

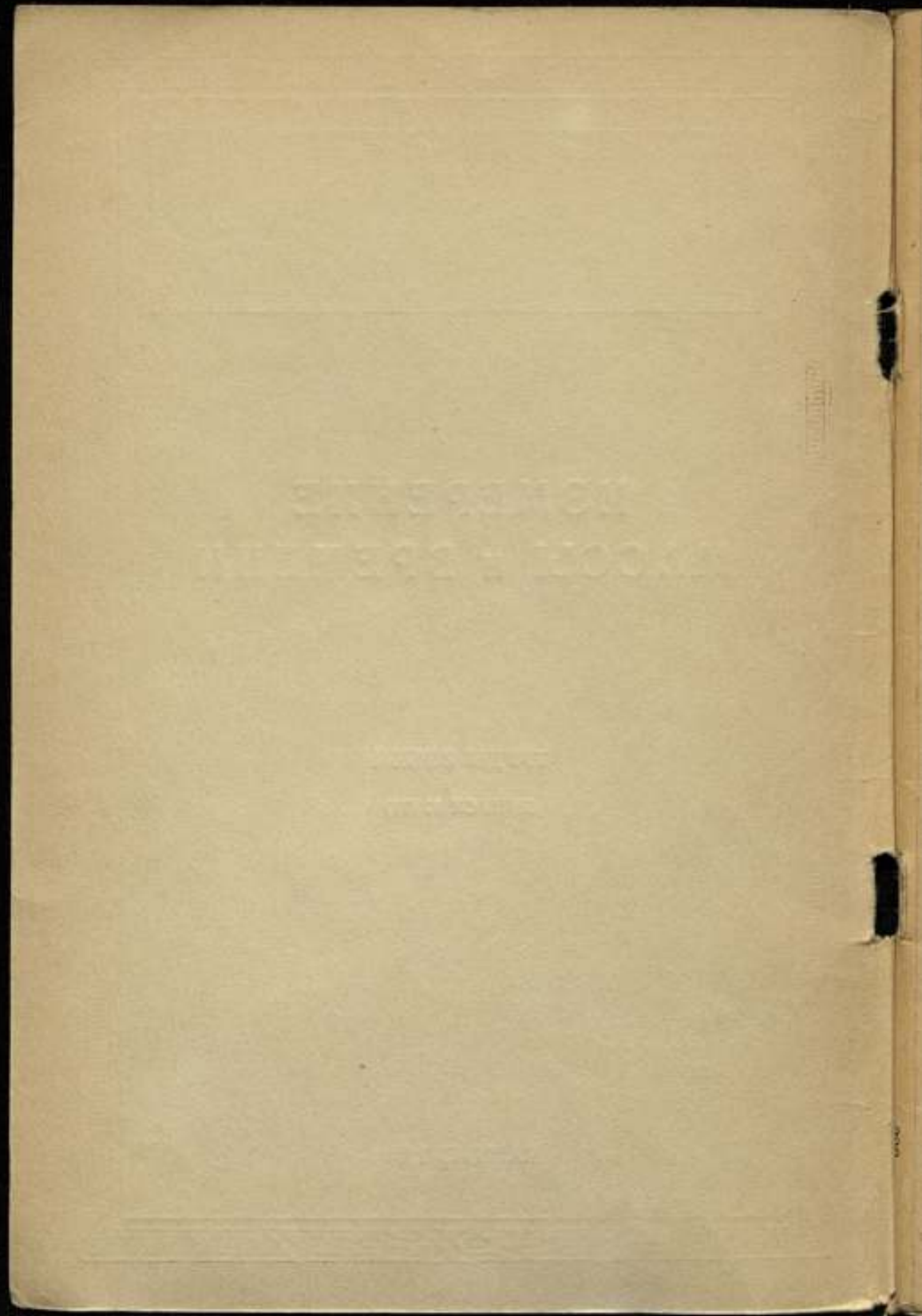
КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ и ВРЕМЕНИ

ТРУДЫ ВНИИМ

ВЫПУСК 11 (71)

МАШГИЗ 1950



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

ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ И ВРЕМЕНИ

ТРУДЫ ВНИИМ
ВЫПУСК II (71)

Под редакцией проф. Н. С. МИХЕЛЬСОНА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1960 ЛЕНИНГРАД

м. 10425

В сборнике помещены статьи, относящиеся к вопросам определения величин абсолютного ускорения силы тяжести, плотности жидких тел и измерения времени.

Сборник может представлять интерес для инженерно-технических и научных работников как в области теоретической, так и практической метрологии.

Отв. редактор
канд. техн. наук М. П. ПАВЛОВ

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
РЕДАКЦИЯ ЛИТЕРАТУРЫ ПО МАШИНОСТРОЕНИЮ
Заведующий редакцией инж. Ф. И. Фетисов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник содержит в себе пять статей, по существу относящихся к измерениям в области основных единиц. Статьи эти представляют собой результаты теоретической и экспериментальной разработки актуальных задач, стоявших за последнее время перед соответствующими лабораториями ВНИИМ. Две из них относятся к вопросу определения величины абсолютного ускорения силы тяжести, две — касаются определения плотности жидких тел и одна — области измерения времени.

