цикл замыкался на одном обороте и поэтому упомянутое первое допущение, лежащее в основе способа Ридберга, исключалось.

На рис. 1 изображены «кривые поправок» исследованного винта, причем пунктирной линией нанесена кривая, полученная по способу Ридберга, сплошной — по способу Бесселя.

Из рассмотрения этого графика видно, что исследованный винт действительно плохого качества, так как поправки достигают значений

от $-1,87$ до $+1,46$ делений барабана винта; сами же кривые, определенные двумя методами, совпали, исключая один короткий участок.

Таким образом, способ Ридберга, принятый для исследования, пригоден и для случая «плохого» винта.

Установка для исследования микрометрического винта экзаменаторов уровней в его рабочем положении

Отсутствие специальных устройств для рассматриваемых исследований привело к необходимости изготовления установки дополнительно к имевшемуся в лаборатории испытателю винтов фирмы Бамберга.

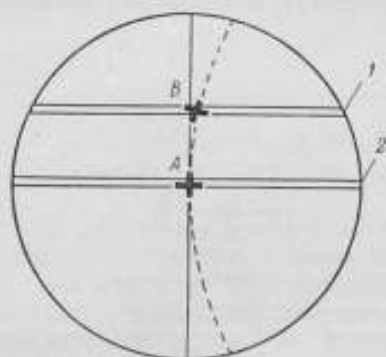


Рис. 3.

Установка, изображенная на рис. 2, была осуществлена с целью исследования винта экзаменатора в его рабочем состоянии, когда винт, упираясь своим концом в специальную площадку, во время вращения поднимает или опускает установочную плиту экзаменатора.

К установочной плите 7 экзаменатора уровней при помощи зажимного винта 5 прикреплена вертикальная стойка из углового железа 6 с отверстием на конце, куда продевается в горизонтальном положении стержень 3 с латунной пластинкой 2 на конце. Эта пластинка прижимается к стержню винтиком 1, одновременно являющимся для пластинки

осью, вокруг которой ее можно поворачивать во время юстировки установки. Стержень 3 закреплен в стойке при помощи стопорного винта и может свободно перемещаться в горизонтальном направлении, если его открепить. Посередине латунной пластинки 2 начерчен тонкой иглой крестик, который устанавливался в фокусе микроскоп-микрометра испытателя винтов Бамберга. Последний (испытатель винтов) был установлен рядом на солидных и прочных подставках.

При вращении винта экзаменатора 4 все приспособление, жестко скрепленное с его установочной плитой, движется вместе с ней, поднимаясь вверх или опускаясь вниз, поворачиваясь вокруг некоторой горизонтальной оси (перпендикулярной плоскости чертежа, рис. 2).

На это обстоятельство следует обратить особое внимание (рис. 3, где 1 — подвижный биссектор, 2 — неподвижный биссектор), так как благодаря непоступательному перемещению штриха во время измерения вспомогательного интервала последний может получиться искаженным на различных участках винта. Это затруднение было устранено тем, что точку пересечения вертикального и горизонтального штрихов наводили на точку пересечения штриха биссектора с вертикальной линией (рис. 3). Конечно, такая наводка возможна только для одного исходного штриха, фиксирующего вспомогательный интервал (положение креста A), так как крестик пластинки во время наводки на второй штрих отойдет от вертикальной линии в положение B (пунктирной линией показан путь движения крестика во время вращения винта экзаменатора). Такую наводку необходимо было делать для того, чтобы исключить ошибку, вносимую в измеряемый интервал в случае нестройной параллельности биссекторов.

Крестик пластинки был освещен так, что в поле зрения микроскоп-микрометра испытателя винтов наблюдалось светящееся изображение штрихов, благодаря чему точность наводки значительно повысилась.

Установка была помещена на прочном цементном основании в подвальной помещении, что обеспечило ее жесткость и довольно хорошее постоянство температуры. Колебания последней за все время исследований не превышали 1° С.

В качестве вспомогательного был принят интервал, равный 1/4 оборота исследуемого винта, из тех же соображений, что и при исследовании винта окуляр-микрометра.

Измерение вспомогательного интервала производилось аналогично тому, как это делается во время исследования винтов микроскоп-микрометров и окуляр-микрометров, но с теми особенностями наводки, которые упомянуты выше.

Исследованию подвергались винты пяти экзаменаторов уровней, основные характеристики которых даны в табл. 1.

Таблица 1

Фирма или завод-изготовитель и номер экзаменатора	Номинальная цена одного деления в секундах дуги	Количество делений на барабане	Шаг винта в мм	Расстояние от оси вращения установочной плиты до оси вращения микрометрического винта в см
Завод „Станкоприбор“ № 36	5	72	0,50	29
Завод „Станкоприбор“, № 167	1	180	0,25	29
Гильдебрандт, № 232235	1	180	0,25	28,5
Цейсс, № 375374	4	48	0,50	43
SIP — Societé Genevoise d'instruments de Physique (без номера)	1	60	0,30	105,5

Установка для исследования микрометрического винта экзаменаторов уровней при свободном положении винта

Ошибка винтов экзаменаторов уровней происходит от несовпадения конца (упора) винта с его осью вращения при перпендикулярности этой оси и опорной поверхности или при неровностях на ней [3].

Первое исследование при рабочем положении винта позволило оценить общие периодические ошибки винта, представляющие сумму частных составляющих, главными из которых являются: 1) ошибка собственно винта (винтовой пары); 2) ошибка вследствие эксцентриситета барабана винта; 3) неправильность нанесений делений на барабане винта; 4) ошибка, зависящая от несовпадения конца (упора) винта с его осью вращения при некотором наклоне подпятника винта или наличии неровностей на его поверхности.

Задачу второго исследования составила оценка суммы первых трех упомянутых выше погрешностей измерения.

Схема установки для данного исследования дана на рис. 4. Установка состоит из массивного на трех остrokонечных ножках основания 12, в которое наглухо заделан вертикальный металлический стержень 11; на этот стержень надет металлический брусок 10, который может свободно перемещаться по нему, если отпустить стопорный винт (на рис. 4 этот винт не виден, так как он закрывается стержнем 11, находящимся на переднем плане); в этот металлический брусок вдевается горизонтальный металлический стержень 8, который можно пере-

мещать в горизонтальном направлении, если открепить стопорный винт 9. На конце горизонтального стержня наглухо надета металлическая муфта 4, в которую вмонтирован остроконечный стальной стержень 7 таким образом, что он может свободно под действием силы, приложенной к концу стержня и направленной вверх по его оси, подниматься и свободно опускаться под действием силы тяжести. К верхнему концу этого стержня прикреплена латунная пластинка 6, которую можно было вращать вокруг зажимного винта 5 в плоскости чертежа во время

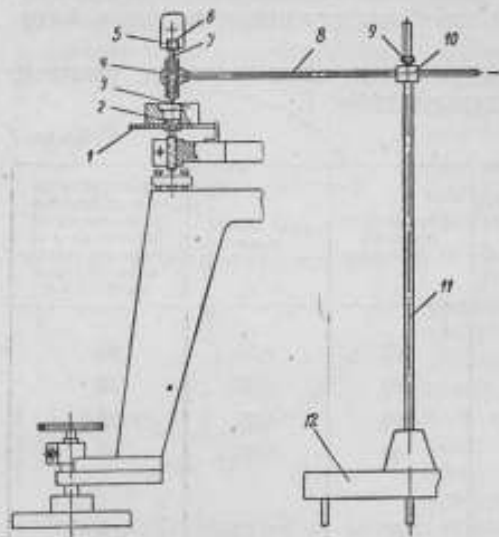


Рис. 4.

юстирования установки; посредине пластинки 6 начерчен острой иглой крестик.

Кроме описанного приспособления, была изготовлена медная массивная цилиндрическая накладка 3 на барабан винта. Так как обычно во всех барабанах микрометрических винтов экзаменаторов уровней имеются выступы 2, то наш накладной цилиндр имеет посредине основания прилегающую к барабану небольшую полость; остальная часть основания подклеена тонким сукном для увеличения трения между барабаном винта 1 и самой накладкой. Посредине верхнего основания наглухо закреплена плоская, хорошо отполированная и отхромированная пластина.

Процесс исследования состоял в следующем. Штангу экзаменатора поднимали при помощи прокладки так, чтобы конец микрометрического винта не касался подпятника, как это видно на рис. 4. Все приспособление юстировалось так, чтобы конец стального стержня 7 был совмещен с осью вращения винта. Для этого отполированную поверхность цилиндрической накладки закапчивали на пламени свечи, после чего ее помещали на барабан винта, как изображено на рис. 4. После этого винт 1 поворачивали на полную окружность, в результате чего конец стержня 7 описывал на законченной поверхности окружность радиусом, равным расстоянию конца стержня от оси вращения винта. Обычно возможно подвести конец стержня так, что упомянутый радиус близок к 1 мм. Затем подводили конец стержня 7 в центр окружности, лежащий на оси вращения винта. Для контроля еще раз поворачивали винт на 360° и, если после этого окружность переходила в точку, совмещение конца стержня с осью вращения винта считалось достигнутым. Тогда при вращении винта 1 штрих на пластине 6 будет двигаться поступательно и ошибка, зависящая от упора винта, будет исключена.

Процесс измерения вспомогательного интервала производили тем же методом, что и в первом исследовании с тем, однако, отличием, что наводка производилась совмещением всего горизонтального штриха с чертой биссектора, а не точки, как в прежней установке, так как здесь горизонтальная черта на пластинке от вращения винта 12 перемещается параллельно самой себе.

Все упомянутые выше пять экзаменаторов уровней были исследованы на этой установке на тех же оборотах, что и на предыдущей

Таблица 2

Номер оборота	Поправки за периодические ошибки микрометрических винтов экзаменаторов уровней в $1 \cdot 10^{-2}$ деления барабана				Номер оборота	Поправки за периодические ошибки микрометрических винтов экзаменаторов уровней в $1 \cdot 10^{-2}$ деления барабана				Номер оборота	Поправки за периодические ошибки микрометрических винтов экзаменаторов уровней в $1 \cdot 10^{-2}$ деления барабана			
	Отсчет по барабану в делениях					Отсчет по барабану в делениях					Отсчет по барабану в делениях			
	для свободного положения винта	для свободного положения винта	разность поправок			для свободного положения винта	для свободного положения винта	разность поправок			для свободного положения винта	для свободного положения винта	разность поправок	
	δ_y	δ_c	$\delta_y - \delta_c$		δ_y	δ_c	$\delta_y - \delta_c$		δ_y	δ_c	$\delta_y - \delta_c$			
Экзаменатор „Станкоприбор“ № 36														
1	0	+15	0	+15	1	0	+15	0	+15	3	0	+128	+2	+128
	18	+7	+3	+4		45	-2	+5	-7		45	+12	-1	+13
	36	-11	-2	-9		90	+27	-5	+32		90	-98	-1	-97
	54	-11	-1	-10		135	-39	0	-39		135	-44	-1	-44
2	0	+5	+4	+1	2	0	+15	+2	+13	4	0	+90	0	+90
	18	-5	+4	-9		45	-2	+3	-5		45	-24	0	-24
	36	-19	0	-19		90	+27	0	+27		90	-114	0	-114
	54	+18	-7	+25		135	-39	-3	-36		135	-54	+2	-56
Экзаменатор „Станкоприбор“ № 167														
3	0	+38	+4	+34	3	0	+18	+2	+16	1	0	-2	+10	-12
	18	+4	+4	0		45	-11	-1	-10		12	+2	+5	-3
	36	-30	-1	-29		90	+21	-1	+22		24	+2	-7	+9
	54	-4	-8	+4		135	-29	-1	-28		36	0	+7	-7
4	0	+19	+5	+14	4	0	+18	0	+18	2	0	0	+4	-4
	18	+6	+7	-1		45	-11	0	-11		12	-1	+2	-3
	36	-19	-3	-16		90	+21	0	+21		24	0	+2	+2
	54	-4	-8	+4		135	-29	-2	-27		36	+1	-4	+5
Экзаменатор Цейс № 375374														
Экзаменатор Гильдебрандт № 232335														
5	0	+17	+3	+14	1	0	+70	-4	+74	3	0	+3	+1	+2
	18	-3	+4	-7		45	-22	+12	-34		12	-3	-1	-2
	36	-13	0	-13		90	-112	+6	-118		24	+3	+1	+2
	54	0	-7	+7		135	+65	-16	+81		36	-3	-1	-2
6	0	+18	+2	+16	2	0	+137	0	+137	4	0	+2	0	+2
	18	-10	+8	-13		45	-20	+6	-26		12	+1	0	+1
	36	-25	+2	-27		90	-112	0	-112		24	0	0	0
	54	+15	-9	+24		135	-6	-8	+2		36	-3	-2	-1
Экзаменатор SIP														
Первое определение				Повторное определение				Среднее из двух определений						
1	0	+8	+22	-14	1	0	-3			1	0	+2	+22	-20
	15	-59	-7	-52		15	-31				15	-45	-7	-52
	30	0	-6	+6		30	-12				30	-6	-6	0
	45	+51	-21	+72		45	+36				45	+52	-21	+73
2	0	+16	+18	-2	2	0	+12			2	0	+14	+18	-4
	15	-50	-19	-31		15	-46				15	-48	-19	-30
	30	-10	-2	-8		30	-9				30	-10	-2	-8
	45	+44	+1	+43		45	+45				45	+44	+1	+43
3	0	+4	+19	-15	3	0	+5			3	0	+4	+19	-15
	15	-48	-18	-30		15	-38				15	-43	-18	-25
	30	-3	-2	-1		30	-13				30	-8	-2	-6
	45	+47	+1	+46		45	+57				45	+32	+1	+61

Номер оборота	Поправка за периодические ошибки микрометрических винтов экзаменаторов уровней в $1 \cdot 10^{-2}$ деления барабана				Номер оборота	Поправки за периодические ошибки микрометрических винтов экзаменаторов уровней в $1 \cdot 10^{-2}$ деления барабана				Номер оборота	Поправки за периодические ошибки микрометрических винтов экзаменаторов уровней в $1 \cdot 10^{-2}$ деления барабана				
	Отсчет по барабану в делениях					Отсчет по барабану в делениях					Отсчет по барабану в делениях				
	для несвободного положения винта	для свободного положения винта	разность поправки			для несвободного положения винта	для свободного положения винта	разность поправки			для несвободного положения винта	для свободного положения винта	разность поправки		
	δ_y	δ_c	$\delta_y - \delta_c$		δ_y	δ_c	$\delta_y - \delta_c$		δ_y	δ_c	$\delta_y - \delta_c$		δ_y	δ_c	$\delta_y - \delta_c$
4	0	+6	+17	-11	4	0	+2		4	0	+4	+17	-13		
	15	-47	-18	-29		15	-43			15	-45	-18	-27		
	30	-21	-1	-20		30	-18			30	-20	-1	-19		
	45	+61	+1	+60		45	+55			45	+58	+1	+57		
5	0	+2	+19	-17	5	0	-1		5	0	0	+19	-19		
	15	-53	-16	-37		15	-48			15	-50	-16	-34		
	30	-13	-1	-12		30	-5			30	-9	-1	-8		
	45	+63	-2	+65		45	+55			45	+59	-2	+61		
6	0	+12	+19	-7	6	0	0		6	0	+6	+19	-13		
	15	-51	-20	-31		15	-50			15	-50	-20	-30		
	30	-24	-2	-22		30	-15			30	-20	-2	-18		
	45	+63	+4	+59		45	+65			45	+64	+4	+60		
7	0	+18	+20	-2	7	0	-6		7	0	+6	+20	-14		
	15	-45	-23	-22		15	-47			15	-46	-23	-23		
	30	-29	-1	-28		30	-14			30	-22	-1	-21		
	45	+55	+4	+51		45	+65			45	+60	+4	+56		
8	0	+15	+12	+3	8	0	+8		8	0	+12	+12	0		
	15	-63	-12	-51		15	-60			15	-62	-12	-50		
	30	-21	+1	-22		30	-16			30	-18	+1	-19		
	45	+69	+1	+68		45	+68			45	+68	+1	+67		

Примечание. Для экзаменатора SIR были проведены повторные определения δ_y с целью выяснения сходимости отдельных независимых определений. Как видно из табл. 2, первое и повторное определения дают вполне удовлетворительную сходимость. Этот материал использован для получения среднего значения δ_y .

установке. Для подсчета числа оборотов винта ко всем экзаменаторам были сделаны дополнительные шкалы.

Вся запись и обработка этих исследований производилась по схеме, изложенной в работе проф. Зверева М. С. [4].

Результаты исследования

В табл. 2 представлены сводные результаты исследования всех пяти экзаменаторов уровней.

В табл. 3 приведены средние квадратичные ошибки.

Данные табл. 2 представлены графически на рис. 5—9, соответственно для экзаменаторов: завода «Станкоприбор» № 36 и № 167, Гильдебрандта № 232235, Цейсса № 375374, SIP (6/номера).

Сплошные линии на рисунках соответствуют несвободному, а пунктирные — свободному положениям винта.

Крупным пунктиром (черта с точкой) указываются поправки, зависящие только от несовпадения упора винта с его осью вращения.

На некоторых участках пунктирные и сплошные линии совпадают.

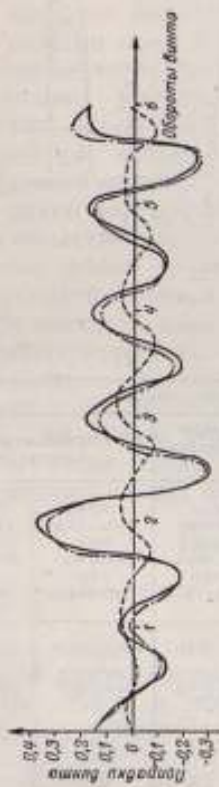


Рис. 5.

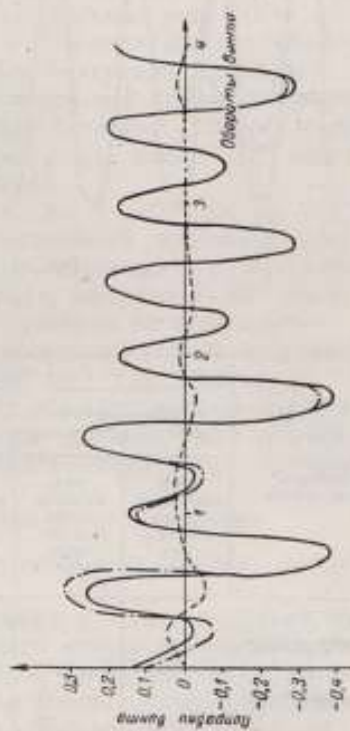


Рис. 6.

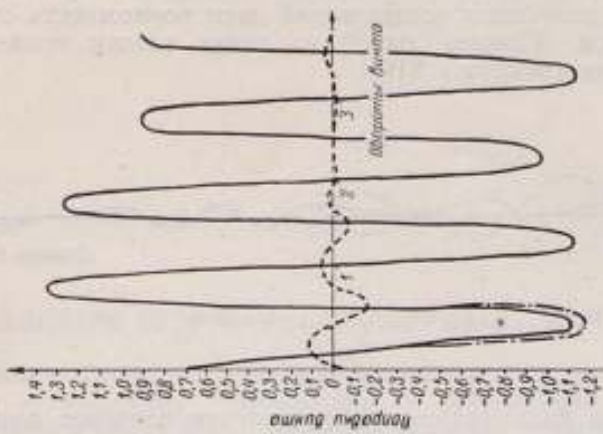


Рис. 7.

Рассматриваемые поправки довольно значительны, и пренебрежение ими приведет к неверной цене деления исследуемого уровня. Существенными источниками периодических ошибок являются несовпадение конца винта с его осью вращения и площадка, в которую упирается винт.

Результаты описанных исследований дают возможность составления таблиц поправок. Пример одной из таких таблиц приведен ниже (табл. 4 — для экзаменатора SIP).

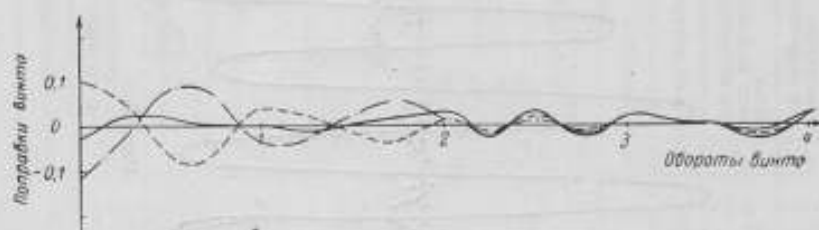


Рис. 8.

Эта таблица применялась при вычислении поправок цены деления уровней, исследованных на данном экзаменаторе.

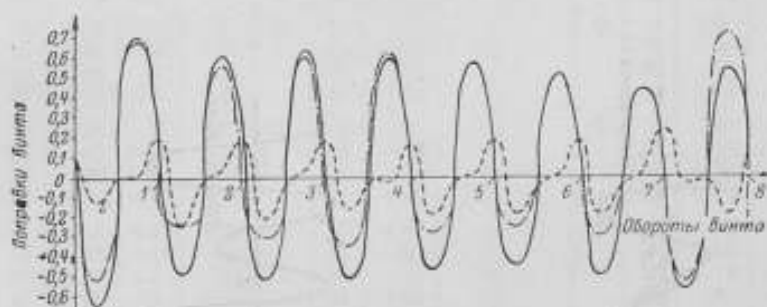


Рис. 9.

Таблица 3

Фирма или завод-изготовитель и номер экзаменатора	Средние квадратичные ошибки					
	определения одного интервала		одного полного отсчета по микроскопу		определенных поправок	
	при свободном положении винта	при свободном положении винта	при свободном положении винта	при свободном положении винта	при свободном положении винта	при свободном положении винта
Завод „Станкоприбор“ № 36	±0,11	±0,11	±0,08	±0,08	±0,063	±0,063
Завод „Станкоприбор“ № 167	0,16	0,16	0,11	0,11	0,087	0,087
Гильдебрандт № 232235	0,80	0,13	0,21	0,09	0,066	0,071
Цейс № 375374	0,05	0,02	0,04	0,01	0,032	0,008
SIP (б/номера)	0,15	0,16	0,11	0,11	0,087	0,087

ТЕПЛОВОЙ (ТЕРМОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ) МАНОМЕТР

Настоящая статья является кратким изложением результатов систематических исследований, выполненных в лаборатории измерения вакуума ВНИИМ в 1954—1957 гг. с целью создания аппаратуры для измерений давления в диапазоне $10^{-4} \div 10^{-7}$ мм рт. ст.

