

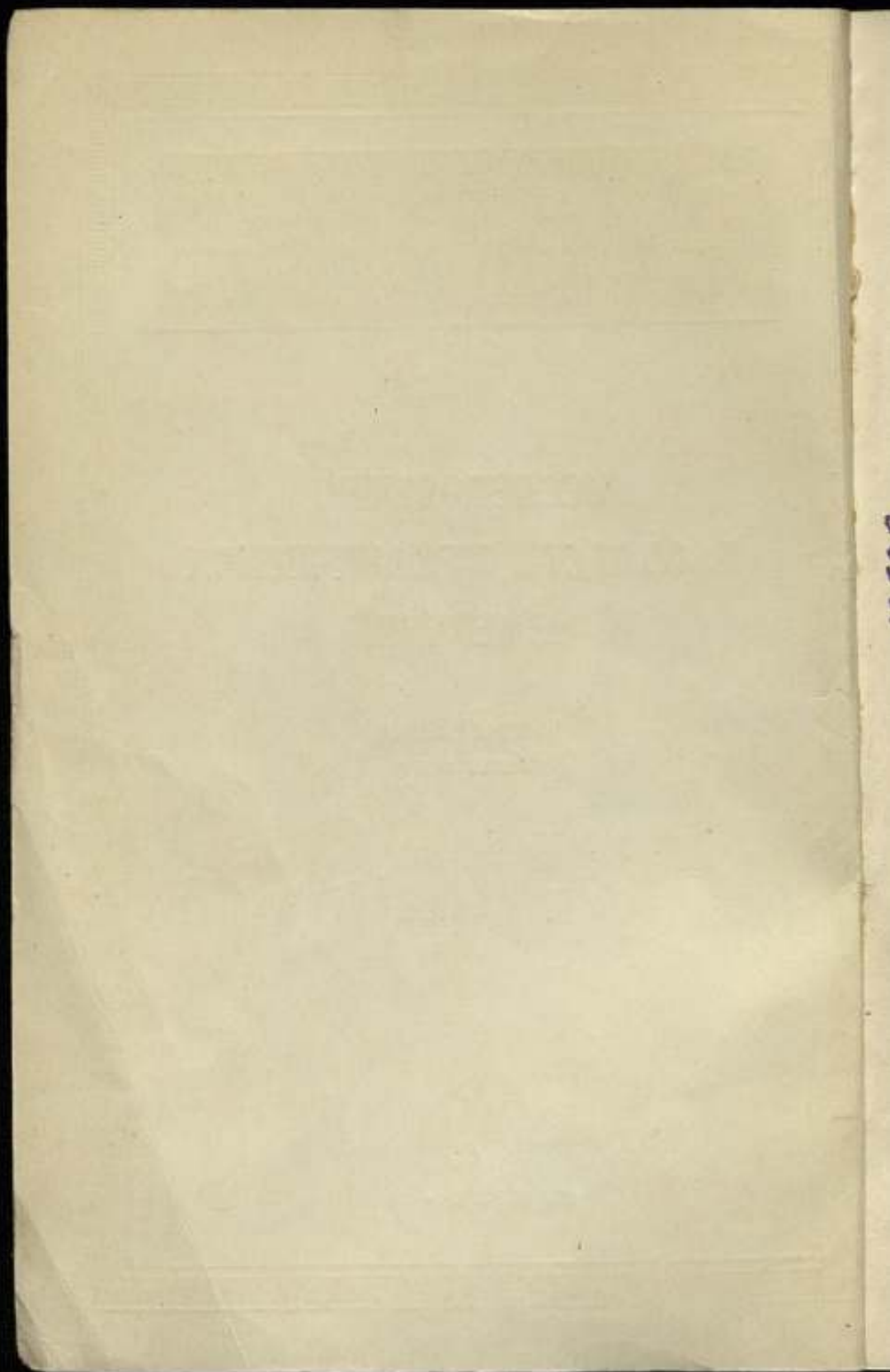
СПР-

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

**ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

ТРУДЫ ВНИИМ
ВЫПУСК 19 (79)

МАШГИЗ • 1952



КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

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

ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ

(МАССА, ВРЕМЯ, ВИСКОЗИМЕТРИЯ)

ТРУДЫ ВНИИМ
ВЫПУСК 19 (79)

Под редакцией
канд. техн. наук М. Г. Павлова

БИБЛИОТЕКА
Всесоюзного научно-иссле-
дательского института метрологии
имени Д. И. Менделеева



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1952 ЛЕНИНГРАД

ш 10598

Сборник содержит описание результатов исследований в области массы, времени и вискозиметрии.

В статьях сборника даны описание и метрологический анализ методов взвешивания, методов и аппаратуры для определения вязкости жидкости.

В одной статье дано описание исследования аппаратуры, применяемой для определения времени посредством астрономических наблюдений.

Материалы сборника представляют интерес для работников научно-исследовательских институтов, работников поверочной системы Государственной службы мер и весов и работников заводских лабораторий.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем сборнике помещены работы, посвященные точным измерениям массы, времени, а также вязкости жидкостей.

Часть работ относится к применению методов точных измерений для определения некоторых характеристик материалов, как например, коэффициента линейного расширения.

В статьях сборника представлены результаты теоретической и экспериментальной разработки задач, стоявших перед лабораториями ВНИИМ и Свердловского филиала ВНИИМ.

В статье Г. Д. Кокоса и И. Н. Морозовой „Кварцевые гири“ приводятся убедительные материалы, позволяющие рекомендовать изготовление точных гирь и разновесов из кристаллов кварца. Такие гири даже при длительной эксплуатации сохраняют постоянство массы, не окисляются, не реагируют на магнитное поле, удобны для гидростатических взвешиваний.

Статья А. В. Суслова „О влиянии на результат точного взвешивания стабильности „нуля“ весов и метода определения их чувствительности“, посвящена двум вопросам, относящимся к точному взвешиванию.

Первый вопрос — следует ли грузик, с помощью которого производится определение цены деления шкалы весов, помещать на каждое плечо весового коромысла или достаточно помещать его только на одно плечо.

Второй вопрос касается выяснения величины погрешности, возникающей от того, что во время взвешивания изменяется положение равновесия ненагруженных весов.

Статья Г. Д. Кокоса и Н. А. Смирновой „Приложение метода крутильного маятника к исследованию коромысел точных весов“ содержит описание избранного авторами метода определения расстояния между линией опоры средней призмы

и центром тяжести коромысла. В статье приведены расчетные и опытные данные, показывающие преимущества предлагаемого метода перед методом определения этой величины по чувствительности весов.

В статье Г. Д. Кокоса „Весовой прибор для определения коэффициента линейного расширения различных материалов“ рекомендуется применение весового метода для особо точных определений коэффициента расширения твердых тел. Сущность метода состоит в том, что испытуемый образец помещен на одно из плеч коромысла весов, уравновешенных при начальной температуре. При повышении температуры образец, удлиняясь, нарушает равновесие весов, так как сдвигает гирю, установленную на коромысле плотно к концу образца. Уравновесив систему дополнительными гирями, по массе дополнительных гирь судят о величине линейного удлинения образца и о его коэффициенте линейного расширения.

Введение ряда предложенных поправок позволяет получить значение искомого коэффициента с высокой точностью.

В статье С. С. Товчигречко „О периодических ошибках микрометрических винтов экзаминаторов уровней“ рассматриваются периодические ошибки микрометрического винта экзаминатора уровней, которые могут возникать вследствие несовпадения точки контакта упора винта и опорной плоскости с осью вращения винта и вследствие наклона оси винта относительно опорной плоскости. Для подсчета этих ошибок приводятся формулы, которые могут быть полезны при проверке экзаминаторов и анализе их погрешности.

В статье Н. А. Чеснокова „Эталонный метод воспроизведения единиц кинематической вязкости. Эталонные и образцовые приборы“ дано систематическое описание метода ступенчатой калибровки эталонных капиллярных вискозиметров с висязим уровнем.

Автор дает теорию капиллярных вискозиметров, анализирует физический смысл введения поправок на кинетическую энергию сначала при определении постоянной прибора, а затем — при определении вязкости жидкости. Далее дано описание созданных во ВНИИМ эталонных наборов капиллярных вискозиметров.

В статье также приведен опыт многолетних работ в этой области измерений, проведенных во ВНИИМ.

Вторая статья Н. А. Чеснокова „Точность измерения вязкости на вискозиметре с эксцентричным падением шарика“ посвящена анализу величины погрешности определения вязкости посредством этих вискозиметров.

Наклон трубки, в которой падает шарик, на 10° к вертикали обуславливает прямолинейность движения шарика и большую стабильность показаний прибора.

Применение разных шариков позволяет измерять динамическую вязкость жидкостей от 0,01 до $1 \cdot 10^6$ сантипуазов с погрешностью, не превышающей 1—2%.

Прибор допускает проведение измерений при разных температурах, прост и удобен в обращении. Автор рекомендует прибор для широкого применения.

В статье В. И. Жукова, Л. П. Степанова и А. А. Часовникова „Автоматический мерный бак ВНИИМ“ приводится описание автоматического устройства для измерения количества воды и изложены результаты исследования этого устройства. Анализ результатов показал, что автоматический мерный бак имеет погрешность измерений не более 0,2%, при габаритах в четыре раза меньших, чем габариты неавтоматических баков той же пропускной способности.

The first part of the book is devoted to a general introduction to the subject of the history of the United States. The author discusses the various factors that have shaped the nation's development, including geography, economics, and politics. He also touches upon the role of the individual in the history of the country.

The second part of the book is a detailed account of the American Revolution. The author describes the events leading up to the war, the military campaigns, and the final outcome. He also discusses the impact of the Revolution on the young nation.

The third part of the book is a study of the early years of the United States. The author examines the political and social conditions of the time, as well as the role of the federal government. He also discusses the development of the American economy and the growth of the nation's population.

The fourth part of the book is a study of the American Civil War. The author describes the causes of the war, the military campaigns, and the final outcome. He also discusses the impact of the war on the nation's social and political structure.

The fifth part of the book is a study of the Reconstruction period. The author discusses the challenges faced by the newly freed slaves and the efforts to rebuild the South. He also discusses the role of the federal government in the Reconstruction process.

The sixth part of the book is a study of the Gilded Age. The author discusses the rise of industrial capitalism and the growth of the nation's economy. He also discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government.

The seventh part of the book is a study of the Progressive Era. The author discusses the reforms of the time, including the movement for women's suffrage and the establishment of the Federal Reserve. He also discusses the role of the federal government in the Progressive Era.

The eighth part of the book is a study of the American West. The author discusses the expansion of the nation's territory and the role of the federal government in the process. He also discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government.

The ninth part of the book is a study of the American South. The author discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government. He also discusses the impact of the Civil War and Reconstruction on the South.

The tenth part of the book is a study of the American Midwest. The author discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government. He also discusses the impact of the Civil War and Reconstruction on the Midwest.

The eleventh part of the book is a study of the American Northeast. The author discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government. He also discusses the impact of the Civil War and Reconstruction on the Northeast.

The twelfth part of the book is a study of the American Northwest. The author discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government. He also discusses the impact of the Civil War and Reconstruction on the Northwest.

The thirteenth part of the book is a study of the American Southwest. The author discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government. He also discusses the impact of the Civil War and Reconstruction on the Southwest.

The fourteenth part of the book is a study of the American South. The author discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government. He also discusses the impact of the Civil War and Reconstruction on the South.

The fifteenth part of the book is a study of the American West. The author discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government. He also discusses the impact of the Civil War and Reconstruction on the West.

The sixteenth part of the book is a study of the American Midwest. The author discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government. He also discusses the impact of the Civil War and Reconstruction on the Midwest.

The seventeenth part of the book is a study of the American Northeast. The author discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government. He also discusses the impact of the Civil War and Reconstruction on the Northeast.

The eighteenth part of the book is a study of the American Northwest. The author discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government. He also discusses the impact of the Civil War and Reconstruction on the Northwest.

The nineteenth part of the book is a study of the American Southwest. The author discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government. He also discusses the impact of the Civil War and Reconstruction on the Southwest.

The twentieth part of the book is a study of the American South. The author discusses the social and political conditions of the time, as well as the role of the federal government. He also discusses the impact of the Civil War and Reconstruction on the South.

Г. Д. КОКОШ и И. Н. МОРОЗОВА

КВАРЦЕВЫЕ ГИРИ

Рациональный выбор материала для изготовления гирь имеет очень большое значение, так как от правильного решения этого вопроса в значительной степени зависит точность измерения массы весовым способом, а также измерения силы с помощью весовых динамометров. Материалы, из которых изготавливаются гири, должны быть стойкими на износ, антимагнитными и антикоррозийными.

Наиболее часто гири изготавливаются из различных сплавов и покрываются антикоррозийным слоем золота или никеля.

Опыт показал, что такие покрытия сравнительно легко стираются, а иногда даже отслаиваются, вследствие чего гири быстро изменяют свою массу.

Исходя из имеющихся в распоряжении лаборатории мер массы ВНИИМ материалов, можно сказать, что от таких антикоррозийных покрытий следует совершенно отказаться и перейти к изготовлению точных гирь из сплавов или других материалов, не требующих покрытий.

В этом направлении начинает развиваться и заводская практика. Так, например, рижский завод „Эталон“ приступил к выпуску образцовых гирь 1-го и 2-го разрядов из нержавеющей стали.

В качестве материала для изготовления точных гирь нашел также применение горный хрусталь (кварц). Кристаллический кварц (SiO_2) широко распространен в земной коре и встречается в виде отдельных кристаллов, достигающих подчас высоты свыше двух метров (горный хрусталь), и в виде зернистых скоплений (кварцевые пески).

В чистом виде кварц бесцветен и прозрачен. Твердость кварца по Моосу равна 7; плотность $2,5 - 2,8 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$; удельная магнитная восприимчивость $0,40 \cdot 10^{-6}$ в единицах электромагнитной системы.

Как материал для гирь, кристаллический кварц обладает целым рядом ценных свойств. Он очень тверд, устойчив на износ, на химическое воздействие и, как уже отмечалось,

прекрасно полируется и немагнитен. Гири из кварца имеют изящный вид и их легко содержать в чистоте, что важно для сохранения постоянства массы. Все эти качества дают возможность рекомендовать гири из горного хрусталя (кварца) для работ по точному взвешиванию.

К отрицательным свойствам горного хрусталя следует отнести его некоторую гигроскопичность. Влияние гигроскопичности на изменение массы гирь совершенно не исследовано в отношении всех материалов, применяемых для изготовления гирь. Сам по себе этот вопрос представляет значительный интерес, но за неимением достаточных данных не может быть освещен в этой статье.

Обращаясь к метрологической практике, следует рекомендовать производить калибровку алюминиевых гирь, пользуясь граммовой гирей, изготовленной из кварца, так как плотность кварца и алюминия очень близки друг к другу, благодаря чему отпадает необходимость введения поправки на приведение к вакууму.

Действительно, плотность алюминия, применяемого для изготовления наборов миллиграммовых гирь, равна $2,7 \frac{г}{см^3}$, а плотность кварца, как уже указывалось, колеблется от 2,5 до $2,8 \frac{г}{см^3}$. Возьмем наихудший случай, когда разность плотностей достигает $0,2 \frac{г}{см^3}$. Разность объемов граммовых гирь из кварца и алюминия будет равна при этом $0,03 см^3$. Средняя плотность воздуха составляет $0,0012 \frac{г}{см^3}$. Пренебрегая поправкой на приведение к вакууму, мы допустим погрешность около 0,03 мг. Наиболее крупная гиря в миллиграммовых наборах имеет массу в 500 мг, следовательно, погрешность для нее окажется равной 0,015 мг, что лежит достаточно близко к погрешности измерения массы этой гири. Для гири в 200 мг погрешность окажется равной 0,006 мг, что значительно меньше погрешности, допустимой для определения массы образцовых гирь 1-го разряда этого достоинства ($\pm 0,01 мг$). Если же учесть, что всегда можно подобрать кристаллический кварц, плотность которого практически будет совпадать с плотностью алюминия, идущего на изготовление миллиграммовых гирь, то можно избежать и этой погрешности.

Весьма целесообразно применение кварцевых гирь в химических лабораториях. Такие гири не подвержены коррозии, а плотность их весьма близка к плотности обычно взвешиваемых в химических лабораториях веществ.

Очень слабо выраженные магнитные свойства кристаллического кварца делают кварцевые гири незаменимыми при магнитных измерениях.

В настоящее время гири из горного хрусталя используются главным образом в метрологических учреждениях и некоторых научно-исследовательских институтах.

Большая часть гирь этого вида, находящихся в обращении, изготовлена очень давно, а некоторые из них существуют более ста лет.

Многочисленные измерения массы этих гирь показывают их малую изменчивость. Возьмем для примера разновес работы Штерна. Значения действительной массы гирь этого разновеса приводятся за 20 лет его эксплуатации (табл. 1).

Таблица 1

Номинальная масса гирь в г	Действительная масса гирь в г			
	1928 г.	1931 г.	1933 г.	1948 г.
10	9,99996	10,00015	10,00006	10,00012
10	9,99997	10,00017	10,00009	10,00020
5	4,99998	5,00007	5,00003	5,00011
2	2,00007	2,00008	2,00006	2,00007
1	1,00010	1,00008	1,00008	1,00011
1	1,00009	1,00009	1,00008	1,00011

Как видно из табл. 1, гири за 20 лет их использования практически сохранили свою массу, так как колебания массы в основном лежат в пределах погрешности ее измерения. Встречаются отдельные гири с номинальной массой в 1000, 500, 200, 100, 50, 20, 10, 5, 2, 1 г, а также наборы гирь пяти видов:

1) 14 гирь с номинальной массой от 1 кг до 1 г; 2) 13 гирь от 500 г до 1 г; 3) 12 гирь от 200 г до 1 г; 4) 10 гирь от 100 г до 1 г; 5) 14 гирь от 50 г до 0,1 г.

Как отдельные гири, так и наборы гирь обычно помещаются в плотно закрывающиеся футляры, оклеенные внутри бархатом. На рис. 1 изображен один из таких наборов, принадлежащий лаборатории мер массы ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Форма гирь — обычная (цилиндр с головкой), что делает гири удобными в обращении.

С целью сравнения объема кварцевой гири с объемом бронзовой гири, на рис. 1 изображены рядом две гири одинаковой номинальной массы: одна из кварца, другая — бронзовая.

Иногда отдельным кварцевым гирям придавалась своеобразная форма: прямой цилиндр без головки, цилиндр с эллиптическим сечением, шар и т. д. Все эти формы менее удобны, чем обычная (прямой цилиндр с головкой).

В музее Д. И. Менделеева при ВНИИМ хранятся кварцевые гири, применявшиеся великим исследователем в его научных работах.

На рис. 2 показана гиря в 1 кг, имеющая форму многогранника. Рядом с ней для сравнения поставлена бронзовая

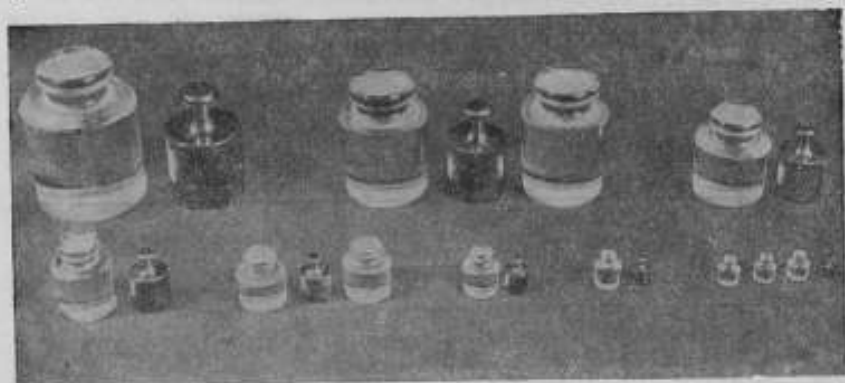


Рис. 1. Сравнительная величина кварцевых и бронзовых гирь.

гиря такой же массы. На рис. 3 изображен набор из четырех гирь, имеющих форму прямых цилиндров со снятой у верхнего и нижнего оснований фаской. Гири не имеют головок, а поэтому при установке их на весы и снятии с весов необ-



Рис. 2. Кварцевая и бронзовая гири в 1 кг.

ходимо пользоваться специальными гиредержателями, имеющими мягкие подушечки, обтянутые бархатом или замшей. Часто для этой цели применяются также салфетки из обезжиренной мягкой замши. Номинальная масса этих гирь: 500, 200, 200 и 100 г.

Очень хорошим набором кварцевых гирь владеет термическая лаборатория Московского государственного универси-

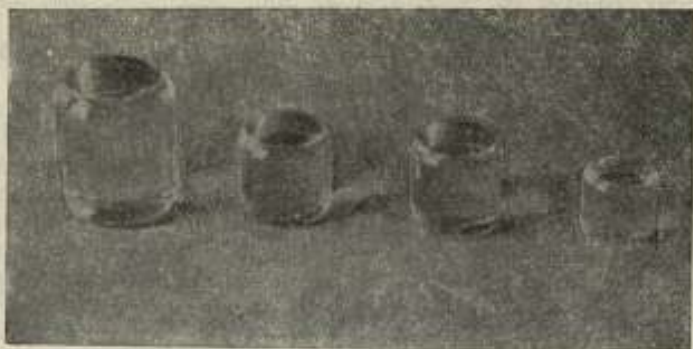


Рис. 3. Набор кварцевых гирь, имеющих форму прямых цилиндров.



Рис. 4. Набор кварцевых гирь, принадлежащий Московскому государственному университету.



Рис. 5. Кварцевые гири в форме шаров.

тета. В этом наборе имеются гири следующей номинальной массы: 50, 20, 10, 10, 5, 2, 1, 1 г. 500, 500, 500, 200, 200 мг и 6 гири по 100 мг (рис. 4).

Даже гири в 100 мг имеют обычную, весьма удобную, форму прямого цилиндра с головкой.

Оригинальна форма кварцевых гирь, представленных на рис. 5. Это — шары, весьма точно выполненные.

Следует отметить, что тела правильной геометрической формы могут быть использованы для исследования плотностей различных жидкостей. Особенно пригодны для этих целей правильные кубы или прямые параллелепипеды из горного хрусталя. Линейные размеры таких тел могут быть определены весьма точно интерференционными методами. Это дает возможность установить достаточно точный объем такого рода куба, прямого параллелепипеда, цилиндра или шара.