Статья лауреата Сталинской премии П. Н. Агалецкого „Способ обнаружения и исключения систематических погрешностей при определении абсолютного значения ускорения силы тяжести с помощью маятниковой аппаратуры“ представляет собой критический разбор метода использования поворотного маятника. Автор рекомендует свой новый дифференциальный метод, позволяющий обнаруживать и исключать систематические погрешности, и тем значительно уточняет определение абсолютного значения ускорения силы тяжести.

В статье П. Н. Агалецкого и К. Н. Егорова „Коромысло, как инструмент для исследования системы нож — опора маятниковых приборов“ авторы, анализируя колебания физического маятника и влияние различных факторов на изменение его приведенной длины и периода колебания, пришли к заключению, что величину систематической погрешности, проистекающей от геометрической формы ножа и опоры, их механических свойств, материала и других факторов, следует определять экспериментально, для чего считают наиболее целесообразным использовать предлагаемое ими специальное коромысло.

Статья П. А. Налимова „Интерференционный метод определения плотностей слабых водно-спиртовых растворов“ содержит описание метода применения интерферометра к определению плотности жидкостей. Автор, сопоставляя плотность водно-спиртового раствора, определенную дифференциальным пикнометрическим методом, с величиной показателя преломления этого раствора, определенной интерференционным методом, дает для диапазона крепости исследованных им растворов эмпирическую формулу, определяющую зависимость между изменением плотности раствора и соответствующим изменением его показателя преломления.

В статье Н. С. Михельсона „К реформе спиртометрии“ автор решает вопрос о приспособлении металлических спиртомеров, рас-

считанных для 15°C , к учету ими крепости водно-спиртовых растворов в процентах при 20°C . В связи с намеченным в ближайшее время переходом спиртометрии на новую нормальную температуру 20°C , возник вопрос, придется ли вновь изъять из обращения прежние спиртомеры, как приборы, которые нельзя использовать в новых условиях, или же, имея в виду их значительную стоимость и большое распространение в промышленности, изыскать возможность приспособить их к новым температурным условиям. В своей статье автор дает теоретические основания для такого приспособления и точные указания для его технического осуществления. Статья сообщает также некоторые сведения, относящиеся к спиртометрии, знакомство с которыми необходимо каждому работающему в этой области.

В. Д. Деревянкин в статье „Сличение часов на хроноскопе и определение ошибок минутного периода“ дает обоснование метода сличения часов на хроноскопе и разбирает конкретные случаи сличения, встречающиеся в практике службы времени. Далее автор рассматривает определение ошибок минутного периода на хроноскопе и приходит к выводу о том, что метод сличения на хроноскопе рациональнее хронографического метода.

Проф. Н. С. Михельсон

Лауреат Сталинской премии П. Н. АГАЛЕЦКИЙ

СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИСКЛЮЧЕНИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ АБСОЛЮТНОГО ЗНАЧЕНИЯ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКОВОЙ АППАРАТУРЫ

1. Введение

Начиная с XVII века, когда была разработана теория физического маятника, ученые различных стран при определении абсолютного значения ускорения силы тяжести стали использовать маятниковую аппаратуру, возлагая на нее вполне обоснованные надежды по получению наиболее точного значения g , по сравнению с результатом Галилея, относящимся примерно к 1590 г. Для этих целей применялись как нитяные, так и поворотные маятники. Однако наибольшее развитие за последние сто лет получил метод поворотных маятников, поэтому в настоящей статье мы остановимся только на анализе этого метода.

К последним определениям абсолютного значения g , проведенным с помощью поворотных маятников, относятся определения потсдамские, вашингтонские и теддингтонские.

По данным авторов упомянутых исследований вероятная погрешность полученных ими результатов не превышает ± 3 миллигала. Однако расхождение между тремя последними значениями g , приведенными к одному пункту, достигает величины порядка 20 миллигал, что нельзя считать случайностью.

Поэтому ряд исследователей, проводивших анализ этих работ, пришел к заключению, что в дальнейшем для точного определения g следует выбрать какой-либо другой метод вместо метода поворотных маятников с тем, чтобы освободиться в результате от неисключенных систематических погрешностей [7, 8].

Мы полагаем, что в развитии метода физического маятника, в данном случае — поворотного, не исчерпаны все его возможности и можно найти практически осуществимые пути, обеспечивающие получение надежного результата для g , освобожденного в достаточной мере от систематических погрешностей.

Как известно из основ метрологии [9], при осуществлении многократных измерений одной и той же физической величины результаты измерений бывают искажены случайными и систематическими погрешностями. Случайные погрешности определяют точность измерений. Систематические погрешности определяют правильность измерений. Случайные погрешности измерений не могут быть исключены опытным путем, но их влияние на результат может быть теоретически учтено путем применения к обработке рядов наблюдений теории вероятностей и методов статистики.