За последние годы задача получения высокого вакуума, до 10^{-10} — 10^{-12} мм рт. ст., полностью решена: разработаны и находят все более широкое применение ионизационные манометры новых конструкций с нижним пределом измерения, достигающим 10^{-10} — 10^{-11} мм рт. ст. К приборам этого типа, а также к ионизационным манометрам обычной конструкции, применяемым для измерений давления в пределах $10^{-3} \div 10^{-7}$ мм рт. ст., предъявляются все более высокие требования в отношении точности показаний. В связи с этим задача создания образцовых манометров для исходных измерений низких давлений стала одной из наиболее актуальных.

В области среднего вакуума, до 1 — 10^{-4} мм рт. ст., образцовым прибором может служить компрессионный манометр при соблюдении ряда условий, относящихся к изготовлению и градуировке его. Для области высокого вакуума (давления, меньшие $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.) образцовой аппаратуры до настоящего времени не существует.

В связи с этим лаборатория поставила задачу создания образцового манометра для диапазона давления $10^{-4} \div 10^{-7}$ мм рт. ст.

В 1954 г. был разработан термомолекулярный манометр. В последующие годы были произведены работы по усовершенствованию и испытанию новых моделей термомолекулярного манометра.

Принципиальная схема манометра

Принципиальная схема термомолекулярного манометра дана на рис. 1.

Две камеры прибора сообщаются одна с другой через кольцеобразный зазор, который образуется между цилиндрическими поверхностями поршня 2 и корпуса прибора 1. В этих камерах поддерживают постоянные температуры T_1 и T_2 . Вдоль образующих боковой поверхности поршня температура непрерывно изменяется от значения T_1 (в сечении *aa*) до T_2 (в сечении *bb*). При малой теплопроводности поршня основания его имеют температуры, практически не отличающиеся от температур камер T_1 и T_2 соответственно.

Камера 1 соединена трубкой 3 с баллоном, имеющим температуру T , в котором поддерживается постоянное давление P ; при

достаточно малых значениях этого давления условие стационарного состояния газа в приборе и в баллоне, к которому он присоединен трубкой 3, будет выражаться уравнением

$$P_1 - P_2 = P \frac{\sqrt{VT_1} - \sqrt{VT_2}}{\sqrt{T}}, \quad (1)$$

где P_1, T_1 — давление и температура газа в камере I;

P_2, T_2 — давление и температура в камере II;

P, T — давление и температура газа в резервуаре, присоединенном к прибору трубкой.

Величина давления в баллоне может быть на основании равенства (1) определена по формуле

$$P = \frac{F \sqrt{VT}}{S(\sqrt{VT_1} - \sqrt{VT_2})}, \quad (2)$$

где S — площадь поршня;

F — сила, действующая на поршень, обусловленная разностью давлений $P_1 - P_2$.

В частном случае, при $T = T_1$,

$$P = P_1 \frac{F}{S \left(1 - \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}\right)} \quad (3)$$

Если площадь поршня, действующая на него сила и температуры камер известны, то при высокой разреженности газа величина давления газа в резервуаре, соединенном с прибором, может быть определена расчетным путем по формулам (2) или (3). Следовательно, устройство, схематически изображенное на рис. 1, может быть применено в качестве абсолютного манометра. Непосредственно измеряемыми величинами при этом являются F, T_1, T_2 .

Формулы (2) и (3) точны только при очень малых значениях давления, когда средняя длина свободного пробега молекул газа много больше ширины кольцеобразного зазора, через который сообщаются друг с другом камеры I и II прибора. Для более общего случая, когда давление может принимать значения в широком диапазоне, охватывающем высокий и средний вакуум, на основании кинетической теории газов также можно получить выражение термомолекулярной разности давлений как функцию давления газа.

Согласно теории термической эффузии, в цилиндрической трубке, заполненной разреженным газом, вдоль оси которой имеется градиент температуры, возникает поток газа в направлении ее оси в сторону повышения температуры. Величину этого потока газа, называемого термомолекулярным потоком, можно выразить уравнением¹:

$$\pi R^2 U = \pi R^2 \frac{2k}{6} \left(\frac{\bar{v}}{v} + \frac{\bar{n}}{n} \right) \quad (4)$$

¹ См. Sutherland W., Thermal transpiration and Radiometer Motion, Phil. Mag., v. 42, 1896, p. 373.

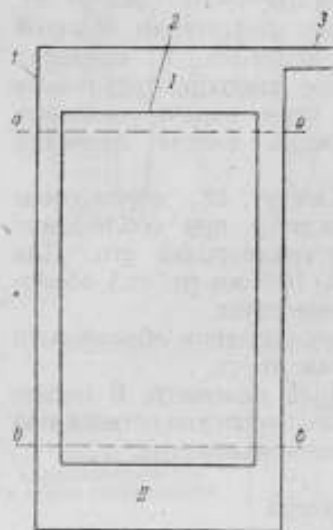


Рис. 1.

или, приняв во внимание, что

$$\frac{\dot{P}}{P} = \frac{\dot{n}}{n} + 2 \frac{\dot{v}}{v}$$

(так как $P = \frac{1}{3} nmv^2$),
получаем:

$$\pi R^2 U = - \frac{\pi R^2 v \lambda}{6} \left(\frac{\dot{P}}{P} - \frac{\dot{v}}{v} \right), \quad (5)$$

где R — радиус трубки;

U — скорость потока газа в трубке;

v — средняя скорость теплового движения молекул газа;

n — число молекул газа в 1 см^3 ;

λ — средняя длина свободного пути молекул газа;

l — длина трубки.

Если объемы камер, соединенных этой трубкой, ограничены, то в них должна установиться разность давлений с градиентом, направленным вдоль оси трубки. При средних разрежениях газа, когда средняя длина свободного пробега молекул много меньше диаметра трубки, под действием разности давлений в камерах возникнет течение газа вблизи оси трубки в обратном направлении по закону Пуазейля (с поправкой на скольжение):

$$\pi R^2 U = - \frac{\pi R^4 P}{8\eta} \left(1 + \frac{4\epsilon}{R} \right), \quad (6)$$

где η — коэффициент внутреннего трения;

$\epsilon = a\lambda$ — коэффициент скольжения;

a — постоянная.

При неустановившемся состоянии в трубке будет наблюдаться двойной поток газа: вблизи стенок трубки в направлении повышения температуры и вблизи центра трубки в противоположном направлении. При стационарном состоянии среднее значение потока через все сечение трубки обратится в нуль. Тогда на основании уравнений (4) и (5) с учетом равенства

$$v_1 = \frac{3}{4} \frac{\lambda}{v} P \quad (7)$$

(получающегося из соотношений $\eta = \frac{1}{4} nmv$ и $P = \frac{nmv^2}{3}$) приходим к формуле Сёзерленда:

$$\frac{\dot{P}}{P} \left[1 + \frac{R^2}{\lambda^2} \left(1 + \frac{4\epsilon}{\lambda} \right) \right] = \frac{\dot{v}}{v}. \quad (8)$$

В том случае, когда падение температуры вдоль оси трубки, соединяющей камеры I и II, происходит по линейному закону, измерение средней скорости движения молекул вдоль оси трубки также подчиняется линейному закону:

$$\dot{v} = \frac{v_1 - v_2}{l} = \text{const}. \quad (9)$$

Аналогично изменяется и давление вдоль трубки:

$$\dot{P} = \frac{P_1 - P_2}{l} = \text{const}.$$

поэтому уравнение (8) для такого случая можно написать в следующем виде:

$$\frac{P_1 - P_2}{P} = \frac{v_1 - v_2}{v \left[1 + \frac{4aR}{\lambda} + \left(\frac{R}{\lambda} \right)^2 \right]} \quad (10)$$

Линейное изменение температуры корпуса прибора и поршня в направлении оси корпуса и поршня достигается осевой симметрией конструкции прибора и однородностью материалов, из которых изготовлены поршень и корпус прибора.

Известное соотношение

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \quad (11)$$

позволяет представить уравнение (10) в следующем виде:

$$\frac{P_1 - P_2}{P} = \frac{\sqrt{T_1} - \sqrt{T_2}}{\sqrt{T}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{4aR}{\lambda} + \left(\frac{R}{\lambda} \right)^2} \quad (12)$$

В рассматриваемом манометре камеры I и II сообщаются друг с другом через кольцеобразный зазор между поршнем и корпусом прибора. В этом случае в формуле (12) величину $2R$ надо заменить шириной кольцеобразного зазора $(R_1 - R_2)$, и мы получим следующее уравнение

$$\frac{P_1 - P_2}{P} = \frac{\sqrt{T_1} - \sqrt{T_2}}{\sqrt{T}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{4a(R_1 - R_2)}{\lambda} + \left(\frac{R_1 - R_2}{2\lambda} \right)^2} \quad (13)$$

где R_1 — радиус цилиндрической части корпуса прибора;

R_2 — радиус поршня.

Введение величины площади поршня S и величины силы, действующей на поршень, $F = (P_1 - P_2) S$, в формулу (13) дает расчетную формулу прибора в следующем виде:

$$P = \frac{F \sqrt{T} (1 + \gamma)}{S (\sqrt{T_1} - \sqrt{T_2})} \quad (14)$$

где

$$\gamma = \frac{4a(R_1 - R_2)}{\lambda} + \left(\frac{R_1 - R_2}{2\lambda} \right)^2$$

Частным случаем формулы (14) является формула (2), пригодная для определения величины давления лишь при высокой разреженности.

Формула (14) выведена для случая диаметра поршня, равного диаметру цилиндрического канала, в котором он находится.

При наличии зазора между поршнем и цилиндром на боковую поверхность поршня будет действовать сила, параллельная его оси, величина которой определяется известной формулой:

$$F = \frac{1}{2} (P_1 - P_2) S_1 \quad (15)$$

где S_1 — площадь сечения кольцеобразного зазора.

Равнодействующую сил, действующих на поршень, поэтому можно представить в виде:

$$F = (P_1 - P_2) (S + S_1) = (P_1 - P_2) S$$

Соответственно, в формулу (14) необходимо ввести вместо S приведенную площадь поршня S_n .

Пределы измеряемого давления

Рассматриваемые пределы определяются значением силы F , которую можно измерить с достаточной точностью.

При относительно больших давлениях P значение γ растет быстрее P , и потому, как следует из формулы (14), F мало. При очень малых значениях P F также мало. В диапазоне $10^{-1} \div 10^{-4}$ мм рт. ст. величина F достаточно велика для измерения с необходимой точностью, но в этом интервале показания прибора неточны вследствие дополнительных погрешностей, зависящих от состава газа и других причин. Поэтому практические пределы измерений рассматриваемого прибора составляют $10^{-4} \div 10^{-8}$ мм рт. ст.

При меньших давлениях, помимо указанной причины, существенное влияние на показания прибора будет оказывать также световое давление.

Влияние теплопроводности поршня

При создании манометра были исследованы два варианта конструкции поршня. По первому варианту поршень представляет собою пустотелый слюдяной цилиндр с тепловыми экранами, расположенными

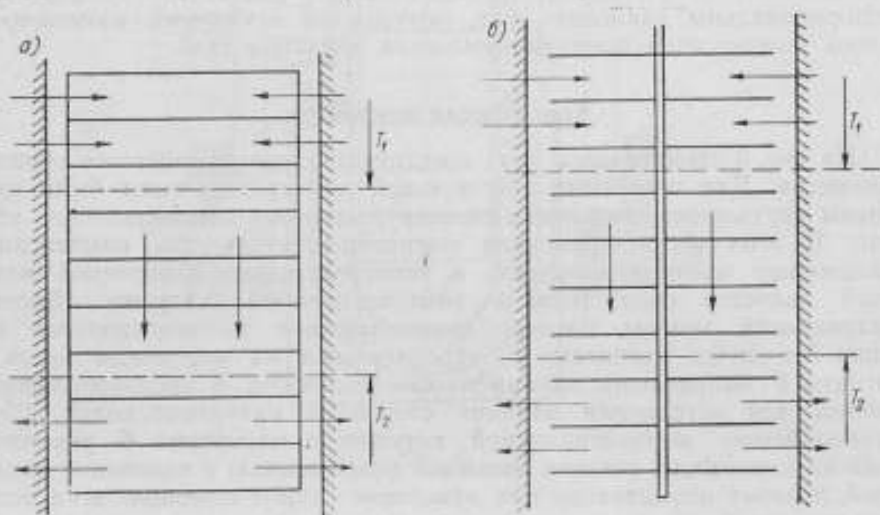


Рис. 2.

внутри его в диаметральных плоскостях (рис. 2, а); по второму — систему тонких дисков из слюды, покрытых с двух сторон тонким слоем алюминия с целью уменьшения поглощения лучистой энергии (рис. 2, б).

Существенных различий в качествах приборов того и другого варианта не обнаружено: в обоих случаях теплопроводность поршня вдоль его оси уменьшалась приблизительно в одинаковой степени с увеличением высоты поршня и числа тепловых экранов.

Проведенные эксперименты показали, что при выбранных нами температурах камер $T_1 = +20^\circ \text{C}$, $T_2 = -194^\circ \text{C}$ разность температур верхнего основания поршня и стенок камеры не превышала $1-2^\circ \text{C}$, тогда как в камере II минимальная разность температур нижнего основания поршня и стенок камеры составляла $5-6^\circ \text{C}$ (при высоте поршня 24 см). Меньшее значение разности температур основания поршня

и стенок камеры в камере I можно объяснить более интенсивным теплообменом.

Следует отметить, что установившиеся температуры верхнего и нижнего оснований поршня практически не изменялись при изменении давления в пределах $10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст., что исключает необходимость регистрации температуры нижнего и верхнего основания поршня, а также внесения соответствующих поправок при каждом отсчете давления.

Постоянство температур оснований поршня обусловлено тем, что теплопередача внутри поршня от верхнего основания к нижнему происходит путем обмена лучистой энергии и только в незначительной мере вследствие теплопроводности. Существенное значение имеет также то, что теплообмен, происходящий между тепловыми экранами в направлении оси поршня, вызываемый теплопроводностью газа, компенсируется теплообменом между боковой поверхностью корпуса прибора и поршнем в радиальном направлении.

На рис. 2 показаны стрелками потоки тепла, обусловленные теплопроводностью газа и обменом лучистой энергии.

Поток тепла в аксиальном направлении, обусловленный теплопроводностью газа, и компенсирующий поток в радиальном направлении пропорциональны давлению газа, поэтому не исключена возможность полной компенсации влияния изменения давления газа.

Конструкция манометра

На рис. 3 схематически дана конструкция первого опытного образца манометра. Для измерения действующей на поршень силы были применены крутильные микровесы, сконструированные специально для этой цели. В этих весах применена магнитно-электрическая компенсация вращающего момента нагрузки, а непосредственно измеряемой величиной является сила тока в компенсационной катушке. Восстанавливающий момент создает взаимодействие компенсационной катушки 7 с двумя магнитами 6, укрепленными на коромысле весов 9. Магниты 6 направлены одноименными полюсами в противоположные стороны для устранения влияния сторонних магнитных полей. Сила взаимодействия компенсационной катушки с магнитами 6, укрепленными на коромысле, связана линейной зависимостью с величиной тока I в ней, поэтому взвешивание или измерение силы с помощью этих весов состоит в подборе компенсационного тока I , при котором коромысло с нагрузкой уравнивается в неотклоненном положении. Величина действующей в приборе силы определяется по формуле

$$F = kI,$$

где K — постоянная прибора, определяемая при нагружении весов образцовыми гирями (рейтерами).

Этот прием компенсации, в соответствии с общей теорией крутильных весов, исключает ряд погрешностей, свойственных крутильным весам. Отклонения коромысла весов наблюдались по положению «зайчика», отражаемого зеркальцем 5, укрепленным на коромысле весов.

В первом опытном образце манометра поршень представляет собою тонкостенный слюдяной цилиндр 4; тепловые экраны 3 и основания цилиндра изготовлены из тонкой алюминиевой фольги. В боковой стенке поршня сделан ряд отверстий, через которые внутренний объем его сообщался с камерами I и II. Поршень подвешен на тонкой нити (из вольфрама, $\varnothing 25$ мк) к концу коромысла весов, расположенных так.

что ось поршня совмещается с осью корпуса прибора. Для юстировки положения поршня имеются установочные винты *II*. Для термостатирования камеры *I* прибора применен жидкостный термостат типа ТС-15 с ртутным контактным термометром; рабочая жидкость термостата протекает в рубашку *2*. В камере *II* поддерживают постоянство температур погружением всей нижней части стеклянного корпуса прибора в жидкий азот, заполняющий сосуд Дьюара *I*. Измерения температур поверхно-

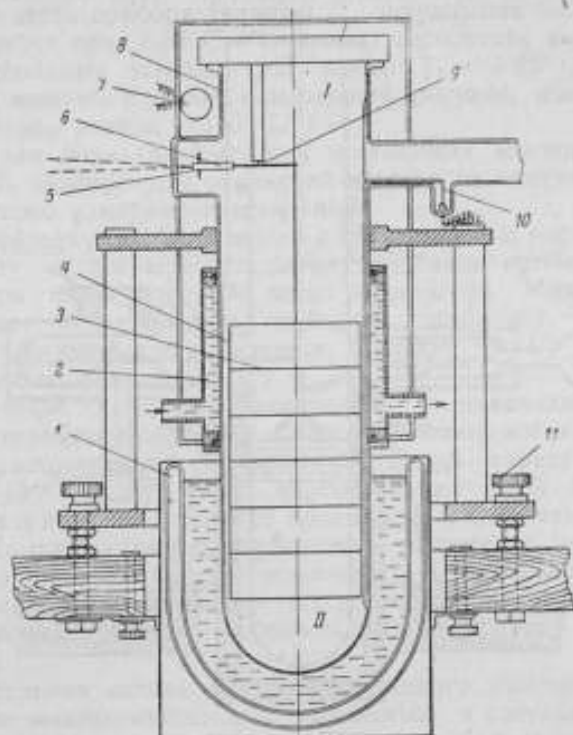


Рис. 3.

стей оснований поршня и камер производится с помощью термопар. Выводы термопар укреплены на поршне и соединены с молибденовыми вводами *10*, впаянными в стеклянный корпус *8* прибора. Стеклянный корпус манометра снабжен плоским шлифом, к которому притерт стеклянный диск. Такое соединение допускает быструю и удобную сборку и разборку прибора. Чувствительность примененных крутильных весов составляла 5 мк/мгс .

При непосредственных сличениях манометра новой конструкции с компрессионным манометром была установлена устойчивость кривой зависимости показаний рассматриваемого давления от измеряемого компрессионным манометром.

Однако точность компрессионного манометра в интервале давлений рассматриваемого прибора недостаточна для исследования последнего. Поэтому необходимо сравнение показаний двух приборов этого типа, опирающееся на постоянные приборы, соответствующие формуле (14).

В связи с этим в 1956 г. был изготовлен новый образец манометра этого типа с запаянным стеклянным корпусом, в котором были приме-

нены крутильные весы еще более высокой чувствительности с увеличенной длиной растяжек и коромысла и поршнем меньшего веса.

Кроме того, в этом образце манометра была изменена конструкция поршня. Новый поршень представляет собою систему тонких дисков, укрепленных на оси из тонкой стеклянной трубочки (рис. 2, б). Диски эти оказались возможным изготовить из алюминиевой фольги или из слюды, покрытой с двух сторон тонким слоем алюминия, при этом они служат надежными тепловыми экранами. При малых расстояниях

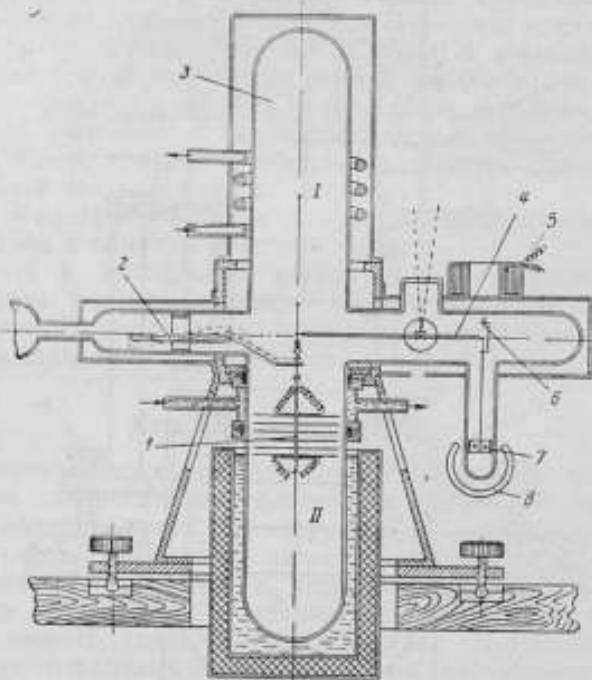


Рис. 4.

между дисками по сравнению с диаметром их такая система дисков при значительно меньшем весе заменяет пустотелый цилиндр с тем же числом экранов.

Конструкция манометра 1956 г. схематически показана на рис. 4. Стекланный запаиваемый корпус манометра 3 диаметром 100 мм имеет два отростка; в одном из них расположены крутильные весы 4, в другом — механизм для навешивания и снятия рейтера 2. В средней части корпуса расположен поршень I, представляющий собою систему тонких слюдяных металлизированных дисков. Поршень снабжен дифференциальной термодпарой, предназначенной для контроля температур верхней и нижней поверхностей его. Выводы термодпары припаяны к двум тонким подвескам, на которых поршень подвешен к длинному плечу коромысла весов. Подвески, в свою очередь, припаяны к растяжкам (нитям) весов и через них к наружным вводам. Это дает возможность измерять температуры поверхностей поршня одновременно с измерениями давления.