Путем погружения этих тел в испытываемую жидкость можно методом гидростатического взвешивания определить массу вытесняемой ими жидкости.

Этот метод достаточно подробно освещен в работе Д. И. Менделеева „О весе определенного объема воды“ [1], где подвергаются тщательному анализу работы в этой области Шукбурга, Купфера и Ченея.

В частности, Ченеем был применен для этой цели кварцевый цилиндр высотой 79 мм и диаметром 78 мм.

Из приведенных примеров видно, что область применения кварцевых гирь весьма широка.

Изготовление таких гирь вполне доступно предприятиям, занимающимся обработкой различных минералов для промышленных целей. Сюда прежде всего относятся гранильные фабрики, обрабатывающие драгоценные камни. Они могли бы заняться производством кварцевых гирь из горного хрусталя. Потребителями этой продукции будут как метрологические учреждения, так и различные научно-исследовательские и учебные институты и заводские лаборатории. Стоимость набора кварцевых гирь не очень высока — приблизительно в три раза выше, чем стоимость такого же набора гирь из бронзы.

При этом нужно иметь в виду, что стоимость кварцевых гирь может быть значительно снижена при их более широком производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Менделеев Д. И. О весе определенного объема воды, „Временник“, ч. 1, 1894.

О ВЛИЯНИИ НА РЕЗУЛЬТАТ ТОЧНОГО ВЗВЕШИВАНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ „НУЛЯ“ ВЕСОВ И МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

В настоящей статье рассматривается вопрос о влиянии симметричности расположения масс сличаемых грузов и груза, служащего для определения чувствительности весов (весовой цены деления шкалы), и о влиянии изменения положения „точки нуля“ шкалы весов, возникающего в процессе взвешивания, на результат взвешивания. При этом под точкой нуля понимается положение равновесия ненагруженных весов. Точно под точкой нуля следует понимать положение равновесия, отвечающее полному равенству грузов на обеих чашках¹.

При точном определении массы какого-либо тела нельзя ограничиваться единичным взвешиванием, которое не может дать точного результата вследствие наличия неравноплечности коромысла весов, зависящей от многих причин. Поэтому при точных взвешиваниях, кроме взвешивания AB (A — на левой чашке, B — на правой), необходимо еще второе взвешивание, определяющее относительную длину плеч коромысла весов или служащее к исключению влияния разности длины плеч на результат взвешивания. А так как при точных взвешиваниях разность сличаемых масс определяется не добавочными гирями, а из разности равновесий $L_{A,B} - L_{B,A}$, выраженной в делениях шкалы, то к двум основным взвешиваниям необходимо присоединить третье взвешивание — для определения цены деления шкалы, чтобы иметь возможность разность положений равновесия $L_{A,B} - L_{B,A}$ перевести в единицы массы.

Для исключения влияния неравноплечности коромысла весов на результат точного взвешивания служат известные приемы взвешивания Борда, Гаусса, Д. И. Менделеева, С. Д. Гидаспова [2]. Эти приемы взвешивания не учитывают изменений соотношения плеч коромысла весов, происходящих в процессе взвешивания (см. ниже).

¹ [1], стр. 113.

В простейшем случае точное взвешивание представляет собой систему трех взвешиваний (этапов), например, $A, B; B, A; B; A+r$ (при способе Гаусса).

1. О системах точных взвешиваний

При осуществлении процесса точного взвешивания предполагается, что цена деления шкалы весов при данной нагрузке остается неизменной и не зависящей от того, на которое плечо кладется грузик r , ее определяющий, а также в процессе взвешивания неравноплечность коромысла предполагается неизменной.

Между тем, как показывают исследования Д. И. Менделеева [1, 2], цена деления шкалы изменяется не только с изменением нагрузки, но и зависит от множества других причин, как-то: температуры коромысла, от величины размахов, от участка шкалы, на котором определяется, от изменения „состояния“ весов и т. п. Поэтому нет никаких оснований, особенно при современных точных взвешиваниях, считать, что цена деления шкалы не зависит от того, на которое плечо кладется грузик r , ее определяющий.

Будем в дальнейшем исходить из классического положения Д. И. Менделеева: „Сущность дела основана на пропорциональности между изменением разностей грузов и отвечающих им показаний шкалы“ ([1], стр. 128). Для наглядности и вывода формулы для подсчета разности масс сличаемых грузов, на основании указанного положения Д. И. Менделеева, введем в рассмотрение нуль шкалы весов. Тогда процесс взвешивания по Гауссу представится следующей схемой (табл. 1):

Таблица 1

№ этапа	Нагрузка на чашки		Отсчеты отклонений	Положение равновесия	Примечание
	левая	правая			
1	A	A	.....	L_0	a — грузик, добавленный после перестановки грузов, что вызвано наличием неравноплечности;
2	A	$B = A + p$	.....	$L_{A,B}$	
3	$B = A + p$	$A + a$	.....	$L_{B,A}$	$p = B - A$ — искомая разность масс;
4	$B = A + p$	$A + a + r$	.....	$L_{B,A+r}$	r — грузик для определения цены деления

Предполагаем, для определенности, что начало отсчета расположено по шкале справа и стрелка направлена вниз.

Согласно определению цены деления, как отношения гру-

зика к смещению положения равновесия, вызванному этим грузиком, можем записать:

$$\frac{p}{L_{A,B} - L_0} = \frac{r}{L_{B,A+r} - L_{B,A}} \quad (1)$$

Считая, что при взвешивании на левом плече цена деления останется неизменной, можем написать:

$$\frac{p-a}{L_0 - L_{B,A}} = \frac{r}{L_{B,A+r} - L_{B,A}} \quad (2)$$

Исключая из уравнений (1) и (2) точку нуля L_0 и решая полученное уравнение относительно разности масс p сличаемых грузов, получим обычно применяемую на практике формулу подсчета разности масс:

$$p = \frac{a}{2} + \frac{1}{2} (L_{A,B} - L_{B,A}) \cdot \frac{r}{L_{B,A+r} - L_{B,A}} \quad (3)$$

Наличие множителя $\frac{1}{2}$ в ф-ле (3) уже показывает несимметричность процесса взвешивания. Из приведенной схемы взвешивания видно, что „грузик“ p , т. е. искомая разность масс, помещается один раз на правое плечо и другой раз — на левое, а грузик r участвует только на одном плече.

Кроме того, если ф-ла (3) служит для определения массы грузика p при помощи грузика r , то можно поставить обратную задачу: определить массу грузика r при помощи известной разности масс p , что в некоторых пределах можно осуществить практически. Для решения этого вопроса ф-ла (3) и процесс взвешивания, который она выражает, непригодны, так как, вследствие отсутствия симметричности, это будет означать, что грузик r мы взвесим только на одном плече, чего при точных взвешиваниях допустить нельзя.

Достигнуть большей симметричности процесса, а значит и некоторого повышения точности результата взвешивания способом Гаусса можно осуществлением взвешивания по схеме (табл. 2). Считая, что цена деления шкалы весов при определении ее на одном и том же плече и участке шкалы мало изменяется, что практически вполне допустимо, особенно при соблюдении примерного равенства $r = p$, можем написать: для правого плеча:

$$\frac{p}{L_{A,B} - L_0} = \frac{p-r}{L_{A+r,B} - L_0} = \frac{r}{L_{B,A+r} - L_{B,A}}; \quad (4)$$

для левого плеча:

$$\frac{p}{L_0 - L_{B,A}} = \frac{p-r}{L_0 - L_{B,A+r}} = \frac{r}{L_{A,B} - L_{A+r,B}} \quad (5)$$

Исключая из уравнений (4) и (5) точку нуля L_0 , получим расчетную формулу:

$$p = \frac{r(L_{A,B} - L_{B,A})}{(L_{B,A+r} - L_{A+r,B}) + (L_{A,B} - L_{B,A})} \quad (6)$$

Система взвешивания $A+r, B; A, B; B, A; B, A+r$ и аналогичные ей применяются при экспериментальных работах в лаборатории мер массы Свердловского филиала ВНИИМ им. Д. И. Менделеева.

2. Влияние изменения положения „нуля“ шкалы в процессе взвешивания на результат взвешивания

Под точкой нуля шкалы весов в дальнейшем будем понимать положение равновесия ненагруженных весов.

Рассмотрим взвешивание по способу Гаусса с использованием системы, представленной второй схемой (табл. 2). Положение нуля шкалы на каждом этапе взвешивания обозначим

Таблица 2

№ этапа	Нагрузка на чашки		Элонгация	Положение равновесия
	левая	правая		
1	A	A	.....	L_0
2	$A+r$	$B=A+p$	.....	$L_{A+r, B}$
3	A	$B=A+p$	.....	$L_{A, B}$
4	$B=A+p$	A$	.....	L_{B, A}$
5	$B=A+p$	$A+r$	.....	$L_{B, A+r}$

соответственно через $l_{A+r, B}; l_{A, B}; l_{B, A}$ и $l_{B, A+r}$. Эти положения нуля на отдельных этапах будут различны между собой, вследствие непрерывного изменения „состояния“ весов.

Положения равновесия, полученные в процессе взвешивания, обозначим, как и на схеме, для каждого этапа соответственно через

$$L_{A+r, B}; L_{A, B}; L_{B, A}; L_{B, A+r}. \quad (7)$$

Очевидно, для получения более достоверного результата взвешивания нужно исходить не из сравнения положений равновесия (7), отвечающих различным положениям нуля шкалы, а из положений равновесия (7), приведенных предварительно к одному и тому же положению нуля шкалы, например, соответствующему этапу A, B .

Для упрощения введем обозначения:

$$l_{A+r, B} - l_{A, B} = m_1; l_{B, A} - l_{A, B} = m_2; l_{B, A+r} - l_{A, B} = m_3. \quad (8)$$

Пусть цена деления шкалы ненагруженных весов — S_0 , а весов под нагрузкой, отнесенная к этапу A, B , — S_{p_0} . Тогда

положения равновесия (7), после приведения к положению нуля шкалы, соответствующему этапу A, B , согласно равенствам (8), выразятся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} L'_{A+r,B} &= L_{A+r,B} - \frac{m_1 S_0}{S_{p_0}}; \\ L'_{A,B} &= L_{A,B}; \\ L'_{B,A} &= L_{B,A} - \frac{m_2 S_0}{S_{p_0}}; \\ L'_{B,A+r} &= L_{B,A+r} - \frac{m_3 S_0}{S_{p_0}}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Для вычисления цены деления S_{p_0} , согласно определению имеем равенство:

$$S_{p_0} = \frac{2r}{L'_{B,A+r} - L'_{A+r,B} + L_{A,B} - L'_{B,A}}.$$

Подставляя сюда значения приведенных положений равновесия из выражений (9) и решая полученное уравнение относительно S_{p_0} , найдем:

$$S_{p_0} = \frac{2r - (m_1 + m_2 - m_3) S_0}{L_{B,A+r} - L_{A+r,B} + L_{A,B} - L_{B,A}}. \quad (10)$$

Для подсчета искомой разности масс имеем:

$$p = \frac{(L'_{A,B} - L'_{B,A}) S_{p_0}}{2},$$

откуда, согласно равенствам (9) и (8), получаем расчетную формулу:

$$p = \frac{(L_{A,B} - L_{B,A}) S_{p_0}}{2} - \frac{(L_{A,B} - L_{B,A}) S_0}{2}. \quad (11)$$

Трудность вопроса заключается в том, что до сих пор мы не умеем точно определять положение нуля шкалы для каждого этапа взвешивания.

Если в процессе взвешивания весы претерпевают значительные изменения „состояния“, что чаще всего обнаруживается при повышенной чувствительности и при перестановках грузов с чашки на чашку, то можно воспользоваться следующей системой взвешивания:

$$O, O; O, r; A+r, B; A, B; O, O; B, A; B, A+r; O, O; r, O, \quad (12)^1$$

¹ Как серия (12), так и другие, рассматриваемые автором, дадут возможность следить за изменением нуля ненагруженных весов, если изменение положения нуля управляется функцией определенного вида, не принимающей предельных значений в промежутке между точками, для которых повернется нуль весов. (Прим. ред.).

где O, O означает положение равновесия ненагруженных весов. Предполагается, что при накладывании и снятии грузика r , особенно в процессе колебаний, т. е. без арретирования весов, существенных изменений „состояния“ весов не происходит.

При этом разность масс можно подсчитать по ф-ле (11), считая, что

$$S_{r_0} = \frac{2r}{L_{B,A+r} - L_{A+r,B} + L_{A,B} - L_{B,A}}$$

а за положение нуля шкалы на данном этапе принимать среднее значение положения равновесия ненагруженных весов до и после соответствующего этапа взвешивания.

Для получения более достоверного результата и учета изменения состояния весов от медленно исчезающих упругих деформаций, положение равновесия ненагруженных весов надлежит определять по формуле Д. И. Менделеева:

$$L_0 = \frac{l_1 D_0 + l_2}{1 + D_0}$$

т. е., ограничиваясь двумя отсчетами l_1 и l_2 по шкале и пользуясь средним значением декремента затухания D_0 ненагруженных весов, цену деления ненагруженных весов S_0 следует также заменить средним значением, а не определять в каждом взвешивании.

Таким образом, система (12) может быть заменена более простой: $O, O; A+r, B; A, B; O, O; B, A+r; O, O$.

Ниже приводятся результаты серии взвешиваний по системе (12) на весах № 122 и 3 (табл. 3).

У весов № 3 призмы впрессованы в коромысло, причем коромысло этих весов допускает более значительные упругие деформации по сравнению с другими весами; это главным образом и влияет на погрешность результата взвешивания на этих весах.

Чувствительность весов № 122 перед серией взвешиваний была повышена в 2,5 раза по сравнению с той чувствительностью, при которой на этих весах производятся текущие работы. Были использованы весы № 122, до 1 кг, завода „Эталон“; сличались грузы: $A = 1 \text{ кг} + 12,13 \text{ мг}$; $B = 1 \text{ кг}$; $r = 1,00 \text{ мг}$; и весы № 3 типа ВО-1-5 завода „Эталон“, до 5 кг; сличались грузы: $A = B = 5 + 100 \text{ мг}$; $r = 10,13 \text{ мг}$.

Весы № 122 и № 3 снабжены сильными оптическими приспособлениями для отсчетов по шкале.

В случае взвешивания по способу тарирования (Борда) с применением, например, системы $T, A; T, B; T, B+r$, где T — тарировочный груз на левой чашке весов, A и B — сличаемые грузы, обозначая положения равновесия на соответ-

Таблица 3

Результаты отдельных взвешиваний серий						Средний результат	Расхождение	Примечание
Весы № 122								
Без учета положения нуля шкалы	1,839	1,817	1,610	1,708	1,740	1,743 ± 0,030	0,023	$S_p = 0,0286$
С учетом положения нуля шкалы	1,796	1,790	1,617	1,679	1,715	1,720 ± 0,020		$S_p = 0,0875$
Весы № 3								
Без учета положения нуля шкалы	3,138	3,269	3,422	3,673	3,560	3,412 ± 0,065	0,536	
С учетом положения нуля шкалы	3,833	2,895	2,822	2,796	3,034	2,876 ± 0,030		

ствующих этапах через L_A , L_B , L_{B+r} , согласно вышеприведенному положению Д. И. Менделеева, можно записать:

$$\frac{p}{L_B - L_A} = \frac{r}{L_{B+r} - L_B},$$

где $p = B - A$ — искомая разность масс сличаемых грузов. Отсюда непосредственно получаем расчетную формулу для разности масс, обычно применяемую на практике при этом способе:

$$p = (L_B - L_A) S, \quad (13)$$

Обозначая положение нуля шкалы на соответствующих этапах через l_A , l_B и l_{B+r} и введя для краткости обозначения

$$l_B - l_A = m_1; \quad l_{B+r} - l_A = m_2, \quad (14)$$

совершенно аналогично тому, как в случае способа Гаусса, получим для подсчета цены деления шкалы, соответственно положению нуля l_A , формулу

$$S_{r_0} = \frac{r - (m_1 - m_2) S_0}{L_{B+r} - L_B}, \quad (15)$$

и для подсчета разности масс сличаемых грузов, согласно выражениям (13) и (14), формулу

$$p = (L_B - L_A) S_{p_0} - (l_B - l_A) S_0. \quad (16)$$

Сравнивая выражения (11) и (16), замечаем, что при прочих равных условиях влияние смещения положения нуля шкалы весов, возникающего в процессе взвешивания, на результат при взвешивании способом тарирования будет вдвое больше, чем в случае способа двойного взвешивания.

Выводы

Из статьи можно сделать следующие выводы:

1. Точность взвешивания будет повышена, если определение чувствительности весов делать на левом и правом плече при каждом взвешивании.
2. Точность взвешивания зависит от стабильности положения „нуля“ что не учитывается обычно формулами, применяемыми при точном взвешивании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Менделеев Д. И., Труды по метрологии, Стандартгиз, 1936.
2. Менделеев Д. И., Опытное исследование колебания весов, ГОНТИ, 1931.
3. Масса, объем и плотность, Труды ВНИИМ, вып. 19 (35), 1939.

Г. Д. КОКОШ и Н. А. СМЕРНОВА

ПРИЛОЖЕНИЕ МЕТОДА КРУТИЛЬНОГО МАЯТНИКА К ИССЛЕДОВАНИЮ КОРОМЫСЕЛ ТОЧНЫХ ВЕСОВ

При проектировании рычажных равноплечих весов конструкторы опираются в своих расчетах коромысла на некоторые задаваемые техническими условиями параметры, характеризующие весы. Одним из таких параметров является расстояние между линией опоры средней призмы и центром тяжести коромысла. В дальнейшем эту величину будем обозначать через s . Вторым важным параметром является расстояние между линией, касательной к рабочим ребрам грузоприемных призм, и плоскостью опоры, называемое просветом между призмами. Эту величину в дальнейшем будем обозначать через m . Обычно величины s и m связывают с чувствительностью весов и, определяя чувствительность одного коромысла, подсчитывают s , а по чувствительности коромысла с чашками подсчитывают m [2].

Однако нельзя достаточно точно найти величины s и m , пользуясь формулой определения чувствительности, так как в силу непостоянства показаний весов чувствительность также непостоянна. Период колебания весов (T_n) является величиной более постоянной, а определение его с большой точностью не представляет значительного труда. Это обстоятельство подтверждается многими работами по исследованию весов [1]¹.

Авторами были произведены 2.III.1951 г. измерения цены деления и периода колебания весов Рупрехта грузоподъемностью на 200 г. Период колебания определялся из двадцати последовательных колебаний. Полученные значения для цены деления сведены в табл. 1 и для периода колебания в табл. 2.

Среднее значение цены деления оказалось равным 0,147 мг и относительная вероятная погрешность $R_{0K} = 2,2\%$. Среднее значение периода 21,420 сек. и относительная вероятная погрешность периода $R_{0T} = 0,039\%$. Отсюда вытекает вывод о преимуществах определения значений s и m из формулы периода колебания весов.

¹ Сличения второй копии государственного эталона массы с эталоном массы килограммом № 12, произведенные руководителем лаборатории мер массы Г. Д. Кокосом.

Таблица 1

Измерения по порядку	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Цена деления в мг	0,138	0,144	0,147	—	0,138	0,157	0,161	0,129	—	0,163

¹ Измерения 4 и 9 не приведены, как промахи (на основании критерия о промахах, см. [3]).

Таблица 2

Измерения по порядку	1	2	3	4	5	6
Период колебания в сек.	21,450	21,425	21,370	21,400	21,435	21,450

Для определения s воспользуемся формулой периода колебания весов без нагрузки и чашек:

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{\rho^2}{s g}}, \quad (1)$$

где ρ — радиус инерции коромысла;
 g — ускорение силы тяжести.

Из ф-лы (1) получаем:

$$s = \frac{4\pi^2 \rho^2}{T_n^2 g}. \quad (2)$$

Относительная погрешность s , определенного по этой формуле, равна:

$$\varepsilon_{0s} = \sqrt{4\varepsilon_{0\rho}^2 + 4\varepsilon_{0T_n}^2}. \quad (3)$$

где $\varepsilon_{0\rho}$ и ε_{0T_n} — относительные погрешности ρ и T_n .

Как уже было указано, точность определения периода колебания весов высока. Чтобы погрешность определения ρ не уменьшила точности определения s , зависящей от точности определения периода колебания, необходимо, чтобы

$$\sqrt{4\varepsilon_{0\rho}^2} \leq 0,3\varepsilon_{0s}.$$

В этом случае $\varepsilon_{0s} = 2\varepsilon_{0T_n}$. Значения π и g , входящие в формулу (2), можно взять из таблиц с необходимым количеством знаков.

Для определения радиуса инерции коромысла воспользуемся методом крутильного маятника, ранее примененным для этой

цели С. Д. Гидасповым [4]. Этот метод состоит в следующем. Если к телу, подвешенному на проволоке, приложена, а затем удалена пара сил, то возникают свободные крутильные колебания тела.

Обозначим: k — удельный крутящий момент, т. е. момент, необходимый для закручивания проволоки на угол в один радиан; I — момент инерции тела относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести. Пренебрегая инерцией проволоки, можно написать уравнение движения тела в следующем виде:

$$I\ddot{\varphi} + k\varphi = 0.$$

Делим на I и обозначим $\frac{k}{I} = p^2$, получим:

$$\ddot{\varphi} + p^2\varphi = 0.$$

Общее решение этого уравнения будет:

$$\varphi = A \cos pt + B \sin pt,$$

откуда период колебания кручения $T = \frac{2\pi}{p} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{k}}$,

а значит, $I = \frac{T^2 \cdot k}{4\pi^2}$.

Для проволоки постоянного кругового сечения

$$k = \frac{G \pi d^4}{32 l},$$

где G — модуль упругости при кручении;

d — диаметр проволоки;

l — длина проволоки.

Если закрепить проволоку определенной длины и подвешивать на ней разные тела, то

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{T_1^2}{T_2^2},$$

где I_1 и T_1 — момент инерции и период крутильных колебаний одного тела; I_2 и T_2 — момент инерции и период крутильных колебаний другого тела¹.

Отсюда, зная момент инерции какого-нибудь тела и наблюдая периоды крутильных колебаний первого и второго тела на этой же проволоке, можно определить момент инерции второго тела. Этим методом можно определить момент инерции коромысла относительно оси, проходящей через рабочее ребро опорной призмы. Момент инерции коромысла относительно

¹ Хотя крутильные колебания и являются затухающими, приведенное равенство соблюдается с достаточной степенью точности, вследствие малой величины декремента колебаний.