Влияние систематических погрешностей на результаты измерения исключают, располагая известным образом наблюдения, либо вводя поправки, найденные теоретическим или опытным путем.

Задача освобождения измерений от систематических погрешностей требует глубокого анализа всей совокупности опытных данных измерения.

В результате анализа теории поворотного маятника, применяемого при определении абсолютного значения ускорения силы тяжести, автором настоящей статьи в 1947 г. был предложен дифференциальный физический маятник, позволяющий исключать из результата абсолютных определений g значительную часть систематических погрешностей, а также дифференциальный метод в применении к двум поворотным маятникам, позволяющий обнаруживать в результате наличие неисключенных систематических погрешностей.

Предметом настоящей статьи и служит рассмотрение предложенных способов обнаружения и исключения систематических погрешностей из результата определений абсолютного значения ускорения силы тяжести, получаемого с помощью маятниковой аппаратуры.

2. Основные затруднения при пользовании поворотными маятниками

Для последовательности и ясности дальнейших рассуждений рассмотрим кратко основные закономерности физического маятника. Как известно, физический маятник в отличие от математического характеризуется приведенной длиной, представляющей собой расстояние между точкой подвеса A и центром качания B , в котором как бы сосредоточена вся масса маятника (рис. 1). Чтобы определить приведенную длину L , необходимо знать координаты точки B . Используя основное дифференциальное уравнение движения физического маятника

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{gHM}{J} \sin \theta$$

и считая физический маятник подобным математическому, можно прийти к выражению

$$L = \frac{J}{MH} = \frac{J_0}{MH} + H, \quad (1)$$

где M — масса маятника;

H — расстояние от точки подвеса до центра тяжести;

J — момент инерции относительно оси, проходящей через точку подвеса A ;

J_0 — момент инерции относительно оси, проходящей через центр тяжести маятника.

Ускорение силы тяжести в случае бесконечно малых амплитуд находится из уравнения

$$g = \frac{\pi^2}{T^2} \cdot L, \quad (2)$$

где T — полупериод колебания, применительно к маятникам называемый просто периодом колебания.

Для абсолютных определений g физический маятник непригоден, так как центр качания его B и центр тяжести O являются неопределенными точками и, следовательно, в нахождении приведенной длины L может быть допущена большая ошибка.

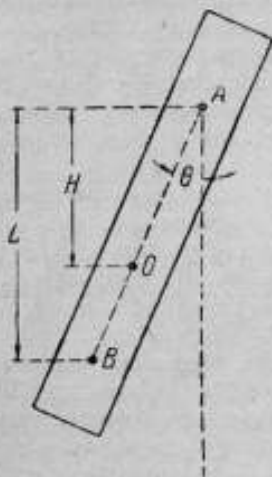


Рис. 1.



Рис. 2.

Обнаруженный еще Гюйгенсом способ определения центра качания B путем перемены точек A и B своими местами, привел впоследствии Кетера, а затем Бесселя к конструкции поворотного маятника (рис. 2), основное свойство которого состоит в том, что расстояние между точками подвеса A и B является его приведенной длиной и что периоды колебаний T_1 и T_2 в прямом и перевернутом положениях равны или достаточно близки друг к другу. Поворотный маятник, получивший широкое распространение при определении абсолютного значения g , характеризуется различным расстоянием точек подвеса A и B от центра тяжести O . Период колебания T идеального поворотного маятника, приведенная длина которого точно

соответствует расстоянию между осями колебания, определяется из уравнения

$$T^2 = \frac{H_1 T_1^2 - H_2 T_2^2}{H_1 - H_2}, \quad (3)$$

и приведенная длина

$$L = H_1 + H_2, \quad (4)$$

где H_1 и H_2 — расстояния от точек подвеса до центра тяжести.

Расчетная ф-ла (2) для поворотного маятника выведена без учета трения и упругих сил, проявляющихся при экспериментах с реальным поворотным маятником.

Поэтому при определении абсолютного значения g с высокой степенью точности нельзя отождествлять расстояние, измеренное между опорными плоскостями A и B (рис. 2), с приведенной длиной и принимать за истинный наблюдаемый период колебания маятника.

Реальные условия эксперимента вызывают необходимость вводить поправки на L и T с целью сближения измеренных значений этих величин с теми, которые входят в расчетную ф-лу (2). Точность определения g зависит от степени сближения этих значений.

Таким образом, сущность метода поворотных маятников, применяемых для определения абсолютного значения ускорения силы тяжести с высокой степенью точности, состоит в опытном определении приведенной длины L маятника и его периодов колебания T_1 и T_2 в прямом и перевернутом положениях с учетом целого ряда поправок как на L , так и на T , что сопряжено с трудностями учета всех факторов, влияющих на колебания маятника помимо силы тяжести.