К короткому плечу весов подвешены на тонкой нити два маленьких магнита 6 и 7. С помощью взаимодействия магнита 6 и компенсационной катушки 5 создается компенсационный момент, уравнивающий

момент силы, действующей на поршень при измерении давления. При отсутствии тока в компенсационной катушке магнит 7, взаимодействуя с магнитом 8, возвращает коромысло в нулевое положение.

Манометр снабжен сосудом Дьюара, служащим для поддержания температуры -194°C , в нижней части прибора, в камере II. Проверка нулевого положения прибора осуществляется путем замены сосуда Дьюара, заполненного жидким азотом, сосудом с водой, имеющей температуру $+20^{\circ}\text{C}$.

Верхняя часть прибора (камеры I), окруженная водяной рубашкой, термостатируется при $+20^{\circ}\text{C}$ с помощью термостата типа ТС-15.

При выбранных температурах камер $T_1 = +20^{\circ}\text{C}$, $T_2 = -194^{\circ}\text{C}$ температура нижней плоской поверхности поршня, измеряемая термопарой, оказалась равной -146°C .

Далее, как показал опыт, при постоянных значениях температур камер T_1 и T_2 температуры оснований поршня не изменяются при изменении величины измеряемого давления.

Масса рейтера была определена с погрешностью порядка $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ г. Примерно эту же погрешность имеют показания прибора при взвешивании рейтера на крутильных весах манометра. Минимальная сила, которая может быть измерена прибором, составляет $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ г, чему соответствует наименьшее измеряемое давление $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. (при площади поршня, равной 65 см^2).

Проведенные сличения показаний ионизационного манометра типа ВИ-3 (серийного образца) с новым абсолютным манометром показали, что расхождения, имеющие случайный характер, в диапазоне давления $5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. составляют $\pm 4\%$. Систематические расхождения в этом диапазоне не превышают 5% от измеряемого давления. Обычно показания ионизационного манометра превышают показания нового прибора. Оценка возможных составляющих погрешностей созданного манометра позволяет утверждать, что указанные расхождения обусловлены, главным образом, погрешностями ионизационных манометров.

Окончательная оценка точности созданного манометра, основанная на обработке экспериментальных результатов и составляющая предмет дальнейших исследований, будет заключаться в сравнительных измерениях приборами рассматриваемого типа, но с различными параметрами.

С. С. СТЕПАНОВ

ЗАВИСИМОСТЬ ЧИСЕЛ ТВЕРДОСТИ ПО РОКВЕЛЛУ ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНУСНОГО НАКОНЕЧНИКА

Решающее влияние на правильность показаний прибора Роквелла имеют: соответствие формы и размеров наконечника стандартным, чистота его поверхности, а также особенности структуры алмаза [1, 2], но надежных количественных зависимостей до последнего времени не найдено. Настоящая работа проведена с целью несколько восполнить этот пробел.

В связи с тем, что наиболее распространены шкалы *C* и *A* Роквелла, объектом изучения выбран конический наконечник с закругленной вершиной. Для исследования влияния на твердость выделены два параметра наконечника: угол при вершине и радиус закругления.

Методика исследования

Опыты состояли в измерении твердости одинаковых брусков различными наконечниками двух серий (табл. 1) по специально разработанной программе. Одна серия включала наконечники с разными углами, но одинаковыми радиусами закругления. Вторая серия включала наконечники с разными радиусами, но одинаковыми углами. Изготовление серий алмазных наконечников представляет значительные технические трудности, поэтому для проведения экспериментов изготовлены стальные закаленные (до $H_{RC} = 62$) и твердосплавные наконечники. Первые применялись для экспериментов по шкале *A*, вторые для экспериментов по шкалам *C* и *A*.

Применение стальных и твердосплавных наконечников дает возможность получить при небольшом числе опытов более отчетливые зависимости чисел твердости от геометрических параметров, так как такие наконечники сравнительно легко обрабатываются, что позволяет придать им более правильную геометрическую форму. Применение однородного поликристаллического материала позволяет также исключить влияние анизотропии алмаза.

Для контроля неизменности формулы и размеров наконечников в процессе опытов проводилось измерение угла конуса и радиуса закругления.

Чистота поверхности рабочей части наконечников лежала в пределах 12-го класса чистоты по ГОСТ 2789-51.

Таблица 1

Материал наконеч- ника	Первая серия			Вторая серия		
	Номер наконечника	Угол конуса, град.	Радиус закругления, мм	Номер наконечника	Угол конуса, град.	Радиус закругления, мм
Стальные	13	80,48	202	24	119,83	176
	12	90,72	192	23	119,98	186
	8	100,57	197	20	120,07	195
	10	100,77	206	22	119,90	261
	6	129,42	206	17	119,90	289
	5	129,72	202			
4	139,62	188				
Твердо- сплавные	5 110	111,33	191	12 284	119,90	105
	4 925	115,30	198	8 949	119,88	158
	25 750	119,92	196	25 750	119,92	196
	8 678	126,02	198	26 655	119,92	254
	5 114	129,83	207			

Для опытов применяли главным образом стальные бруски, а по шкале А также алюминиевые и латунные (табл. 2 и 3).

Таблица 2

Бруски для опытов со сталь- ными наконеч- никами	Для серии с переменным радиусом				Для серии с переменным углом			
	Номер бруска	Материал	Твер- дость ед. H_{RA}	Разброс твердо- сти, ед. H_{RA}	Номер бруска	Материал	Твердость ед. H_{RA}	Разброс твердо- сти, ед. H_{RA}
3	Алюми- ний	18,5	1,7	4	Алюминий	19,0	2,0	
7	Латунь	46,3	1,1	8	Латунь	46,8	0,6	
363	Ст. У10А	49,1	0,4	375	Ст. У10А	49,0	0,3	
321	То же	60,4	0,5	446	То же	60,4	0,6	
103	"	68,0	0,4	2882	"	64,2	0,6	
93	"	73,2	0,6	—	—	—	—	

Таблица 3

Бруски для опытов с твердо- сплавными наконечни- ками	Номер бруска	407	321	322	3/11	1221	130/146	291
	Материал	Ст. У10А			Неизвестная сталь	Ст. У10А		
	Твердость H_{RC}	13,7	22,6	29,6	39,2	47,0	49,4	63,4
	Разброс твер- дости ед. H_{RC}	0,7	0,3	0,3	0,5	0,2	0,4	0,8

Опыты проводились на рычажном приборе с оптическим отсчетом фирмы «Галилео» № 60137, который очень стабилен в своих показаниях. При всех поверках прибора (инструкция 235—56) по образцовым мерам твердости колебания его показаний не превышали $\pm 0,1$ ед.

Для устранения случайных погрешностей и достижения сравнимости отдельных измерений методика проведения опытов строилась с учетом следующих основных положений:

а) продолжительность опытов должна быть возможно короткой, чтобы обеспечить постоянство условий измерений;

б) каждое внедрение должно продолжаться одинаковый промежуток времени;

в) каждый наконечник данной серии должен внедряться одинаковое число раз;

г) способ закрепления наконечника на приборе и последовательность нанесения отпечатков на бруске должны быть одинаковыми для всех наконечников и должны исключать влияния закрепления и неравномерности твердости бруска.

Результаты опытов

На основе анализа экспериментального материала построены кривые изменения производной от твердости по углу $\frac{\partial H_{RC}}{\partial \alpha}$ и производной от твердости по радиусу $\frac{\partial H_{RC}}{\partial R}$ в зависимости от твердости.

На рис. 1 изображены графики, полученные для шкалы С.

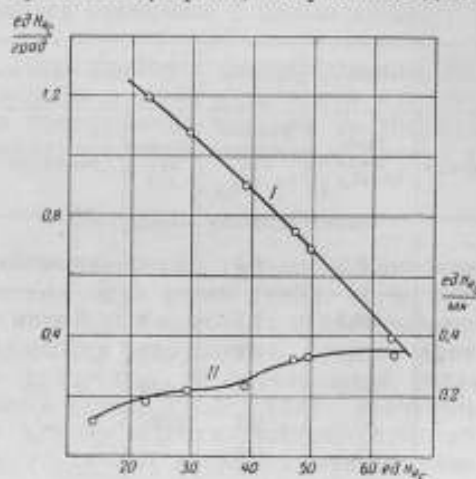


Рис. 1. Графики производных от твердости по углу $\frac{\partial H_{RC}}{\partial \alpha}$ (I) и по радиусу $10 \frac{\partial H_{RC}}{\partial R}$ (II) для шкалы С.

График $\frac{\partial H_{RC}}{\partial \alpha} = \frac{\text{ед. тв.}}{\text{град.}}$ представляет кривую, хорда которой составляет с осью абсцисс угол порядка 135 град.

Пренебрегая кривизной графика, можно сказать, что при измерении твердости по шкале С Роквелла величина погрешности¹ значения

¹ Погрешность определяется по формуле: $\Delta H \approx \frac{\partial H}{\partial \alpha} \Delta \alpha$.

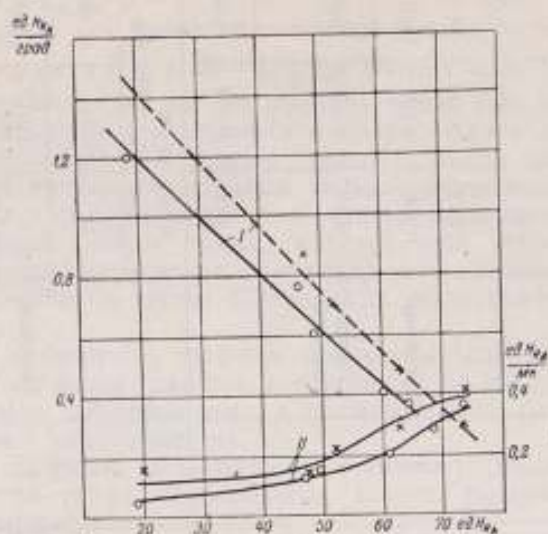


Рис. 2. Графики производных от твердости по углу $\frac{\partial H_{RA}}{\partial \alpha}$ (I) и радиусу $10 \frac{\partial H_{RA}}{\partial R}$ (II) для шкалы A.

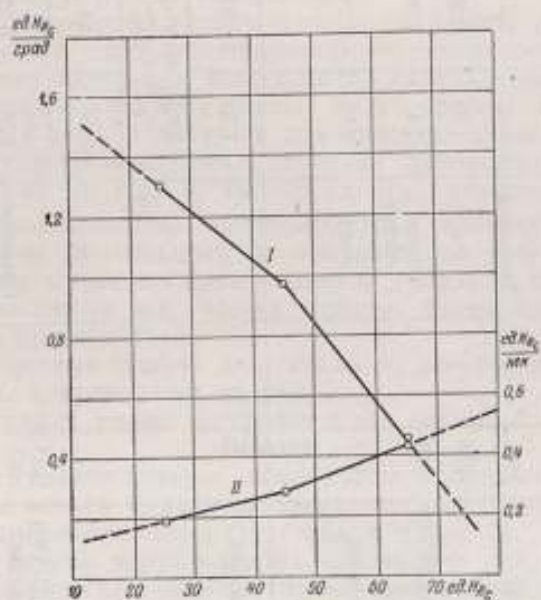


Рис. 3. Вспомогательные графики для вычисления производной от твердости по углу $\frac{\partial H_{RC}}{\partial R}$ (I) и производной от твердости по радиусу $10 \frac{\partial H_{RC}}{\partial R}$ (II) для шкалы C.

Таблица 4

Автор исследования	Год	Число наконеч- ников	Материал наконечников	$\frac{\partial HRC}{\partial \alpha}$ ед. тв. град. при HRC		Число наконеч- ников	Материал наконеч- ников	$\frac{\partial HRC}{\partial R}$ ед. тв. мм при HRC	
				25	45			25	45
Филлипс, Феннер [2] Хильд [3] Столяров (НИИВЕСПРОМ) Настоящее исследование	1951	12	Алмазные	—	—	12	Алмазные	—	0.028
	1953	—	—	1.32	0.95	—	—	0.019	0.030
	1953	5	Твердо- сплавные	1.41	1.08	4	Алмазные	0.018	0.022
	1957	5	То же	1.16	0.79	4	Твердо- сплавные	0.021	0.030
Среднее арифметическое				1.30	0.97			0.019	0.028
Столяров (НИИВЕСПРОМ) Настоящее исследование То же	1953 1957	7	Стальные закаленные Твердо- сплавные	$\frac{\partial HRA}{\partial \alpha}$ ед. тв. град. при HRA		4	Алмазные	$\frac{\partial HRA}{\partial R}$ ед. тв. мм при HRA	
				45	64			45	64
	1957	4	То же	0.91	0.55	5	Стальные закаленные	—	0.017
				0.86	0.46	2	Твердо- сплавные	0.012	0.024
Среднее арифметическое				0.88	0.50			0.013	0.024
									0.038

твердости из-за отклонения угла конуса на 1 град. уменьшается прямо пропорционально возрастанию твердости.

График $\frac{\partial H_{RC}}{\partial R} \frac{\text{ед. тв.}}{\text{мк}}$ имеет вид сложной кривой с точкой перегиба в диапазоне твердости $H_{RC} = 35-37$. Эта точка соответствует переходу от «мягких» металлов (1-й участок кривой), когда уже при приложении предварительной нагрузки внедряется и сферическая и конусная части, к «твердым» металлам (2-й участок кривой), когда при приложении предварительной нагрузки внедряется только сферическая часть, а при полной нагрузке и сферическая и конусная части наконечника. Из рассмотрения графика следует также, что величина погрешности¹ из-за отклонения радиуса закругления от стандартного значения на 1 мк при измерении твердости по шкале С Роквелла увеличивается с возрастанием твердости.

На рис. 2 изображены графики, полученные для шкалы А. Пунктирной линией нанесены графики, построенные по результатам опытов с твердосплавными наконечниками, а сплошной, — по результатам опытов со стальными наконечниками.

Смещение графиков объясняется, по-видимому, влиянием некоторых особенностей групп наконечников, как-то: различием в чистоте поверхности, твердости и т. п.

Характер полученных зависимостей одинаков с зависимостями для шкалы С. Точка перегиба кривой $\frac{\partial H_{RA}}{\partial R}$ лежит в диапазоне $H_{RA} = 60-65$. Очевидно, что понятия область «мягких» металлов и область «твердых» металлов для шкал А и С не совпадают.

Сравнение полученных результатов с данными других авторов (табл. 4) указывает на удовлетворительную сходимость всех цифр. Если принять веса отдельных исследований одинаковыми, то наиболее достоверными значениями производных будут средние арифметические из приведенных в табл. 4 значений для каждого диапазона твердости.

Для получения промежуточных значений производных в диапазонах твердостей $25-45$ ед. H_{RC} и $45-65$ ед. H_{RC} возможно применение линейной интерполяции. Это подтверждается характером полученных графиков. Графики производных от твердости по углу очень близки к прямым линиям, а графики производных от твердости по радиусу естественно разделяются на два участка, которые также могут быть заменены отрезками прямых линий.

Интерполяционный график для шкалы С, построенный по средним значениям табл. 4, приводится на рис. 3.

Такой же график можно построить и для шкалы А.

Выводы

1. Найдены количественные зависимости, определяющие влияние отклонений угла конуса и радиуса закругления от стандартных значений на измеренные числа твердости (табл. 4 и рис. 3).

2. Данные работы могут служить основанием для разработки допусков на геометрические размеры наконечников при пересмотре действующего стандарта на метод Роквелла (ОСТ 10242-40).

ЛИТЕРАТУРА

1. Marriner B. S., Engineer, V, 200, 1955, p. 56.
2. Phillips C. E., Fenner A. J., Engineering, V. 175 (4459), 1951, p. 57.
3. Hid, Wiss, Abh. der PTB, Bd 5, 1953, S. 75.

¹ Погрешность определяется по формуле: $\Delta H = \frac{\partial H_R}{\partial R} \Delta R$.

ВЫБОР И КАЛИБРОВАНИЕ КАПИЛЛЯРОВ ДЛЯ АБСОЛЮТНОГО ВИСКОЗИМЕТРА

В абсолютных капиллярных вискозиметрах капилляры являются самой важной частью прибора. Их выбор и калибрование в значительной степени определяют точность измерений вязкости. В уравнение Пуазейля диаметр капилляра входит в четвертой степени. Ввиду этого погрешность его измерения 0,1% обусловит погрешность в определении вязкости, равную 0,4%. Уравнение Пуазейля применимо для трубок цилиндрической формы и ламинарного характера потока жидкости. Первое условие в практике не соблюдается, так как изготавливаемые капиллярные трубки не имеют строгой цилиндрической формы.

Многие исследователи в области вискозиметрии считают, что капилляры в вискозиметрах эллиптически в сечениях, конусообразны по длине. Если радиус капилляра определен по объему заполняющей его ртути, то уравнение Пуазейля с учетом эллиптичности и конусности капилляра согласно Книббсу [1] будет:

$$\eta = \frac{\pi \zeta^4 P}{8Ql} (1 - 2\varepsilon^2 - 4e^2), \quad (1)$$

где η — вязкость;
 r — средний радиус, полученный из непосредственных измерений;
 P — перепад давления в капилляре;
 Q — скорость потока;
 l — длина капилляра;

$\varepsilon = \frac{b-c}{b+c}$ — эллиптичность капилляра; здесь b и c — полуоси эллипса;
 $e = \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2}$ — конусность капилляра; здесь r_1 и r_2 — средние радиусы на концах.

По этой формуле можно установить примерные требования к форме капилляра. Разница в 1% между осями эллипса (овала) соответствует погрешности определения вязкости в 0,005%. Та же разница 1% для средних радиусов капилляра на обоих концах соответствует погрешности определения вязкости в 0,01%. Упомянутые отклонения в 1% были приняты в качестве допустимых.

Исследования большого количества капиллярных трубок, выпускаемых стекольными заводами, установили, что ни одна из них не имеет

строгой геометрической формы. Поэтому ни одно из уравнений, учитывающих влияние конусности и эллиптичности капилляра, не может быть применено при расчетах вязкости. В физико-техническом институте (PTR — Берлин, 1945 г.) С. Эрк и А. Шмидт сделали попытку исправить капилляры в пластическом состоянии, обжимая их на оправе. Однако получающиеся на внутренней поверхности капилляра шероховатости от оправки заставили отказаться от такого исправления.

Последнее обстоятельство удержало от попыток исправления формы капилляров путем применения оправки или расшлифовки. Таким образом, остался весьма сложный и трудоемкий путь выбора наилучших капилляров из большой партии стеклянных трубок, которые выпускаются заводами.

Изучение метода волочения стеклянных трубок позволило установить, что форма капиллярного канала трубки получается подобной форме ее внешней поверхности. Это заключение, подтвержденное дальнейшими экспериментами, явилось основанием разработанного метода разбраковки и предварительной калибровки капилляров.

Работа по выбору и калиброванию капилляров была разделена на два этапа. Первый заключался в отборе трубок по результатам измерения их внешних диаметров, второй — в калибровании отобранных трубок. Исследованию подверглось две партии трубок производства завода «Дружная горка». Первая партия в количестве 800 трубок весом 400 кг, изготовленных из стекла № 23, исследовалась в 1952 г. Вторая партия, в количестве 3000 трубок весом 1500 кг, изготовленных из стекла № 29 лучшими мастерами завода по специальному заказу, исследовалась в 1954 г.

Результаты внешних измерений — малой и большой оси эллипса в различных сечениях трубки с помощью микрометра и промера диаметра капиллярного отверстия на концах трубки с помощью специальных калибров — привели к отбраковке 784 из первой и 2960 трубок из второй партии. Эти измерения установили, что степень отклонения трубки от цилиндрической формы находится в пределах 0,5—14% от среднего значения диаметра капилляра.

Для того, чтобы получить предварительную оценку изменения размеров капиллярного отверстия по длине трубки, каждая трубка из 56 отобранных была прокалибрована перемещением ртутного столбика длиной 5—10 см на специально созданной для этой цели установке. Длина столбика ртути на каждом участке измерялась катетометром с погрешностью $\pm 0,02$ мм. Результаты калибрования некоторых трубок графически показаны на рис. 1. По оси x отложены калибровочные участки, по оси y — соответственно длины ртутного столба. Внизу графика жирной чертой выделены наилучшие места трубки, пригодные для более тщательного калибрования.

По данным этого предварительного калибрования из 56 трубок отбраковано 37. 19 трубок подверглись более тщательному калиброванию перемещением ртутного столбика длиной 15—20 мм, причем 9 из них калибровались в 1952 г. и 10 в 1954 г. Измерение столбика ртути на всех участках производилось с помощью микроскоп-компаратора с погрешностью не свыше 1 м. При этом температура измерялась с погрешностью, не превышающей 0,1° С.

Ртуть, взятая для калибрования, взвешивалась до начала и после окончания калибрования на весах лаборатории мер массы с погрешностью не более 0,0002 г. Длина столбика ртути при каждом его положении в трубке определялась как среднее из 32 отсчетов, составляющих четыре серии измерений.

Обработка результатов калибрования производилась по методике, описанной в книге Попова [2].

Средний радиус капилляра для каждого участка при 20° С вычислялся по обычной формуле.