рабочего ребра опорной призмы определяется по известной формуле:

$$I_{\text{кор.}} = I_{\text{кор.}} + Rs^2,$$

где $I_{\text{кор.}}$ — момент инерции коромысла относительно рабочего ребра опорной призмы;

$I_{\text{кор.}}$ — момент инерции коромысла относительно оси, проходящей через центр тяжести и параллельной ребру опорной призмы;

R — масса коромысла.

Так как величина s очень мала, то можно без сколько-нибудь заметной погрешности принять $I_{\text{кор.}} = I_{\text{кор.}}$. Например, для аналитических весов Сарториуса $R = 50$ г; $s = 0,00708$ см; $Rs^2 = 0,00000708$ г см². Так как при определении момента инерции коромысла округление до десятых долей г см² даст достаточную точность (что будет доказано ниже), то такое допущение ($I_{\text{кор.}} = I_{\text{кор.}}$) вполне оправдывается.

Рассчитаем допустимые погрешности при определении радиуса инерции коромысла методом крутильного маятника. Как указано ранее,

$$2\varepsilon_0 \leq 0,3\varepsilon_{0s}, \text{ т. е. } \varepsilon_0 \leq 0,3\varepsilon_{0s}.$$

Для определения радиуса инерции коромысла воспользуемся формулой:

$$I_{\text{кор.}} = Rp^2,$$

откуда

$$p = \sqrt{\frac{I_{\text{кор.}}}{R}};$$

следовательно,

$$\varepsilon_0 = \sqrt{\frac{1}{4} \varepsilon_{0I_{\text{кор.}}}^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_{0R}^2},$$

где $\varepsilon_{0I_{\text{кор.}}}$ и ε_{0R} — относительные погрешности $I_{\text{кор.}}$ и R .

Массу коромысла легко определить с большой точностью, поэтому принимаем $\frac{1}{2} \varepsilon_{0R} \leq 0,3\varepsilon_0$. Всю погрешность в определении p относим за счет погрешности в определении $I_{\text{кор.}}$, т. е. $\frac{1}{2} \varepsilon_{0I_{\text{кор.}}} = \varepsilon_0$, или, подставляя $\varepsilon_{0R} \leq 0,3\varepsilon_{0I_{\text{кор.}}}$, получим

$$\varepsilon_{0I_{\text{кор.}}} \leq 0,6\varepsilon_{0I_{\text{кор.}}}.$$

Для определения момента инерции коромысла методом крутильного маятника воспользуемся формулой:

$$\frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{н}}} = \frac{T_{\text{к}}^2}{T_{\text{н}}^2},$$

где $I_{\text{к}}$ — момент инерции коромысла и крутильного маятника¹;

¹ $I_{\text{к}}$ включает наряду с моментом инерции коромысла также момент инерции самого маятника. Для получения момента инерции коромысла следует вычесть из $I_{\text{к}}$ момент инерции самого маятника.

I_n — момент инерции линейки и крутильного маятника;
 T_n — период колебания крутильного маятника, когда на нем находится коромысло;
 T_n — период колебания крутильного маятника, когда на нем находится тело с известным моментом инерции (линейка прямоугольного сечения).

$$I_n = I_n \frac{T_n^2}{T_n^2},$$

откуда

$$\varepsilon_{0 I_n} = \sqrt{\varepsilon_{0 I_n}^2 + 4 \varepsilon_{0 T_n}^2 + 4 \varepsilon_{0 T_n}^2}.$$

Из всех величин, входящих в последнее уравнение, наиболее трудно определим период колебания крутильного маятника. Поэтому всю погрешность в определении момента инерции коромысла отнесем за счет погрешности в определении периода колебания кручения. Принимая $\varepsilon_{0 T_n} = \varepsilon_{0 T_n}$, получаем $\varepsilon_{0 T_n} = \sqrt{8} \varepsilon_{0 T_n (к)}$. Подставляя $\varepsilon_{0 I_{нор}} \leq 0,6 \varepsilon_{0 T_n}$, получим $\varepsilon_{0 T_n (к)} \leq \frac{0,6 \varepsilon_{0 T_n}}{\sqrt{8}}$. При этом необходимо, чтобы $\varepsilon_{0 I_n} \leq 0,3 \varepsilon_{0 T_n}$.

Следовательно, имея определенную погрешность при установлении периода колебания весов, можно рассчитать допустимую погрешность измерения периода колебания крутильного маятника. Если период крутильных колебаний определен с допустимой погрешностью, то погрешность определения s будет зависеть только от погрешности определения периода колебания весов.

Для определения m воспользуемся формулой периода колебания для нагруженных весов:

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{R\rho^2 + 2Pa^2}{(Rs + 2Pa)g}},$$

где a — длина плеча коромысла;

$2P$ — масса всех подвешенных грузов.

Считая, что s как для ненагруженного, так и для нагруженного коромысла остается одним и тем же [2], получим:

$$m = \frac{2\pi^2 R\rho^2}{PT_n^2 g} + \frac{4\pi^2 a^2}{T_n^2 g} - \frac{Rs}{2P}$$

и

$$\varepsilon_m = \sqrt{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2 + D_4^2 + D_5^2 + D_6^2}.$$

Здесь $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$ — частные погрешности, равные:

$$D_1 = \varepsilon_R \frac{\partial m}{\partial R} = \varepsilon_R \left(\frac{2\pi^2 \rho^2}{PT_n^2 g} - \frac{s}{2P} \right);$$

$$D_2 = \varepsilon_a \frac{dm}{da} = \varepsilon_a \cdot \frac{8\pi^2 a}{T_n^2 g}; \quad D_4 = \varepsilon_r \frac{dm}{dr} = \frac{4\pi^2 R^2}{PT_n^2 g} \cdot \varepsilon_r;$$

$$D_4 = \varepsilon_P \frac{dm}{dP} = \left(-\frac{2\pi^2 R^2}{T_n^2 g P^2} + \frac{R^2}{2P^2} \right) \varepsilon_P;$$

$$D_5 = \varepsilon_{T_n} \frac{dm}{dT_n} = \left(-\frac{4\pi^2 R^2}{PgT_n^3} - \frac{8\pi^2 a^2}{gT_n^3} \right) \varepsilon_{T_n}; \quad D_6 = \varepsilon_s \frac{dm}{ds} = -\frac{R}{2P} \cdot \varepsilon_s,$$

где $\varepsilon_m, \varepsilon_R, \varepsilon_a, \varepsilon_r, \varepsilon_P, \varepsilon_{T_n}$ — абсолютные погрешности величин m, R, a, r, P, T_n .

Величины R и $2P, g$ легко могут быть определены с такой точностью, что

$$\sqrt{D_1^2 + D_4^2} < 0,3 \varepsilon_m,$$

поэтому $\varepsilon_m = \sqrt{D_2^2 + D_3^2 + D_5^2 + D_6^2}$.

Вычислив D_2, D_3, D_5, D_6 по вышеприведенным формулам, можно определить ε_m для каждого конкретного случая.

Выше даны формулы, по которым рассчитываются относительные погрешности всех величин при определении радиуса инверсии коромысла методом крутильного маятника. Наиболее трудно определим период колебания кручения с заданной точностью. Чтобы относительная погрешность определения периода колебания была малой, необходимо взять период колебания достаточно большим (не менее 18—30 сек.). Это можно обеспечить, подбирая проволоку соответствующего диаметра и длины. Из формулы для периода колебания крутильного маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{k}},$$

где

$$k = \frac{G\pi d^4}{32l},$$

следует, что период колебания эффективнее изменять подбором диаметра проволоки. Для получения большей точности в отсчете времени можно регистрировать колебания при помощи фотоэлемента, установленного около положения равновесия крутильного маятника, где скорость наибольшая, а следовательно, ошибка в отсчете времени будет наименьшей.

Как вытекает из формулы $\frac{I_k}{I_n} = \frac{T_n^2}{T_k^2}$, относительная погрешность I_k обуславливается относительными погрешностями определения I_n и $\frac{T_n^2}{T_k^2}$.

Обозначим:

$$\frac{T_k^2}{T_n^2} = x^2.$$

Тогда

$$I_x = I_0 \cdot x^2,$$

следовательно, $\varepsilon_{I_x} = \sqrt{x^2 \varepsilon_{I_0}^2 + 4x^2 I_0^2 \cdot \varepsilon_x^2}$.

Отсюда получаем, что, при сохранении постоянной погрешности результата, погрешность в определении x может быть допущена тем большей, чем меньше будут значения величин

$x = \frac{T_x^2}{T_0^2}$ и I_0 . Для этого известный момент инерции должен быть меньше момента инерции коромысла не менее, чем в 1,5–2 раза. Однако I_0 должен быть таким, чтобы T_0 не был меньше 18–30 сек.

При определении радиуса инерции методом крутильного маятника большую ошибку могут внести внешние толчки, дающие добавочный момент и нарушающие соответствие между I и T . Особо опасно это при определении моментов инерции тел малого веса. Поэтому при определении момента инерции легкого тела крутильный маятник следует помещать в месте, изолированном от внешних толчков, или прибегнуть к методу, основанному на ином принципе.

Одним из таких методов пользуются в приборостроении для определения малых моментов инерции. Он основан на явлении изменения периода колебания баланса при насаживании на его ось тел с различными моментами инерции. Мы не будем подробно останавливаться на этом методе, так как масса коромысла обычно достаточно велика для устойчивости крутильного маятника против толчков.

В каждом конкретном случае необходимо, исходя из имеющейся относительной погрешности определения периода колебания весов, рассчитать по вышеприведенным формулам допустимые погрешности в определении радиуса инерции крутильным маятником. Подбирая оптимальные условия для данного случая и манипулируя количеством измерений, можно добиться требуемой точности. При получении же меньшей точности следует рассчитать точность определения s , исходя из имеющихся точностей определения периода колебания коромысла весов и точности определения радиуса инерции методом крутильного маятника.

Точность, полученная при определении s по формуле для периода колебания весов, всегда будет значительно выше точности определения s по формуле для цены деления.

Для проверки всего изложенного был проведен опыт определения s весов Рупрехта на 200 г по тому и другому методу. Все необходимые измерения были произведены со 2.Ш по 6.IV.1951 г. Период весов определялся из двадцати последовательных колебаний. Полученные данные помещены в табл. 1. Относительная вероятная погрешность $R_{0T_s} = 0,039\%$.

Рассчитаем допустимую погрешность в определении пе-

риода колебания крутильного маятника, при которой погрешность определения δ зависела бы только от погрешности определения периода колебания весов. Расчет произведем для вероятных погрешностей.

После подстановки результатов опыта в приведенные выше формулы получим допустимую вероятную погрешность определения периода крутильных колебаний $R_{\sigma T_k(n)} = 0,009\%$.

Определим радиус инерции коромысла.

В качестве тела известного момента инерции была использована алюминиевая линейка, момент инерции которой равен $552,82 \text{ гсм}^2$. Момент инерции крутильного маятника равен $182,09 \text{ гсм}^2$.

В результате опыта были получены значения для периода колебания линейки, приведенные в табл. 3. Каждое значение определено из 15 наблюдений.

Среднее значение периода $18,612 \text{ сек.}$ и относительная вероятная погрешность $R_{\sigma T_n} = 0,0091\%$.

Таблица 3

Измерения по порядку	1	2	3	4	5
T_n сек.	18,613	18,620	18,613	18,627	18,613
Измерения по порядку	6	7	8	9	10
T_n сек.	18,613	18,613	18,600	18,607	18,600

Таблица 4

Измерения по порядку	1	2	3	4	5
T_k сек.	45,080	45,150	45,160	45,150	45,180
Измерения по порядку	6	7	8	9	10
T_k сек.	45,170	45,100	45,080	45,070	45,050

В табл. 4 приведены опытные данные по определению периода колебаний коромысла, подвешенного к той же нити. Каждый результат определен из 10 наблюдений.

Среднее значение периода колебания $45,113 \text{ сек.}$ и относительная погрешность $R_{\sigma T_k} = 0,022\%$.

В данном случае мы получим при определении периода колебания крутильного маятника погрешности, превышающие допустимые. Рассчитаем относительную вероятную погрешность $R_{\sigma \delta}$, исходя из имеющихся погрешностей.

Имеем $R_{\sigma T_k} = 0,022\%$ и $R_{\sigma T_n} = 0,0091\%$.

$$R_{\sigma \delta} = \sqrt{R_{\sigma \delta_n}^2 + 4R_{\sigma T_k}^2 + 4R_{\sigma T_n}^2}; \quad R_{\sigma \delta} \leq 0,3 R_{\sigma T_k}$$

$$R_{0I_k} = \sqrt{4R_{0T_k}^2 + 4R_{0I_n}^2} = \\ = \sqrt{4 \cdot 0,022^2 + 4 \cdot 0,0091^2} = 0,048\%$$

$$R_{0I_n} = 0,014\%; \quad I_n = 738,91 \text{ гсм}^2; \quad R_{I_n} = 1,0 \text{ гсм}^2.$$

Принимаем $I_n = 738,9 \text{ гсм}^2$.

$$R_{0\phi} = \sqrt{\frac{1}{4}R_{0I_{\text{кор}}}^2 + \frac{1}{4}R_{0R}^2};$$

$$\frac{1}{2}R_{0R} \leq 0,3 R_{0\phi}; \quad R_{0\phi} = \frac{1}{2}R_{0I_{\text{кор}}}.$$

$$R_{0\phi} = 0,024\%; \quad R_{0R} \leq 0,014\%; \quad R = 84,601 \text{ г};$$

$$R_R = 0,021 \text{ г}. \text{ Берем } R = 64,60 \text{ г}.$$

$$R_{0\phi} = \sqrt{4R_{0\phi}^2 + 4R_{0I_n}^2}; \quad R_{0\phi} = 0,092\%.$$

Рассчитаем радиус инерции коромысла:

$$I_k = I_n \frac{T_k^2}{T_n^2} = 738,91 \frac{45,113^2}{18,612^2} = 4341,185 \text{ гсм}^2.$$

$$I_{\text{кор}} = 4341,185 - 182,09 = 4159,095 \text{ гсм}^2;$$

$$I_{\text{кор}} = R\rho^2; \quad R = 84,60 \text{ г}.$$

$$\rho = \sqrt{\frac{4159,095}{84,60}} = 7,011 \text{ см}.$$

Рассчитаем s по периоду колебания весов.

$$s = \frac{4\pi^2\rho^2}{T_n^2 g} = \frac{4 \cdot 3,14159^2 \cdot 7,011^2}{21,420 \cdot 981,93} = 0,0043072 \text{ см}.$$

$$R_s = 0,0043072 \cdot 0,00092 = 0,0000040 \text{ см}.$$

Принимаем $s = 0,004307 \pm 0,0000040 \text{ см}$.

Определим s из формулы цены деления:

$$E = \frac{RIs}{aL},$$

где E — цена деления;

l — длина одного деления шкалы весов;

a — длина плеча коромысла;

L — длина стрелки весов.

Были получены значения для цены деления, приведенные в табл. 1. Среднее значение цены деления 0,147 мг и относительная вероятная погрешность 2,2%.

Имеем	Принимаем	
$a = 8 \text{ см}$	$R_a = 0,1 \text{ см}$	$R_{0a} = 1,2\%$
$L = 27,7 \text{ см}$	$R_L = 0,01 \text{ см}$	$R_{0L} = 0,036\%$
$l = 0,1 \text{ см}$	$R_l = 0,001 \text{ см}$	$R_{0l} = 1,0\%$
$R = 84,60 \text{ г}$	$R_{0R} = 0,014 \%$	

$$R_{0s} = \sqrt{R_{0R}^2 + R_{0l}^2 + R_{0a}^2 + R_{0L}^2 + R_{0E}^2}; \quad R_{0R} \leq 0,3 R_{0s};$$

$$R_{0s} = \sqrt{R_{0l}^2 + R_{0a}^2 + R_{0L}^2 + R_{0E}^2} = 2,7\%;$$

$$s = \frac{a l E}{R_l} = \frac{8 \cdot 27,7 \cdot 0,147}{84,60 \cdot 0,1 \cdot 1000} = 0,00385 \text{ см},$$

$R_s = 0,00010 \text{ см}$. Следовательно, $s = (0,0038 \pm 0,00010) \text{ см}$.

Сравнивая результат определения s по периоду колебания коромысла ($s = 0,0043072 \pm 0,0000040 \text{ см}$) с результатом определения по цене деления шкалы весов ($0,0038 \text{ см} \pm 0,00010 \text{ см}$), следует отметить большую достоверность значения s , определенного по периоду колебаний. Значение s , определенное по цене деления, следует рассматривать как приближенное.

Рассмотренный здесь метод определения радиуса инерции коромысла может быть широко использован при проектировании весов. Как показывает конструкторская практика, в настоящее время при теоретическом расчете весов конструкторы совершенно не вычисляют периода колебания весов, так как для этой цели им необходимо значение радиуса инерции коромысла. Теоретический расчет радиуса инерции коромысла является весьма сложным и требует большой затраты времени. Этот расчет может быть заменен экспериментальным исследованием плоской модели коромысла, вырезанной из тонкого листа алюминия или даже картона по теоретическому чертежу коромысла. Радиусы инерции этой модели и действительного коромысла будут одинаковы вследствие возможности применения к этому случаю теоремы о геометрическом подобии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидаслов С. Д., Некоторые исследования в области точных весов, Труды ВНИИМ, 19 (35), Масса, объем и плотность, 1939.
2. Доброхотов А. Н., Рычажные весы, Каталогиздат, 1939.
3. Маликов М. Ф., Основы метрологии, Машгиз, 1949.
4. Тимошенко С. П., Колебания в инженерном деле, ОНТИ, 1931

Г. Д. КОКОШ

ВЕСОВОЙ ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ¹

Равноплечие рычажные весы являются весьма чувствительным прибором, поэтому они нашли широкое применение не только в области измерения массы, но также и для измерения силы, для магнитных и электрических измерений и т. д. И везде весовой метод оказывается чрезвычайно эффективным, поскольку он дает возможность получить наивысшую точность результата.

Можно применять весы и для измерения коэффициента линейного расширения различных материалов. Этот метод позволяет не только определить коэффициент линейного расширения с большой точностью, но и установить наличие вариаций коэффициента в различных участках исследуемого образца.

Основной частью установки являются весы типа аналитических, грузоподъемностью в 200 г. Коромысло весов должно быть сделано из материала с малым коэффициентом линейного расширения, например, из инвара или плавленого кварца. Схематично такой прибор изображен на рис. 1.

Образец испытуемого материала имеет форму цилиндра. Длина его 100 мм, диаметр 6—8 мм. Устойчивость положения образца достигается его укладкой в цилиндрическую выточку, сделанную в правом плече коромысла. Одним концом образец упирается в выступ 7, другим — в гирию 3 которую он может смещать при своем расширении. Весы помещаются в термостат. После того как произойдет стабилизация температуры термостата и всей системы, с помощью специального приспособления гирия 3 вплотную придвигается к образцу, и весы уравниваются без нарушения термостатности.

На левом плече весов необходимо предусмотреть возможность подвески рейтеров в 10, 10, и 20 мг. Нагрузки от 0,1 мг до 10 мг определяются по шкале весов. Для удобства отсчета следует взять весы с вайтографом и вывести шкалу последнего за пределы термостата. Удобны для работы весы АДВ-200 Ленинградского весового завода „Госметр“.

¹ Авторское свидетельство № 10723.

Длина образца при начальной температуре равна 100 мм. При повышении температуры в термостате до 25°С образец удлиняется на величину $\Delta l_1 = \alpha l_1 \Delta t$, где α — коэффициент линейного расширения, l_1 — начальная длина образца, Δt — приращение температуры.

Очевидно,

$$\alpha = \frac{\Delta l_1}{l_1 \Delta t} = \frac{\Delta l_1}{100 \Delta t}. \quad (1)$$

При расширении образца 1 произойдет перемещение гири 3, равное удлинению образца 1. Если бы коэффициент расши-

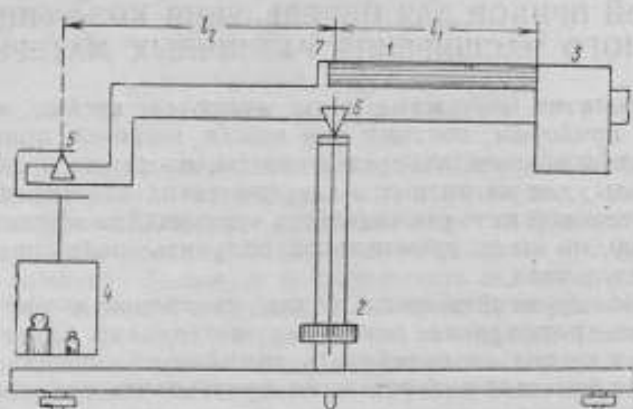


Рис. 1. Схематический чертеж весового прибора:

1 — образец измеряемого материала; 2 — шкала весов; 3 — подвижная гиря; 4 — чашка весов; 5 — грузоприемная призма; 6 — опорная призма; 7 — узорный выступ для образца.

рения коромысла весов был равен нулю, то вызванный этим перемещением дополнительный момент оказался бы равным $Mg\Delta l_1$, где M — масса подвижной гири, g — ускорение силы тяжести и Δl_1 — приращение длины образца 1. Этот дополнительный момент необходимо компенсировать помещением добавочной массы Δm на чашку левого плеча. Уравнение моментов сил, при восстановлении равновесия весов, примет вид:

$$\Delta m \cdot g l_2 - Mg \Delta l_1 = 0, \text{ откуда } \Delta l_1 = \frac{\Delta m \cdot l_2}{M}. \quad (2)$$

Для повышения точности определения коэффициента α необходимо учитывать также и коэффициент расширения коромысла, поскольку нарушение равновесия системы связано на самом деле с разностью температурных удлинений образца и коромысла.

Само по себе перемещение груза 3, вызванное температурным расширением коромысла, не нарушило бы равновесия системы.

Чувствительность метода можно оценить следующим образом: весы завода „Госметр“ АДВ-200 имеют цену деления шкалы 0,1 мг. Точность определения массы этими весами можно считать равной 0,1 мг. Это даст нам возможность определить точность измерения удлинения стержня $\Delta^* l_1$. Положив $\Delta m = 0,1$ мг, l_1 (плечо весов) = 100 мм, $M = 200$ г, по ф-ле (2) получим: $\Delta^* l_1 = 0,05$ мк.