Остановимся кратко на характере поправок, подлежащих непосредственному или косвенному учету. По природе этих поправок мы полагаем возможным разделить их на четыре группы: энергетические, параметрические, поправки, вызванные условиями эксперимента, и поправки на приближенность расчетной формулы для g .

Энергетические поправки, относящиеся только к периоду колебаний, обусловлены: а) наличием момента упругих сил относительно оси вращения маятника; б) расходом энергии в процессе колебания маятника на преодоление сил трения и на излучение упругих колебаний, затухающих в опоре. Очевидно, что при установившемся режиме колебаний, отсутствии других колебательных систем, связанных с маятником и имеющих близкую или равную частоту, можно считать, что декремент затухания целиком определяет потерю энергии, и его среднее значение с достаточной точностью позволяет учесть эту часть энергетических поправок.

Определение величины энергетической поправки за момент упругих сил вызывает необходимость выяснения характера взаимодействия ножа и опоры в процессе колебания маятника при малых амплитудах.

Поправки второго рода, названные нами параметрическими или геометрическими, относятся главным образом к приведенной длине. Они включают в себя:

- а) комплекс причин, вызывающих смещение оси вращения относительно точки опоры;
- б) изменение положения центра тяжести вследствие изгиба маятника;
- в) удлинение маятника под действием силы тяжести в прямом и перевернутом положениях.

Поправки, вызванные условиями эксперимента, и поправки на приближенность расчетной формулы для g с достаточной точностью учитываются при тщательно поставленном эксперименте (маятник качается при постоянной температуре в вакуумной камере, остаточное давление воздуха в которой не искажает результата измерений).

Для нас главный интерес представляют первые подгруппы энергетических и параметрических поправок, включающие поправки, обусловленные геометрией ножа и опоры, а также их упругими свойствами, характером движения ножа на опоре или опоры на ноже (качение, скольжение или упругие деформации), скачком штатива. Эти причины, вызывая изменения периода и приведенной длины маятника, порождают в процессе эксперимента основные затруднения, не дающие возможности судить о степени точности полученного результата при пользовании поворотными маятниками.

В работах, выполненных немецкими, американскими и английскими исследователями по определению абсолютного значения ускорения силы тяжести, имеется ряд спорных положений и отсутствуют контрольные методы, позволяющие судить о степени исключения из результата систематических погрешностей. Этим прежде всего и объясняются те расхождения в конечных значениях g , о которых говорилось в вводной части данной статьи.

В потсдамской работе была предпринята попытка, наряду с учетом абсолютных значений поправочных членов, освободиться от влияния геометрии ножа и упругих деформаций ножа и опоры путем их взаимной частичной или полной компенсации; с этой целью маятник при своих колебаниях опирался подушкой на нож и ножом на подушку.

Необходимо подчеркнуть, что подобного рода компенсация может иметь место только для параметрических, но не энергетических поправок, при определенном сочетании материалов опоры и ножа и при определенной геометрии ножа; в других случаях, наоборот, могут быть внесены дополнительные систематические погрешности.

Американцы и англичане отказались от способа компенсации, примененного немцами; они, располагая технически более совершенной аппаратурой, стремились развить экспериментальные и теоретические приемы для определения абсолютных значений перечисленных выше поправок. В частности, влияние системы нож — опора учитывалось в теддингтонской работе теоретически, исходя из допущения чистого качения опорной пластины на ноже, считая, что при абсолютно

жестких ноже и опорной пластине мгновенная ось вращения проходит через точки, лежащие на граничной поверхности лезвия ножа.

Опытное исследование колебания весов, проведенное основателем русской метрологической школы Д. И. Менделеевым [10], дает основание заключить, что механика движения опоры на ноже или ножа на опоре при колебаниях маятника является более сложной и требует глубокого всестороннего изучения. Если для сопоставления допустить другую крайность, т. е. предположить наличие не качения, а чистого скольжения, то нельзя считать, что мгновенная ось вращения проходит через точки, лежащие на граничной поверхности; в этом случае она проходит через точку, лежащую приблизительно в центре кривизны призмы.

В действительных условиях мы, вероятно, имеем дело и с качением, и с упругими деформациями. Ответить на вопрос, какое из этих явлений преобладает, без тщательного экспериментального исследования вряд ли возможно.

Получение конкретных числовых значений для поправочных членов может производиться двояко: аналитически (расчетным путем) и эмпирически. Достоверность расчетных значений определяется не только знанием общих закономерностей, но и умением их применить к данному конкретному случаю, а следовательно, и полнотою знания всей совокупности конкретных условий. Если условия сложны и не могут быть достаточно полно учтены, нельзя ожидать большой достоверности от значений, полученных путем расчета, несмотря на то, что для расчета были применены общие точно известные закономерности. В этих случаях возможен и наиболее приемлем эмпирический способ получения числовых значений для конкретных условий. Полученные этим способом числовые значения будут более достоверны, по сравнению с вычисленными. Все это относится в полной мере к поправкам на период и приведенную длину, вносимым системой нож — опора.