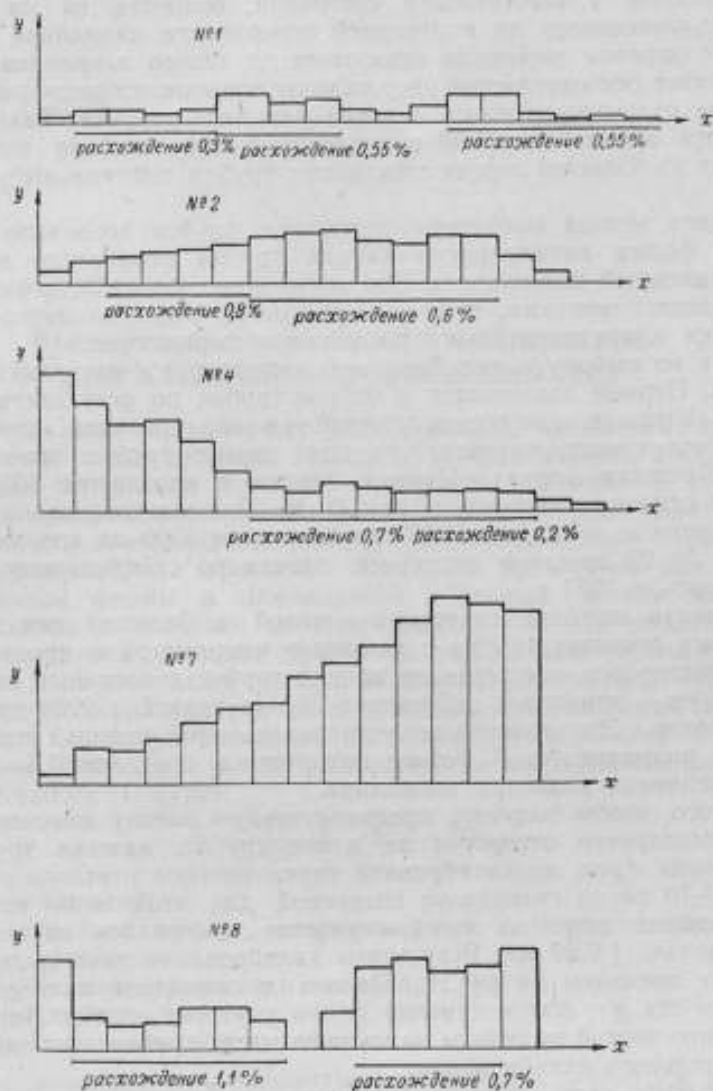


Рис. 1. Графики изменения диаметра капиллярных трубок № 1, 2, 4, 7, 8 по данным предварительного калибрования в 1952 г.

Изменение среднего радиуса капилляра по длине трубки на основании данных калибрования графически изображено на рис. 2. По этим графикам в 1952 г. выбраны участки, пригодные для изготовления девяти пар капилляров. В трубках № 5, 6 и 8 не оказалось участков, пригодных для капилляров.

Известны и другие системы калибрования капилляров, но они более сложны и трудоемки по сравнению с использованной системой Гей-Люссака. Средний радиус на каждый участок капилляра вычислялся

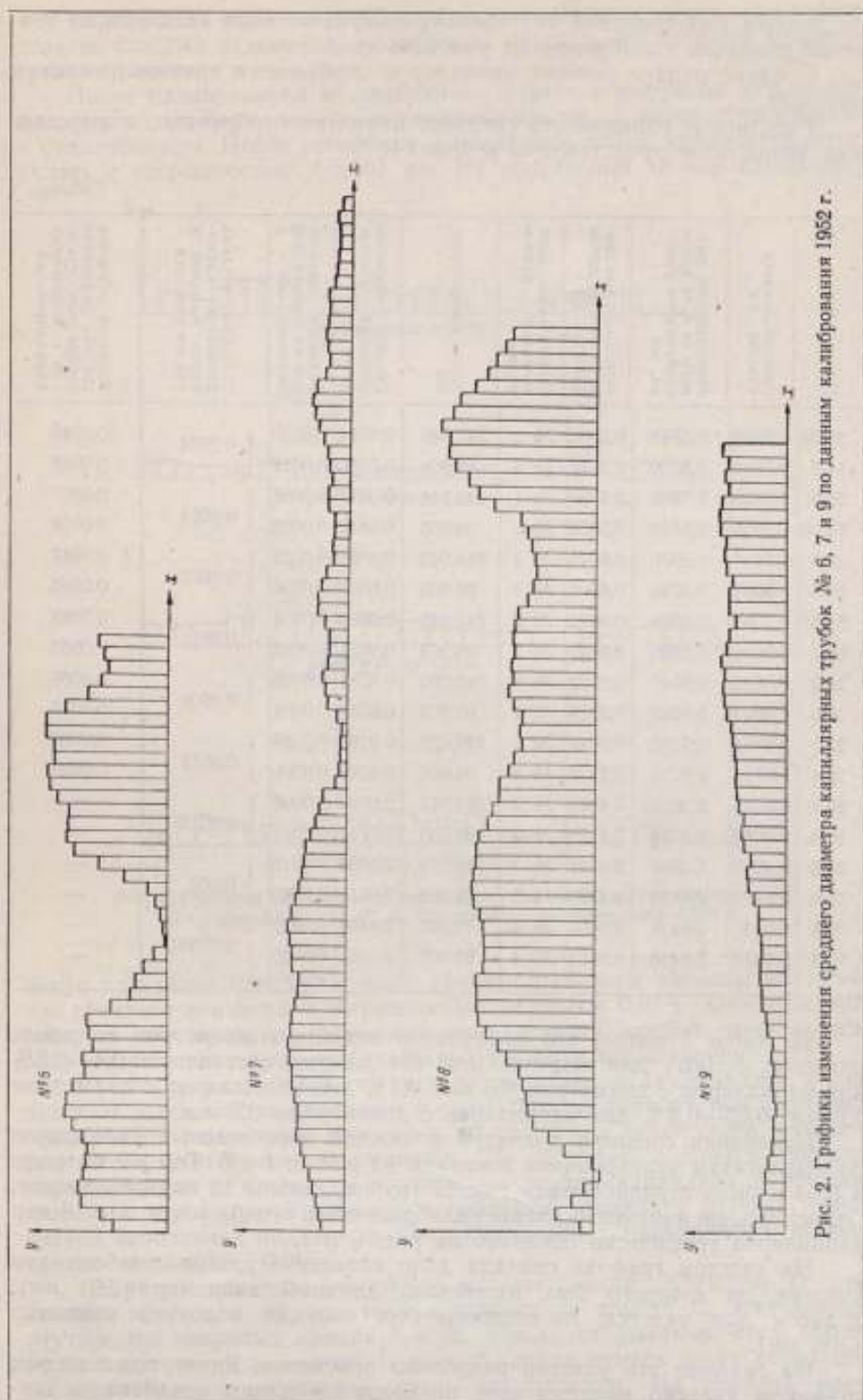


Рис. 2. Графики изменения среднего диаметра капиллярных трубок № 6, 7 и 9 по данным калибрования 1952 г.

по данным калибрования как средняя арифметическая величина из значений радиусов калибровочных участков капилляров.

Средний радиус готовых капилляров определялся гравиметрическим методом.

Результаты определений среднего диаметра отобранных и вырезанных капилляров представлены в табл. 1.

Таблица 1

Длина участка, мм	Средний диаметр участка, мм	Минимальный диаметр на всей длине отобранного участка, мм	Максимальный диаметр на всей длине участка, мм	Обозначения, присвоенные капиллярам	Длина капилляров, мм	Среднее значение диаметра капилляра, мм	Разности диаметров на концах капилляров, мм	Разность средних диаметров капилляров в одной и той же паре, мм	Разность значений средних диаметров отобранных участков и вырезанных капилляров, мм
25,38	0,5966	0,5948	0,5986	№ 1	240,046	0,6014	0,0010	0,0034	0,0048
14,6	0,5942	0,5930	0,5952	№ 1	99,906	0,5980	0,0016		0,0048
26,3	0,5825	0,5802	0,5858	№ 1	240,046	0,5818	0,0066	0,0024	0,0007
10,66	0,5838	0,5820	0,5852	№ 1	99,905	0,5842	0,0002		0,0004
24,8	0,6034	0,5970	0,6076	№ 1	240,043	0,6081	0,0022	0,0052	0,0047
10,8	0,5984	0,5948	0,6002	№ 1	99,905	0,6029	0,0036		0,0045
25,6	0,9594	0,9566	0,9622	№ 2	240,046	0,9682	0,0004	0,0011	0,0088
10,7	0,9606	0,9590	0,9622	№ 2	99,905	0,9671	0,0012		0,0065
24,0	0,9695	0,9640	0,9732	№ 2	240,060	0,9781	0,0006	0,0001	0,0086
10,5	0,9707	0,9688	0,9728	№ 2	99,905	0,9782	0,0004		0,0075
25,0	0,9704	0,9660	0,9748	№ 2	240,052	0,9793	0,0058	0,0012	0,0089
10,4	0,9744	0,9714	0,9772	№ 2	99,305	0,9782	0,0006		0,0038
26,0	2,3976	2,3936	2,4040	№ 3	240,047	2,0729	0,0006	0,0015	—
10,5	2,4058	2,4024	2,4120	№ 3	99,905	2,0714	0,0002		—
24,6	2,4262	2,4060	2,4324	№ 3	240,053	2,0536	0,0016	0,007	—
11,0	2,4172	2,4120	2,4220	№ 3	99,904	2,0616	0,0080		—
24,6	2,0440	2,0418	2,0464	№ 4	240,047	2,4403	0,0020	0,0058	—
10,4	2,0448	2,0416	2,0494	№ 4	99,903	2,4461	0,0030		—

Из табл. 1 видно, что различие в значениях диаметров по длине участков, годных для вырезки пар капилляров, составляет: 0,4—0,8% для капилляров с диаметром 0,6 мм; 0,1% для капилляров с диаметром 1,0 мм; 0,06—0,3% для капилляров с диаметрами 2,5 мм.

Изменения среднего диаметра в каждой паре готовых капилляров по результатам калибрования показаны на рис. 3, 4 и 5. Тем же методом в 1954 г. были откалиброваны еще 10 трубок, давшие 18 пар капилляров. Относительное изменение длины калибровочного столба ртути для 13 пар капилляров графически показано на рис. 6 и 7.

На каждом графике сначала дано изменение длины столбика для участка, из которого был изготовлен длинный капилляр (240 мм), а затем для участка, из которого был вырезан короткий капилляр (100 мм).

На графике эти участки разделены просветом. Внизу под каждым графиком указано максимальное расхождение длины столбика в дан-

ной паре. После того как участки для вырезки капилляров были определены, каждый из них был калиброван на значение среднего диаметра гравиметрическим методом.

После калибрования из отобранных участков вырезаны капилляры, концы которых были залиты оптической смолой, а затем отшлифованы и отполированы. После шлифовки и полировки длина капилляров измерялась с погрешностью $\pm 0,001$ мм. Из полученных 18 пар капилляров

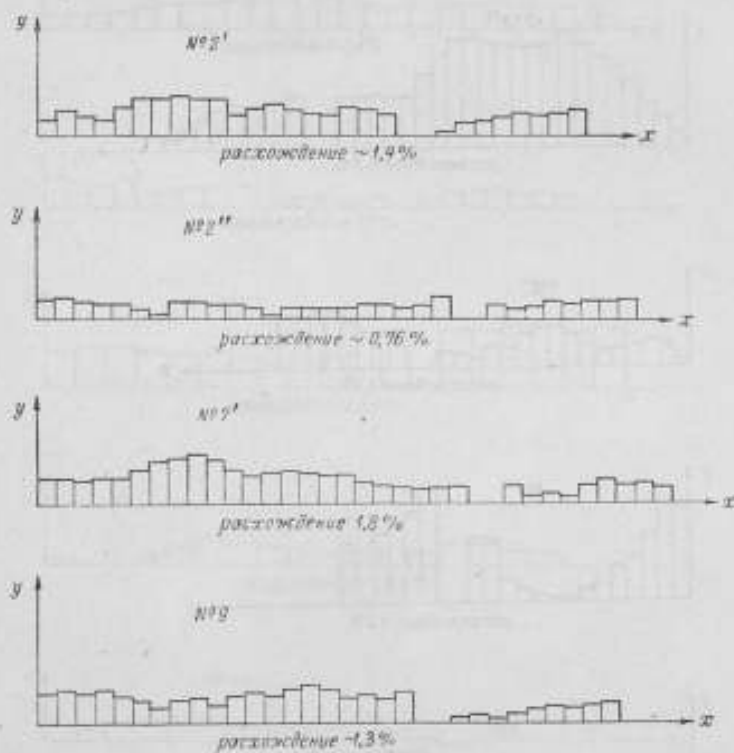


Рис. 3. Графики изменения среднего диаметра капилляров, вырезанных из трубок № 2', 2'', 7', 9, по данным калибрования 1952 г.

шесть пар были прокалиброваны гравиметрическим методом на значение среднего диаметра с погрешностью не свыше 0,01%. Столь высокая точность калибрования возможна при условии особой тщательности заполнения капилляров и достаточной точности взвешивания.

Сущность разработанного метода заполнения заключалась в следующем. К обоим полированным торцам заполненного ртутью капилляра притираются стеклянные пластинки до получения оптического контакта, при этом ртутный мениск срезается. По интерференционным полосам, образующимся в плоскости притира на торцах капилляра и ртутного столба, контролируется точность заполнения капилляра ртутью. Температура заполнения поддерживалась постоянной и измерялась с погрешностью не свыше $\pm 0,05^\circ$ С.

На рис. 8 показано устройство для заполнения. Капилляр *D* с помощью резиновой трубки присоединяется к трубке *C*, наполненной ртутью при закрытых кранах *A* и *B*. После открывания этих кранов ртуть поступает в капилляр. В момент, когда мениск ртути образуется на верхнем конце капилляра, краны закрываются. На верхний конец

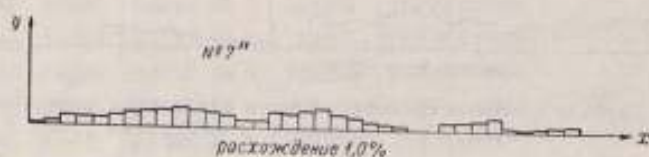
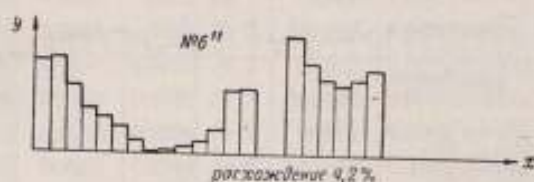
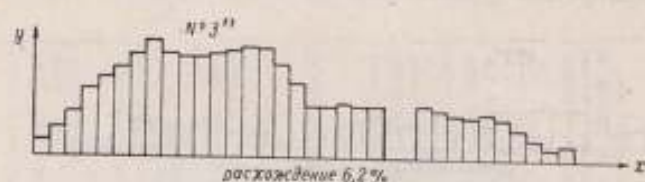
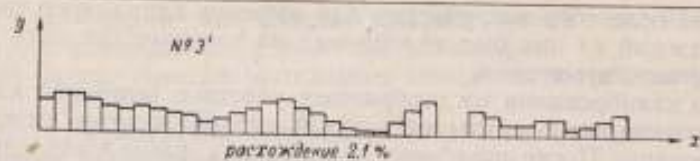


Рис. 4. Графики изменения среднего диаметра капилляров, вырезанных из трубок № 3', 3'', 6', 6'', 7'', по данным калибровки 1952 г.

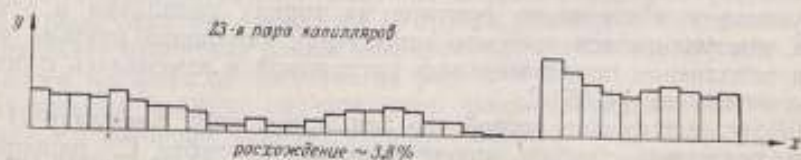
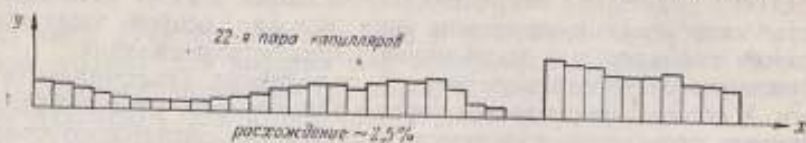


Рис. 5. Графики изменения среднего диаметра пар капилляров, вырезанных из трубки № 1, по данным калибровки 1952 г.

капилляра накладывают цилиндрическую пластину, притирают до появления интерференционных полос. Затем капилляр вместе с крапом *A* отсоединяется от трубки *C* — поворачивают притертым к пластине концом вниз, снимают резиновую трубку и термостатируют капилляр. После выдержки при заданной температуре притирают пластину

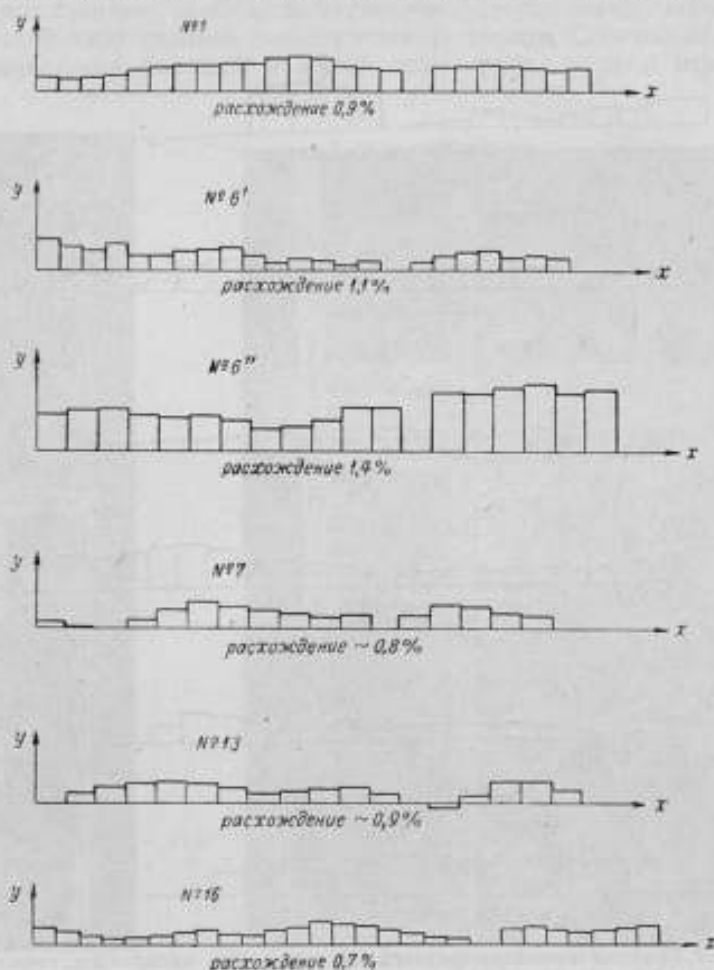


Рис. 6. Графики изменения среднего диаметра в паре капилляров, вырезанных из трубок № 1, 6', 6'', 7, 13, 16, по данным калибрования 1954 г.

ко второму концу капилляра. Вид наполненных ртутью капилляров показан на рис. 9. Интерференционная картина является доказательством равенства длины столба ртути капилляра. Далее ртуть из капилляра выливают в чистый взвешенный бюкс и определяют ее массу с погрешностью не свыше $\pm 0,00001$ г. Операция заполнения каждого капилляра и последующего взвешивания производилась троекратно.

Результаты взвешивания обрабатывались по методике, принятой лабораторией мер массы ВНИИМ для точных измерений.

Результаты калибрования приведены в табл. 2.

Из полученных капилляров пять пар были применены для определения вязкости дистиллированной воды абсолютным методом при 20°C .

Хорошее совпадение значений вязкости, полученных на капиллярах различных сечений, и высокая точность свидетельствуют об отсутствии систематических погрешностей калибрования капилляров.

Для дополнительного изучения формы капиллярных трубок после выполненной работы были произведены следующие исследования.

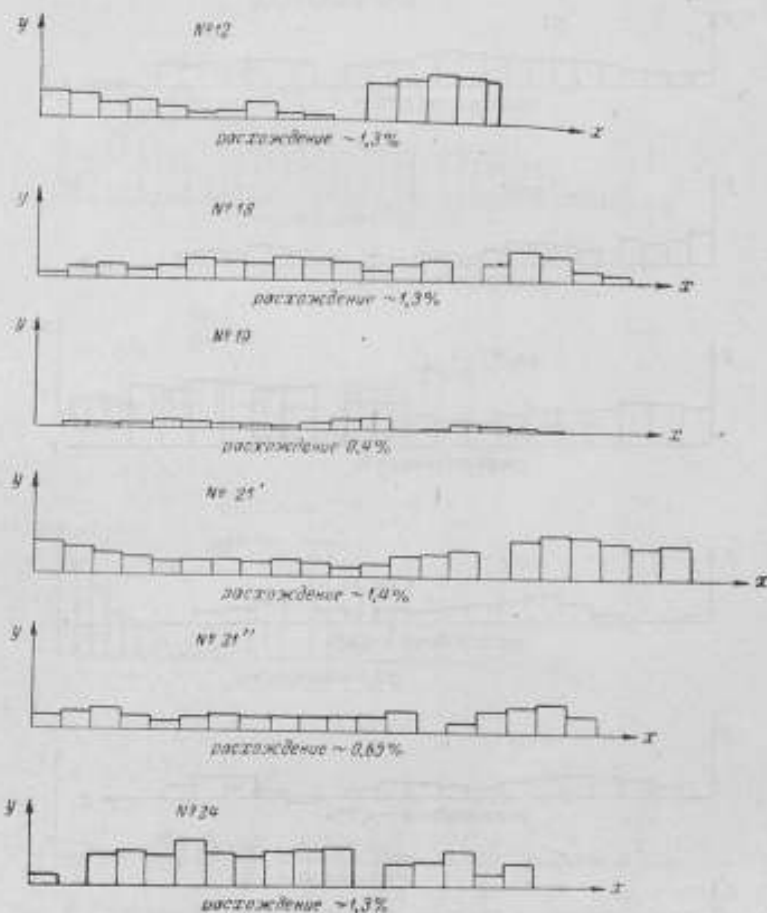


Рис. 7. Графики изменения среднего диаметра в паре капилляров, вырезанных из трубок № 12, 18, 19, 21', 21'', 24, по данным калибрования 1954 г.