Если считать, что испытанию подвергался образец из железа, то его удлинение Δl_1 , при начальной длине $l_1 = 100$ мк, $\Delta t = 5^\circ \text{C}$, будет равно 6 мк (коэффициент линейного расширения железа принят равным $12 \cdot 10^{-6}$ град. $^{-1}$). Относительная погрешность измерения удлинения Δl_1 составляет $\frac{0,05 \text{ мк}}{6 \text{ мк}} \approx 0,8\%$.

При увеличении Δt относительная погрешность измерения уменьшается. Некоторое уточнение в приведенном расчете может быть произведено путем учета смещения центров тяжести образца 1 и гири 3, вызываемого температурным расширением.

Из совместного решения уравнений (1) и (2) мы получим

$$\alpha = \frac{\Delta m \cdot l_2}{l_1 M \cdot \Delta t}, \text{ а так как}$$

$$M = 200 \cdot 10^3 \text{ мг и } l_2 = 100 \text{ мм, то } \alpha = \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta p}{\Delta t}. \quad (3)$$

При

$$\Delta t = 5^\circ \text{C, } \alpha = \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta p}{5} = \Delta p \cdot 10^{-6}.$$

Увеличивая чувствительность весов, начальную длину образца и величину интервала температуры, легко снизить погрешность определения α до $\pm 1 \cdot 10^{-8}$ град. $^{-1}$.

С целью дальнейшего повышения точности определения коэффициента расширения рекомендуется определять величину удлинения Δl_1 для разных приращений температур, например, для $\Delta t = 5^\circ, 10^\circ$ и т. д., что дает возможность исключить из расчета начальную длину образца l_1 , отношение l_2/l_1 и коэффициент расширения коромысла.

При детализации расчета необходимо также учесть упругие деформации в местах контакта с опорой 7 и гирей 3, (рис. 2), возникающие под влиянием силы сопротивления груза 3, отодвигаемого расширяющимся образцом, а также вызываемое этой силой упругое укорочение образца. Зная

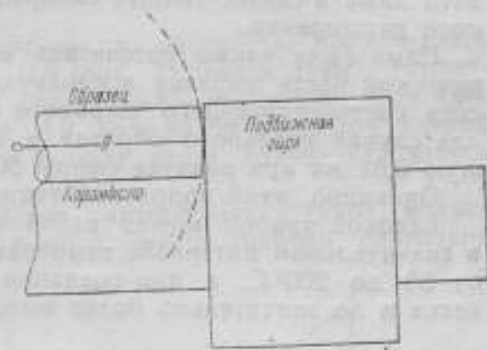


Рис. 2. Схема контакта образца с подвижной гирей.

вес груза Z , равный M_1 , и задавшись коэффициентом трения f , находим силу давления образца I , оказываемого им на опору Z и груз Z . Эта сила равна $Q = f \cdot M$.

Для устранения влияния на измерение Δl_1 всякого рода перекосов, торцы образца целесообразно делать сферическими со значительным радиусом кривизны ($R \approx 50$ см).

В этом случае упругая деформация шарового контакта с опорными плоскостями опоры и подвижного груза может быть подсчитана по формуле Герца [1]. Оказывается, величина этой деформации настолько мала, что ее следует учитывать лишь в особо точных измерениях.

Осевое сжатие настолько мало, что его не следует учитывать даже в самых точных измерениях коэффициента линейного расширения.

Нами была также рассчитана величина вдавливания сферической части образца в плоскую поверхность гири Z . Высота соответствующего шарового сегмента была определена для случая стального образца и составила величину, меньшую $0,01$ мм при радиусе сферы 50 см [2].

Очевидно, этой поправкой также можно пренебречь.

Весовой прибор может найти применение для измерений в значительном интервале температур, например, в интервале от 50 до 200°C , а при создании специальных конструкций весов и до значительно более высокой температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев Н. М., Сопротивление материалов, Гостехиздат, 1949.
2. Зайцев Г. П., Закон подобия деформаций разных металлов, 1950

О ПЕРИОДИЧЕСКИХ ОШИБКАХ МИКРОМЕТРИЧЕСКИХ ВИНТОВ ЭКЗАМИНАТОРОВ УРОВНЕЙ

Винтовая линия, развернутая на плоскость, представляет собой наклонную линию AB (рис. 1), являющуюся гипотенузой треугольника ABC , где $BC = h$ — шаг винта. Для идеального винта гипотенуза AB должна быть прямой линией с постоянным наклоном, т. е. шаг винта должен оставаться неизменным.

Несмотря на совершенство винторезных станков, микрометрические винты все же могут иметь ошибки, благодаря

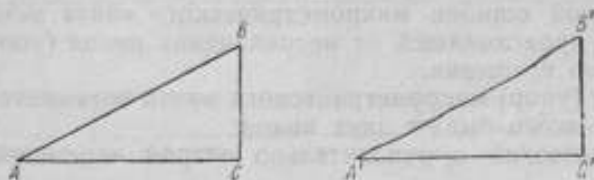


Рис. 1. Развертка винтовой линии на плоскость.

которым вместо прямой линии AB мы имеем волнистую линию $A'B'$, а шаг винта, при переходе от одного оборота к другому, будет изменяться. Обычно волнистость линии $A'B'$ очень мало меняется от одного оборота к другому, что порождает повторяющиеся на каждом обороте ошибки, которые принято называть периодическими.

Постоянное изменение (увеличение или уменьшение) величины шага винта вызывает так называемые ходовые или прогрессивные ошибки.

Таким образом, источником рассмотренных ошибок является сама винтовая нарезка. В механизмах с микрометрическими винтами помимо этого могут быть еще и другие причины, вызывающие как периодические, так и ходовые ошибки.

Ходовые ошибки могут быть вызваны конструктивными особенностями механической системы, в которую входит винт.

Неизменность угла между осью вращения винта и рабочей плоскостью штанги экзаминатора (угол должен быть

равным 90°) приводит к тому, что ось вращения винта всегда будет касательной в точке пересечения рабочей плоскости штанги с осью винта к дуге, соответствующей углу наклона штанги, а потому истинный угол наклона будет меньше получаемого микрометрическим винтом. Это уменьшение прогрессирует с увеличением угла наклона штанги.

Периодические ошибки, помимо источников, изложенных выше, могут вызываться еще эксцентриситетом барабана винта и неправильностью нанесения делений на нем, а также несовпадением конца (упора) винта с его осью вращения; последняя усугубляется наличием шероховатостей и неровностей на рабочей поверхности подпятника винта.

Существующие способы исследования периодических ошибок микрометрических винтов — способы Бесселя [1], Ридберга [2] предназначены для винтов окуляр-микрометров и микроскоп-микрометров астрономо-геодезических инструментов. Эти два способа можно применить и к микрометрическим винтам экзаминаторов уровней. Однако эти способы дают возможность исследовать суммарную периодическую ошибку, т. е. ошибку, происходящую от действия всех перечисленных выше источников периодических ошибок.

Настоящая статья посвящена исследованию слагающей периодической ошибки микрометрического винта экзаминатора уровней, происходящей от несовпадения конца (упора) винта с его осью вращения.

Конец (упор) микрометрического винта экзаминатора уровней чаще всего бывает двух видов:

- а) конический с относительно острой вершиной (концом винта) и
- б) конический с вершиной, переходящей в сферическую поверхность.

Для винта с острым концом необходимо, чтобы его ось вращения проходила через вершину конуса, а для винта со сферическим концом — через центр сферической поверхности. Если эти условия не выполнены, то измерения, производимые винтами, будут искажены периодической ошибкой.

Рассмотрим первый вид винтов, т. е. остроконечные. Допустим, что упор (конец) винта не совпадает с его осью вращения. Площадка упора микрометрического винта (подпятник) горизонтальна, а штанга экзаминатора имеет начальный угол к плоскости α (очевидно, что для случая параллельности штанги экзаминатора и подпятника несовпадение упора винта с его осью вращения на суммарную периодическую ошибку влиять не будет).

На рис. 2 схематически изображены основные линии экзаминатора уровней: a — разрез вертикальной плоскостью, проходящей через ось вращения винта и перпендикулярной к оси вращения штанги экзаминатора, и b — проекция винта на штангу экзаминатора. Здесь VF — микрометрический винт, у которого

точка контакта не совпадает с осью вращения; O — точка пересечения оси вращения штанги экзаминатора с плоскостью, ей перпендикулярной и проходящей через ось вращения винта экзаминатора.

Введем обозначения:

$D_0 = OA$ — расстояние от оси вращения винта до оси вращения штанги экзаминатора;

θ — угол поворота винта.

$$D = OB = D_0 + y; \quad y = AB = r_0 \cos \theta.$$

$r_0 = AM$ — расстояние от оси вращения винта до его точки упора (конца) M .

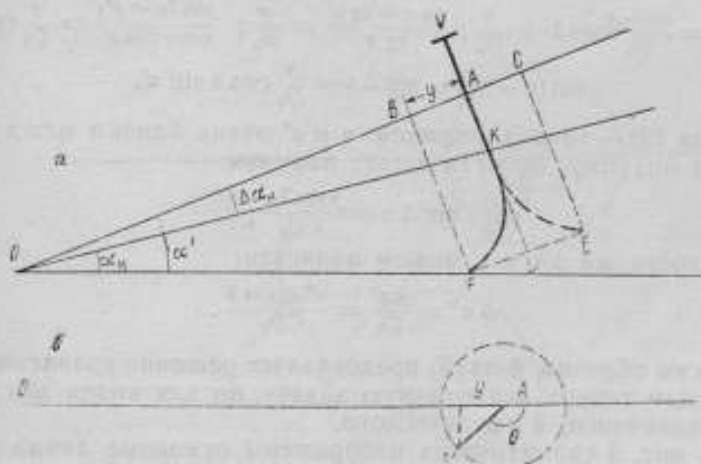


Рис. 2. Основные линии экзаминатора уровней.

Проекция точки M на штангу экзаминатора, как легко сообразить, будет описывать окружность радиусом r_0 . На рис. 2-а точка M совпадает с точкой E при $\theta = 0$ и с точкой F при $\theta = 180^\circ$; $x_0 = KL$ — начальная длина винта (до его поворота на угол θ); $x = AK = h = \frac{h_0 \theta}{2\pi}$ — перемещение винта при повороте на угол θ ; h_0 — шаг винта;

$$x = x_1 + x_2.$$

где x_1 — перемещение винта только от движения по винтовой линии при повороте на угол θ ;

x_2 — перемещение винта, вызванное только смещением упора относительно оси винта при повороте на угол θ (очевидно $x_2 = 0$, когда ось вращения винта перпендикулярна штанге экзаминатора, что в данном случае и предполагается);

α — начальный угол штанги экзаминатора к плоскости горизонта при $r_0 = 0$, т. е. если упор винта совпадает с его осью вращения;

α' — искаженный угол α , благодаря несовпадению упора (конца) винта с осью вращения.

Угол α' на рис. 2 изображен для случая $\theta = \pi$.

Требуется решить уравнение:

$$\alpha - \alpha' = \Delta \alpha'' = f(D_0, r_0, \alpha, \theta). \quad (1)$$

Из геометрического построения рис. 2 следует:

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{AL}{OB} = \frac{x_0 + x}{D_0 + y}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{AL}{OA} = \frac{x_0 + x}{D_0};$$

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha'} = \frac{D_0 + y}{D_0} = 1 + \frac{y}{D_0}; \quad \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha'} = \frac{y}{D_0}; \quad \frac{\sin(\alpha - \alpha')}{\cos \alpha \cos \alpha'} = \frac{y}{D_0} \operatorname{tg} \alpha';$$

$$\sin(\alpha - \alpha') = \sin \Delta \alpha = \frac{y}{D_0} \cos \alpha \sin \alpha'. \quad (2)$$

Ф-ла (2) — точная формула. α и α' очень близки между собою, а поэтому, полагая $\alpha = \alpha'$, получим:

$$\sin \Delta \alpha = \frac{y \sin 2\alpha}{2 D_0};$$

по малости же $\Delta \alpha$ и α можем написать:

$$\Delta \alpha'' = \frac{y \alpha'}{D_0} = \frac{\alpha'' r_0 \cos \theta}{D_0}. \quad (3)$$

Таким образом, ф-ла (3) представляет решение уравнения (1).

Решим теперь аналогичную задачу, но для конца винта не остроконечного, а сферического.

На рис. 3 схематически изображены основные линии экзаминатора уровня: a — разрез вертикальной плоскостью, проходящей через ось вращения винта и перпендикулярной к оси вращения штанги экзаминатора; b — проекция конца винта на штангу экзаминатора; v — увеличенная схема вертикального разреза сферического конца винта. На рис. 4 — увеличенная схема сферического конца правильного винта (ось вращения совпадает с центром сферы).

Проведем из центра O сферического конца радиус $O'E = r_0$ параллельно оси вращения винта (фиг. 4) и допустим, что длина линии VE равна длине остроконечного винта VF (рис. 2).

Введем обозначения:

D_0, x_0, x, y и θ — то же, что и для рис. 2;

r_0 — расстояние от центра сферического конца винта до его оси вращения (рис. 3);

α_0 — начальный угол штанги экзаминатора уровня к плоскости горизонта при $r_0 = 0$ (рис. 4);

α_0' — искаженный угол α_0 (искажение произошло благодаря несовпадению центра сферического конца винта с его осью вращения).

Из геометрического построения рис. 3 и 4 получаем:
 $D = D_0 + y - z$ — длина штанги экзаминатора при смещенной
 точке упора винта;

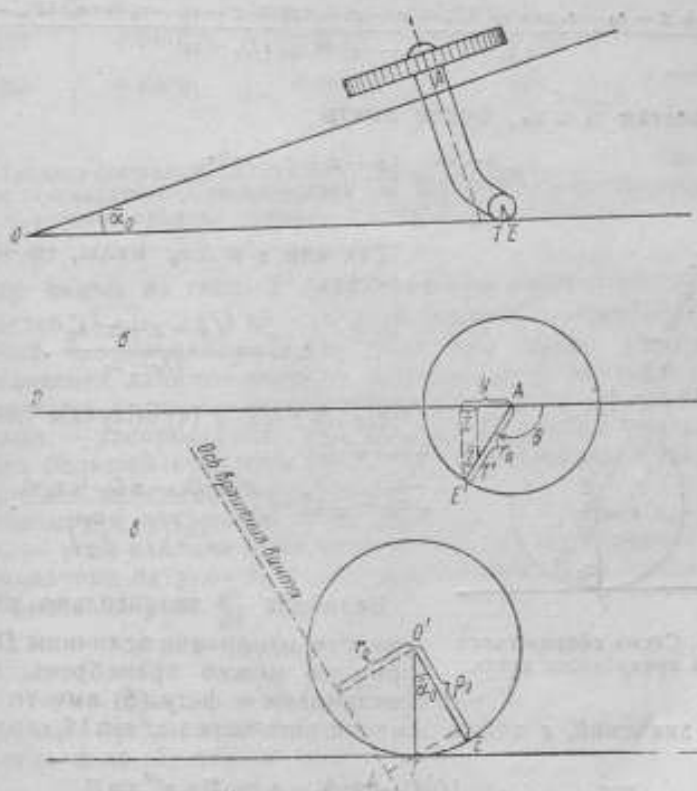


Рис. 3. Основные линии экзаминатора уровней.

$D_0 = D_0 + z_0$ — длина штанги экзаминатора в случае, когда
 ось вращения винта совпадает с центром
 сферы упора.

$$z_0 = \rho_0 \sin \alpha_0; \quad z_0 = \rho_0 \sin \alpha_0; \quad z = z_0 \cos \theta; \quad y = r_0 \cos \theta;$$

$T = x_0 + x - (\rho_0 + \rho_0 \cos \alpha_0)$ — длина винта при смещенном упоре;

$l = x_0 + x - (\rho_0 + \rho_0 \cos \alpha_0)$ — длина винта при совпадении точки
 упора с осью вращения;

$$\operatorname{tg} z_0 = \frac{x_0 + x - \rho_0 - \rho_0 \cos \alpha_0}{D_0 + y - z}; \quad \operatorname{tg} z_0 = \frac{x_0 + x - \rho_0 - \rho_0 \cos \alpha_0}{D_0 - z_0}$$

$$\frac{\sin(\alpha_0 - \alpha_0)}{\cos \alpha_0 \sin \alpha_0} = \frac{\sin \overline{\Delta \alpha_0}}{\cos \alpha_0 \sin \alpha_0} =$$

$$= \frac{(x_0 + x - \rho_0 - \rho_0 \cos \alpha_0)(D_0 + y - z) - (x_0 + x - \rho_0 - \rho_0 \cos \alpha_0)(D_0 - z_0)}{(x_0 + x - \rho_0 - \rho_0 \cos \alpha_0)(D_0 - z_0)}$$

Полагая $\alpha_0 \approx \alpha_0$, будем иметь

$$\sin \overline{\Delta \alpha_0} = \frac{(y - z + z_0) \sin 2\alpha_0}{2(D_0 - z_0)}$$

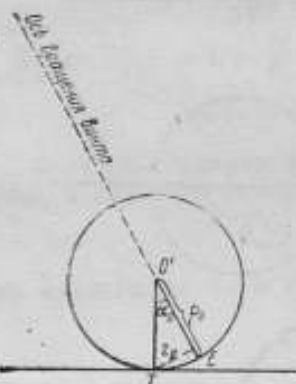


Рис. 4. Схема сферического конца правильного винта.

Так как x и $\overline{\Delta \alpha_0}$ малы, то можно написать:

$$\overline{\Delta \alpha_0}'' = \frac{(y - z + z_0) \alpha_0''}{D_0 - z_0} \quad (4)$$

Из ф-л (3) и (4) получим (полагая $\alpha_0'' \approx \alpha''$):

$$\overline{\Delta \alpha_0}'' - \Delta \alpha'' = \frac{\alpha''(z_0 D_0 - z D_0 + z_0 y)}{D_0^2 \left(1 - \frac{z_0}{D_0}\right)} \quad (5)$$

Величина $\frac{z_0}{D_0}$ значительно меньше точности измерения величины D_0 , поэтому ею можно пренебречь. После подстановки в ф-лу (5) вместо z , z_0 , у их значений, а также заменяя $\sin \alpha$ через $\alpha'' \sin 1''$, получим:

$$\overline{\Delta \alpha}'' - \Delta \alpha'' = \frac{[D_0(1 - \cos \theta) - r_0 \cos \theta] \rho_0 \alpha'' \sin 1''}{D_0^2} \quad (6)$$

Из уравнения (6) легко найти, что разность $(\overline{\Delta \alpha}'' - \Delta \alpha'')$ принимает максимальное значение при $\theta = \pi$. При этом значении уравнение (6) будет иметь вид:

$$\overline{\Delta \alpha}'' - \Delta \alpha'' = \frac{2 \rho_0 \alpha'' \sin 1''}{D_0} - \frac{r_0 \rho_0 \alpha'' \sin 1''}{D_0^2} \quad (7)$$

Отбрасывая в уравнении (7) второй член, как величину малую в сравнении с первым членом (предполагая $\rho_0 = r_0 = 1$ мм), будем иметь:

$$\overline{\Delta \alpha}'' - \Delta \alpha'' = \frac{2 \rho_0 \alpha'' \sin 1''}{D_0} \quad (8)$$

На основании ф-лы (8) составим табл. 1 максимальных разностей $(\overline{\Delta \alpha}'' - \Delta \alpha'')$ для разных значений D_0 , ρ_0 и α'' .

Таблица 1¹

D_0 мм	Значения α''			
	60	120	180	240
1055	+0,00003	+0,0001	+0,0004	+0,0005
290	+0,0001	+0,0005	+0,001	+0,002

¹ Таблица составлена для экзаминатора „SIP“, у которого $D_0=1055$ мм, и для экзаминатора „Станкоприбор“ № 167, у которого $D_0=290$ мм; r_0 и r_0' условно приняты равными 1 мм.

Как видно из табл. 1, порядок возможных максимальных разностей ($\Delta \alpha_0 - \Delta \alpha''$) значительно меньше погрешностей измерений экзаминатором. Это дает нам право дальнейшие исследования данного вопроса производить с винтами одного какого-либо типа — с остроконечными или со сферическими концами, — распространяя эти выводы на другой тип винтов. Для большей простоты выкладок в дальнейшем будем рассматривать винты остроконечные.

Обозначим начальную фазу через θ_0 , α' — через $\alpha_n + \Delta \alpha_n$, где α_n — угол наклона штанги экзаминатора до поворота винта экзаминатора на угол θ ; $\Delta \alpha_n$ — изменение угла α_n после поворота винта на угол θ .

$$\alpha_n'' = k'' P; \Delta \alpha_n'' = k'' p; \Delta \alpha'' = k'' \Delta p,$$

где k'' — цена деления барабана винта;

$P, p, \Delta p$ — углы, выраженные в делениях барабана.

Тогда ф-ла (3) примет вид:

$$\Delta p = \frac{r_0 (P + p) \cos(\theta_0 + \theta)}{D_0}. \quad (9)$$

Для случая $P=0$ (штанга экзаминатора до поворота винта на угол θ горизонтальна) ф-ла (9) будет иметь вид:

$$\Delta p = \frac{r_0 p \cos(\theta_0 + \theta)}{D_0}. \quad (10)$$

Ф-ла (9) дает возможность определить r_0 и P . В самом деле, если измерениями определить периодические ошибки, происходящие за счет несовпадения упора винта с его осью вращения, и из графика периодических ошибок взять две точки, соответствующие углам $\theta = \theta_1, \theta = \theta_2, p = p_1, p = p_2$, а также Δp , соответствующее этим двум точкам — Δp_1 и Δp_2 , получим два уравнения:

$$\Delta p_1 = \frac{r_0 (P + p_1) \cos(\theta_0 + \theta_1)}{D_0}; \quad \Delta p_2 = \frac{r_0 (P + p_2) \cos(\theta_0 + \theta_2)}{D_0}.$$

Эти два уравнения решаются однозначно относительно неизвестных r_0 и P (D_0 предполагается известным):

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{\Delta p_2 p_1 \cos(\theta_0 + \theta_1) - \Delta p_1 p_2 \cos(\theta_0 + \theta_2)}{\Delta p_1 \cos(\theta_0 + \theta_2) - \Delta p_2 \cos(\theta_0 + \theta_1)}; \\ r_0 &= \frac{D_0 [\Delta p_1 \cos(\theta_0 + \theta_2) - \Delta p_2 \cos(\theta_0 + \theta_1)]}{(p_1 + p_2) \cos(\theta_0 + \theta_1) \cos(\theta_0 + \theta_2)}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Теперь рассмотрим другой случай: площадка упора винта наклонена к плоскости горизонта под углом γ , штанга экзаминатора — попержнему под углом α' , что схематически изображено на рис. 5.