Проведенные нами экспериментальные исследования физических явлений в системе нож — опора, подготовляемые к опубликованию в отдельной работе, позволяют нам присоединиться к мнению тех исследователей [11], которые считают, что при малых амплитудах в системе нож — опора имеют место упругие деформации. Моменты упругих сил являются функциями от реакции опор и углов поворота ножей по отношению к опорам и зависят от материала ножей и опор, их термообработки и профилей их рабочих поверхностей. Момент упругих сил в системе нож — опора одного знака с восстанавливающим моментом маятника, создаваемым силой тяжести. Этот дополнительный момент вызывает уменьшение периода колебаний маятника и вносит в результат измерения абсолютного значения силы тяжести систематическую погрешность положительного знака.

Мы остановились более подробно на первых подгруппах энергетических и параметрических изменений с той целью, чтобы подчеркнуть их сложное, далеко не изученное влияние на колебание маятника, а также показать, что они являются одним из основных источ-

ников неисключенных систематических погрешностей, могущих отягчить конечный результат.

Из вышеизложенного следует, что сомнения в конечных значениях g , полученных предшествующими исследователями с помощью поворотных маятников, вполне законны.

Иностранные ученые базировались на теории поворотного маятника, обращая основное внимание на определение абсолютных значений вводимых поправок, не делая попыток расширить рамки самой теории поворотного маятника. У нас нет оснований оспаривать способы определения большинства поправок, детально разработанные немецкими, американскими и английскими учеными, однако наличие значительных расхождений в конечных результатах побудило нас подойти к решению этой задачи не только критически в отношении частных вопросов, касающихся учета тех или иных поправок, но и коренным образом пересмотреть метрологические возможности данного метода.

3. Метод исключения систематических погрешностей

Рассмотрим кратко основные особенности поворотного маятника и постараемся установить пути, позволяющие исключить частично или полностью преобладающее число систематических погрешностей, искажающих действительное значение g .

Возьмем для простоты рассуждений однородный, с равномерно распределенной массой, стержень AA_1 , изображенный на рис. 3, центр тяжести которого находится в его геометрическом центре O . Используя ф-лу (1) для приведенной длины

$$L = \frac{J_0}{MH} + H,$$

можно найти характер изменения приведенной длины в зависимости от H при $\frac{J_0}{M} = \text{const}$. Эту зависимость представляют кривые AB_1 и BA_1 (рис. 3), симметрично расположенные относительно центра тяжести стержня и имеющие перегиб в точках R и R_1 , координаты которых соответствуют минимальному значению приведенной длины L_{\min} и радиусу инерции r . На каждой из кривых, как видно из рисунка, имеется возможность выбрать только две точки подвеса, отвечающие заданной приведенной длине, а на стержне в целом — четыре точки.

Условимся называть физический маятник коромыслом, если расстояние от точки подвеса до центра тяжести меньше радиуса инерции ($H < r$), и маятником, если это расстояние больше радиуса инерции ($H > r$). В обычных поворотных маятниках берут две точки, отвечающие заданной приведенной длине или периоду колебаний, лежащие на различных частях стержня относительно его центра тяжести, причем одна точка находится в области маятников, а другая — в области коромысел. Такие точки являются взаимными. В нашем случае приведенной длине L отвечают две пары взаимных точек: A, B и A_1, B_1 .

Очевидно, точки A_1 и B_1 соответственно тождественны точкам A и B , поэтому помимо взаимных мы имеем еще две пары тождественных точек: A, A_1 и B, B_1 . Первая пара тождественных точек лежит в области маятников, вторая — в области коромысел.

Использование тождественных точек для подвеса привело бы нас либо к обычному физическому маятнику (неповоротному), либо

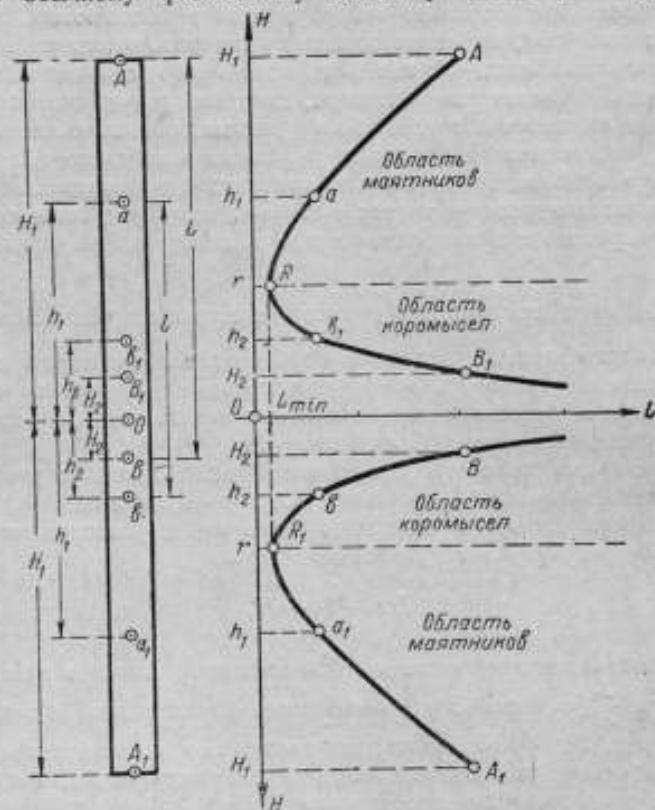


Рис. 3.