Три капиллярные трубки были разделены на участки по 50 мм. На каждом из этих участков были измерены внешние максимальные и минимальные диаметры в ряде сечений. На рис. 10, а показаны графики изменения диаметров сечений по длине каждой трубки. По оси x отложены участки трубок, а по оси y — максимальные и минимальные размеры диаметров сечений. После этого каждый из участков трубки калибровался с помощью перемещения столба ртути длиной 50 мм, которую измеряли с погрешностью не свыше 0,02 мм. Результаты этих измерений даны на рис. 10, б. Исходя из рис. 10, можно заключить, что изменения длины ртутного столба соответствуют изменениям квадратов внешних диаметров трубки. Далее трубки были разрезаны на участки. Один конец каждого участка после шлифования и полировки рассматривали и измеряли в восьми направлениях с помощью универсального

микроскопа. При этом обмеру подвергались полированный торец трубки и ее капиллярное отверстие. Результаты этих измерений представлены на рис. 11 и 12.

Анализ всех проведенных измерений позволяет сделать следующие выводы.

1. Капиллярные трубки, выпускаемые стекольными заводами, не имеют какой-либо строгой геометрической формы. Соотношение между так называемыми большой и малой осью трубки и угол между ними



Рис. 8. Устройство для заполнения капилляра ртутью.

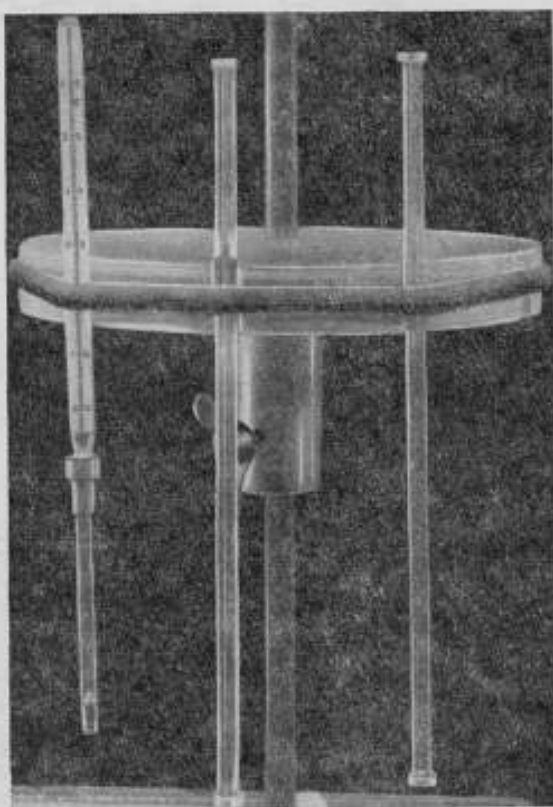


Рис. 9. Штатив-держатель для капилляров, заполненных ртутью.

для данной трубки являются величинами сравнительно постоянными, но у различных трубок эти величины различны.

2. Поверхность капиллярных каналов неоднородна; она искажена многочисленными продольными желобками шириной в $0,001-0,005$ мм и глубиной, не поддающейся измерению. На самих этих желобках имеют место углубления и бугорки. Однако все эти поверхностные дефекты настолько малы по сравнению с диаметром капилляра, что их вискозиметрический эффект незначителен.

3. Отклонение капиллярных трубок от цилиндрической формы в сечениях обусловлено, главным образом, отклонением от цилиндрической формы холяв, из которых они вытягиваются. Отклонение от

цилиндрической формы по длине трубки обусловлено несовершенством технологии вытягивания.

4. Отклонения от цилиндрической формы капиллярных каналов как правило подобны соответствующим отклонениям у самих трубок. Разность между максимальными и минимальными размерами внешнего и внутреннего диаметров трубки является на всем ее протяжении величиной сравнительно постоянной.

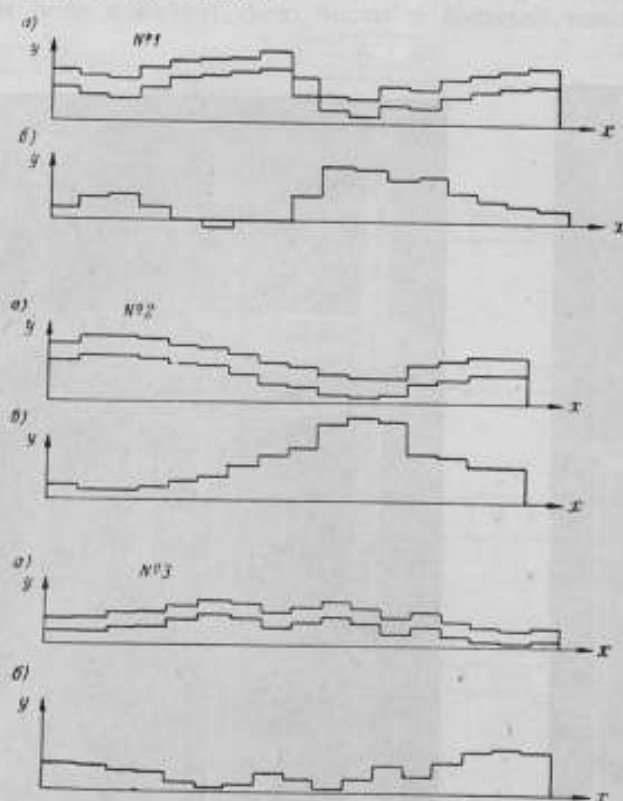


Рис. 10. Графики изменения размеров трех капиллярных трубок (№ 1, 2, 3): а — изменение размеров сечения капиллярных трубок по длине (данные микроскопического измерения); б — изменение квадрата диаметра капиллярных трубок (данные калибрования ртутью).

5. Наличие разнообразных по величине и форме отклонений канала капилляров от цилиндрической формы оказывает влияние на точность абсолютных измерений вязкости. Степень этого влияния теоретически и экспериментально определить затруднительно. Попытки заменить в формуле Пуазейля радиус полуосями эллипса и ввести поправочный член на конусность капилляров следует признать необоснованными.

6. Для существенного повышения точности измерения вязкости с помощью капиллярных абсолютных вискозиметров весьма важно иметь капилляры цилиндрической формы. Для получения таких капилляров можно рекомендовать:

а) перейти на вытягивание капиллярных трубок из размягченных, специально расшлифованных с большой точностью, цилиндрических заготовок;

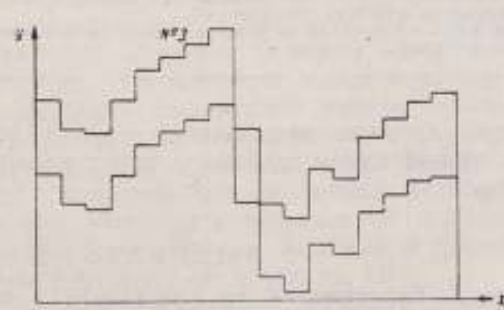
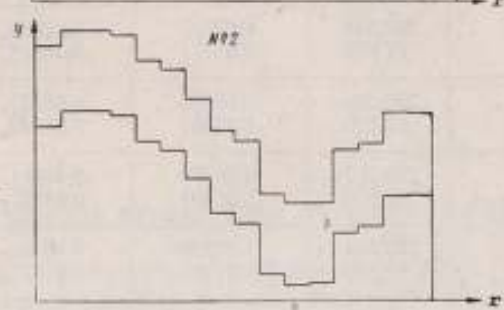
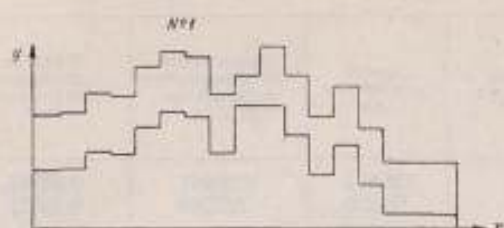


Рис. 11. Графики изменения размеров сечения капиллярных трубок № 1, 2, 3 по длине (по данным калибрования ртутью).

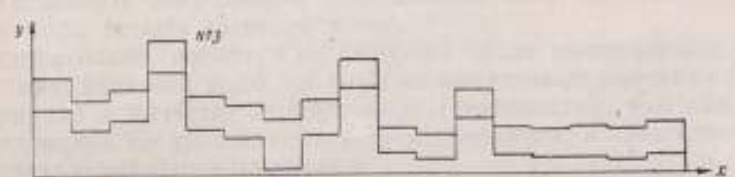
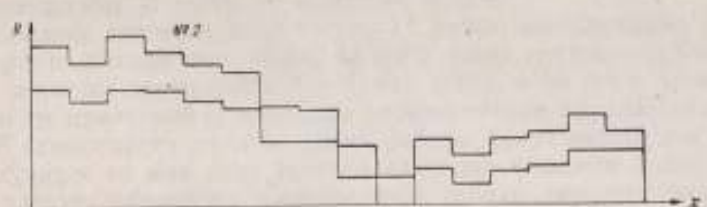
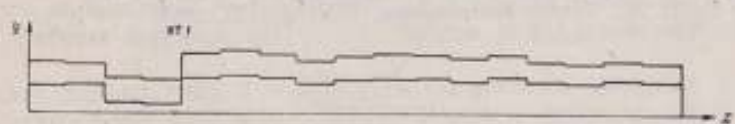


Рис. 12. Графики изменения размеров сечения капиллярных трубок № 1, 2, 3 по длине (по данным оптического измерения с помощью универсального микроскопа).

Таблица 2

№ пары капилляров	Длина капилляров, мм	Масса ртути для заполнения капилляров при 20° С, г	Квадрат диаметра капилляра, мм ²	Наибольшая разница в диаметрах, %	
				по длине	в сечении (овальность)
1	238,612 98,238	0,85924 0,37268	0,33847 ₅ 0,35658 ₂	0,9	1,1
3	239,544 97,603	0,63367 0,25771	0,24864 ₉ 0,24818 ₆	0,8	0,8
5	239,544 97,876	0,55356 0,22567	0,21721 ₄ 0,21672 ₄	0,8	1,1
13	239,002 97,876	1,26052 0,51468	0,49574 ₄ 0,49427 ₇	0,9	0,9
16	239,542 97,876	1,17309 0,47499	0,46031 ₂ 0,45616 ₆	1,4	0,7

Примечания. 1. В 3-й графе даны средние значения массы ртути из всех заполнений капилляра и из всех взвешиваний.
2. При вычислении квадрата диаметра капилляра плотность ртути при 20° С принята равной 13,5457 г/см³.

б) изготовленные капиллярные трубки исправлять путем волочения их в размягченном состоянии через калиброванную графитированную оправу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барр Г., Вискозиметрия, пер. с англ., ГОНТИ, М., 1938.
2. Попов М. М., Термометрия и калориметрия, МГУ, М., 1954.
3. Рудо Н. М., Точное взвешивание, ВНИИМ, Л., 1949.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ВОДЫ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 20° С

Измерение вязкости в абсолютных единицах связано с трудностями, которые увеличиваются с повышением точности. Однако, если вязкость одной жидкости известна, то вязкости других жидкостей довольно легко поддаются точному определению. В СССР в качестве эталонного вещества принята вода, значение вязкости которой при 20° С считается равным 0,01005 пуаз. Это значение, соответствующее табличным данным Бингема и Джексона, получившее дополнительное обоснование в работе Халфина Э. П. [1], положено в основу эталонного метода воспроизведения единицы вязкости, утвержденного Ученым советом ВНИИМ в 1945 г. Следует заметить, что различные авторы приводят значения вязкости воды при 20° С, отличающиеся от принятого стандарта. Например, в таблицах Леру, Дарсая, Бингема и Джексона значения вязкости воды отличаются друг от друга на 1,5%.

В табл. 1 приводятся данные некоторых, наиболее тщательно выполненных, определений вязкости воды различными методами, а в табл. 2 все эти работы сгруппированы по степени совпадения значений вязкости.

Анализ данных таблиц приводит к следующим выводам.

1. Расхождение между значениями вязкости воды при 20° С в работах, приведенных в табл. 1, достигает 3,05%.

2. Среднее значение вязкости из 11 работ, выполненных с помощью капиллярного метода измерений, на 0,2% ниже среднего значения, полученного методом крутильных колебаний шара, и на 0,5% ниже среднего значения из измерений с помощью вискозиметров крутильного типа.

3. В зависимости от того, какие работы будут взяты для рассмотрения, получится то или иное среднее значение вязкости воды; этим, возможно, следует объяснить наличие трех таблиц вязкости воды, опубликованных в литературе.

4. Установить погрешность определения того или иного значения вязкости воды весьма затруднительно.

Следовательно, несмотря на большое число выполненных работ по определению вязкости воды, ни одно из полученных значений не может быть принято в качестве стандартного (эталонного), так как ни одно из исследований не удовлетворяет всем требованиям точности и надежности, предъявляемым измерениям.

Именно поэтому за границей работы по определению вязкости воды при 20° С не прекращались до настоящего времени.

Таблица 1

Вязкость, приведенная к 20° С, сантипуаз	Год выполнения работы	Метод	Автор	Ссылка на литературу
1 011	1846	Капиллярный	Пуазейль	[2]
1.003	1876	"	Шпрунг	[3]
1.008	1883	"	Злотте	[4]
1.005	1912	"	Бингем и Уайт	[5]
1.032	1886	"	Траубе	[6]
1.008	1900	"	Госкинг	[7]
1.004	1909	"	"	
1.021	1882	"	Стефан	[8]
1.0015	1892	"	Торпе и Роджер	[9]
1.005	1932	"	Эрк и Шмидт	[10]
1.026	1887	Затухание крутильных колебаний шара и жидкости	Кеннг	[11]
1.007	1908	Затухание крутильных колебаний шара, наполненного жидкостью	Ладенбург	[12]
1.006	1936	То же	Анраде, Чайонг	[13]
1.010	1916	Вращение внешнего цилиндра относительно концентрического внутреннего	Цемплен и Погани	[14]
1.008	1890	То же	Шведов	[15]
1.018	1925	"	Леру	[16]
1.021	1901	"	Дрю	[17]
1.026	1903	"	Гарней	[18]
1.008	1952	"	Гепплер	[19]
1.014	1891	Затухание крутильных колебаний полого цилиндра, наполненного жидкостью	Мютцель	[20]
1.0020	1952	Капиллярный	Свинделле, Кос и Годфрей	[21]

В аэрогидрометрической лаборатории ВНИИМ в 1951—1955 гг. была создана измерительная установка, с помощью которой определена вязкость воды абсолютным методом при 20° С.

Выбор метода измерений

Наиболее употребительными методами измерения вязкости жидкостей являются следующие:

- 1) метод свободного падения шарика в испытуемой жидкости;
- 2) метод вращения одного из двух соосных цилиндров;
- 3) метод крутильных колебаний шаров или цилиндров, помещенных в жидкость или наполненных жидкостью;

Таблица 2

Метод измерений	Количество рассматриваемых работ	Среднее арифметическое значение вязкости, сантипуазы	Пределы вариаций в значениях вязкости, %
Капиллярный	11	1,010	3,05
•	8	1,0045	0,7
•	6	1,0034	0,35
Змгухание крутильных колебаний шара . .	4	1,013	2,0
Вращение одного из двух соосных цилиндров	6	1,015	1,8
Все работы, указанные в табл. 1	21	1,012	3,05

4) метод истечения испытуемой жидкости через капилляры.

Эти методы весьма подробно описаны в общеизвестной литературе по вискозиметрии [22].

Для определения вязкости воды при 20° С большинство исследователей пользовалось капиллярным методом. Сущность этого метода заключается в том, что исследуемая жидкость протекает через капилляр, длина и диаметр которого известны. По размерам капилляра, по скорости течения и разности давлений на концах капилляра вычисляется вязкость жидкости. Этот метод выгодно отличается от перечисленных выше своей теоретической обоснованностью и относительной простотой эксперимента.

Капиллярный метод наиболее всесторонне был разработан Пуазейлем. Его исследования вязкости жидкостей, опубликованные в 1846 г., отличаются необыкновенной законченностью и четкостью. Сущность теории этого метода выражается следующими тремя основными положениями:

1) количество жидкости, вытекающее за единицу времени, пропорционально давлению при условии, если длина трубки превышает некоторый минимум, возрастающий с радиусом;

2) количество вытекающей за единицу времени жидкости обратно пропорционально длине трубки;

3) количество вытекающей за единицу времени жидкости пропорционально четвертой степени радиуса.

Теория предполагает, что поток жидкости в цилиндрической трубке имеет ламинарный характер. В применении к трубке бесконечной длины вязкость вычисляется по формуле

$$Q = \frac{\pi PR^4}{8 \cdot \eta \cdot l} \quad (1)$$

где Q — количество жидкости, протекающей за единицу времени;

P — перепад давления на концах капилляра;

R — радиус трубки;

η — коэффициент внутреннего трения (вязкости жидкости);

l — длина капиллярной трубки.

Математическое обоснование формулы Пуазейля дали одновременно и независимо друг от друга Видеман и Гагенбах.

В измерительной практике мы имеем дело всегда с конечными капиллярами. Гагенбах и Куэрт дополнили формулу Пуазейля поправоч-

ными членами, которые количественно выражают явления, имеющие место на концах капилляров.

Полное уравнение течения жидкости через капиллярную трубку обыкновенно выражается с помощью уравнения:

$$\eta = \frac{\pi PR^4}{8Q(l+nR)} - \frac{m \cdot \rho \cdot Q}{8\pi(l+nR)}, \quad (2)$$

где m — коэффициент Гагенбаха, является величиною экспериментальной, причем разные исследователи приписывают m различные значения, например: Гагенбах 0,79, Рейнольдс 0,5, Куэтт 1,0, Бусениск 1,12, Шиллер 1,08, Книббе и Римаи 1,14, Госкинг 1,6 и т. д.; в аэрогидрометрической лаборатории ВНИИМ значение m определено равным 0,58;

n — поправка Куэтта, тоже величина экспериментальная, учитывающая затраты энергии давления на превращение сходящегося потока у входного конца капилляра в прямолинейный поток, присущий доминарному потоку в самом капилляре; различные исследователи приписывают n разные значения, в пределах 0 — 6.

Точное экспериментальное определение величин m и n затруднительно. Такая неопределенность в выборе коэффициентов m и n является основным недостатком абсолютных измерений с помощью капиллярных вискозиметров.

В настоящей работе был принят метод Куэтта [23] — измерение вязкости путем пропускания исследуемой жидкости через два последовательно включенных капилляра, — который устраняет необходимость определения коэффициентов m и n . Сущность этого метода заключается в том, что перепад давлений, обусловленный течением жидкости через капилляр, измеряют на участке «средней» части трубки, для которой эпюра распределения скоростей по сечению соответствует параболическому закону. Тем самым исключается влияние входного и выходного участков, а измеряемый перепад давлений зависит только от величин R , η , ρ , Q , λ .

Действительно, если пропускать через капилляры K_1 и K_2 одинаковое количество жидкости Q за одно и то же время t , получим разность давлений на концах этих капилляров P_1 и P_2 . Если мысленно отделить от концов у каждого из этих капилляров равные между собой отрезки, достаточные для того, чтобы в остающихся средних областях движение жидкости было таким же, как в бесконечной трубке, то поправки Π , которые необходимо вычесть из P_1 и P_2 , чтобы получить разность давлений между сечениями, ограничивающими средние области в двух капиллярах, будут равны между собой, потому что они зависят только от величин R , η , ρ , Q и λ , которые в рассматриваемых капиллярах совершенно одинаковы.

В таком случае из равенства

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 (P_1 - \Pi)}{8 \cdot \eta (l_1 - \lambda)} = \frac{\pi \cdot R^4 (P_2 - \Pi)}{8 \eta (l_2 - \lambda)} \quad (3)$$

получается уравнение:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l_1 - l_2}, \quad (4)$$

которое не содержит больше неизвестных величин Π и λ . Это же уравнение можно получить в результате следующих преобразований. Для каж-

дого из двух капилляров напишем следующие уравнения:
для длинного капилляра

$$P_1 = \frac{8 \cdot Q \cdot \eta}{\pi \cdot R^4} (l_1 - \lambda) + \frac{m \cdot \rho Q^2}{\pi^2 \cdot R^4}; \quad (5)$$

для короткого капилляра

$$P_2 + \frac{8 \cdot Q \cdot \eta}{\pi \cdot R^4} (l_2 - \lambda) + \frac{m \cdot \rho Q^2}{\pi^2 \cdot R^4}. \quad (6)$$

Вычитая из первого второе уравнение, при $R_1 \cong R_2 = R$ имеем

$$P_1 - P_2 = \frac{8 \cdot Q \cdot \eta}{\pi R^4} (l_1 - l_2),$$

откуда

$$Q = \frac{\pi R^4}{8 \eta} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l_1 - l_2}.$$

Куэтт, а в последующем Эрк и американские авторы Швиделлс, Кое и Годфрей подбирали капилляры в каждой паре так, чтобы их диаметры отличались лишь на сотые доли процента. Для обработки опытных данных перечисленные авторы пользовались уравнением, приведенным к следующему виду:

$$\eta = \frac{\tau}{8 \cdot Q} \cdot \frac{F_1 \Delta P_1 - F_2 \Delta P_2}{V_1 l_1 - V_2 l_2} = \frac{\tau \cdot \pi}{Q} \cdot \frac{R^4 \Delta P_1 - R^4 \Delta P_2}{V (l_1 - l_2)}, \quad (7)$$

где V — объем жидкости, протекающей за время τ под действием напорной высоты ΔP через капилляр поперечного сечения F и длиной l . Индексы 1 и 2 выражают отношение объема вещества к соответствующим капиллярам.

Расчет вязкости нами производился по формуле:

$$\eta = \frac{\pi \cdot g \cdot \rho (p - l)}{128} \cdot \frac{l_1}{d_1^4} - \frac{l_2}{d_2^4} \cdot \frac{H_1 - H_2}{M} \cdot \tau, \quad (8)$$

которая более точно выражает значение вязкости и более удобна для обработки результатов опыта.

Измерительная установка

Установку для измерения вязкости воды методом пропускания ее через последовательно расположенные два капилляра различной длины, но с диаметрами, близкими друг к другу, впервые создал Куэтт. Вязкость воды определялась им с погрешностью $\pm 2,5\%$. Источники погрешности автором не исследовались.

Метод, предложенный Куэттом, в 1924—1944 гг. был использован в PTR Эрком и Шмидтом для измерения вязкости воды и минеральных масел. Измерительная установка Эрка и Шмидта мало отличается от установки Куэтта.