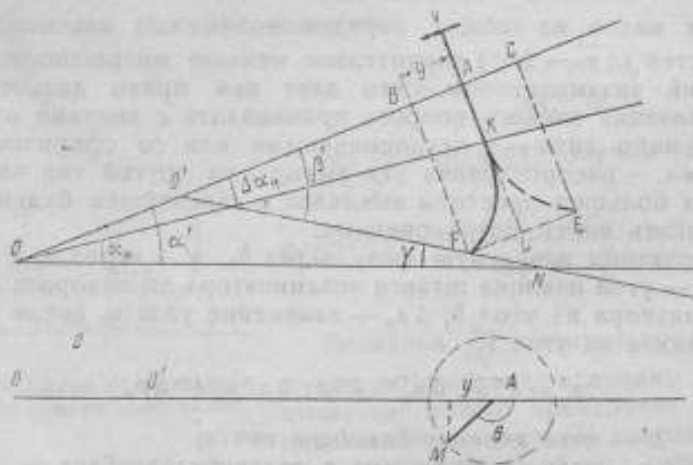


Рис. 5. Основные линии экзаминатора уровнем.

Значения величины D , D_0 , r_0 , θ , θ_0 , x_0 , x , y , α , α' , α_0 , $\Delta \alpha_n$, P , p — те же, что и в ф-лах (2) и (9).

Из геометрического построения рис. 5 следует:

$$\beta = \alpha + \gamma; \quad \beta' = \alpha' + \gamma; \quad O'B = D_0 + y - O'O; \quad y = r_0 \cos \theta;$$

$$\frac{O'O}{\sin \gamma} = \frac{D_0}{\sin \beta \cos \alpha}; \quad O'B = D_0 + r_0 \cos \theta - \frac{D_0 \sin \gamma}{\sin \beta \cos \alpha}; \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{AL}{O'A};$$

$$BF = \Delta L = x_0 + x; \quad D = D_0 + y; \quad O'A = D_0 - \frac{D_0 \sin \gamma}{\sin \beta \cos \alpha};$$

$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{BF}{O'B};$$

$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{(x_0 + x) \sin \beta' \cos \alpha'}{D_0 \sin \beta' \cos \alpha' + r_0 \sin \beta' \cos \alpha' \cos \theta - D_0 \sin \gamma};$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{(x_0 + x) \sin \beta' \cos \alpha'}{D_0 \sin \beta' \cos \alpha - D_0 \sin \gamma}; \quad \operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta' = \frac{r_0 \sin \gamma' \cos \alpha' \cos \theta}{D_0 (\sin \beta' \cos \alpha' - \sin \gamma)}$$

$$\sin(\alpha - \alpha') = \sin \Delta \alpha = \frac{r_0 \sin \beta' \cos \alpha' \cos \theta \cos \beta \sin \beta'}{D_0 (\sin \beta' \cos \alpha - \sin \gamma)} \quad (12)$$

Так как $\alpha, \alpha', \beta, \beta', \Delta \alpha$ — малые углы, а также принимая $\alpha = \alpha', \beta = \beta'$ и ограничиваясь первыми членами разложения в ряд, будем иметь:

$$\Delta \alpha'' = \frac{r_0 \beta^2 \cos \theta}{D_0^2} = \frac{r_0 (\alpha + \gamma)^2 \cos \theta}{D_0^2} \quad (13)$$

Применяя обозначения ф-лы (9) и, кроме того, полагая $\Delta \alpha'' = k'' \Delta p$ и $\gamma'' = k'' Q$, где Δp и Q — углы, выраженные в делениях барабана винта, получим ф-лу (13) в следующем виде:

$$\Delta p = \frac{r_0 (Q + P + p)^2 \cos(\theta_0 + \theta)}{D_0 (P + p)} \quad (14)$$

Как легко видеть, ф-ла (9) есть частный случай ф-лы (14), когда $Q = 0$, т. е. когда площадка упора винта горизонтальна.

Ф-ла (14) дает возможность выяснить совместное влияние Q и r_0 на периодическую ошибку винта, что нами и сделано для экзаминаторов „SIP“ и „Станкоприбор“ № 167. Результаты вычисления поправок (Δp) по аргументам Q и r_0 представлены в табл. 2.

Таблица 2

r_0 мм	Q в делениях лимба		
	60	120	180
Экзаминатор „SIP“ ($D_0 = 1055$ мм)			
0,5	-0,18	-0,58	-1,20
1,0	-0,36	-1,15	-3,40
Экзаминатор „Станкоприбор“ № 167 ($D_0 = 290$ мм)			
0,2	-0,17	-0,34	-0,55
0,4	-0,35	-0,68	-0,12

Примечание. Таблица для экзаминатора „SIP“ составлялась по формуле $\Delta p = -\frac{r_0 (Q + 15)^2}{15825}$, а для экзаминатора „Станкоприбор“ № 167 по формуле $\Delta p = -\frac{r_0 (Q + 90)^2}{26100}$, которые получаются из ф-лы (14), если положить $P = 0, p = 15$ („SIP“), $p = 90$ („Станкоприбор“ № 167), $\theta_0 = 90^\circ$, $D_0 = 1055$ мм („SIP“) и $D_0 = 290$ мм („Станкоприбор“ № 167).

Как видно из табл. 2, несовпадение упора винта с его осью вращения может вызвать настолько значительные периодические ошибки, что они могут заметно исказить результаты измерения.

Реальность наличия экзаминов с эксцентричными упорами винтов подтверждается материалами проверок экзаминов уровней, производившихся в течение ряда лет лабораторией времени Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева.

На основании данного исследования можно сделать вывод, что периодические ошибки микрометрических винтов экзаминов могут быть значительно уменьшены путем сведения к минимуму несовпадения упора винта с его осью вращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красовский Ф. Н., Данилов В. В., Руководство по высшей геодезии, ч. I, вып. 1, Изд. редбюро ГУГСК НКВД СССР, 1938.
2. Блажко С. Н., Курс практической астрономии, 1938.

Н. А. ЧЕШОКОВ

ЭТАЛОННЫЙ МЕТОД ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ. ЭТАЛОННЫЕ И ОБРАЗЦОВЫЕ ПРИБОРЫ

Измерение вязкости жидкостей широко применяется в научной работе и в различных областях промышленности. Однако отсутствие единообразия в определении постоянных приборов, применяемых для измерения вязкости, приводит к несовпадению ее значений при определении в разных лабораториях.

Химической лабораторией ВНИИМ в 1944—1950 гг. проведена большая работа по изучению различных систем вискозиметров и выбору наилучших систем и конструкций, дающих значения вязкости с наименьшей погрешностью. Уделено внимание и подбору калибровочных жидкостей. В результате были созданы группы эталонных вискозиметров, наборы образцовых приборов и разработана поверочная схема.

Из всех исследованных вискозиметров наименьшими погрешностями обладают капиллярные вискозиметры. Технические вискозиметры истечения, служащие для определения условной вязкости, сконструированные без учета физических законов, должны быть вообще изъяты из употребления. Перевод условной вязкости (например, градусов Энглера) в кинематическую носит лишь приближенный характер, а в пределах от 1,0 до 1,6 градусов Энглера, как указывает А. Ф. Добрянский [2], дает сильно искаженные результаты даже при пользовании наиболее совершенной формулой, выведенной Л. С. Блохом и А. Ф. Добрянским.

Ротационный вискозиметр не дал надежных результатов для маловязких жидкостей.

Менее воспроизводимые результаты получены на вискозиметре со скольжением шарика по стенке наклонной трубки.

Капиллярные вискозиметры, в свою очередь, обладают некоторыми погрешностями, связанными с их конструкцией. Выбор системы капиллярного вискозиметра с наименьшими погрешностями являлся одной из основных задач настоящей работы.

Для исследования были выбраны вискозиметры, предназначенные для относительных измерений, с истечением жидкости через капилляр под действием собственного веса. Основанием для исследований именно этого типа вискозиметров послужило то обстоятельство, что они компактны, работа с ними проста, и они дают вполне надежные и воспроизводимые результаты.

Из этой большой группы вискозиметров исследованы: основной капиллярный вискозиметр (рис. 1), вискозиметр

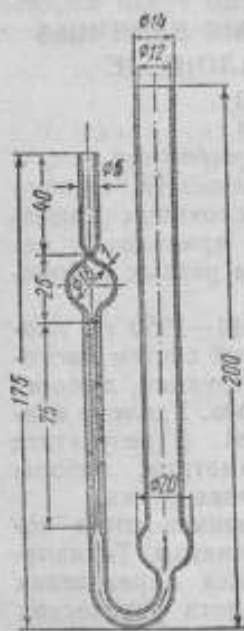


Рис. 1. Основной капиллярный вискозиметр.

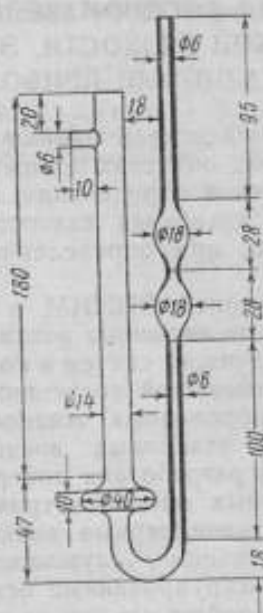


Рис. 2. Вискозиметр Пинкевича и Митрофановой.

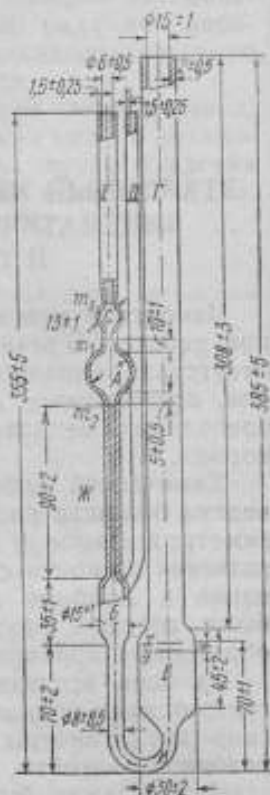


Рис. 3. Вискозиметр с висющим уровнем.

метр системы Пинкевича и Митрофановой (рис. 2), пользующийся у нас большим распространением, и мало применяемый до настоящего времени вискозиметр с висющим уровнем [1] (рис. 3).

Исследование этих систем вискозиметров показало, что при применении метода ступенчатой калировки самостоятельно для каждой системы наблюдаются некоторые расхождения в значениях вязкости одних и тех же жидкостей (табл. 1 и 2).

В табл. 1 приведены средне-арифметические значения кинематической вязкости, измеренные при 20° С на группе

Таблица 1

Жидкость	Система вискозиметра		Расхождение в %
	С висячим уровнем	Пинкевича и Митрофановой	
	Кинематическая вязкость в <i>сст</i> при 20° С		
А	3,8266	3,8210	0,15
Б	30,865	30,705	0,52
В	70,162	69,447	1,09
Г	342,699	340,416	0,67

Таблица 2

Жидкость	Тем- пера- тура °С	Система вискозиметра			Расхождение в %	
		С висячим уровнем (I)	Пинкевича и Митро- фановой (II)	Основной капилляр- ный виско- зиметр (III)	Между I и II	Между I и III
Д	20	33,370	32,846	33,475	-1,56	+0,33
	35	16,949	16,626	16,956	-1,89	+0,06
	50	9,830	9,698	9,994	-1,34	+1,67
	65	6,323	6,229	6,449	-1,49	+1,99
Е	20	116,434	114,696	116,786	-1,49	+0,29
	35	48,175	47,481	48,500	-1,45	+0,66
	50	24,212	24,011	24,495	-0,41	+1,15
	65	13,714	13,547	13,859	-0,88	+1,09

вискозиметров, в табл. 2 — на одном и том же вискозиметре для каждой жидкости, но при разных температурах. Из этих таблиц следует, что показания, полученные на вискозиметре с висячим уровнем, занимают среднее положение между показаниями, полученными на основном капиллярном вискозиметре и вискозиметре типа Пинкевича и Митрофановой. Две последние системы приборов с сообщающимися коленами обладают существенным недостатком, заключающимся в изменении высоты столба жидкости при ее истечении через капилляр. Помимо этого, в них не устраняется погрешность от неточности наполнения, так как в основном капиллярном вискозиметре объем вводимой жидкости отмеряется пипеткой,

а в вискозиметре Пинкевича и Митрофановой — трудно осуществимым всасыванием жидкости точно до определенной метки. Кроме того, при перевертывании вискозиметра Пинкевича и Митрофановой в нормальное положение часть жидкости остается на трубке, так как не представляется возможным в этот момент снять ее фильтровальной бумагой, и она попадает в вискозиметр. Погрешность увеличивается, если наполнение прибора производят при комнатной температуре, а измерение вязкости — при какой-либо иной.

Обе эти погрешности отпадают при измерении вязкости на вискозиметре с висячим уровнем (рис. 3). Первая исключается тем, что истекающая жидкость попадает в резервуар *Б*, разобренный воздушным пространством с другим коленом, поэтому гидростатический столб жидкости при работе на данном вискозиметре будет всегда один и тот же. Как следствие разобращения этих колен (*ЕБ* и *ГВ*), т. е. разобращения рабочего объема жидкости в колене *ЕБ* и оставшегося количества жидкости в трубке *И* и другом колене *ГВ*, точность наполнения прибора жидкостью не имеет значения. Поэтому, пределы наполнения вискозиметра ограничены в резервуаре *В* двумя метками *x* и *y*, указывающими минимум и максимум наполнения. Следовательно, при измерении вязкости на вискозиметре этой системы отпадает и вторая погрешность — погрешность от неточного наполнения.

Автор конструкции вискозиметра с висячим уровнем установил, что толщина слоя висячего уровня, образующегося при вытекании жидкости из капилляра *Ж* на верхней поверхности резервуара *Б*, прилегающей к капилляру, не зависит ни от плотности, ни от вязкости, ни от поверхностного натяжения жидкости, а зависит только от размеров капилляра и высоты напора [1 и 3]. Поправка на поверхностное натяжение значительно снижается при замене плоского висячего уровня висячим уровнем полусферической формы и сводится до минимума при применении вискозиметров с удлиненными капиллярами.

Поскольку вискозиметр с висячим уровнем обладает рядом преимуществ перед другими исследованными нами капиллярными вискозиметрами, дальнейшая работа проведена на вискозиметрах этой системы.

Прежде чем перейти к изложению наших исследований, необходимо остановиться на теории капиллярных вискозиметров и на погрешностях, которые могут возникнуть при измерении вязкости.

Истечение жидкости через капилляр подчиняется закону Пуазейля. Формула для вычисления кинематической вязкости, согласно этому закону, имеет следующий вид:

$$\nu = \frac{\pi g h r^4}{8 Q L} \tau, \quad (1)$$

где ν — кинематическая вязкость жидкости;
 g — ускорение силы тяжести;
 h — высота столба жидкости, под давлением которого происходит ее истечение;
 r — радиус капилляра;
 L — длина капилляра;
 Q — объем вытекающей жидкости;
 τ — время истечения этой жидкости.

Поскольку для данного прибора $\frac{\pi g h r^4}{8 Q L} = C$ является постоянной величиной, равенство (1) приводится к виду

$$\nu = C \tau.$$

Исходя из ф-лы (1), размерность кинематической вязкости в абсолютной системе единиц — $\text{см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$. Единицу кинематической вязкости принято называть стоксом (см). В практической работе пользуются величиной в сто раз меньшей — сантистоксом (ссм).

Формула Пуазейля выведена в предположении наличия ламинарного потока. Условия потока для каждой данной трубки и жидкости характеризуются числом Рейнольдса — Re , не имеющим размерности:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (2)$$

где v — средняя скорость;
 d — диаметр капилляра;
 ν — кинематическая вязкость.

Экспериментальным путем определено, что в капиллярных трубках переход ламинарного потока в турбулентный происходит тогда, когда число Re достигает значения 1400—2000, т. е. при критической скорости $v_k = \frac{1400 \nu}{d}$.

В капиллярных вискозиметрах средняя скорость движения жидкости, вычисленная по формуле $v = \frac{Q}{\pi r^2 \tau}$, невелика, так как τ — время истечения жидкости через капилляр — значительно, а Q — объем вытекающей из шарика вискозиметра жидкости — мал.

Рассмотрим самый неблагоприятный случай, который может встретиться в нашей работе. При диаметре капилляра $d = 0,05$ см, времени истечения дистиллированной воды $\tau = 100$ сек. и при объеме вытекающей жидкости $Q = 5$ мл средняя скорость v оказывается равной 30,6 см/сек, и число $Re = 1,5$.

Формула Пуазейля точна только в том случае, если жидкость покидает капилляр со скоростью, равной нулю. Так как давление столба жидкости не только преодолевает

силы трения движущейся жидкости, но и сообщает ей скорость, в ф-лу (1) должна быть введена поправка на кинетическую энергию.

Формула вязкости с учетом указанной поправки имеет следующий вид:

$$v = \frac{\pi g h r^4}{8 Q L} \tau - \frac{m Q}{8 \pi L \tau}, \quad (3)$$

где m — некоторый коэффициент, численное значение которого зависит от конструкции прибора. По вычислениям разных авторов он колеблется от 0,5 до 1,3. При определении кинематической вязкости нефтепродуктов [6] величину m принимают равной 0,56. По вычислениям химической лаборатории ВНИИМ, произведенным на основании экспериментального материала для вискозиметров с висячим уровнем, m оказалось равным 0,58. Значением $m = 0,58$ мы и будем пользоваться в настоящей работе.

Было предложено ввести в формулу Пуазейля вторую поправку, исходя из тех соображений, что в местах соединения капилляра с резервуарами возникает турбулентное движение. Эта поправка на „концевые эффекты“ сводится к фиктивному удлинению капилляра на некоторую величину $l = \pi r$. Второй член ф-лы (3) в этом случае примет следующий вид:

$$\frac{m Q}{8 \pi \tau (L + l)}. \quad (4)$$

Величина поправки l равна 1,146 r . Поправка на „концевые эффекты“, вычисленная для исследуемых нами вискозиметров, например, для прибора с диаметром капилляра в 0,55 мм и длиной в 300 мм, оказалась равной 0,11% от поправки на кинетическую энергию. Погрешность от неучета поправки на кинетическую энергию при измерении вязкости была равна 0,28%. Следовательно, погрешность от неучета поправки на „концевые эффекты“ могла составить 0,0003%. Вследствие малости этой величины, лежащей далеко за пределами точности, которая возможна при измерении вязкости, поправкой на „концевые эффекты“ мы будем пренебрегать.

Капилляр по всей своей длине в редких случаях бывает строго цилиндричен. Однако в вискозиметрах, измеряющих вязкость относительным методом, некоторая неточность в диаметре капилляра, возможная эллиптичность и конусность его учитываются постоянной прибора и не будут влиять на вязкость, поэтому вводить поправку на неправильную форму капилляра не следует.

Вернемся теперь к ф-ле (3).

Обозначив в ней сочетания величин $\frac{\pi g h r^4}{8 Q L}$ и $\frac{m Q}{8 \pi L}$, не зависящих от рода жидкости, соответственно через постоянные C и K , придем к формуле:

$$v = C \tau - \frac{K}{\tau} = C \left(\tau - \frac{K}{C \tau} \right). \quad (5)$$

Произведя надлежащие подстановки размерностей C и K , легко убедиться, что выражение $\frac{K}{C\tau}$ имеет размерность времени и уменьшается с ростом времени истечения τ . Это и позволяет величину $\frac{K}{C\tau}$ обозначить через $\Delta\tau$ и привести выражение вязкости к виду:

$$\nu = C(\tau - \Delta\tau). \quad (6)$$

Расшифруем физический смысл этой формулы. Предположим, что жидкость невесома, но обладает вязкостью. Пусть в этом случае объем жидкости, находящейся под некоторым давлением, вытек бы из капилляра за время τ_0 . Но так как жидкость весома, та же работа сил давления расходуется не только на преодоление сил трения, но и на сообщение, выходящей из капилляра жидкости, скорости, а значит, и кинетической энергии. В силу этого время истечения реальной весомой жидкости τ будет больше τ_0 , т. е. $\tau = \tau_0 + \Delta\tau$, откуда $\tau_0 = \tau - \Delta\tau$. Следовательно, формула $\nu = C\tau_0 = C(\tau - \Delta\tau)$ дает выражение вязкости, не искаженное затратой работы на создание кинетической энергии вытекающей жидкости.

При использовании вискозиметра для относительных измерений нет необходимости определять постоянную прибора C на основании измерений его параметров. Проще определить C , применяя жидкость с известной вязкостью.

Воспользовавшись предыдущей формулой и определив предварительно время истечения жидкости τ , найдем, что постоянная прибора с поправкой на кинетическую энергию равна:

$$C = \frac{\nu}{\tau - \Delta\tau} [\text{см}^2] \cdot [\text{сек}^{-2}] \text{ или } \text{ст/сек}. \quad (7)$$

Для подсчета поправки $\Delta\tau$ необходимо воспользоваться ф-лой (3), из которой следует, что $\Delta\tau$ зависит от объема Q , длины капилляра L , значения m , равного, как уже указывалось, 0,58, и от измеренного опытным путем времени истечения τ .

При подсчете поправки отпадает надобность в весьма точных измерениях названных выше величин, что упрощает работу.

Определив по какой-либо жидкости с известной вязкостью постоянную прибора C , при нахождении вязкости иных жидкостей вновь пользуются формулой,

$$\nu = C(\tau - \Delta\tau),$$

в которую подставляется время истечения исследуемой жидкости и вносится поправка $\Delta\tau$, как это было указано выше.

В развернутом виде формула для определения вязкости любой жидкости имеет вид:

$$\nu_x = \frac{\nu_x}{\tau_x - \Delta\tau_x} (\tau_y - \Delta\tau_y). \quad (8)$$

Здесь индекс „х“ означает жидкость, по которой определялась постоянная прибора $C = \frac{\nu_x}{\tau_x - \Delta\tau_x}$, а индекс „у“ означает жидкость, вязкость которой необходимо найти.

Эта формула содержит поправки на кинетическую энергию и при определении постоянной прибора и при измерении вязкости исследуемой жидкости.