к коромыслу, для определения приведенной длины которых необходимо знать момент инерции, массу и координаты центра тяжести стержня, так как расстояние между тождественными точками не является приведенной длиной (тождественные точки характеризуются одним и тем же значением H , и такой маятник, естественно, не может быть применен для абсолютных измерений g).

Нельзя также в случае обычного поворотного маятника взять для подвеса точки, лежащие по одну сторону от центра тяжести стержня, так как приведенная длина представляет собой сумму расстояний от точек подвеса до центра тяжести, и для ее определения необходимо знать H_1 и H_2 , измеренные с погрешностью, не пре-

вышающей миллионных долей L , в то время как положение центра тяжести можно определить лишь с погрешностью до десятитысячных долей L .

Таким образом, свойство взаимных точек, заключающееся в том, что расстояние между ними равняется приведенной длине, остается одним единственно возможным условием практического осуществления поворотного маятника в том виде, в каком он существует со времен Кетера и Бесселя. Одна из этих точек, как уже говорилось выше, лежит в области маятников, другая — в области коромысел.

Необходимо заметить, что в области коромысел малые изменения H вызывают значительные по абсолютной величине и противоположные по знаку изменения приведенной длины, по сравнению с областью маятников, что влечет за собой различное влияние причин, вызывающих смещение оси вращения, на колебания маятника в прямом и перевернутом положениях. На это обстоятельство предыдущие исследователи в своих работах не обращали должного внимания, а нам кажется, что оно имеет существенное значение при вычислении поправочных членов.

Каковы же те пути, которые могут привести к полному или частичному исключению систематических погрешностей, могущих исказить конечное значение g ?

Обращаясь к кривым $L = f(H)$ при $r^2 = \frac{J_0}{M} = \text{const}$, изображенным на рис. 3, нетрудно усмотреть, что мы можем выбрать любое число взаимных точек, отвечающих постоянству радиуса инерции, но соответствующих различным приведенным длинам и периодам колебаний. Если мы выберем на этой кривой две пары взаимных точек — A, B и a, b , соответствующих приведенным длинам L и l , то будем иметь как бы два самостоятельных поворотных маятника, качающихся с периодами T и t , объединенных в одно целое.

Следовательно, ускорение силы тяжести может быть найдено из выражений

$$g = \pi^2 \frac{L}{T^2}, \quad (5)$$

$$g = \pi^2 \frac{l}{t^2}. \quad (6)$$

Умножая левые и правые части этих выражений соответственно на T^2 и t^2 и вычитая из первого второе, имеем

$$g = \pi^2 \frac{L - l}{T^2 - t^2}. \quad (7)$$

Обозначая абсолютные значения поправок на приведенные длины через ΔL и Δl , на периоды — через ΔT и Δt и полагая, что они имеют один и тот же знак, получим согласно ф-ле (7)

$$g = \pi^2 \frac{(L \pm \Delta L) - (l \pm \Delta l)}{(T \pm \Delta T)^2 - (t \pm \Delta t)^2}$$

или, после простых преобразований,

$$g = \pi^2 \frac{(L-l) \pm (\Delta L - \Delta l)}{(T^2 - t^2) \pm 2(\Delta T \cdot T - \Delta t \cdot t) + (\Delta T^2 - \Delta t^2)}. \quad (8)$$

Если порядок поправок один и тот же, т. е. $\Delta L = \Delta l$; $\Delta T \cdot T = \Delta t \cdot t$, то поправки на приведенные длины, вызванные смещением осей вращения, будут взаимно исключены, а поправки на периоды колебания значительно уменьшены, по сравнению с обычным поворотным маятником. При этих условиях выражение (8) принимает вид

$$g = \pi^2 \frac{L-l}{T^2 - t^2}. \quad (9)$$

Подстановка в выражение (9) значений $L = H_1 + H_2$; $l = h_1 + h_2$ дает

$$g = \pi^2 \frac{(H_1 - h_1) - (h_2 - H_2)}{T^2 - t^2}. \quad (10)^1$$

Обозначая расстояния $H_1 - h_1$ через X , а $h_2 - H_2$ — через Y , будем иметь

$$g = \pi^2 \frac{X - Y}{T^2 - t^2}. \quad (11)$$

Полученное нами уравнение (11) показывает, что при выборе на стержне AA_1 (рис. 3) двух пар взаимных точек, отвечающих различным приведенным длинам, имеется возможность избавиться в полной или частичной мере от влияния на маятник преобладающего числа факторов, искажающих действительный результат g . Подробный анализ степени компенсации отдельных систематических погрешностей различного происхождения будет изложен в наших последующих работах.