Вискозиметр их имел следующие существенные недостатки:

- 1) концы капилляров в промежуточных резервуарах неодинаково расположены по отношению к жидкостному потоку, что может повести к нарушению подобия физических явлений у концов, которое лежит в основе метода измерения вязкости с помощью данного прибора;
- 2) регулирование постоянства давления в приборе осуществляется в резервуаре питания, при этом конец газопроводной трубки находится

вблизи входного отверстия трубки, по которой испытываемая жидкость течет в промежуточный резервуар; вследствие этого испытываемая жидкость до предела насыщена газом, что ведет к изменению ее вязкости в сторону повышения; 3) во время опыта не было обеспечено постоянство положения уровней жидкости в пьезометрах вискозиметра, так как авторами не было принято никаких мер к ослаблению пульсации от капельного истечения жидкости из вискозиметра и от действия газовых пузырьков и жидкостном регуляторе давления; 4) соединение капилляров и пьезометров с металлическими резервуарами выполнено не вполне удачно.

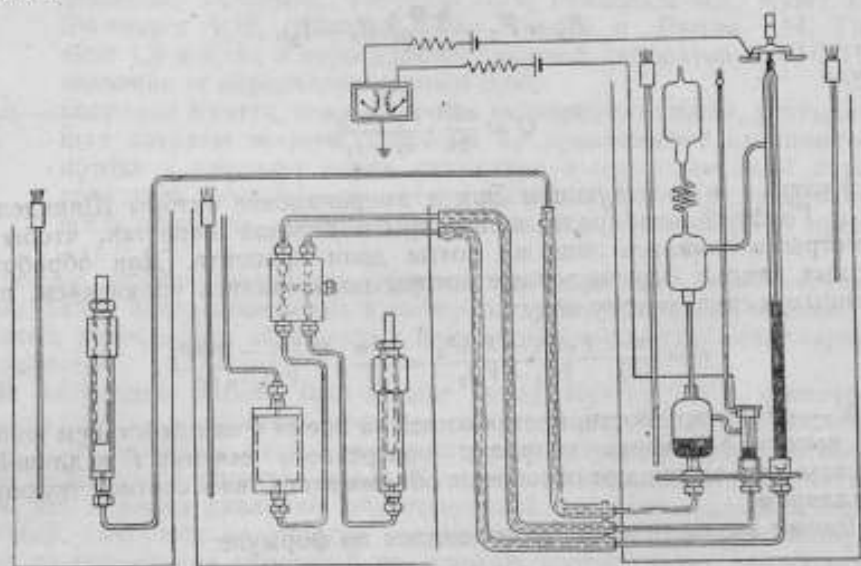


Рис. 1. Схема установки для определения вязкости воды при 20° С НСБ США.

Перечисленные недостатки снижали точность измерений, выполненных Эрком и Шмидтом, и поэтому едва ли можно согласиться со значением погрешности, приводимым этими авторами и равным 0,5%.

В 1931—1952 гг. в Национальном бюро стандартов (НСБ) США Швинделлс, Кое и Годфрей создали измерительную установку новой конструкции, схема которой приведена на рис. 1. Эта установка является развитием метода Куэтта.

Струя воды пропускается через два сменных капилляра (различной длины и сравнительно одинакового диаметра) при известных постоянных скоростях. Перепад давления на концах капилляров измеряется дифференциальным ртутным манометром. Вязкость рассчитывается по формуле Пуазейля без каких-либо поправочных коэффициентов. Работа велась приблизительно 15 лет.

Авторы дали значение вязкости воды при 20° С, равное 1,002, и приписали ему погрешность 0,1%. Анализа погрешностей в работе не дается. Осуществленная американскими авторами измерительная установка сложна по устройству. В установке применяется в сравнительно большом количестве ртуть. Система термостатирования трудно осуществима, так как в трех масляных термостатных ваннах температура должна поддерживаться и измеряться с погрешностью не свыше $\pm 0,001^\circ\text{C}$.

Схема установки, созданной в 1951 г. во ВНИИМ, на которой выполнена настоящая работа, дана на рис. 2.

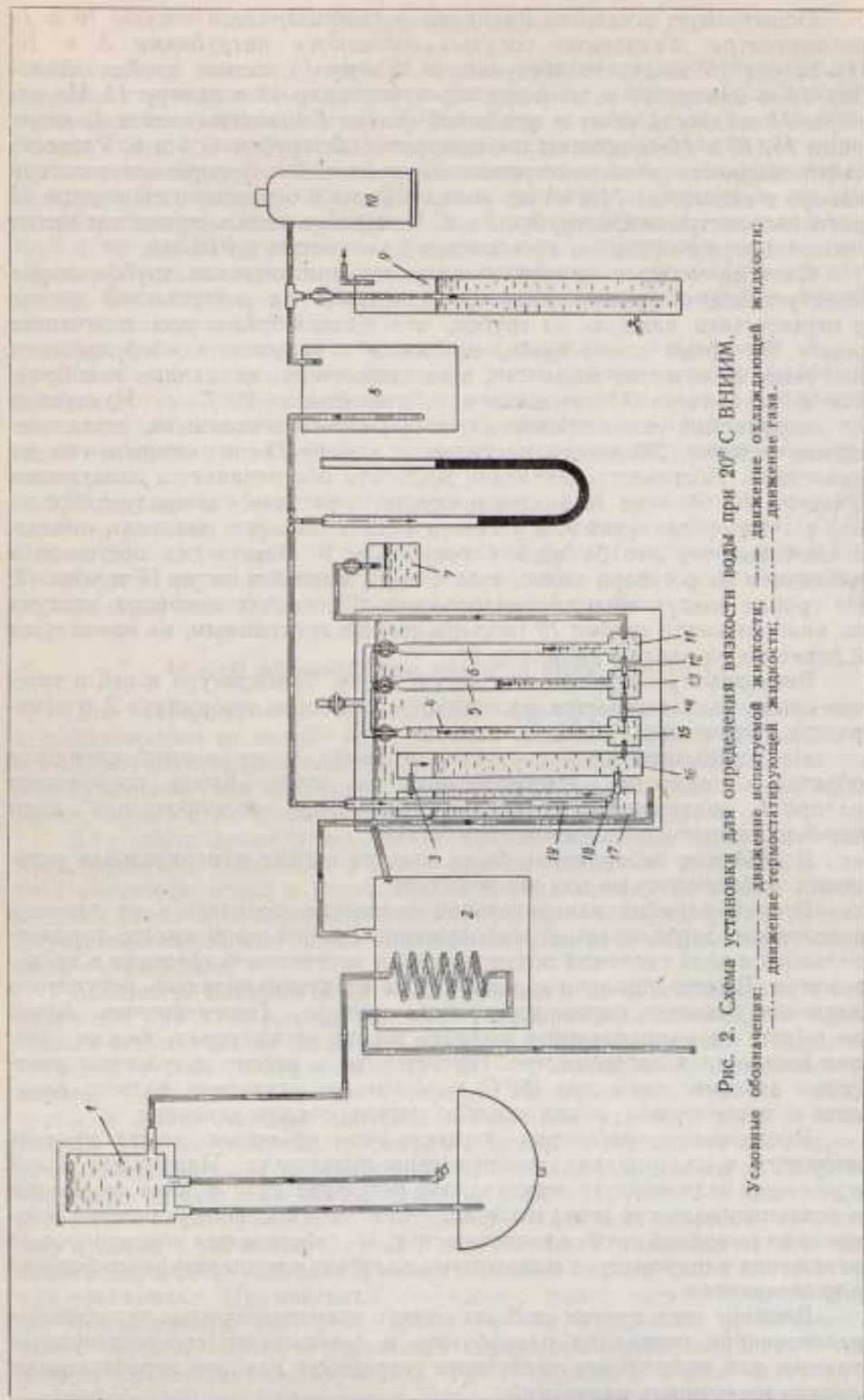


Рис. 2. Схема установки для определения вязкости воды при 20° С ВНИИМ.
 Условные обозначения: — — — — — движение испытуемой жидкости; — — — — — движение охлаждающей жидкости;
 - - - - - движение термостатирующей жидкости; — — — — — движение газа.

Испытуемую жидкость наливают в сообщающиеся сосуды 16 и 17 вискозиметра. Указанные сосуды сообщаются патрубками 3 и 18. Из сосуда 16 жидкость поступает в камеру 15, затем, пройдя капилляр 14, в камеру 13 и, наконец, через капилляр 12 в камеру 11. Из камеры 11 жидкость течет в приемный стакан 7 и взвешивается. С камерами 15, 13 и 11 соединены пьезометрические трубки 4, 5 и 6. Разность высот жидкости в пьезометрических трубках 4 и 5 определяет потери напора в капилляре 14 и на его концах. То же в отношении капилляра 12 дают пьезометрические трубки 5 и 6. Измерение пьезометрических высот производится с помощью катетометра с точностью $\pm 0,01$ мм.

Система четырех кранов наверху пьезометрических трубок позволяет установить уровни жидкости в трубках на желательной высоте и перекрывать каждую из трубок, что целесообразно при подготовке опыта. Во время опыта краны находятся в положении, изображенном на схеме. Количество жидкости, прошедшее через капилляры и собранное в стаканчике 7, взвешиваем с точностью $\pm 0,002$ г. Измерения по описываемой схеме производятся при строго постоянном, установившемся режиме. Жидкость поступает в камеру 15 под одним и тем же давлением. Постоянство давления жидкости обеспечивается следующим образом. Из баллона 10 воздух поступает в ресивер 8 и воздушно-водяной регулятор давления 9. В ресивере устанавливается давление, определяемое высотой столба воды в регуляторе 9. Воздух под постоянным давлением из ресивера подводится к погруженной в сосуд 17 трубке 19. Из трубки воздух выходит пузырьками. Поскольку давление воздуха на нижнем конце трубки 19 поддерживается постоянным, не изменяется и давление на входе в капилляр 14.

Вискозиметр погружен в водяную ванну. Температура в ней в течение опыта поддерживается постоянной с помощью термостата 2 и измеряется с точностью $\pm 0,01^\circ$ С.

Из термостата вода поступает в ванну, а из ванны сливается обратно в термостат. Изображенный на схеме бачок постоянного напора 1 поддерживает стабильность течения водопроводной воды через охлаждающий змеевик термостата.

В 1954 г. в лаборатории была создана вторая измерительная установка, работающая на том же принципе.

Второй вариант измерительной установки отличается от первого, в основном, вертикальным расположением капилляров вместо горизонтального и иной системой поддержания постоянного давления в вискозиметре. Вместо баллона с воздухом и воздушно-водяного регулятора давления применен бачок постоянного напора. Перемещением бачка по высоте на направляющей колонке можно регулировать режим течения жидкости в вискозиметре. Приведенные в работе результаты измерения вязкости воды при 20° С получены на установке первого варианта с применением обоих способов регулирования давления.

Исследование установки показало, что во время опыта уровень жидкости в пьезометрах вискозиметра пульсирует. Причинами такой пульсации являются: 1) порционное истечение газа в виде пузырьков в воздушно-водяном регуляторе давления; 2) капельное истечение жидкости из выводной трубки вискозиметра; 3) действие сил поверхностного натяжения в пьезометрах и некоторые колебания температурного режима в вискозиметре.

Влияние этих причин не было до сего времени изучено: проведенные исследования позволили разработать и осуществить соответствующие приемы для полного или частичного устранения влияния перечисленных причин на точность измерений.

Подбор капилляров

Капилляр является главной частью вискозиметра. Относительная погрешность определения среднего диаметра капилляра обуславливает учетверенную относительную погрешность в определении вязкости. Эллиптичность и конусность капилляра также приводит хотя и к меньшим, но тем не менее значительным изменениям измеряемого значения вязкости. Изготовление цилиндрических капилляров является весьма сложным делом. Исследование большого количества капиллярных трубок, изготовленных заводом «Дружная горка», привело к заключению, что каждая капиллярная трубка имеет индивидуальную геометрическую форму. Эллиптичность и конусность этих капиллярных трубок колеблется в пределах $0,5 \div 5\%$.

Для отбора пригодных капилляров пришлось исследовать около двух тонн капиллярных трубок. Для этого отбора была разработана особая система разбраковки трубок и создана специальная установка для предварительной их калибровки. Отобранные этим методом капилляры подвергались калибровке усовершенствованным гравиметрическим методом.

В результате было изготовлено шесть пар капилляров, средний диаметр которых определен с погрешностью, не превышающей $0,01\%$. Отклонения капилляров от цилиндрической формы не превышают $0,9\%$. Результаты их калибровки показаны в табл. 3. Подробные данные по вопросу о капиллярах даны в специальной статье.

Опыты по измерению вязкости воды при 20°C

Для капилляров с небольшими диаметрами при измерениях с погрешностью не свыше $0,1\%$ весьма важно, чтобы в вискозиметр и в испытываемую жидкость не попало каких-либо механических примесей или пузырьков газа. Поэтому были приняты самые тщательные меры предосторожности, чтобы избежать засорения капилляров.

Для опыта применялись только свежеперегнанная вода одной или двух перегонки. Вискозиметр перед опытом тщательно промывался слабым раствором соды, а затем теплой дистиллированной водой. Пьезометры и капилляры обрабатывались хромовой смесью, спиртом и дистиллированной водой. Все части вискозиметра после промывки просушивались в термостате.

Измерения вязкости воды были проведены на описанном выше вискозиметре при двух разных способах регулирования давления. В одних опытах регулирование давления осуществлялось с помощью воздушно-водяного регулятора давления, в других — с помощью бачка постоянного напора. Давление на входе в первый капилляр подбиралось таким, чтобы, с одной стороны, получить наибольшие разности уровней жидкости в пьезометрических трубках, а с другой — обеспечить ламинарное течение воды. Опыты производились при числах Рейнольдса от 12 до 52. Жидкость из вискозиметра вытекала не в виде струйки, а в виде капли. Измерение времени опыта производилось следующим способом: секундомер пускали в тот момент, когда в поставленный стаканчик падала первая капля, и останавливали в момент падения первой капли после отнятия стаканчика. Примененный секундомер имеет погрешность отсчета, не превышающую $0,01$ сек.; вращение его механизма производится током частоты 1000 гц от эталонного генератора (пуск и остановка секундомера производились вручную). Время каждого опыта составляло от 1000 до 3500 сек. Стаканчик, в который собиралась вода, прикрывался

специальным стеклышком, имеющим отверстие для ввода конца выводной трубочки вискозиметра. Это делалось с целью уменьшения испарения воды из приемного стаканчика во время проведения опыта. Кроме того, была определена и учитывалась поправка на испарение воды, которая, впрочем, оказалась менее 0,01%. Определение поправки на испарение произведено путем взвешивания такого же стаканчика с водой, как и приемный стаканчик в вискозиметре, с точно такой же накрывающей пластинкой и трубкой. Было найдено, что в среднем испаряется в 1 сек $1,4 \cdot 10^{-6}$ г воды. В расчеты вводилась эта средняя поправка, умноженная на продолжительность опыта.

При вычислении вязкости из данных опыта пользовались формулой Пуазейля, преобразованной применительно к рассматриваемому случаю измерения двумя капиллярами:

$$\eta = \frac{\pi \cdot g \cdot \rho (\rho - e)}{128 \left(\frac{l_1}{d_1^4} - \frac{l_2}{d_2^4} \right)} \cdot \frac{H_1 - H_2}{M} \cdot \tau,$$

- где η — вязкость в пуазах ($г \cdot см^{-1} сек^{-1}$);
 g — ускорение силы тяжести (принято для Ленинграда $981,932 см/сек^2$);
 ρ — плотность воды при $20^\circ C$ (принята равной $0,99823 г/см^3$);
 e — плотность воздуха в пьезометрах ($г/см^3$);
 l_1 и l_2 — длины первого и второго капилляра ($см$);
 d_1 и d_2 — диаметры первого и второго капилляра ($см$);
 H_1 — разница уровней воды в первом и втором пьезометрах ($см$);
 H_2 — разница уровней воды во втором и третьем пьезометрах ($см$);
 M — масса воды, прошедшей через капилляры ($г$);
 τ — время опыта ($сек$).

При измерении вязкости воды в 1954 г. использовались капилляры пар № 3 и 13. В 1955 г. опыты выполнены с применением пяти пар капил-

Таблица 3

№ пары капилляров	Длина капилляров, мм	Масса ртути для заполнения капилляра при $20^\circ C$, г	Квадрат диаметра капилляра, мм ²	Наибольшая разница в диаметрах, %	
				по длине	в сечении (овальность)
1	238,612	0,85924	0,33847 ₃	0,9	1,1
	98,238	0,37268	0,35658 ₇		
3	239,544	0,63367	0,24864 ₉	0,8	0,8
	97,603	0,25771	0,24818 ₆		
5	239,544	0,55356	0,21721 ₄	0,8	1,1
	97,876	0,22567	0,21672 ₄		
13	239,002	1,26052	0,49574 ₁	0,9	0,9
	97,876	0,51468	0,49427 ₇		
16	239,542	1,17309	0,46031 ₇	1,4	0,7
	97,876	0,47499	0,45616 ₆		

Примечания: 1. В 3-й графе даны средние значения массы ртути из всех заполненных капилляров и из всех взвешиваний.
 2. При вычислении квадрата диаметра капилляра плотность ртути при $20^\circ C$ принята равной $13,5467 г/см^3$.

ляров: № 1, 3, 5, 13 и 16. Между опытами 1954 и 1955 гг. проведена перешлифовка концов капилляров и повторная калибровка их диаметров. В табл. 3 приведены длины капилляров после перешлифовки их концов. В опытах 1954 г. пары капилляров № 3 и 13 имели следующие длины соответственно: длинный капилляр 241, 911 и 241, 925 мм; короткий капилляр 100, 500 и 100, 908 мм. При вычислении величин вязкости воды по данным табл. 4 и 5 принимались указанные здесь длины капилляров.

Результаты опытов 1954 г. помещены в табл. 4 (капиллярная пара № 3) и 5 (пара № 13).

Результаты опытов 1955 г. помещены в табл. 6 (капиллярная пара № 1), 7 (пара № 3), 8 (пара № 5), 9 (пара № 13) и 10 (пара № 16).

Таблица 4

№ опыта	Перепад давления		Давление воздуха в пьезометрах, мм рт. ст.	Количество протекшей жидкости, г	Время истечения, сек.	Вязкость $\text{г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{сек}^{-1}$
	на длинном капилляре, см	на коротком капилляре, см				
1	35,662	15,269	795,4	46,9366	2196,80	0,010035
2	35,672	15,452		45,2615	2137,00	0,010038
3	35,689	15,438		50,0483	2355,00	0,010019
4	35,710	15,528	805,0	49,2285	2325,70	0,010025
5	34,345	14,004		77,8093	3651,60	0,010037
6	34,033	14,549		36,9082	1810,68	0,010050
7	34,063	14,571	803,1	40,8525	1999,68	0,010032
8	34,066	14,569		38,5640	1888,61	0,010040
9	34,054	14,575		38,2662	1875,52	0,010038
10	34,043	14,560	805,0	38,2066	1871,99	0,010037
11	34,054	14,592		38,6342	1897,10	0,010048
12	34,050	14,554		41,7096	2042,52	0,010038
13	34,053	14,591	807,6	43,3433	2124,92	0,010032
14	34,054	14,584		39,9330	1957,94	0,010037
15	34,010	14,609		38,4580	1894,78	0,010050
16	35,301	15,170	805,0	62,2216	2947,68	0,010027
17	35,312	15,337		64,5399	3087,17	0,010046
18	35,303	15,393		38,8926	1863,24	0,010028
19	35,313	15,323	807,6	39,2226	1873,04	0,010037
20	36,010	15,859		47,3920	2242,85	0,010027
21	35,960	15,961		55,7061	2658,20	0,010034
22	35,879	15,659	807,6	52,5986	2484,79	0,010043
23	35,874	15,624		46,0083	2169,63	0,010040
24	36,234	15,790		52,7298	2462,21	0,010037
25	36,020	15,797	36,7493	1736,00	0,010044	
Среднее значение						0,010037
Среднеквадратичная погрешность одного измерения равна 0,07%.						

Таблица 5

№ опыта	Перепад давления		Давление воздуха в пьезометрах, мм рт. ст.	Количество протекшей жидкости, г	Время истечения, сек.	Вязкость $\text{г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$
	на длинном капилляре, см	на коротком капилляре, см				
1	28,579	12,551	811,3	77,0437	1148,21	0,010027
2	28,682	12,861		71,8182	1085,17	0,010035
3	28,410	12,560		75,6551	1141,67	0,010040
4	28,233	12,559	809,0	71,4404	1089,58	0,010035
5	28,691	12,674		77,9293	1163,44	0,010038
6	28,819	12,790		73,8661	1101,74	0,010036
7	28,724	12,784	792,0	80,3892	1206,20	0,010040
8	27,364	11,969		77,5542	1205,59	0,010045
9	27,451	11,662		73,1020	1106,32	0,010030
10	27,489	11,832	790,0	74,2857	1134,34	0,010036
11	27,493	11,896		75,8036	1160,13	0,010020
12	27,278	11,797		68,2913	1055,78	0,010047
13	27,262	11,357	796,0	72,4758	1087,81	0,010021
14	27,336	11,267		74,9982	1115,83	0,010036
15	27,318	12,148		70,3042	1106,19	0,010020
16	27,326	11,746	790,0	72,2271	1109,79	0,010049
17	27,342	11,643		73,3818	1116,65	0,010028
18	27,316	11,969		72,6872	1132,51	0,010037
19	27,297	11,865	796,0	68,3476	1058,96	0,010037
20	13,176	5,585		46,4818	1465,57	0,010047
21	13,171	5,580		46,4818	1465,57	0,010047
22	13,193	5,627	796,0	49,9844	1577,39	0,010023
23	13,196	5,576		53,3313	1674,54	0,010044
24	13,255	5,626		50,8805	1594,56	0,010036
25	13,200	5,587	796,0	53,1038	1667,65	0,010036
26	13,216	5,586		53,9543	1691,51	0,010042
27	13,216	5,585		51,2215	1604,40	0,010034
28	13,271	5,620	796,0	51,2598	1601,25	0,010033
29	13,265	5,617		51,9066	1622,56	0,010035
Среднее значение						0,010035
Среднеквадратичная погрешность одного измерения составляет 0,08%.						