Поправка на кинетическую энергию, как это следует из ф-лы (3), зависит от длины капилляра и времени истечения жидкости. С увеличением длины капилляра поправка уменьшается. Это видно из табл. 3, 4, 5, в которых приведены поправки на кинетическую энергию при длине капилляра в 300, 200, 100, 50 и 25 мм. В табл. 3 приводится определение постоянных вискозиметра по дистиллированной воде. В табл. 4 — вязкость этилового спирта, и в табл. 5 — вязкость смеси керосина с трансформаторным маслом.

Таблица 3

Дистиллированная вода. Определение постоянных вискозиметров

<i>L</i> мм	τ сек.	<i>C</i> сст/сек	$\Delta\tau$ сек.	<i>C</i> ₁ сст/сек	Расхождение между <i>C</i> и <i>C</i> ₁ в %
300	154,90	0,006500	0,46	0,006519	0,29
200	177,21	0,005681	0,69	0,005704	0,40
100	150,10	0,006707	1,37	0,006770	0,94
50	120,09	0,008384	2,75	0,008580	2,34
25	57,64	0,01747	5,50	0,01931	10,53

Таблица 4

<i>L</i> мм	τ сек.	ν сст	ν_1 сст	$\Delta\tau$ сек.	ν_2 сст	Расхождение между ν и ν_2 в %
300	277,20	1,8018	1,8071	0,26	1,8054 ¹	0,20
200	316,91	1,8004	1,8076	0,38	1,8055	0,28
100	267,41	1,7935	1,8103	0,77	1,8052	0,65
50	211,91	1,7766	1,8182	1,54	1,8050	1,57
25	96,80	1,6853	1,8692	3,08	1,8097	7,38

¹ При измерении на трех вискозиметрах средне-арифметическое значение вязкости равно 1,8048.

Таблица 5

<i>L</i> мм	τ сек.	ν сст	ν_1 сст	$\Delta\tau$ сек.	ν_2 сст	Расхождение между ν и ν_2 в %
300	627,52	4,0789	4,0908	0,11	4,0901 ¹	0,27
200	716,80	4,0721	4,0886	0,17	4,0877	0,38
100	604,20	4,0524	4,0904	0,34	4,0881	0,88
50	477,20	4,0008	4,0944	0,69	4,0884	2,19
25	214,00	4,7386	4,1323	1,48	4,1038	9,77

¹ При измерении на трех вискозиметрах средне-арифметическое значение вязкости равно 4,0876.

Следовательно, для получения величин вязкости с наименьшими погрешностями необходимо применять вискозиметры с удлиненными, по сравнению с применяемыми в повседневной работе (65—90 мм), капиллярами.

В табл. 3, 4 и 5 приняты следующие обозначения:

L — длина капилляра;

τ — наблюдаемое время истечения;

$C = \frac{\nu_0}{\tau}$ — постоянная вискозиметра, вычисленная по воде без введения поправки на кинетическую энергию;

$C_1 = \frac{\nu_0}{\tau - \Delta\tau}$ — то же, но с введением поправки;

$\Delta\tau$ — поправка на кинетическую энергию;

$\nu = C\tau$ — кинематическая вязкость, вычисленная без учета поправок при определении постоянной и вязкости;

$\nu_1 = C_1\tau$ — то же, с учетом поправки только при определении постоянной;

$\nu_2 = C_1(\tau - \Delta\tau)$ — то же, но с учетом поправок при определении постоянной и вязкости.

Из рассмотренной табл. 4 и 5 следует:

1. Неисправленная вязкость ν понижается с уменьшением длины капилляра.

2. С введением одной только поправки в постоянную прибора вязкость ν_1 увеличивается с уменьшением длины капилляра.

3. Введение двух поправок: поправки на постоянную прибора и на кинетическую энергию испытуемой жидкости заметно стабилизирует значения ν_2 .

Если проследить за изменением чисел вязкости при постоянстве длины капилляра, оказывается, что $\nu_1 > \nu_2 > \nu$.

Из этих сопоставлений необходимо сделать следующий вывод: для получения значений вязкости, исправленной на кинетическую энергию, поправку на кинетическую энергию необходимо вводить и в величину постоянной прибора и в величину вязкости исследуемой жидкости.

Из ф-л (5) и (6), следует, что поправка на кинетическую энергию $\Delta\tau = \frac{K}{C\tau}$ зависит от величины постоянной. Эта поправка увеличивается с уменьшением постоянной или, иначе говоря, с уменьшением диаметров капилляров. Величины поправок для вискозиметров с длиной капилляра в 300 мм и постоянными 0,005; 0,05 и 0,5 *сст/сек*, зависящие от времени истечения жидкости, приведены в табл. 6. Из этой таблицы видно, что наиболее существенное значение имеет поправка при самой малой постоянной *C*.

Таблица 6

τ сек.	$\Delta\tau$ сек. при значениях <i>C</i>		
	0,005 <i>сст/сек</i>	0,05 <i>сст/сек</i>	0,5 <i>сст/сек</i>
100	0,92	0,09	0,01
200	0,46	0,05	0,005
300	0,31	0,03	0,003
400	0,23	0,02	—
500	0,18	0,02	—
600	0,15	0,01	—
700	0,13	0,01	—
800	0,11	0,01	—
900	0,10	0,01	—
1000	0,09	0,01	—
1200	0,08	—	—
1400	0,07	—	—
1600	0,06	—	—
1800	0,05	—	—
2000	0,05	—	—

К погрешностям вызываемым несовершенством прибора, может быть отнесена возможная погрешность от неполного опорожнения рабочего измерительного резервуара от метки m_1 до метки m_2 (рис. 3) при вытекании из него жидкости. Однако скорость вытекания зависит от вязкости жидкостей: менее вязкая вытекает быстро, более вязкая — медленно; поэтому оставшийся на стенках слой жидкости как показали опыты (табл. 7), практически не зависит от вязкости. В опытах 1, 2, 3 (табл. 7) погрешность, вызванная неполным

опорожнением измерительного резервуара, равна соответственно 0,003, 0,01 и 0,02%.

Таблица 7

№ опыта	Вязкость жидкости ν сст	Плотность ρ г/см ³	Время истечения τ сек.	Количество жидкости, приставшей к стенкам	
				Вес г	Объем мл
1	1,0068	0,9982	155	0,0056	0,0056
	11,481	0,8592	1766	0,0046	0,0054
2	11,481	0,8592	215	0,0147	0,0171
	97,461	0,8921	1831	0,0159	0,0178
3	97,461	0,8921	197	0,0449	0,0503
	599,34	0,9150	1213	0,0472	0,0516

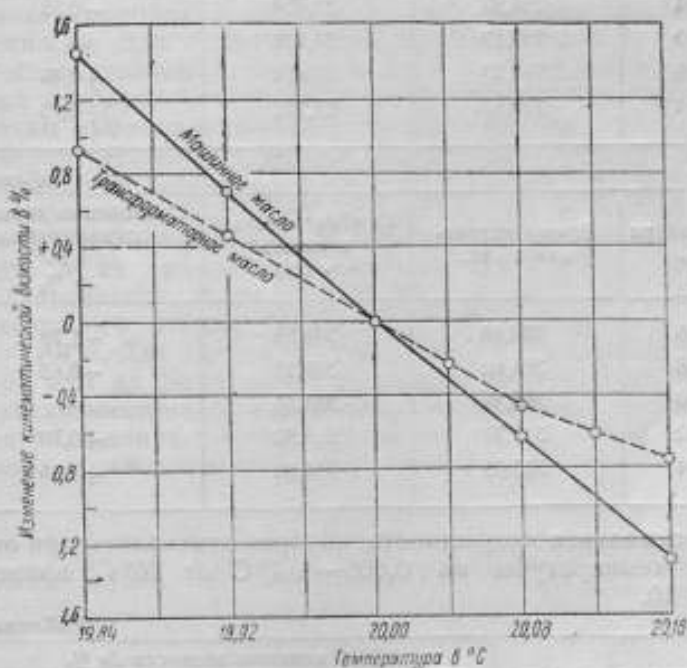


Рис. 4. Изменение вязкости в зависимости от температуры при небольшом отклонении ее от 20° С.

При измерении вязкости наиболее существенной погрешностью является погрешность, вызванная колебаниями температуры во время опыта. Известно, что вязкость в сильной степени зависит от температуры. Так, например, вязкость минеральных масел при отклонении температуры от нормальной (20° С) на 1° меняется, в зависимости от степени их вязкости, на 4—12%.

Для выяснения погрешности измерений вязкости при отклонении температуры от нормальной (20°C) на сотые доли градуса, были проведены опыты с двумя маслами: трансформаторным и машинным. Результаты опытов приведены в табл. 8 (трансформаторное масло), табл. 9 (машинное масло) и на рис. 4.

Таблица 8

Температура $t^{\circ}\text{C}$	Время истечения τ сек	Кинематическая вязкость ν <i>сст</i>	Отклонения вязкости от измеренной при 20°C $\Delta\nu$ %
20,16	255,24	31,241	-0,75
20,12	255,60	31,285	-0,61
20,08	256,00	31,334	-0,46
20,04	256,57	31,404	-0,23
20,00	257,17	31,478	-
19,92	258,37	31,624	+0,46
19,84	259,57	31,771	+0,93

Таблица 9

Температура $t^{\circ}\text{C}$	Время истечения τ сек	Кинематическая вязкость ν <i>сст</i>	Отклонения вязкости от измеренной при 20°C $\Delta\nu$ %
20,16	304,60	346,88	-1,29
20,08	306,63	349,19	-0,63
20,00	308,58	351,41	-
19,92	310,77	353,90	+0,70
19,84	313,05	356,50	+1,45

Максимальная погрешность, которая отмечалась при отклонениях температуры на $0,005 - 0,1^{\circ}\text{C}$ от 20°C , приведена в табл. 10.

Таблица 10

Отклонение темпера- туры от 20°C	Изменение вязкости $\Delta\nu$ %	
	Трансформаторное масло $\nu \approx 31$ <i>сст</i>	Машинное масло $\nu \approx 351$ <i>сст</i>
$\pm 0,005^{\circ}$	$\pm 0,03$	$\pm 0,04$
$\pm 0,01^{\circ}$	$\pm 0,06$	$\pm 0,08$
$\pm 0,02^{\circ}$	$\pm 0,11$	$\pm 0,16$
$\pm 0,05^{\circ}$	$\pm 0,29$	$\pm 0,41$
$\pm 0,1^{\circ}$	$\pm 0,56$	$\pm 0,84$

Колебания температуры во время опыта, а также ошибки при определении моментов прохождения мениска жидкости через кольцевые метки m_1 и m_2 создадут погрешность в измерении времени истечения жидкости.

При измерениях мы пользовались секундомерами с ценой деления 0,1 и 0,2 сек.; погрешность отсчета времени составляла 0,05 и 0,1 сек. При ходе секундомера в течение 2000 сек., максимальная погрешность секундомера оказалась равной 0,01%.

Кроме этих погрешностей возможны промахи, которые могли произойти от плохо вымытого и высушенного прибора, невертикальности его в рабочем положении, попадания пыли, применения нефильтованной калибровочной жидкости и др. В нашей работе они не имели места.

В результате проделанной работы установлены тип измерительного прибора и длина капилляра, дающие наименьшие погрешности. Для осуществления эталонного метода, а также в качестве эталонных вискозиметров и образцовых измерительных приборов 1-го разряда были выбраны вискозиметры с висязим уровнем и длиной капилляра 300 мм.

В основу эталонного метода для воспроизведения единицы кинематической вязкости в абсолютной системе единиц взята дистиллированная вода. Вязкость воды при 20° С, согласно работе Э. П. Хальфина [5], как наиболее вероятное значение, принята нами равной $0,010068 \text{ см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$ или стокса^1 . Дистиллированная вода, перегнанная дважды в установке из кварцевого стекла, имела электропроводность, равную $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ ом}^{-1}$. Для охвата интервала вязкости жидкостей при 20° С от 0,01 до 10 *ст* нами применены три группы эталонных вискозиметров с различными диаметрами капилляров.

Для повышения точности измерений число вискозиметров, входящих в каждую группу, было доведено до трех (табл. 11).

Таблица 11

Индекс группы	№ вискозиметра	Номинальный диаметр капилляра в мм
А	1, 2, 3	0,55
Б	4, 5, 6	0,95
В	7, 8, 9	1,75

Для определения постоянной прибора и вязкости жидкостей проводилось по 10 измерений времени истечения и подсчитывалось τ среднее.

¹ Вязкость воды определена, по данным Э. П. Хальфина, с максимальной возможной погрешностью в $\pm 0,2\%$.

Для определения постоянных вискозиметров пользовались методом ступенчатой калибровки. Исходной жидкостью была дистиллированная вода, вязкость которой принималась равной $0,010068 \text{ см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$.

Постоянные приборов группы А определялись по воде, и затем на этих приборах измерялась вязкость более вязкой жидкости I:

$$\nu_I = \frac{\nu_1 + \nu_2 + \nu_3}{3}.$$

Затем по жидкости I определялись постоянные приборов группы Б, и на них же измерялась вязкость еще более вязкой жидкости II:

$$\nu_{II} = \frac{\nu_4 + \nu_5 + \nu_6}{3}.$$

По жидкости II устанавливались постоянные приборов группы В.

Подсчеты C и ν велись по формулам

$$C_x = \frac{\nu_x}{\tau_x - \Delta\tau_x}$$

и

$$\nu_y = \frac{\nu_x}{\tau_x - \Delta\tau_x} (\tau_y - \Delta\tau_y),$$

где во всех случаях индекс „х“ относился к жидкости, служившей для определения постоянной прибора, а индекс „у“ — к исследуемой на данном приборе жидкости. Схема калибровки эталонных вискозиметров дана на рис. 5.

При изготовлении вискозиметров капилляры были тщательно просмотрены. Диаметры капилляров измерены специальными калибрами, а объемы рабочего измерительного расширения — при помощи наполнения ртутью и взвешивания. Измеренные объемы расширений от метки m_1 до метки m_2 оказались равны 6 мл.

Для снижения погрешности от колебаний температуры все измерения проводились при температуре 20°C с точностью $0,01^\circ\text{C}$. Постоянство температуры достигалось применением двух термостатов: рабочего и вспомогательного. В рабочем термостате помещали измерительные приборы и термометр с наименьшим подразделением шкалы $0,02^\circ\text{C}$. Вспомогательный термостат был снабжен контактным термометром, контрольным термометром, мешалкой, змеевиком для охлаждения жидкости этого термостата водопроводной водой и насосом для перекачивания жидкости в рабочий термостат.

Обратное поступление жидкости из рабочего термостата во вспомогательный происходило при помощи сифона.

Вертикальность капилляра проверялась по отвесу в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Исходя из размеров эталонных вискозиметров (объема измерительного расширения и длины капилляра), вычисление поправки на кинетическую энергию велось по формуле:

$$\Delta \tau = \frac{0,46}{C \tau} = \frac{0,46}{v}, \quad (9)$$

полученной с учетом значения K (см. стр. 58).

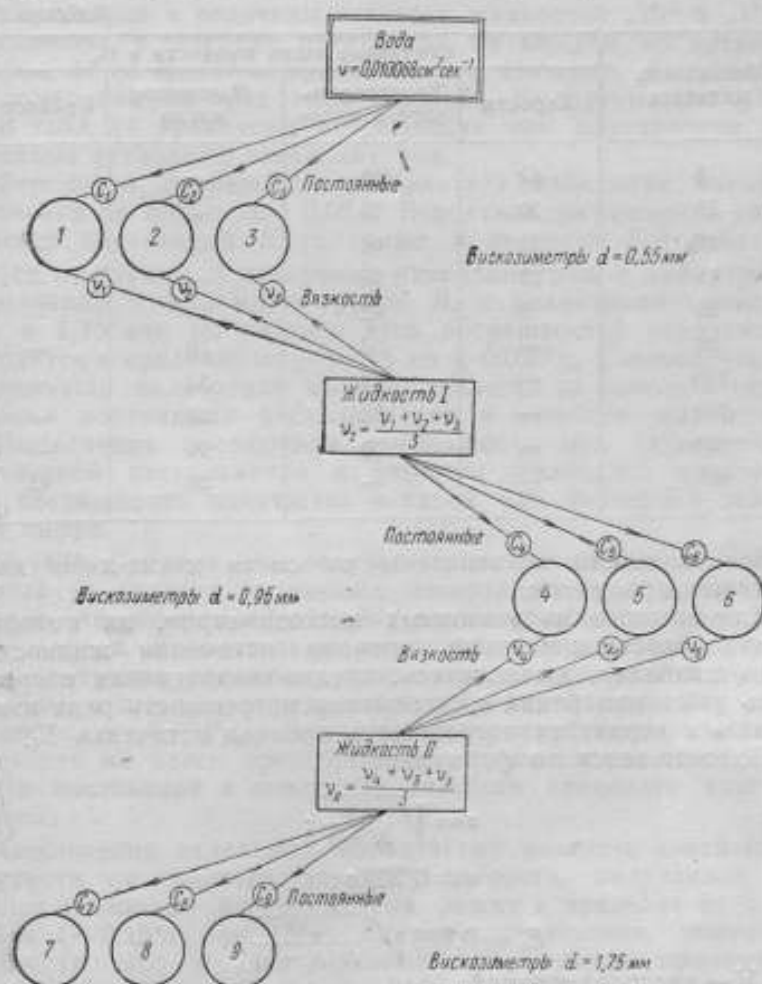


Рис. 5. Схема определения постоянных эталонных вискозиметров.

Исправленное время истечения жидкости через капилляр подсчитывалось по формуле:

$$\tau' = \tau - \Delta \tau, \quad (10)$$

где τ — наблюдаемое время истечения.

Для определения постоянных эталонных вискозиметров, в качестве жидкостей I и II нами взяты жидкости с примерной вязкостью в 10 и 100 *сст*, которые в дальнейшем изложении будут называться как жидкости „10“ и „100“. Составы этих жидкостей, а также других, вязкость которых измерялась на группах эталонных вискозиметров, приведены в табл. 12.

Таблица 12

Обозначение жидкости	Составные части жидкости в %			
	Керосин	Трансформаторное масло	Машинное масло	Брайтсток
5	62	38	—	—
10	30	70	—	—
10а	32	68	—	—
15	22	78	—	—
20	8	92	—	—
50	—	72	28	—
100	—	48	52	—
140	—	32	68	—
300	—	10	90	—
600	—	—	55	45

Все жидкости изготовлены из смеси каких-либо двух нефтяных продуктов.

Для каждого из эталонных вискозиметров, на которых производилось измерение времени истечения жидкостей через капилляр, вычислялись: средне-квадратичная погрешность ряда измерений σ , вероятная погрешность ряда измерений ϵ и вероятная погрешность времени истечения E_v .

Подсчет велся по формулам:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{N-1}}; \quad (11)$$

$$\epsilon = 0,703 \sigma; \quad (12)^1$$

$$E_v = 0,703 \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{N(N-1)}}; \quad (13)$$

где N — число измерений;

δ — остаточная погрешность одного измерения.

При определении постоянных вискозиметров и вязкости жидкостей методом ступенчатой калибровки происходит на-

¹ 0,703 = t_{α} при $\alpha = 0,5$ и $K = N - 1 = 9$ взято из таблиц, помещенных в книге В. И. Романовского [4]. При $K = 7$ и $K = 11$, t_{α} равно соответственно 0,711 и 0,697.

копление погрешностей. С увеличением количества операций численное значение погрешности возрастает. Накопленные погрешности вычисляли как корень квадратный из суммы квадратов погрешностей. Вероятная погрешность результата определения постоянной вискозиметра обозначена через E_c , а измерения вязкости на нем — E_v .

В табл. 13 приведены значения постоянных эталонных вискозиметров и величины вязкости жидкостей „10“ и „100“. Отклонение в вязкости, измеренной на каждом из вискозиметров, от ее средне-арифметического значения, выведенного из измерений на трех вискозиметрах, не превышало 0,1%.

В табл. 14 приведены погрешности при определении постоянных эталонных вискозиметров.

Вероятная погрешность результата измерения времени истечения не превышала 0,02%. Вероятная погрешность определения постоянной E_c (а также и вязкости E_v) увеличивается от группы А эталонных вискозиметров, с диаметрами капилляров в 0,55 мм, к группе В, с диаметрами капилляров в 1,75 мм, но разница этих погрешностей невелика и находится в пределах от $\pm 0,015$ до $\pm 0,030\%$. Следовательно, ступенчатая калибровка мало отражается на точности определения постоянных вискозиметров и вязкости жидкостей.

Вычисление абсолютной погрешности при определении постоянной вискозиметра и вязкости жидкостей показало, что погрешность получается в пятой или четвертой значащей цифре.

В табл. 15 приведены величины вязкости жидкостей, измеренных на группах эталонных вискозиметров и предназначенных для проверки образцовых капиллярных вискозиметров 1-го разряда. Относительная вероятная погрешность результата измерения вязкости укладывается примерно в те же пределы, что и при определении постоянной (табл. 14), и не превосходит 0,031%. Возможностью изменения вязкости жидкости мы здесь пренебрегаем, так как операции определения постоянной и измерения вязкости следовали друг за другом.

Отклонения отдельных определений вязкости какой-либо жидкости от среднего значения вязкости, полученной на группе эталонных вискозиметров, лежит в пределах от 0 до 0,28% (—0,15%; +0,13%). Среднее отклонение, учитывая жидкости „10“ и „100“, данные для которых приведены в табл. 14, составляет около 0,01% (—0,05%; +0,045%).