В дальнейшем стержень AA_1 , на котором при $r = \text{const}$ выбраны две пары взаимных точек A, B и a, b , отвечающих приведенным длинам L и l , мы будем называть дифференциальным физическим маятником.

Учитывая, что в уравнение (11) входит разность расстояний между точками подвеса в области маятников и в области коромысел, дифференциальный физический маятник можно осуществлять, выбирая взаимные точки в области коромысла как по одну, так и по другую сторону относительно центра тяжести стержня. Дифференциальный физический маятник, у которого все четыре точки подвеса расположены по одну сторону от центра тяжести, будем называть *неповоротным*, в отличие от *поворотного* дифференциального маятника, у которого точки подвеса в области коромысел и точки подвеса в области

¹ Во всех предыдущих и последующих выражениях T и t представляют собой усредненные периоды:

$$T^2 = \frac{H_1 T_1^2 - H_2 T_2^2}{H_1 - H_2}; \quad t^2 = \frac{h_1 t_1^2 - h_2 t_2^2}{h_1 - h_2}.$$

маятников расположены относительно центра тяжести по разные стороны. Дифференциальный поворотный маятник можно рассматривать как два нормальных поворотных маятника с приведенными длинами L и l и уравненными периодами T и t . Следовательно, он позволяет получить для ускорения силы тяжести два независимых результата:

$$g_1 = \frac{\pi^2 L}{T^2} \text{ и } g_2 = \frac{\pi^2 l}{t^2},$$

Кроме того, по ф-лам (9) и (11) можно получить третье независимое значение для ускорения силы тяжести

$$g_3 = \pi^2 \frac{L-l}{T^2 - t^2}.$$

В значениях g_1 и g_2 определяются и вводятся поправки на период и приведенную длину; в значении g_3 — поправки компенсируются.

Сопоставление значений g_3 с g_1 и g_2 позволяет установить порядок величины неисключенных систематических погрешностей, т. е. определить правильность полученных результатов.

Таким образом, дифференциальный маятник является не только средством исключения систематических погрешностей при определении абсолютного значения ускорения силы тяжести, но дает также критерий для оценки степени достоверности полученного результата.

4. Дифференциальный метод в приложении к обычным поворотным маятникам

При рассмотрении кривых $L = f(H)$, в п. 3 для вывода ур-ния (7) было наложено условие $r^2 = \frac{J_0}{M} = \text{const}$. Учитывая, что

$$L = \frac{r^2}{H} + H \text{ и } l = \frac{r^2}{h} + h,$$

указанное выше условие для дифференциального маятника можно представить в виде

$$r^2 = H_1 \cdot H_2 = h_1 \cdot h_2. \quad (12)$$

Практическое осуществление дифференциального маятника, соответствующего условию (12), сопряжено с большими трудностями в связи с подгонкой периодов. Условие (12) требует, чтобы у маятника одновременно соблюдались равенства $T_1 = T_2$ и $t_1 = t_2$. Проведенный нами анализ показал, что ур-ния (9) и (10) справедливы и при отступлении от условия (12), причем принцип компенсации равнозначных и равновеликих параметрических поправок и прогрессивных поправок на период сохраняется. Для краткости не будем приводить элементарных доказательств, подтверждающих, что в ур-нии (10)

$$g = \pi^2 \cdot \frac{(H_1 - h_1) - (h_2 - H_2)}{T^2 - t^2}$$

при переходе от кривой $L = f(H)$, соответствующей радиусу инерции r_1 , к кривой, соответствующей радиусу инерции r_2 , прираще-

ние H_1 равно по абсолютной величине и противоположно по знаку приращению H_2 , и, следовательно, ур-ния (9), (10) и (11) справедливы и в тех случаях, когда r_1 для L не равно r_2 для l . Это условие позволяет не только облегчить возможность практического осуществления дифференциального физического маятника, но и распространить дифференциальный метод на два отдельно существующих поворотных маятника различной приведенной длины L и l в качестве контрольного средства для выявления неисключенных систематических погрешностей при определении g .

При осуществлении дифференциальных маятников и пользовании дифференциальным методом считаем возможным рекомендовать:

1. Предварительный выбор параметров дифференциального маятника производить графическим методом из семейства кривых $L = f(H)$ для различных радиусов инерции r .

2. С целью уменьшения относительной погрешности результата не допускать малых отношений $\frac{L-l}{L}$.

3. Не допускать, чтобы при пользовании двумя поворотными маятниками их массы значительно отличались друг от друга.

4. Если маятник качается, опираясь пластиной на нож, необходимо все опорные пластины делать из одного материала и степень чистоты обработки опорной плоскости иметь одинаковую.