Хорошее совпадение результатов измерения вязкости на капиллярах различного сечения является косвенным подтверждением отсутствия значительных погрешностей определения их диаметров, которые в данном случае могли бы рассматриваться как систематические.

Среднее значение вязкости, подсчитанное из 107 измерений, равно $0,1003 \text{ г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$ при средней квадратичной погрешности 0,09%.

Таблица 6

№ опыта	Перепад давления		Давление воздуха в пьезометрах, см	Количество протекшей жидкости, г	Время истечения, сек.	Вязкость, $\text{г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{сек}^{-1}$
	на длинном капилляре, см	на коротком капилляре, см				
1	43,073	16,328	790,0	79,2327	1622,88	0,010029
2	41,001	15,239		57,8655	1229,92	0,010024
3	39,592	15,871		39,3270	909,08	0,010038
4	45,625	17,737		72,6186	1428,81	0,010045
5	43,087	16,118		66,5070	1347,61	0,010034
6	42,917	16,174	789,8	55,1037	1129,60	0,010036
7	29,264	10,026		46,4780	1322,07	0,010018
8	26,414	9,905		54,0887	1797,97	0,010046
9	26,535	9,866		49,4492	1625,53	0,010031
10	25,798	10,111		32,8911	1150,03	0,010042
Среднее значение						0,010034
Среднеквадратичная погрешность одного измерения составляет 0,09%.						

Таблица 7

№ опыта	Перепад давления		Давление воздуха в пьезометрах, мм рт. ст.	Количество протекшей жидкости, г	Время истечения, сек.	Вязкость, $\text{г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{сек}^{-1}$
	на длинном капилляре, см	на коротком капилляре, см				
1	43,333	20,391	800,3	61,2717	2556,31	0,010025
2	43,258	20,307	800,4	49,9727	2086,16	0,010035
3	43,089	20,182		53,8313	2250,45	0,010030
4	43,073	20,190		43,1896	1807,81	0,010032
5	43,121	20,253		43,8778	1838,20	0,010034
6	43,046	20,197		39,5055	1656,23	0,010033
7	43,144	20,245	800,5	48,4785	2028,99	0,010038
8	43,123	20,240	800,7	43,1128	1805,32	0,010036
9	42,259	19,412	796,3	37,7924	1565,61	0,010039
10	42,286	17,310	796,3	50,2647	1929,75	0,010043
Среднее значение						0,010034
Среднеквадратичная погрешность одного измерения составляет 0,05%.						

Предельную случайную погрешность найденного значения вязкости воды следует принять равной 0,03% (при доверительной вероятности 0,997).

Погрешность найденного нами значения вязкости воды при 20° С обусловлена погрешностями измерения величин, входящих в формулу, по которой вычисляется вязкость воды, и погрешностью измерения температуры.

Таблица 8

№ опыта	Перепад давления		Давление воздуха в пьезометрах, мм рт. ст.	Количество протекшей жидкости, г	Время истечения, сек.	Вязкость, $\text{г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{сек}^{-1}$
	на длинном капилляре, см	на коротком капилляре, см				
1	48,436	20,945	793,3	47,6661	2172,76	0,010041
2	48,620	20,607		37,5341	1679,87	0,010046
3	48,677	20,502		44,2585	1967,87	0,010038
4	48,686	20,472		36,0731	1599,31	0,010023
5	48,674	20,499	800,2	37,7509	1678,19	0,010036
6	48,646	20,443		39,6881	1762,05	0,010033
7	48,663	20,372	800,6	40,3840	1788,47	0,010039
8	48,615	20,390		46,3637	2055,39	0,010026
9	48,638	20,420		46,6770	1849,56	0,010034
Среднее значение						0,010035
Среднеквадратичная погрешность одного измерения составляет 0,07%.						

Таблица 9

№ опыта	Перепад давления		Давление воздуха в пьезометрах, мм рт. ст.	Количество протекшей жидкости, г	Время истечения, сек.	Вязкость, $\text{г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{сек}^{-1}$
	на длинном капилляре, см	на коротком капилляре, см				
1	23,927	9,989	805,0	71,9920	1235,12	0,010029
2	23,949	9,975	805,0	72,6917	1243,54	0,010026
3	23,955	9,975	804,8	67,7836	1160,83	0,010041
4	24,051	9,929		67,9106	1150,49	0,010034
5	24,054	9,924		68,5585	1161,16	0,010037
6	24,021	9,928		77,7497	1319,63	0,010032
7	23,933	9,971	805,0	67,3332	1154,36	0,010039
8	23,956	9,954		69,4218	1187,95	0,010049
9	23,898	9,975		57,2166	1156,51	0,010047
10	23,855	9,955		70,1351	1208,36	0,010044
Среднее значение						0,010038
Среднеквадратичная погрешность одного измерения составляет 0,08%.						

Теоретический расчет предельной погрешности искомого значения вязкости, произведенный непосредственно по формуле зависимости вязкости от величин, измеряемых в опыте, дал значение предельных погрешностей для различных пар капилляров, находящееся в пределах $0,04 \div 0,07\%$. Эти величины удовлетворительно совпадают со значением погрешностей, вычисленных по результатам опытов.

Таблица 10

№ опыта	Перепад давления		Давление воздуха в пьезометрах, мм рт. ст.	Количество протекшей жидкости, г	Время истечения в сек.	Вязкость, $\text{г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{сек}^{-1}$
	на длинном капилляре, см	на коротком капилляре, см				
1	20,983	9,537	805,0	67,2227	1619,69	0,010020
2	20,515	9,401		58,2703	1447,62	0,010032
3	19,831	9,841		65,2723	1804,56	0,010035
4	19,682	9,726		58,8239	1632,33	0,010038
5	19,651	9,694		56,1568	1557,38	0,010033
6	19,776	9,493		55,3300	1485,43	0,010030
7	19,989	9,213		54,8282	1405,11	0,010034
8	20,067	9,028		55,2635	1381,15	0,010024
9	20,044	9,049		62,2886	1565,52	0,010040
10	19,944	9,062		50,7606	1284,14	0,010030
Среднее значение						0,010032
Среднеквадратичная погрешность одного измерения составляет 0,06%.						

Для сравнения полученного значения вязкости воды при 20° С с результатами других исследований необходимо еще раз рассмотреть работы, помещенные в табл. 1.

Из двадцати одной работы, представленной в этой таблице, наиболее достоверные результаты дают исследования Шпринга, Бингэма и Уайта, Госкинга, Торпе и Роджера, Ярка и Шмидта, Швинделлса, Кое и Годфрея.

Среднее значение вязкости, вычисленное по результатам этих работ, составляет 0,010034 пуаза. Предельную погрешность этой величины следует полагать не меньшей 0,2%. Максимальное расхождение значений вязкости составляет 0,35%. Полученное нами значение вязкости воды при 20° С, равное 0,010035 пуаза, совпадает в пределах погрешности измерений со среднеарифметической величиной, полученной из перечисленных шести работ.

Заключение

Проведенная работа позволила установить наиболее достоверное к настоящему времени значение константы вязкости воды при 20° С, равное 0,0010035 $\text{кг}/\text{м}\cdot\text{сек}$ 0,010035 пуаза, предельная погрешность которого, соответствующая доверительной вероятности 0,997, составляет 0,03%.

Разработанный тип измерительной установки и принятая методика измерения могут быть применены в поверочной практике и при точных измерениях вязкости абсолютным методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Халфин Э., Труды ВНИИМ, вып. 5 (60), 1947, стр. 4.
2. Poiseuille J. L. M., *Mém. Savants Étrangers*, v. 9, 1946, p. 423.
3. Sprung, *Ann. d. Phys.*, Bd 159, 1876, S. 1.
4. Slotte *Ann. d. Phys.*, Bd 120, 1883, S. 257.

5. Bingham u. White, Zeitschr. Phys. Chem. Bd 80, 1912, S. 670.
6. Traube, Ber. d. deutsch. Chem. Ges., Bd 19, 1886, S. 871.
7. Hosking, Phil. Mag., v. 17, 1909, p. 502; v. 49, 1900, p. 274.
8. Stephan, Ann. d. Phys., Bd 17, 1882, S. 673.
9. Thorpe T. a. Rodger J., Phil. Trans. A., v. 185, 1894, p. 397.
10. E r k S. u. S c h m i d t A., Physikallsche Zeitschr., Nr. 4, 1938, S. 489—496.
11. König, Ann. d. Phys., Bd 32, 1887, S. 193.
12. Ladenburg, Ann. d. Phys., Bd 27, 1908, S. 156.
13. Andrade a. Chiong, Proc. Phys. Soc., v. 48, 1936, p. 247.
14. Zemlen. u. Pogani, Ann. d. Phys., Bd 49, 1916, S. 39.
15. Chvedov T., Journ. d. Physique, v. IX, 1890, p. 34.
16. Leroux, Ann. d. Phys., v. 4, 1925, p. 163.
17. Drew, Phys. Rev., v. 12, 1901, p. 114.
18. Gurney, Phys. Rep., v. 26, 1903, p. 98.
19. Hóppler, Z. angew. Phys., Bd 4, H. 8, 1952, S. 297—300.
20. Mützel, Ann. d. Phys., Bd 43, 1891, S. 15.
21. Swindells, Coe a. Godfrey, J. Research Nat. of S., v. 48, Nr. 1, 1951.
22. Б а р р Г., Вискозиметрия, перев. с англ., ГОИТИ, М., 1938.
23. C o u e t t e M., Ann. d. st. Phys., v. 21, 1890, p. 433; J. de Phys., v. 9, 1890, p. 566.

Г. А. МАЛЯРОВ, Л. П. СТЕПАНОВ

ВЛИЯНИЕ НА ВЯЗКОСТЬ ВОДЫ РАСТВОРЕННОГО В НЕЙ ВОЗДУХА

Вода является эталонным веществом в области вискозиметрии. Поэтому представляет интерес определение влияний на вязкость воды растворенных в ней веществ и прежде всего воздуха, так как при поверках вискозиметров применяется вода, насыщенная воздухом. Надежных литературных данных по этому вопросу не имеется. Известна одна работа Руппина¹, который из опытов с прокипяченной и насыщенной воздухом водой нашел, что вязкость воды ничтожно изменяется от растворенного в ней воздуха. По его измерениям вязкость воды без воздуха на 0,03% больше вязкости воды, насыщенной воздухом.

Влияние растворенного воздуха на вязкость воды было определено на капиллярном вискозиметре с висющим уровнем, сконструированном для летучих жидкостей. Чертеж прибора представлен на рисунке. Изготовлен прибор из стекла.

Вискозиметр имеет три расширения *A*, *B* и *B*, капилляр *D*, соединительные трубки *G*, *E* и *Ж* и кран *K*. Выше и ниже расширения *B* нанесены кольцевые риски *З* и *И* для фиксирования времени начала и конца истечения жидкости из этого расширения. Заполняется прибор следующим образом: трубка, идущая от крана, присоединяется к насосу, например водоструйному, и внутри вискозиметра создается некоторое разрежение. Кран закрывают, прибор отсоединяют от насоса и трубку, идущую от крана, опускают в исследуемую жидкость. Открыв кран, набирают жидкость примерно до середины расширения *A*. Ввиду наличия в приборе висячего уровня количество забираемой жидкости без какого-либо влияния на точность измерения вязкости может варьироваться в широких пределах. По заполнении прибора кран закрывают. Перед измерением вязкости прибор ставят в положение краном вверх. Жидкость через трубку *Ж* заполняет расширение *B*. В таком положении прибор должен находиться в термостате до установления температуры опыта. Затем прибор поворачивают краном вниз и жидкость начинает течь по капилляру. По времени истечения жидкости из расширения *B* определяется ее вязкость. Опыт работы с прибором показал, что кран вполне оправдывает себя, если давление газа (воздуха, паров жидкости) в вискозиметре близко к атмосферному. Если же давление газов мало, на герметичность

¹ Krummel O. und Ruppin E., Wissenschaftliche Meeruntersuchungen (N. F.), Bd 9, 1906.

крана полагаться нельзя, так как во избежание загрязнения исследуемой жидкости применение смазки является нежелательным. В этом случае лучше после заполнения прибора трубку выше крана запаивать. При повторном использовании прибора приваривается новая трубка и к ней тот же кран.

Опыты по определению влияния растворенного воздуха в воде на ее вязкость были произведены на трех вискозиметрах. Чертеж вискозиметра № 1 приведен. Вискозиметры № 2 и 3 отличались от первого длиной и диаметрами капилляров, а также уменьшенным объемом расширения А. Длина капилляров у вискозиметров № 2 и 3 303 мм, диаметры приблизительно 0,6 и 1 мм соответственно.

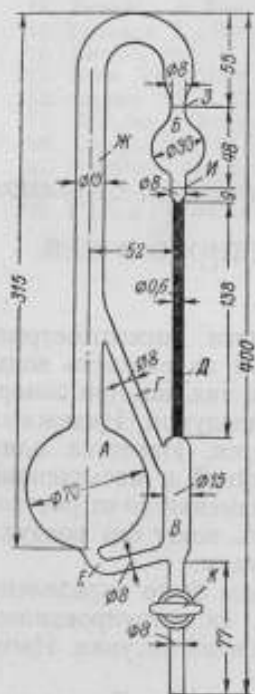


Схема капиллярного вискозиметра с висющим уровнем для летучих жидкостей.

На каждом из трех вискозиметров определялось время истечения воды, насыщенной воздухом, а затем время истечения воды, из которой воздух был удален. Время истечения воды определялось с помощью электрического секундомера, работающего от тока эталонной частоты 1000 гц. Погрешность секундомера не превышала 0,01 сек. Удаление растворенных газов производилось двумя способами: в одних опытах кипячением, в других с помощью вакуума. При кипячении вискозиметр с водой помещался в сушильный шкаф с температурой 120—150° С. После того как вода прокипятилась, закрывался кран, и трубка, идущая от крана к прибору, заваривалась. При удалении воздуха с помощью вакуума прибор подключался к механическому насосу. После откачки в течение 10—15 мин. закрывался кран, и трубка тут же заваривалась. В опытах с водой, насыщенной воздухом, трубка, идущая к крану, не заваривалась. До установления температуры в термостате кран был открыт и внутренняя полость вискозиметра соединялась с атмосферой. Кран закрывался по достижении температуры опыта, перед тем как вискозиметр ставился в рабочее положение (краном вниз).

Таким образом, в этих опытах давление воздуха в приборе равнялось атмосферному.

При каждом заполнении вискозиметра делалось по 10—15 определений времени истечения воды. Результаты опытов даны в таблице. Все опыты производились при температуре $+20 \pm 0,01^\circ \text{C}$.

Последняя графа таблицы показывает в процентах превышение вязкости воды, насыщенной воздухом, над вязкостью воды без воздуха.

Вычисления вязкости производили по формуле:

$$\eta = CPt = C(\rho - e)gh, \quad (1)$$

где η — динамическая вязкость жидкости;

C — постоянная вискозиметра, определяемая его размерами;

P — действующий гидростатический напор, под которым происходит истечение жидкости;

t — время течения жидкости;

g — ускорение силы тяжести;

Номер		Давление в приборе, мм рт. ст.	Вода, насыщенная воздухом		Вода, из которой воздух удален		Относительное повышение вязкости воды ϵ , %
опыта	вискозиметра		число измерений	среднее время истечения, сек.	число измерений	среднее время истечения, сек.	
1	1	746,0	15	182,14	10	181,74	0,10
2	1	752,3	10	182,14	10	181,66	0,15
3	1	745,7	10	182,15	10	181,74	0,11
4	2	757,6	10	339,96	10	339,15	0,12
5	2	757,6	10	339,95	10	339,14	0,12
6	3	746,7	10	46,09	11	45,97	0,14
7	3	745,9	10	46,05	10	45,95	0,10
8	3	745,7	10	46,08	10	45,97	0,12
Среднее значение ϵ							0,12%
Примечания: 1. В опытах 1 и 7 воздух из воды удален кипячением; в остальных опытах — с помощью вакуума. 2. В третьей графе дано давление влажного воздуха в приборе в опытах с водой, насыщенной воздухом. Это давление принято равным барометрическому.							

e — плотность газа в приборе (в наших опытах влажного воздуха или паров воды);

H — некоторая средняя разность уровней жидкости во время ее течения по капилляру.

Величины C и H зависят только от размеров вискозиметра. Плотность воды, из которой воздух удален, можно принять равной плотности воды, насыщенной воздухом, так как соответствующая поправка имеет порядок $10^{-4}\%$. Таким образом, переменными величинами являлись η , e и t . Относительное повышение вязкости воды вследствие растворения в ней воздуха в соответствии с формулой (1) будет (в %):

$$\epsilon = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1} \cdot 100 = \left[\frac{(\rho - e_2) t_2}{(\rho - e_1) t_1} - 1 \right] \cdot 100, \quad (2)$$

где индексы 2 и 1 относятся соответственно к воде с воздухом, и без него.

При вычислениях e за величину e_1 принималась плотность насыщенных водяных паров при 20°C (воздух был удален) и за величину e_2 — плотность воздуха, имеющего стопроцентную влажность, температуру 20°C и находящегося под давлением, равном барометрическому.

Проведенная в 1956 г. работа привела к следующим выводам.

1. Вязкость воды, насыщенной воздухом при 20°C , больше вязкости воды, из которой воздух удален при той же температуре, на 0,12%.

2. Разработанная новая конструкция вискозиметра может быть рекомендована для измерения вязкости летучих жидкостей и для измерения влияния растворимости газов на вязкость жидкостей.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТЫ ВИСКОЗИМЕТРА ТИПА ВУ ПО ВОДЕ И ПО МАСЛУ

Вискозиметр типа ВУ представляет собой прибор, измеряющий вязкость жидкостей в условных единицах — градусах ВУ. На этом приборе вязкость жидкости вычисляют как отношение времени истечения 200 мл испытуемой жидкости при температуре определения к водному числу вискозиметра (константе прибора). Водное число представляет собой время истечения в секундах 200 мл дистиллированной воды при 20° С. Для различных приборов водное число согласно ГОСТ 1532—54 может колебаться в пределах 50—52 сек. Время истечения воды из вискозиметра типа ВУ принято за градус ВУ. В сфере использования приборов для нефтяной промышленности неоднократно ставился вопрос о том, что вследствие несовершенства вискозиметра, а следовательно, и больших разбросов в показаниях одного и того же нефтепродукта, более правильно определять константу прибора не по воде, а по маслу. Основанием к этому служит уменьшение влияния входного и выходного участков трубки при повышении вязкости. Это особенно важно для рассматриваемого типа приборов, так как длина их трубки мала.

Целью настоящей работы являлось: 1) определение константы вискозиметра типа ВУ не только по воде, но и по маслам различной вязкости; 2) выяснение вопроса, насколько рационально определение константы по маслам, а не по общепринятому методу, т. е. по воде.

Для проведения опытов использованы пять вискозиметров типа ВУ, отобранных из большого количества приборов и составляющих во ВНИИМ контрольную группу вискозиметров типа ВУ. Константы их по воде были разные; они охватывали почти весь диапазон, предусмотренный ГОСТ 1532—54 для вискозиметров типа ВУ и имели следующие значения: 50,0; 50,5; 51,0; 51,5 и 51,8.

Константы отдельных приборов по маслу определялись как отношение условий вязкости заданного масла на испытуемом приборе к среднему значению вязкости, полученному на приборах контрольной группы.

Все опыты проведены при температуре 20° С с отклонениями, не превышающими 0,05° С. При опытах пользовались специально изготовленными термометрами с ценой деления 0,1° С. Время истечения определяли 15 раз и выводили среднее арифметическое. Отклонение отдельных определений времени истечения не превышало 0,2% от среднего значения.

Таблица 1

Определение констант вискозиметров по воде и маслу I и вязкость масла II

	Номера приборов					Среднее значение вязкости	Расхождение в средних значениях вязкости, %
	1361	1794	1662	1423	1653		
Водное число (константы вискозиметров по воде), сек.	50,0	50,5	51,0	51,5	51,8	—	—
Вязкость масла I	1,601	1,589	1,592	1,591	1,584	1,591	—
Время истечения масла I, сек.	80,05	80,25	81,10	81,93	82,05	—	—
Константы вискозиметров по маслу I, сек.	50,32	50,44	50,97	51,50	51,57	—	—
Время истечения масла II, сек.	122,20	123,52	124,03	126,07	126,44	—	—
Вязкость масла II по константе масла I	2,428	2,449	2,433	2,448	2,452	2,442	0,0
Вязкость масла II по водному числу	2,444	2,446	2,432	2,448	2,441	2,442	

Таблица 2

Определение констант вискозиметров по воде и маслу II и вязкость масла III

	Номера приборов					Среднее значение вязкости	Расхождение в средних значениях вязкости, %
	1361	1794	1662	1423	1653		
Водное число, сек.	50,0	50,5	51,0	51,5	51,8	—	—
Вязкость масла II (по водному числу)	—	—	—	—	—	2,442	—
Время истечения масла II, сек.	122,20	123,52	124,03	126,07	126,44	—	—
Константы вискозиметров по маслу II, сек.	50,04	50,58	50,79	51,63	51,78	—	—
Время истечения масла III, сек.	181,40	182,05	182,85	185,55	187,36	—	—
Вязкость масла III по константе масла II	3,625	3,599	3,600	3,594	3,618	3,605	0,055
Вязкость масла III по водному числу	3,626	3,605	3,585	3,603	3,617	3,607	

Таблица 3

Определение констант вискозиметров по воде и маслу III и вязкость масла IV

	Номера приборов					Среднее значение вязкости	Расхождение в средних значениях вязкости, %
	1361	1794	1662	1423	1653		
Водное число, сек.	50,0	50,5	51,0	51,5	51,8	—	—
Вязкость масла III (по водному числу)	—	—	—	—	—	3,607	—
Время истечения масла III, сек.	181,40	182,05	182,85	185,55	187,36	—	—
Константы вискозиметров по маслу III, сек.	50,25	50,47	50,69	51,44	51,94	—	—
Время истечения масла IV, сек.	399,75	402,48	406,06	411,48	413,47	—	—
Вязкость масла IV по константе масла III	7,949	7,975	8,011	7,999	7,961	7,979	0,010
Вязкость масла IV по водному числу	7,995	7,970	7,962	7,990	7,982	7,980	

Таблица 4

Определение констант вискозиметров по воде, маслам IV и V и вязкость масла V

	Номера приборов					Среднее значение вязкости	Расхождение в средних значениях вязкости, %
	1361	1794	1662	1423	1653		
Водное число, сек.	50,0	50,5	51,0	51,5	51,8	—	—
Вязкость масла IV по водному числу	—	—	—	—	—	7,980	—
Время истечения масла IV, сек.	399,75	402,48	406,06	411,48	413,47	—	—
Константы вискозиметров по маслу IV, сек.	50,09	50,44	50,88	51,56	51,81	—	—
Время истечения масла V, сек.	812,65	816,23	824,41	832,45	843,41	—	—
Вязкость масла V по константе масла IV	16,224	16,182	16,203	16,145	16,279	16,207	0,012
Вязкость масла V по водному числу	16,253	16,163	16,165	16,164	16,282	16,205	
Константы вискозиметров по маслу IV, сек.	50,14	50,36	50,87	51,36	52,04	—	—

Данные вычисления констант вискозиметров по пяти маслам (I, II, III, IV и V, с условной вязкостью в градусах ВУ соответственно 1,591; 2,442; 3,607; 7,880 и 16,207) и вязкости масел, определенные по соответствующей константе по маслу или водному числу (константа по воде), приведены в табл. 1, 2, 3 и 4. Табл. 5 представляет свободную таблицу водных чисел и масляных констант.