В табл. 15 приведена вязкость жидкости „10а“, измеренная на двух группах эталонных вискозиметров с диаметрами капилляров 0,55 и 0,95 мм. Величины вязкости получились близкими на каждой из этих групп. Отклонение средних значений вязкости, полученной на группах А и В, от средне-арифметического значения вязкости, выведенной из показаний

№ вискози- метра	Диаметр капилляра d мм	Операции	Поправка на кинети- ческую энергию Δt сек	Исправлен- ное время истечения t сек	Постоянная вискози- метра C сст/сек	Вязкость жидкости η сст	Средне- арифмети- ческое значение вязкости η сст	Отклонение η от $\bar{\eta}$ в %
1	0,55	Определение постоян- ной по дистиллирован- ной воде	0,46	167,72	0,006003	—	1,0068	—
2			0,46	154,44	0,006519	—		—
3			0,46	127,98	0,007867	—		—
1	0,55	Определение вязкости по жидкости „10“	0,04	1956,90	0,006003	11,747	11,749	-0,017
2			0,04	1801,66	0,006519	11,745		-0,042
3			0,04	1494,38	0,007867	11,756		+0,059
4	0,95	Определение постоянной по жидкости „10“	0,04	229,92	0,05110	—	11,749	—
5			0,04	200,90	0,05848	—		—
6			0,04	220,54	0,05328	—		—
4	0,95	Определение вязкости по жидкости „100“	0,00	2071,61	0,05110	105,86	105,81	+0,044
5			0,00	1809,04	0,05848	105,79		-0,022
6			0,00	1985,52	0,05328	105,79		-0,022
7	1,75	Определение постоянной по жидкости „100“	0,00	155,75	0,6794	—	105,81	—
8			0,00	213,66	0,4952	—		—
9			0,00	213,44	0,4958	—		—

Таблица 14

Операции	№ вискозиметра	τ	ε	E _τ		E _ε		E _ν	
				абс.	в %	абс.	в %	абс.	в %
Определение постоянной по дистиллированной воде	1	0,114	0,080	0,025	0,015	0,00000090	0,0150	—	—
	2	0,105	0,074	0,023	0,015	0,00000098	0,0150	—	—
	3	0,117	0,082	0,026	0,020	0,00000016	0,0202	—	—
Определение вязкости жидкости „10“	1	0,212	0,149	0,047	0,002	—	—	0,0018	0,0151
	2	0,400	0,281	0,087	0,005	—	—	0,0019	0,0158
	3	0,220	0,155	0,049	0,003	—	—	0,0024	0,0204
Определение постоянной по жидкости „10“	4	0,158	0,111	0,035	0,015	0,0000012	0,0228	—	—
	5	0,117	0,082	0,026	0,013	0,0000013	0,0214	—	—
	6	0,092	0,065	0,020	0,009	0,0000010	0,0194	—	—
Определение вязкости жидкости „100“	4	0,301	0,268	0,085	0,005	—	—	0,025	0,0233
	5	0,285	0,207	0,066	0,004	—	—	0,023	0,0217
	6	0,301	0,212	0,067	0,003	—	—	0,021	0,0197
Определение постоянной по жидкости „100“	7	0,071	0,050	0,016	0,010	0,000016	0,0238	—	—
	8	0,097	0,068	0,021	0,010	0,000012	0,0238	—	—
	9	0,220	0,154	0,044	0,021	0,000015	0,0300	—	—

Таблица 15

Наименование жидкости	№ виско- зиметра	$\Delta \tau$ сек.	τ' сек.	v_1 см/сек.	E_v абс.	E_v в %	v см/сек.	Отклоне- ния от v	
								v_1	v_2
Керосин	1	0,19	396,71	2,3815	0,00044	0,0186	2,3850	-	-0,147
	2	0,19	366,32	2,3880	0,00040	0,0169		+0,125	
	3	0,19	303,25	2,3856	0,00050	0,0211		+0,025	
5	1	0,08	960,81	5,7677	0,0011	0,0192	5,7732	-	-0,095
	2	0,08	886,67	5,7802	0,0009	0,0152		+0,121	
	3	0,08	773,69	5,7719	0,0012	0,0208		-0,022	
10а	1	0,04	1812,55	10,881	0,0017	0,0154	10,892	-	-0,082
	2	0,04	1672,24	10,901	0,0016	0,0151		+0,101	
	3	0,04	1384,71	10,894	0,0024	0,0224		+0,037	
	4	0,04	213,10	10,889	0,0032	0,0294	10,888	-	-0,009
	5	0,04	186,25	10,892	0,0038	0,0346		+0,019	
	6	0,04	204,27	10,884	0,0026	0,0238		-0,055	
15	4	0,03	277,79	14,195	0,0038	0,0268	14,195	-	0,000
	5	0,03	242,92	14,206	0,0032	0,0228		+0,077	
	6	0,03	266,17	14,184	0,0031	0,0219		-0,077	
20	4	0,02	484,15	24,740	0,0059	0,0240	24,736	-	+0,016
	5	0,02	422,80	24,725	0,0062	0,0250		-0,044	
	6	0,02	464,38	24,742	0,0057	0,0205		+0,024	
50	4	0,01	1110,11	56,727	0,013	0,0229	56,726	-	+0,002
	5	0,01	970,19	56,737	0,014	0,0239		+0,019	
	6	0,01	1064,43	56,713	0,011	0,0195		-0,023	
140	7	0,00	200,05	135,91	0,050	0,0297	135,98	-	+0,051
	8	0,00	274,51	135,94	0,038	0,0280		+0,029	
	9	0,00	274,64	136,10	0,042	0,0308		-0,088	
300	7	0,00	417,80	283,85	0,071	0,0251	283,99	-	-0,049
	8	0,00	573,65	284,07	0,073	0,0258		+0,026	
	9	0,00	572,91	284,05	0,086	0,0304		+0,021	
600	7	0,00	908,62	617,32	0,16	0,0264	617,32	-	0,000
	8	0,00	1245,96	617,00	0,16	0,0256		-0,052	
	9	0,00	1245,74	617,64	0,19	0,0305		+0,052	

шести вискозиметров, входящих в эти две группы, составляет $\pm 0,018\%$. Такое малое отклонение вязкости указывает на надежность измерения вязкости при применении не одного, а трех приборов в каждой из групп эталонных вискозиметров.

Последнее подтверждается также и малым расхождением значений постоянных C образцовых капиллярных вискозиметров 2-го разряда (табл. 16), определенных по двум жидкостям, вязкость которых измерена на группах эталонных вискозиметров (величины вязкости приведены в табл. 15). Отдельные значения C при этом отклонялись от среднего арифметического на $\pm 0,002\%$ и на $\pm 0,088\%$, т. е. меньше $\pm 0,1\%$.

Для осуществления поверки рабочих капиллярных вискозиметров нами предусмотрены образцовые измерительные приборы 1-го и 2-го разряда. В качестве образцовых капиллярных вискозиметров 1-го разряда предложены вискозиметры той же системы и размеров, что и эталонные вискозиметры. Набор образцовых приборов 1-го разряда, в отличие от эталонных, состоит не из девяти, а всего лишь из трех приборов с разными диаметрами капилляров (0,55; 0,95 и 1,75 мм). Прежде чем измерять вязкость, необходимо определить постоянные вискозиметров. Поэтому вероятная погрешность результата измерения вязкости на образцовых приборах 1-го разряда будет равна корню квадратному из суммы квадратов погрешностей при определении постоянной и вязкости. Согласно табл. 14 и 15, она может достигнуть $\pm 0,046\%$.

В качестве образцовых капиллярных вискозиметров 2-го разряда также выбраны капиллярные вискозиметры с висязим уровнем, но с длиной капилляра в 90 мм. Набор состоит из шести приборов с диаметрами капилляров от 0,5 до 2,5 мм.

Последовательность поверки вискозиметров следующая: Эталонный метод воспроизведения единицы кинематической вязкости \rightarrow Образцовые капиллярные вискозиметры 1-го разряда \rightarrow Образцовые капиллярные вискозиметры 2-го разряда \rightarrow Рабочие капиллярные вискозиметры.

Поверка заключается в определении постоянной вискозиметра по двум жидкостям, вязкость которых измерена на приборах соответствующего класса точности.

Образцовыми измерительными приборами 1-го разряда предполагается снабдить институты и управления 1-го разряда системы Комитета по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, а образцовыми измерительными приборами 2-го разряда — все остальные управления.

Необходимо указать, что при применении вискозиметров (образцовых 2-го разряда и рабочих) с диаметрами капилляров до 3,5 мм и с постоянной около 10 *сст/сек* можно расширить диапазон измерения вязкости до 10000 *сст*, при максимальном времени истечения 1000 сек.

Таблица 16

№ вискозиметра	d мм	Q мл	Наименование жидкости	$\Delta \tau$ сек.	τ' сек.	C сст/сек	$C_{ср}$ сст/сек	Отклонение C от $C_{ср}$ в %
34	0,60	5,50	Дистиллиро- ванная вода Керосин	1,40	110,60	0,0091031	0,0091058	- 0,030 + 0,015 + 0,015
				1,40	110,55	0,0091672		
				0,59	261,88	0,0091072		
42	0,80	5,80	5	0,26	242,33	0,023824	0,023818	± 0,019
			10а	0,13	457,32	0,023813		
41	1,00	5,45	20	0,06	284,48	0,086952	0,086941	± 0,011
			50	0,02	652,54	0,086931		
16	1,20	5,55	20	0,06	200,80	0,12319	0,12307	± 0,093
			50	0,03	461,33	0,12296		
30	1,50	5,90	50	0,03	224,77	0,25237	0,25244	± 0,027
			100	0,01	419,04	0,25251		
10	1,79	5,90	100	0,01	196,37	0,53883	0,53882	± 0,002
			300	0,00	526,99	0,53881		
44	2,10	5,50	300	0,00	285,75	0,99384	0,99412	± 0,028
			600	0,00	620,79	0,99441		
11	2,16	6,10	300	0,00	248,47	1,14295	1,14261	± 0,029
			600	0,00	540,43	1,14228		
9	0,55	6,25	Дистиллиро- ванная вода	1,59	190,98	0,0054712	0,0052709	± 0,006
				1,59	191,02	0,0052706		
3	0,55	6,25	Дистиллиро- ванная вода	1,59	211,43	0,0047619	0,0047633	± 0,030
				1,59	211,30	0,0047648		
5	0,95	6,25	10	0,15	248,19	0,043878	0,043869	± 0,021
			15	0,10	323,64	0,043860		
7	0,95	6,25	10	0,15	238,22	0,045714	0,045718	± 0,008
			15	0,10	310,46	0,045722		

№ вискозиметра	d мм	Q мл	Наименование жидкости	$\Delta \tau$ сек	τ' сек	C см ³ /сек	$C_{ср}$ см ³ /сек	Отклонение C от $C_{ср}$ в %
8	0,95	6,25	10	0,15	229,33	0,047486	0,047483	± 0,006
			15	0,10	298,96	0,047481		
6	1,75	6,25	100	0,02	201,82	0,52428	0,52438	± 0,019
			300	0,00	541,47	0,52448		
1	1,75	6,25	100	0,02	219,77	0,48146	0,48142	± 0,008
			300	0,00	539,95	0,48138		
2	1,75	6,25	100	0,02	233,78	0,45260	0,4530	± 0,088
			300	0,00	626,37	0,45339		

Выводы

Выбрана система капиллярных вискозиметров для групп эталонных вискозиметров и наборов образцовых измерительных приборов 1-го и 2-го разрядов и установлены размеры для длины и диаметров капилляров.

Вычислены погрешности при определении постоянной вискозиметра методом ступенчатой калибровки и при измерении вязкости жидкостей.

Составлен проект рабочей поверочной схемы, дающий возможность осуществить поверку капиллярных вискозиметров разных систем, применяемых в промышленности Советского Союза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волярович М. П., Новые вискозиметры для нефтепродуктов, «Совещание по вязкости жидкостей и коллоидных растворов», т. II, Изд. АН СССР, 1944.
2. Добрянский А. Ф., Блох Д. С. и Блесточкина Е. П., Соотношение между кинематической вязкостью и вязкостью по Энглеру, Труды ВНИИМ, вып. 5 (60), Работы в области химии и физико-химические исследования, 1947.
3. Рыбак Б. М., Анализ нефти и нефтепродуктов, ч. I, Гос. научно-технич. из-во нефтяной и горно-топливной литературы, Баку, 1948.
4. Романовский В. П., Основные задачи теории ошибок, Гостехиздат, 1947.
5. Хальфин Э. П., О вероятнейшем значении вязкости воды при температуре вблизи 20° С, Труды ВНИИМ, вып. 5 (60), 1947.
6. ГОСТ 33-46, «Нефтепродукты», Метод определения кинематической вязкости.

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ НА ВИСКОЗИМЕТРЕ С ЭКСЦЕНТРИЧЕСКИМ ПАДЕНИЕМ ШАРИКА

Вискозиметры, основанные на измерении вязкости при помощи шарика, падающего в жидкой среде, бывают двух типов: 1) с шариком, свободно падающим в вертикальном цилиндре, и 2) с шариком, падающим в наклонном цилиндре.

Вискозиметры первого типа обладают тем недостатком, что шарик при падении в жидкостях с малой вязкостью получает дополнительное колебательное и вращательное движение, центр шарика смещается с оси цилиндра, вследствие чего изменяется путь, а следовательно, и время падения шарика.

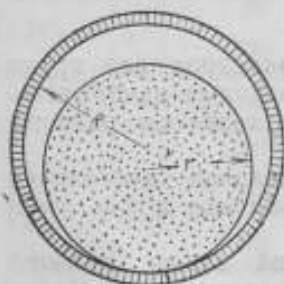


Рис. 1. Поперечный разрез цилиндра через центр шарика.

В вискозиметре второго типа, по мнению автора этой конструкции, упомянутый недостаток устраняется тем, что цилиндру придано наклонное, под углом 10° к вертикали, положение, и шарик падает эксцентрично, скользя по стенке цилиндра. Стенка цилиндра является направляющей для шарика, и серповидный зазор (рис. 1) остается постоянным во все время падения шарика.

Вискозиметр с эксцентрическим падением шарика позволяет измерять вязкость от 0,01 до 1000 000 сантипуазов путем выбора при измерениях соответствующего шарика, т. е. при изменении соотношения $\frac{R^2}{r^2}$ от 1,002 до 2,6, где R — радиус цилиндрической трубки и r — радиус шарика.

Вычисление вязкости жидкости и постоянной шарика в случае измерения их при 20°C , производится по следующим формулам:

$$\eta = C \cdot \tau (\rho_{ш} - \rho_{ж});$$

$$C = \frac{\eta}{\tau (\rho_{ш} - \rho_{ж})},$$

где η — динамическая вязкость в пуазах (или сантипуазах);

τ — время падения шарика в сек.;

$\rho_{ш}$ — плотность шарика в $г/см^3$;

$\rho_{ж}$ — плотность жидкости в $г/см^3$;

C — постоянная шарика в $\frac{см^2}{сек^2}$ (при вычислении в сантипуазах множится на 100).

Для измерений вязкости при любых температурах необходимо учесть коэффициент расширения материала шарика, и формула для вычисления вязкости примет следующий вид:

$$\eta = C \tau \left[\frac{6m}{(d+d\alpha\tau)^2 \pi} - \rho_{ж} \right],$$

где m — масса шарика в г;

d — диаметр шарика в см;

t — температура измерения в $^{\circ}C$;

α — коэффициент расширения материала шарика.

Соответствующим преобразованием из этой формулы выводится формула для вычисления постоянной шарика C .

Вискозиметры с эксцентрическим падением шарика изготовляются двух типов — точные и промышленные приборы. Точные приборы допускают измерение вязкости с погрешностью от $\pm 0,2$ до $\pm 0,5\%$, промышленные — с погрешностью $\pm 1,0\%$.

Измерение вязкости можно вести в пределах температур: для точного прибора от -60 до $+150^{\circ}C$, для промышленного от -35 до $+150^{\circ}C$.

Нами определены постоянные шариков двух точных приборов, измерена вязкость жидкостей и произведено сравнение величин вязкости, полученных на одном из этих вискозиметров и на эталонных капиллярных вискозиметрах.

Точный прибор с эксцентрическим падением шарика изображен на рис. 2. Основной частью точного прибора является калиброванная стеклянная трубка, расположенная под углом 10° к вертикали. На трубке нанесены три кольцевые метки A , B и C . Снизу трубку закрывают пробкой 8 и металлическим колпачком 10 , сверху — полой пробкой 12 с капилляром 14 , прокладкой 15 и металлическим колпачком 16 . В зависимости от рода исследуемой жидкости, пробки и прокладки применяются или резиновые, или металлические, позолоченные, с уплотнительными кольцами 9 и 13 . Трубка вставлена в стеклянный жидкостный термостат. Вверху термостата имеется отверстие для ввинчивания термометра 4 , в нижней части — два патрубка: короткий 1 и длинный 2 — для наполнения термостата и выпуска из него жидкости. В термостате, ближе к боковой поверхности, помещена нагревательная пластинка с вилкой для присоединения к электросети.

Цилиндрический стержень прибора 11 вставляется в штатив 5 , что позволяет вращать прибор вокруг оси стержня.

Для закрепления прибора служит пружинная защелка 7. Штатив снабжен уровнем 6 и тремя нивелировочными винтами 3.

Регулирование температуры термостата производится включением нагревательной пластинки, а перемешивание жидкости — при помощи резиновой воздуходувки, а также переворачиванием прибора. Однако этот способ дает большие отклонения от выбранной температуры измерения.

В наших опытах мы пропускали через термостат вискозиметра сверху вниз жидкость, подаваемую циркуляционным насосом из другого, более совершенного термостата. Колебания температуры в термостате вискозиметра не превосходили при этом $\pm 0,01^\circ \text{C}$.

Наполнение трубки вискозиметра исследуемой жидкостью производят сверху, при закрытом пробкой и колпачком 10 нижнем конце. Уровень жидкости должен быть ниже краев на 2 см, так как после опускания шарика и закрытия трубки деталью 12 жидкость вытекает через капилляр 14 в кольцевую полость детали 16.

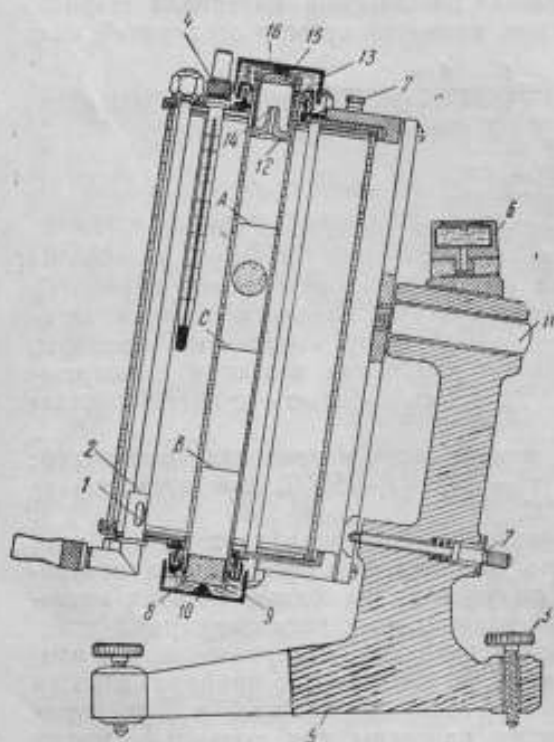


Рис. 2. Вискозиметр с эксцентрическим падением шарика.

ли 12. Затем ставят прокладку 15 и навинчивают колпачок 16.

Прибор устанавливают по уровню и приступают к определению времени падения шарика. Для этого, освободив защелку, прибор поворачивают на 180° , дают опуститься шарик до полой пробки 12, вновь поворачивают на 180° для приведения его в рабочее положение, закрепляют защелкой и наблюдают по секундомеру время падения шарика от метки А до метки В.

Укороченным путем падения шарика от метки А до метки С мы не пользовались, так как его применяют только для очень

вязких жидкостей. Время падения шарика измеряют только при нормальном положении прибора.

Продельвая указанные операции, проводят ряд наблюдений (в наших опытах — десять) и выводят среднее арифметическое.

Определение постоянных шариков по жидкостям с постепенно возрастающей вязкостью, было произведено для двух вискозиметров — № 1 и 2. В первом — для шести шариков, во втором — для пяти. Первые два шарика (I и II) изготовлены из специального стекла, остальные (III, IV, V и VI) — из устойчивого против коррозии сплава. Шариком, предназначенным для измерения вязкости газов, мы не пользовались. Этот шарик сделан из хромистой стали и позолочен.

Исходной жидкостью для определения постоянных шариков была дистиллированная вода, вязкость которой принята нами при 20°С равной 0,01005 пуазов (соответствующая этой температуре плотность воды равна 0,99823 г/см³).

Остальные жидкости, которыми мы пользовались, представляли собой минеральные масла и их смеси или растворы некоторых веществ в маслах.

Плотность их при 20°С следующая:

Жидкость	Плотность в г/см ³
А	0,8504
Б	0,8818
В	0,9056
Г	0,9138
Д	0,8830

Диаметры, масса и плотность шариков приведены в табл. 1. Масса шариков измерена в лаборатории мер массы ВНИИМ с погрешностью $\pm 0,00005$ г, диаметры шариков измерены в лаборатории мер длины ВНИИМ с погрешностью $\pm 0,0005$ мм.

Таблица 1

№ шарика	Вискозиметр № 1			Вискозиметр № 2		
	Диаметр <i>d</i> мм	Масса <i>m</i> г	Плотность ρ г/см ³	Диаметр <i>d</i> мм	Масса <i>m</i> г	Плотность ρ г/см ³
I	15,805	4,9663	2,4023	15,805	4,9356	2,4068
II	15,629	4,8041	2,4033	15,631	4,8126	2,4066
III	15,550	15,9633	8,1079	15,252	15,9647	8,1056
IV	15,002	14,3260	8,1032	15,001	14,3227	8,1029
V	13,500	10,4443	8,1069	13,501	10,4457	8,1063
VI	10,003	4,1379	7,8953	10,002	4,1379	7,8980

Плотность шариков ρ вычислялась по формуле:

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3},$$

где m — масса, v — объем и r — радиус шарика.

Таблица

№ шарика	Вискозиметр № 1			Вискозиметр № 2		
	Постоянная C $\text{см}^2 \cdot \text{сек}^2$	Вероятная погрешность E_C		Постоянная C $\text{см}^2 \cdot \text{сек}^2$	Вероятная погрешность E_C	
		абсолютная	в %		абсолютная	в %
I	0,00009176	0,00000019	0,021	0,00009033	0,00000019	0,021
II	0,0007632	0,00000026	0,034	0,0007468	0,00000023	0,031
III	0,001347	0,00000063	0,047	0,001309	0,00000056	0,043
IV	0,01213	0,0000063	0,052	0,01184	0,0000067	0,057
V	0,1097	0,000078	0,071	0,1095	0,000081	0,074
VI	0,4309	0,00034	0,078	—	—	—

В табл. 2 приведены постоянные шариков и вероятные погрешности их определения E_C , подсчитанные по формуле:

$$E = 0,703 \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{N(N-1)}},$$

где $\sum \delta^2$ — сумма квадратов разностей между отдельными определениями и их средним арифметическим;

N — число определений.

Абсолютные значения вероятных погрешностей показывают, что погрешность E_C при определении постоянной шариков получается в четвертой или пятой значащей цифре. С увеличением числа этапов при ступенчатой калибровке, т. е. от шарика I к VI, относительная погрешность определения постоянной возрастает, и у шарика VI достигает $\pm 0,08\%$.

Совершенно аналогично увеличивается погрешность E_v при определении вязкости жидкостей. В табл. 3 приведена вязкость жидкостей, измеренная на вискозиметре № 1, а в табл. 4 — измеренная на вискозиметре № 2. Время падения шариков в жидкости определено достаточно точно; относительная вероятная погрешность E_v лежит в пределах от $\pm 0,010$ до $\pm 0,035\%$.

При сравнении величин вязкости, измеренной на двух вискозиметрах — № 1 и № 2 (табл. 5), замечаем, что для одной и той же жидкости эти величины несколько отличаются друг от друга, причем в их разнице нет определенной эконо-

Таблица 3

Жидкость	№ шарика	Время падения шарика секунд	Вероятная погрешность времени падения E_t		Вязкость γ пуазов	Вероятная погрешность измерения вязкости E_γ	
			абсолютная	в %		абсолютная	в %
А	I	354,15	0,061	0,017	0,05043	0,000014	0,027
Б	II	307,92	0,045	0,015	0,3575	0,00013	0,037
В	III	333,16	0,035	0,010	3,2320	0,0016	0,048
Г	IV	290,03	0,083	0,029	25,293	0,015	0,060
Д	V	372,72	0,061	0,016	295,41	0,22	0,073

Таблица 4

Жидкость	№ шарика	Время падения шарика секунд	Вероятная погрешность времени падения E_t		Вязкость γ пуазов	Вероятная погрешность измерения вязкости E_γ	
			абсолютная	в %		абсолютная	в %
А	I	361,49	0,052	0,014	0,05082	0,000013	0,025
Б	II	310,15	0,030	0,010	0,3533	0,00012	0,033
В	III	338,66	0,094	0,028	3,1929	0,0016	0,051
Г	IV	300,43	0,106	0,035	25,564	0,017	0,067

номерности; при измерениях шариками I и IV вязкость меньше, на вискозиметре № 1, при измерениях шариками II и III она наоборот, больше. Отклонение вязкости от среднего значения сравнительно невелико и не превышает $\pm 0,61\%$.

Таблица 5

Жидкость	№ шарика	Вязкость в пуазах		Среднее значение вязкости в пуазах	Отклонение в вязкости на каждом из приборов от среднего значения в %
		на вискозиметре № 1	на вискозиметре № 2		
А	I	0,05043	0,05082	0,05063	$\pm 0,39$
Б	II	0,3575	0,3533	0,3554	$\pm 0,59$
В	III	3,2320	3,1929	3,2124	$\pm 0,61$
Г	IV	25,293	25,564	25,428	$\pm 0,53$

При испытании двух других точных приборов, произведенном значительно позднее, чем испытания вискозиметров № 1 и 2, нами также получены расхождения в показаниях вязкости и примерно такого же порядка, как и на вискозиметрах № 1 и 2:

Жидкость	Расхождение вязкости в % от среднего значения
а	$\pm 0,29$
б	$\pm 0,63$
в	$\pm 0,38$
г	$\pm 0,58$

Полученные в настоящей работе данные согласуются с имеющимися в литературе. Так, например, по литературным данным вязкости двух масел, измеренная на двух вискозиметрах с эксцентрическим падением шарика, дала отклонения от среднего арифметического значения $\pm 0,49\%$.

Следовательно, можно считать, что при измерении вязкости на различных точных приборах с эксцентрическим падением шарика расхождения в показаниях могут достигать $\pm 0,63\%$.

Для сравнительной оценки величин вязкости, полученных при измерении на вискозиметре с эксцентрическим падением шарика (вискозиметр № 1) и на эталонных капиллярных вискозиметрах, нами проведены опыты с четырьмя жидкостями. Как видно из табл. 6, расхождение в вязкости лежит в пределах от $-0,3$ до $+0,5\%$.

Таблица 6

Жидкость	Плотность жидкости г/см ³	Капиллярный вискозиметр		Вискозиметр с эксцентрическим падением шарика		Расхождение в вязкости (по отношению к капиллярному в %)
		Вязкость в паузах	№ шарика	Вязкость в паузах		
5	0,8425	0,04848	II	0,04872	+ 0,49	
10	0,8592	0,09864	II	0,09879	+ 0,15	
50	0,8847	0,4936	III	0,4939	+ 0,06	
100	0,8921	0,8697	III	0,8672	- 0,29	

Если принять во внимание, что расхождения между отдельными приборами могут достигать, согласно нашим опытам, $\pm 0,63\%$, то при пользовании различными вискозиметрами с эксцентрическим падением шарика отклонения в вязкости от показаний эталонных капиллярных вискозиметров могут доходить до 2% .

Однако, учитывая то обстоятельство, что среди приборов с эксцентрическим падением шарика попадаются приборы со значительно меньшим отклонением показаний от показаний эталонных вискозиметров (см. табл. 6), можно путем отбора из большого количества приборов выбрать приборы, которые могут быть использованы в качестве образцовых. Погрешность показаний этих приборов может быть уменьшена, если градуировку их, т. е. определение постоянных шариков, производить по жидкостям, вязкость которых измерена на группах эталонных вискозиметров (рабочих эталонах).

Вискозиметр с эксцентрическим падением шарика (тип точного прибора) можно рекомендовать для широкого применения в промышленности и исследовательской работе.

Этот тип вискозиметра охватывает широкий диапазон вязкости, дает вязкость в абсолютной системе единиц, позволяет производить измерения при различных температурах, не требует поправок на поверхностное натяжение и налипание. Прибор компактен, и работа с ним проста.

В. И. ЖУКОВ, Л. П. СТЕПАНОВ, А. А. ЧАСОВНИКОВ

АВТОМАТИЧЕСКИЙ МЕРНЫЙ БАК ВНИИМ

Проблема измерения больших расходов и количеств воды, а также других жидкостей в различных отраслях народного хозяйства является весьма важной. Приборы для измерения расходов и количеств протекающей жидкости, за исключением нормальных дроссельных приборов, требуют предварительной градуировки их по образцовым приборам или установкам.

К числу наиболее точных методов измерения расходов и количеств жидкостей относятся:

- 1) весовой метод — взвешивание количества жидкости, протекающей по трубопроводу за определенное время;
- 2) объемный метод — измерение объема количества жидкости, протекающей по трубопроводу за определенное время;
- 3) метод солевой прививки — определение расхода по концентрации соли в месте измерения, причем соль вводится в поток в определенном количестве выше по течению.

Весовой метод является наиболее точным, но в то же время наиболее сложным и громоздким. При измерении больших расходов требуются баки большой емкости и соответствующие весовые устройства. Этот метод применяется в очень редких случаях.

Метод солевой прививки применяется только к измерению расходов воды и требует сложных устройств для поддержания постоянства расхода прививки. Расход может быть установлен лишь после анализа жидкости и математических расчетов. Этот метод применяется в качестве контрольного и широкого распространения не получил.

Объемный метод является наиболее распространенным методом измерения расходов и количеств жидкостей. Он достаточно точен, менее громоздок, чем весовой метод, и значительно проще, чем метод солевой прививки.

Однако при измерении больших расходов жидкостей этим методом встречаются серьезные технические трудности, одной из которых является требование больших габаритов мерных баков; так, при измерении расходов порядка $600 \text{ м}^3/\text{час}$ требуются баки объемом не менее 11 м^3 . Кроме того, при испы-

тании приборов на установках, снабженных мерными баками, время испытания ограничено временем заполнения бака, и чем больше расход, тем меньше это время. Если баки не оборудованы соответствующими устройствами, на показаниях испытываемых приборов будут сказываться моменты пуска и остановки течения жидкости.

Перед аэрогидрометрической лабораторией ВНИИМ возникла задача создать установку для измерения расходов и количеств жидкости, которая обладала бы точностью объемного метода и была свободна от его недостатков. Одним из решений этой задачи является замена обычного мерного бака автоматическим баком, т. е. таким, в котором измеряемая жидкость с помощью поворотного хобота попеременно заполняет то одну камеру бака, то другую. Когда заполняется одна камера, то другая опорожняется. При этом закрытие и открытие клапанов и перекидка хобота совершаются автоматически.

При осуществлении автоматического бака номинальной емкостью в 250 дм^3 ставились следующие цели:

1) исследование пропускной способности этого бака, погрешности измерений и устойчивости его работы;

2) создание испытательной водомерной станции, снабженной автоматическим баком для целей поверок и испытаний нестандартных дроссельных приборов (сопел, диафрагм и двойных сопел диаметром до 50 мм)¹.

1. Описание автоматического бака

Автоматический бак представляет собой цилиндрический вертикально стоящий сосуд, высотой 0,9 м и диаметром 0,72 м, разделенный на две камеры плоской перегородкой. На верхней части перегородки, на высоте 0,64 м от дна сосуда, имеется горизонтальная щель для слива излишков воды из одной камеры в другую. Ширина этой щели может регулироваться, для чего предусмотрен щит, который можно установить на нужном расстоянии от нижнего края щели.

В две каждой из камер установлен спускной клапан, автоматически открывающийся и закрывающийся. Для лучшего стекания воды дно камеры выполнено в виде усеченного конуса. Каждая из камер снабжена водоуказательным стеклом с рейкой. Наполнение бака водой осуществляется с помощью хобота, положение которого может меняться. В одном положении хобота заполняется одна камера, в другом — другая.

Кинематическая и электрическая схема автоматического бака представлена на рис. 1.

Работа бака совершается следующим образом. По трубе 42 поступает вода, объем которой подлежит измерению. В изобра-

¹ Проектирование и предварительное опробование автоматического бака в 1940 г. осуществляли сотрудники Е. Ф. Долинский и Л. А. Рубец.

женном на схеме положении перекидного хобота 41 вода направляется в левую камеру. Как только уровень воды дойдет до края перегородки 47, поплавков 39 всплывает и замыкает контакты 16, чем включается ток в верхнюю катушку поляриционного реле 37. Якорь этого реле перебрасывается на контакт 36, в результате этого включается синхронный мотор 44 и последовательно с ним соединенная сигнальная лампа, которая одновременно служит предохранителем в цепи мотора. Мотор вращает находящийся на одной с ним оси кулачок из гетинакса 43. При своем вращении кулачок последовательно замыкает контакты 27, 28, 29 и останавливается, разомкнув контакты 30, так как в этом случае разрывается цепь мотора. При замыкании контактов 27 постоянный ток от выпрямителя 6, через контакты 18, 27 и 48, попадает в ртутное реле 4, которое включает мотор исполнительного механизма 9. Этот мотор остается включенным до тех пор, пока кулачок 15, вращающийся вместе с кривошипом 12, не разомкнет контакты 48. Контакты 48 так расположены, что кривошип 12 совершит при этом пол-оборота.

Кулачок 43 сделан такой ширины, что при своем вращении он нажимает на контакты в течение 3 сек., время же, потребное для поворота кулачка 15 и кривошипа 12 на 180°, составляет 1,5 сек. Кривошип 12, повернувшись на 180° посредством тяги 54, перебросит хобот 41 так, что вода будет направляться в правую камеру бака.

Контакты 27, управляющие перебросом струи из левой камеры в правую, замыкаются только через секунду после того, как уровень воды достигнет края перегородки. Этим гарантируется надлежащее заполнение камеры. Через 6 сек. после замыкания контактов 27 замыкаются контакты 28. В течение этих шести секунд происходит переброс струи воды в правую камеру (первые полторы секунды), слив избытка воды из левой камеры в правую через перегородку 47 и успокоение уровня воды в левой камере.

Как только замкнутся контакты 28, ток от выпрямителя через контакты 18, 28 и 50 попадает в группу реле 3, которые включают мотор исполнительного механизма 7. Кривошип 10, сделав пол-оборота, останавливается, так как кулачком 13 размыкается цепь постоянного тока, и группа реле 3 выключает мотор.

В результате поворота кривошипа 10 на 180° приподнимается клапан 46, и левая камера освобождается от воды. Кривошип 10 делает пол-оборота за 1,5 сек. Через 6 сек. после замыкания контактов 28 замыкаются контакты 29. В этом случае ток от выпрямителя через замкнутые контакты 18, 29 и 51 опять проходит в группу реле 3 (контакты 50 — разомкнуты), включается исполнительный механизм 7, кривошип 10 делает пол-оборота, клапан закрывается, контакты 51 размыкаются. При дальнейшем вращении кулачка 43 он разъединяет

контакты 30. Мотор 44 и кулачок 43 останавливаются и одновременно гаснет сигнальная лампа.

Когда наполнится правая камера бака, замкнутся контакты 17, включится нижняя катушка реле 37, якорь его притянется к контакту 35 и включится мотор 44, так как тогда кулачок 43 не нажимает на контакты 34 и они замкнуты. Вращающийся кулачок последовательно замыкает контакты 31, 32, 33 и останавливается, разомкнув контакты 34. Нетрудно видеть из схемы, что замыкание контактов 31 дает переброс струи, а замыкание контактов 32 и 33 дает открытие и закрытие клапана 45. При закрытии клапана 45 срабатывает счетчик, отмечающий количество полных циклов работы бака.

Если по каким-либо причинам нежелательно включение автоматического управления, переключатель 18—20—19 ставится в положение 20—19. В этом случае контакты 27, 28, 29, 31, 32 и 33 отключены, отключены также контакты 16 и 17. Открытие и закрытие клапанов, а также переброс струи производится замыканием вручную контактов 21—26.

Контакты 55 и 56, включенные параллельно контактам 16 и 17, находятся на пульте управления и служат для приведения всех исполнительных механизмов в исходное положение перед началом работы автоматического бака, а также для проверки работы автоматики без наполнения водой камер бака.

Полный цикл работы бака продолжается не менее 30 сек., что определяется скоростью вращения мотора 44, делающего один оборот за 30 сек. При существующей емкости бака (237 дм^3) автоматическое устройство может успевать срабатывать до расходов $28,4 \text{ м}^3/\text{час}$. Максимальный расход, обусловленный существующим напором и сопротивлениями в подводных трубопроводах, составляет $27,4 \text{ м}^3/\text{час}$.

2. Исследование автоматического бака

Исследования автоматического бака проводились с целью определения погрешности измерения им количества воды при разных расходах и проверки устойчивости его показаний. Для этого под него был подведен контрольный мерный бак прямоугольной формы емкостью в $2,5 \text{ м}^3$. Последний имеет три вертикальных перегородки, образующие четыре камеры разной емкости. Самая маленькая камера имеет емкость 100 дм^3 и вода поступает в нее, переливаясь через перегородку, после заполнения остальных камер. Такое устройство бака, при сравнительно малой его высоте (1 м), позволяет замечать в пределах от 2300 до 2400 дм^3 изменения в количестве поступившей в бак воды до $0,5 \text{ дм}^3$.

Автоматический и контрольный баки были предварительно проградуированы образцовым жидкостным мерником 1-го разряда, емкостью в 10 дм^3 . Объем автоматического бака был

измерен 12 раз. Средние значения емкостей его камер, полученные из этих измерений, оказались 117,69 дм^3 и 119,31 дм^3 ; общая емкость автоматического бака равна 237 дм^3 . Объем контрольного бака был измерен два раза, расхождение результатов составило 0,1%. В вычислениях за объем контрольного бака принято среднее значение.

Исследования проводились в следующем порядке. При постоянном расходе вода поступала в автоматический бак и из него в контрольный. Опыт проводился так, чтобы в нижний бак поступала вся вода, отмеренная автоматическим баком ровно за десять полных циклов его работы. После успокоения

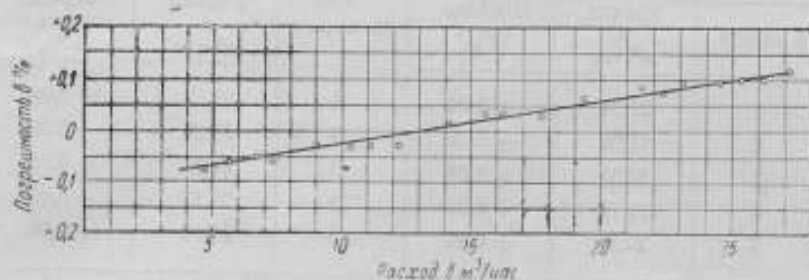


Рис. 2. Зависимость погрешности автоматического бака от расхода воды.

уровня воды в нижнем баке снимались его показания, и относительная погрешность δ определялась по формуле:

$$\delta = \frac{2370 - Q}{Q},$$

где 2370 — удесятеренная емкость автоматического бака в дм^3
 Q — количество воды в дм^3 , отсчитанное по нижнему баку.

Опыты по определению погрешности автоматического бака произведены на различных расходах от 5 до 27 $\text{м}^3/\text{час}$, и зависимость погрешности от расхода представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, погрешность бака почти линейно зависит от расхода воды и лежит в пределах от $-0,08$ до $+0,12\%$.

Положительные погрешности при больших расходах могут быть объяснены образованием большого количества воздушных пузырьков, которые ввиду быстрого наполнения бака не успевают удалиться из воды. Было установлено, что, уменьшая щель, через которую протекает вода из одной камеры в другую, можно несколько уменьшить погрешность автоматического бака при больших расходах. При ширине щели 12 мм погрешность не превосходит 0,12%, однако дальнейшее ее уменьшение не дает снижения погрешности. Результаты исследований, представленные на рис. 2, соответствуют ширине щели 12 мм .

Проверка устойчивости работы автоматического бака была проведена на расходах 20—21 м³/час.

Все опыты проводились строго идентично, отсчеты по нижнему баку брались всегда через 30 мин. после окончания работы автоматического бака, время опорожнения нижнего бака также было одним и тем же, температуры воды и помещения колебались очень незначительно: $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ для воды и $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ для помещения.

Результаты испытания бака на устойчивость показаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ опыта	Расход в м ³ /час	Погреш- ность в %	№ опыта	Расход в м ³ /час	Погреш- ность в %
1	21,74	+0,04	6	21,12	+0,06
2	21,00	+0,06	7	21,28	+0,06
3	20,85	+0,04	8	21,01	+0,06
4	21,12	+0,04	9	21,37	+0,06
5	20,36	+0,04	10	21,12	+0,06

Из приведенных данных видно, что погрешность измерения лежит в пределах от +0,04 до +0,06%, т. е. разброс показаний составляет всего лишь 0,02%. Это свидетельствует о стабильной работе автоматического бака.

Выводы

1. Автоматический мерный бак, созданный во ВНИИМ, пригоден для измерения расходов воды до 28 м³/час, при этом максимальная погрешность равна 0,2%. Эта погрешность складывается из погрешности самого автоматического бака и систематической погрешности контрольного бака, с помощью которого он был исследован.

2. Линейная зависимость между расходом и погрешностью автоматического бака позволяет рассматривать эту погрешность как систематическую и в случае подтверждения этой зависимости в течение ряда лет вводить соответствующие поправки в измерения. Таким образом, точность измерения количества воды может быть значительно повышена.

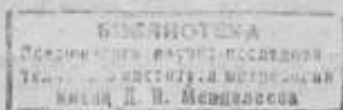
3. Автоматический мерный бак может вполне заменить стационарные мерные баки по меньшей мере в четыре раза большей емкости, и при этом он представляет большие удобства для работы и свободен от свойственных обычным бакам погрешностей, связанных с пуском и закрытием воды.

4. Автоматический мерный бак дооборудован испытательным столом и другими устройствами, что позволило создать во ВНИИМ постоянно действующую водомерную испытатель-

ную станцию. Проведенные на этой станции исследования нестандартных дроссельных приборов некоторых предприятий г. Ленинграда показали полную пригодность автоматического бака для данного рода испытаний.

5. Автоматический мерный бак может быть выполнен передвижным для применения его при измерении емкости различных резервуаров объемным методом.

6. Результаты исследования автоматического мерного бака были использованы при проектировании водомерных испытательных станций большой пропускной способности во ВНИИМ и в Киевском управлении водоканализации.



8

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Г. Д. Кокош и И. Н. Морозова, Кварцевые гири	7
А. В. Суслов, О влиянии на результат точного взвешивания ста- бильности „нуля“ весов и метода определения их чувстви- тельности	13
Г. Д. Кокош и Н. А. Смирнова, Приложение метода крутиль- ного маятника к исследованию коромысел точных весов	21
Г. Д. Кокош, Весовой прибор для определения коэффициента ли- нейного расширения различных материалов	31
С. С. Товчигречко, О периодических ошибках микрометриче- ских винтов экзаминаторов уровней	38
Н. А. Чесноков, Эталонный метод воспроизведения единицы кинематической вязкости. Эталонные и образцовые приборы	45
Н. А. Чесноков, Точность измерения вязкости на вискозиметре с эксцентрическим падением шарика	68
В. И. Жуков, Л. П. Степанов, А. А. Часовников, Авто- матический мерный бак ВНИИМ	77

Технический редактор *Л. В. Соколова*. Корректор *Е. С. Кушля*

Подписано к печати 28/III 1952 г. М-15890. Формат бумаги 60 × 92¹/₂.
 Печ. листов 5¹/₄. Уч.-изд. листов 4,68. Тираж 600 экз. Заказ 821
 Номинал — по прейскуранту 1952 года

2-я фабрика детской книги Детгиза Министерства просвещения РСФСР
 Ленинград, 2-я Советская, 7.

Замеченные опечатки

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
39	8 снизу	$\dots = D_0 + z_0$	$\dots = D_0 - z_0$	Авт.
42	3 снизу	$BF = \Delta L = \dots$	$BF = AL = \dots$	Авт.
71	6 снизу	4,9356	4,9756	Корр.
72	4 сверху	Таблица	Таблица 2	Тип.
72	Таблица 2 (в заголовке)	$\text{см}^2 \cdot \text{сек}^2$	$\text{см}^2 / \text{сек}^2$	Авт.

ВНИИМ 19, зак. 821

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Г. Д. Кохот и И. Н. Морозова, Кварцевые гири	7



Технический редактор *Л. В. Соколова*.

Корректор *Е. С. Кушля*

Подписано к печати 28/III 1952 г. М-15890. Формат бумаги 60 × 92¹/₂.
Печ. листов 5¹/₄. Уч.-изд. листов 4,68. Тираж 600 экз. Заказ 821
Номинал — по прейскуранту 1952 года

2-я фабрика детской книги Детгиза Министерства просвещения РСФСР
Ленинград, 2-я Советская, 7.

3
7

МАТ

921/5
3 821

ФС

3 р. 30 к.



ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА

Ленинград, Невский пр., 58