Таблица 5

Определение констант вискозиметров по воде и маслам разной вязкости

Способ определения констант вискозиметров	Значения вязкости	Номера приборов				
		1361	1794	1662	1423	1653
По воде	1,000	50,0	50,5	51,0	51,5	51,8
По маслу I	1,591	50,32	50,44	50,97	51,50	51,57
По маслу II	2,442	50,04	50,58	50,79	51,63	51,78
По маслу III	3,607	50,29	50,47	50,69	51,44	51,94
По маслу IV	7,980	50,09	50,44	50,88	51,56	51,81
По маслу V	16,207	50,14	50,36	50,87	51,36	52,04
Среднее значение констант по всем маслам	—	50,18	50,46	50,84	51,50	51,83

Из приведенных таблиц следует, что константы вискозиметров, вычисленные по маслам различной вязкости (табл. 5), отличаются между собой, причем не наблюдается какой-либо закономерности в изменении этих констант с увеличением вязкости масел.

Таблица 6

Разница между минимальным и максимальным значением констант по маслам, отнесенная к минимальному значению, представлена в табл. 6.

Номера вискозиметров	Разница между минимальным и максимальным значениями констант, отнесенная к минимальному значению, %
1361	0,56
1794	0,44
1662	0,55
1423	0,53
1653	0,91

Константы по маслам также отличаются от водных чисел и иногда довольно значительно. Так, для вискозиметра № 1361 константы, вычисленные по маслам I и III, отличаются на 0,64 и 0,58%; для вискозиметра № 1662 константа по маслу III отличается на 0,61%, для вискозиметра № 1653 константы по маслам II и V — на 0,44 и 0,46%.

В ряде случаев константы по маслам и водные числа совпадают. Например, в вискозиметре № 1361 водное число равно 50 сек., константа по маслу II составляет 50,04 сек.; в вискозиметре № 1423 водное число и константа по маслу I одинаковы и равны 51,5 сек.; в вискозиметре № 1653 водное число равно 51,8 сек., константы по маслам II и IV — соответственно 51,78 и 51,81 сек.

Средние значения констант, вычисленные по всем маслам (последняя строка табл. 5), наиболее близки к водному числу у вискозиметров № 1794 и 1653 и одинаковы с ним у вискозиметра № 1423.

Значения вязкости масел, вычисленные по водному числу и масляным константам, в некоторых случаях незначительно отличаются между

собой, в других — расхождение достигает 0,4—0,7%. Для прибора № 1361 вязкость масла II, вычисленная по водному числу, отличается от вязкости его по масляной константе на 0,66% (табл. 1); вязкость масла IV, измеренная на вискозиметре № 1662, — на 0,62% (табл. 3).

Вязкости масел, определенные на вискозиметрах с различными константами, также отличаются между собой, причем и здесь не наблюдается никакой закономерности. Так, например, значение вязкости масел II и V получается больше с крайними водными числами 50,0 и 51,8 (табл. 2 и 4); наоборот, вязкость масла III при крайних значениях масляных констант меньше, чем при средних (табл. 3).

Несмотря на колебания в значениях вязкости масел при определении на различных приборах, т. е. с разными константами, и отличия масляных констант от водных чисел, средние значения вязкости масел из определения на пяти приборах, вычисленных по масляным константам или водным числам, по существу равны, так как максимальное расхождение равно 0,055%.

Произведенные исследования приводят к следующему выводу: определение масляных констант для вискозиметров типа ВУ является излишним, так как введение их взамен водного числа (принятого ГОСТ 1532—54) не способствует большей точности прибора, чем при проверке по воде, в то же время последняя поверка значительно проще.

Вязкость, η , по водному числу	Вязкость, η , по масляной константе	Относительное расхождение, %
50,0	50,33	0,66
51,8	52,18	0,62

Л. П. СТЕПАНОВ

НОВАЯ ГРАДУИРОВКА ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ВЕСОВ БЕЗМЕННОГО ТИПА (ВЕСОВ ВЕСТФАЛЯ)

До последнего времени гидростатические весы, служащие для определения плотности жидкостей, градуировались так, что когда их поплавки находились в воде с температурой 20°C , весы показывали единицу, а когда поплавок находился в воздухе, — нуль. Фактически же плотность воды при 20°C равна не 1 г/см^3 , а $0,9982\text{ г/см}^3$, а плотность воздуха — не 0, а $0,0012\text{ г/см}^3$. Из-за указанной градуировки весов последние при измерении плотности какой-либо жидкости показывают не плотность жидкости, а так называемую видимую плотность. Для того, чтобы найти плотность жидкости по показаниям таких весов, необходимо производить вычисления по формуле:¹

$$\rho = 0,99703 \cdot n' + 0,0012\text{ г/см}^3, \quad (1)$$

где ρ — плотность жидкости, г/см^3 ;

n' — отсчет, производственный на весах (видимость плотности).

Предлагаемая новая методика градуировки весов, описанная ниже, устраняет необходимость этих вычислений. Если весы изготовить так, чтобы при нахождении поплавка в воде, имеющей температуру 20°C , они показывали значение ее плотности, равное $0,9982$, а при нахождении поплавка в воздухе — его плотность, равную $0,0012$, — то при измерении плотности любых жидкостей весы будут показывать непосредственно значение искомой плотности, не требующее каких-либо пересчетов.

Введем обозначения:

M — масса поплавка, г ;

V — объем поплавка, см^3 ;

m — масса гири-единицы, г ;

ρ — плотность измеряемой жидкости, г/см^3 ;

n — отсчет по весам при измерении плотности жидкости;

E — плотность воды, г/см^3 ;

e — плотность воздуха, г/см^3 ;

δ — плотность материала гирь-рейтеров, г/см^3 .

¹ Инструкция № 58-54 по поверке гидростатических весов безменного типа, Изд. Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1954.

- n_ϕ — показание весов, когда поплавков находится в воздухе;
 n_E — показание весов, когда поплавков находится в воде;
 L — длина коромысла, т. е. расстояние от ребра опорной призмы до точки подвеса поплавка, см;
 g — ускорение силы тяжести, см/сек²;
 M_0 — масса коромысла, г;
 V_0 — объем коромысла, см³;
 L_0 — расстояние от ребра опорной призмы коромысла до центра тяжести коромысла, см;
 L_1 — расстояние от ребра опорной призмы коромысла до центра (тяжести) объема коромысла, см.

Отсчет по весам n при равновесии коромысла означает то число гирь-единиц, которое необходимо было бы повесить к концу коромысла, чтобы заменить действие всех рейтеров, расположенных на коромысле. Это замечание относится как к силам тяжести рейтеров, так и к архимедовым силам, действующим на рейтеры со стороны воздуха. Например, если рейтеры расположены на коромысле так, что отсчет n равен 1,8235, то это означает, что силовое действие всех примененных рейтеров может быть заменено действием одной гири, равной по массе $n \cdot m = 1,8235 m$ (m — масса гири-единицы).

При равновесии коромысла уравнение моментов сил относительно ребра опорной призмы будет:

$$M_0 g L_0 - e V_0 g L_1 + M g L - \rho V g L + n m g L - \frac{n m}{\delta} e g L = 0. \quad (2)$$

Если ввести обозначение:

$$\frac{M_0 L_0 - V_0 e L_1}{L} = T \text{ (тару),}$$

то после сокращения на gL получим:

$$T + M - \rho V + n \cdot m \left(1 - \frac{e}{\delta}\right) = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) выражает собой условие равновесия гидростатических весов. Для одного и того же поплавка, т. е. для одних и тех же значений M и V , выбирая разные значения величин T и m , можно получить различные формулы, связывающие измеряемую плотность ρ с показанием весов n .

Для выбора T и m при старой градуировке пользовались следующими условиями: при $\rho = E$ $n = 1$, а при $\rho = e$ $n = 0$, которые приводят к формулам:

$$T' + M - EV + m' \left(1 - \frac{e}{\delta}\right) = 0; \quad (4)$$

$$T' + M - e \cdot V = 0; \quad (5)$$

$$T' + M - \rho V + n' m' \left(1 - \frac{e}{\delta}\right) = 0. \quad (6)$$

Здесь T' , n' и m' означают тару, отсчет по весам и массу гири-единицы для прибора, изготовленного по старой градуировке. Решение уравнений (4), (5) и (6) дает упомянутую выше формулу (1).

По предлагаемой методике градуировки T и m выбирают из условий: при $\rho = E n = [E]$, при $\rho = e n = [e]$. Тогда для новой градуировки система уравнений будет:

$$T + M - EV + Em \left(1 - \frac{e}{E}\right) = 0; \quad (7)$$

$$T + M - eV + em \left(1 - \frac{e}{E}\right) = 0; \quad (8)$$

$$T + M - \rho V + nm \left(1 - \frac{e}{E}\right) = 0. \quad (9)$$

Из уравнений (7), (8) и (9) получаем:

$$\rho = n,$$

т. е. отсчет по весам численно равен плотности жидкости в $г/см^3$. Никаких дополнительных расчетов не требуется. Это и есть преимущество новой градуировки весов.

В связи с новой градуировкой весов необходимо остановиться на следующих трех вопросах.

1. Определить соотношение между массами гирь рейтеров для весов с новой и старой градуировками.

2. Установить отличие поверки весов, градуированных по новому способу, от поверки старых весов.

3. Рассмотреть возможность применения весов, градуированных по новому способу, для определения плотности твердых тел.

Соотношение между m — массой гири-единицы для новых весов и m' — массой гири-единицы для весов, градуированных по старому способу, находим из уравнений (4) ÷ (9):

$$m = m' \frac{1}{E - e}; \quad (10)$$

приняв $E = 0,9982$ и $e = 0,0012$, получаем:

$$m = 1,003 \cdot m'; \quad (11)$$

т. е. масса гири-рейтера-единицы, а следовательно, и массы остальных гирь-рейтеров для весов, градуированных по новому способу, должны быть на 0,3% больше масс гирь-рейтеров для весов с прежней градуировкой. Исходя из этого, можно при ремонте все ранее изготовленные гидростатические весы перевести на новую систему градуировки, заменив гири-рейтеры утяжеленными гирями. Другой путь — уменьшение объема поплавка на 0,3%.

Поверку гидростатических весов, градуированных по старому способу, производят по инструкции № 58-54. По этой же инструкции можно поверять и приборы, градуированные по новому способу, с той разницей, что весы должны показывать 0,0012, когда поплавок находится в воздухе, и 0,9982, когда поплавок — в воде при 20° С. Инструкция требует, чтобы температура воды не отличалась от 20° С более, чем на $\pm 0,2^\circ$ С. При новой градуировке весов принципиально можно пользоваться водой при любой температуре. Показания весов при этом должны быть равны значению плотности воды при наблюдаемой температуре. Например, при температуре воды 23° С плотность ее равна 0,9976 $г/см^3$. Правильно работающие весы должны показывать 0,9976. Ограничением здесь служит изменение объема поплавка от изменения температуры. Поэтому, чтобы погрешность в показаниях прибора, обусловленная указанной причиной,

не превосходила 0,01%, необходимо ограничить диапазон температур пределами $17 \pm 23^\circ \text{C}$. Этот диапазон определен для того случая, когда поплавки изготовлены из обычного стекла типа 23 или 29, объемный коэффициент расширения которых приблизительно равен $2,7 \cdot 10^{-5}$ на один градус. Специальные стекла (или плавленый кварц) имеют объемный коэффициент расширения $1,5 \cdot 10^{-6}$. Применение этих материалов для изготовления поплавка дает возможность определять прибором плотности жидкостей в диапазоне от -30°C до $+70^\circ \text{C}$. Вопрос о температуре воды при поверке прибора в данном случае снимается вовсе. Второе отличие заключается в вычислении объема поплавка. Для весов со старой градуировкой в инструкции (пункт 37) приводится приближенная формула для вычисления объема поплавка:

$$V = \frac{m'}{E}. \quad (12)$$

(Более точной формулой будет $V = \frac{m'}{E - \epsilon}$).

Для весов, градуированных по новому способу,

$$V = m. \quad (13)$$

т. е. объем поплавка в см^3 численно равен массе гири-единицы в г.

Градуированные по новому способу весы пригодны и для определения плотности твердых тел. Методика этих определений и формула для вычисления плотности остаются теми же (см. инструкцию 58-54), что и для весов со старой градуировкой.

Таким образом, предложенная новая градуировка гидростатических весов имеет следующие два преимущества перед существующей:

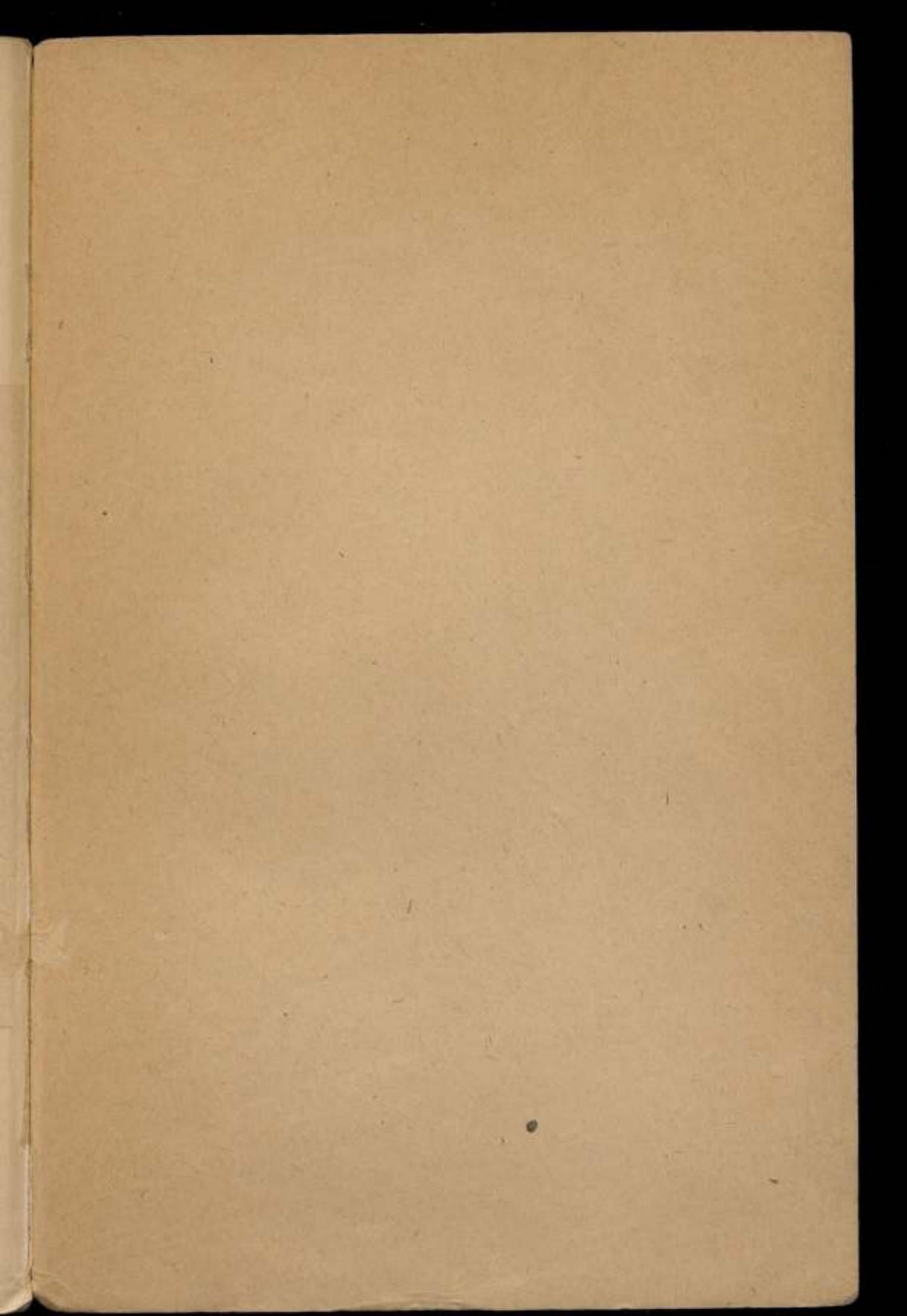
- 1) отпадает необходимость дополнительных вычислений при измерении плотности жидкости;
- 2) при поверке весов не требуется поддержание температуры воды $20 \pm 0,2^\circ \text{C}$.

ОПЕЧАТКИ

Стр.- нод.	Строка	Напечатано	Должно быть
7	22-я снизу	определяемого	определенного
22	10-я снизу, формула	$m_{\text{ср}} = (0,85 \pm 0,05) \frac{1}{\text{час.}} \cdot (2)$	$m_{\text{ср}} = (0,85 \pm 0,05) \frac{1}{\text{час.}} \cdot (2)$
23	Таблица 4, графа 1, заголовок, 3-я строка	$t_{\text{нач}} = t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_{\text{нач}} = t, \text{ } ^\circ\text{C}$
47	5-я сверху, формула	$\Delta_{\text{I}} = \Delta_{\text{д}} - \Delta_{\text{п}} - 2\alpha. \quad (13)$	$\Delta_{\text{I}} = \Delta_{\text{д}} - \Delta_{\text{п}} - 2\alpha. \quad (13)$
50	9-я сверху, формула	$A_2 = \frac{A_0 (\gamma^2 - \beta^2)}{\beta^4 (1 + \gamma^2 + \mu\gamma^2)^2 + \gamma^4}$	$A_2 = \frac{A_0 (\gamma^2 - \beta^2)}{\beta^4 (1 + \gamma^2 + \mu\gamma^2)^2 + \gamma^4}$
50	3-я снизу	$\Delta (\omega^2) = \omega^4 - (1 - \mu) (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \omega^2 + (1 + \mu) \lambda_1^2 \lambda_2^2$	$\Delta (\omega^2) = \omega^4 - (1 + \mu) (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \omega^2 + (1 + \mu) \lambda_1^2 \lambda_2^2$
58	Формула (4), 2-я строка сверху	$p_1 = a_1 b_1 + c_1 + \dots + k_1$	$p_1 = a_1 + b_1 + c_1 + \dots + k_1$
66	6-я сверху, формула	$S_{0,1 \text{ мм}} = (0,04 \pm 0,16 \pm 0,1) \text{ мк} =$ $= 0,06 \text{ мк.}$	$S_{0,1 \text{ мм}} = (0,04 \pm 0,16 \pm 0,1) \text{ мк} =$ $= 0,06 \text{ мк.}$
92	21-я сверху } на перепо- 22-я - } се фор- мулы	-	+
96	Таблица 2, графа 1, 1-я строка снизу	10 мм	1 мм
108	5-я снизу	$\frac{\partial H_{RC}}{\partial \alpha} = \frac{\text{ед. тв.}}{\text{град.}}$	$\frac{\partial H_{RC}}{\partial \alpha} \text{ ед. тв.}$ град.
129	Формула (8)	$\tau = \frac{\pi \cdot g \cdot \rho (\rho - \Gamma) \cdot H_1 - H_2}{128 \frac{I_1}{d_1^4} - \frac{I_2}{d_2^4}} \cdot M, \quad (8)$	$\tau = \frac{\pi \cdot g \cdot \rho (\rho - e) \cdot H_1 - H_2}{128 \frac{I_1}{d_1^4} - \frac{I_2}{d_2^4}} \cdot M, \quad (8)$
130	8-я сверху	и	и

не превосходила 0,01%, необходимо ограничить диапазон температур пределами $17 \pm 23^\circ \text{C}$. Этот диапазон определен для того случая, когда поплавки изготовлены из обычного стекла типа 23 или 29, объемный коэффициент расширения которых приблизительно равен $2,7 \cdot 10^{-5}$ на один градус. Специальные стекла (или плавленый кварц) имеют объемный коэффициент расширения $1,5 \cdot 10^{-6}$. Применение этих материалов для изготовления поплавка дает возможность определять прибором плотности жидкостей в диапазоне от -30°C до $+70^\circ \text{C}$. Вопрос о температуре воды при поверке прибора в данном случае снимается вовсе. Второе отличие заключается в вычислении объема поплавка. Для весов со старой градуировкой в инструкции (пункт 37) приводится приближенная формула для вычисления объема поплавка:

$$V = \frac{m'}{\rho} \quad (12)$$



Цена 9 р.