5. Колебания во всех четырех положениях производить на одном и том же ноже.

6. Уравнивать периоды T_1 и T_2 , а также t_1 и t_2 подгоночным грузом.

7. Определения периодов колебаний во всех четырех положениях производить при одинаковых углах отклонения маятника от положения равновесия, причем угол размаха не должен превышать 1° .

5. Заключение

Произведенный нами анализ метода поворотных маятников, применяемых для определения абсолютного значения ускорения силы тяжести, позволяет сделать следующие выводы:

1. Метод поворотных маятников в том виде, в каком он использовался до сих пор, не дает уверенности в полном исключении из результата систематических погрешностей, обусловленных факторами, влияющими на колебания маятника помимо силы тяжести.

2. Определение поправок на измеренные значения L и T не позволяет исследователю уверенно оценить правильность результата ввиду сложности и недостаточной изученности некоторых источников систематических погрешностей, как, например, влияние системы нож — опора.

3. Анализ общих закономерностей, имеющих место при колебаниях физического маятника, позволил нам установить условия применения к ним дифференциального метода, позволяющего обнаруживать и исключать систематические погрешности при определении с наивысшей точностью абсолютного значения ускорения силы тяжести.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Михайлов, Курс гравиметрии и теории фигуры земли, Изд. редбюро ГУГК при СМ СССР, М., 1939.
2. F. W. Bessel, „Collections des memoires relatives à la physique.“ Paris, 1891.
3. F. Helmert, Beiträge zur Theor. des Reversions Pendels, P. G. J., 1893.
4. F. Kühnen, Fürwängler T., Bestimmung der absoluten Grösse der Schwarkraft zu Potsdam mit Reversionspendeln, P. G. J., 1906.
5. P. Heyl and Cook, Bur. Stand. J. Res., Wash., 1935. 17, 805.
6. L. S. Clark, Ser. A. Math. and Physic, 1939, S. № 787, Vol. 238.
7. Driden, Bur. Stand. J. Res., Wash. 29, 1942.
8. Г. С. Раздымаха, Научные труды ЦНИИГАиК, вып. № 63, 1949.
9. М. Ф. Малков, Основы метрологии, М., 1949.
10. Д. И. Менделеев, Опытное исследование колебания весов, ГНТИ, Ленхимсектор, Л., 1931.
11. И. В. Коробочкин, Колебание несоизмерительных приборов, Машгиз, 1947.

*Лауреат Сталинской премии П. Н. АГАЛЕЦКИЙ
и К. Н. ЕГОРОВ*

КОРОМЫСЛО, КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ НОЖ — ОПОРА МАЯТНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Задача определения абсолютного значения ускорения силы тяжести с метрологической точностью не утратила своей актуальности до настоящего времени. Наибольшее распространение для этого определения получил метод поворотного физического маятника. В текущем столетии абсолютные определения g проводились в Ленинграде в Главной Палате мер и весов, а также в Потсдаме, Вашингтоне и Теддингтоне. Определения в Главной Палате мер и весов производились с помощью длинных нитяных маятников. Остальные определения проведены с помощью поворотных маятников.

В итоге этих работ стало очевидным, что как метод длинных маятников, так и метод поворотных маятников, наиболее разработанный в теоретическом и практическом отношении, все же не обеспечивают получения результатов для абсолютного значения ускорения силы тяжести с необходимой в настоящее время метрологической точностью порядка двух-трех миллионных долей.

Анализ абсолютных определений, проведенных в Потсдаме, Вашингтоне и Теддингтоне, полностью подтверждает мнение Д. И. Менделеева о поворотных маятниках: "... Говоря вообще, я не считаю возможным достичь с поворотным маятником высших степеней точности в определении напряжения тяжести уже по той причине, что здесь надо применять колебания на призмах, что влечет за собой сомнение ...".

Определение характера сил трения, установление физической картины механизма колебания острия ножа, опирающегося на пластину, а также установление действительного положения оси вращения маятника и определение роли и характера упругих деформаций ножа и опоры являются вопросами первостепенной важности при определении абсолютного значения ускорения силы тяжести с помощью поворотных маятников. Потсдамское, вашингтонское и теддингтонское определения не сопровождалось в должной мере экспериментальными исследованиями этих вопросов, поэтому мы вправе ожидать в упомянутых работах наличия неисключенных систематических погрешностей.

Для установления абсолютного значения физической величины с метрологической точностью необходимо иметь аппаратуру наивысшей чувствительности. Однако решающим в получении достоверного значения результата в этом случае является не чувствительность аппаратуры и повторяемость ее показаний, а возможность исключения из результата систематических погрешностей. Если влияние случайных погрешностей на точность результата можно значительно уменьшить путем увеличения числа наблюдений, то исключение систематических погрешностей требует проведения специальных исследований.

Анализ определений g , проведенных в текущем столетии с помощью поворотных маятников, показывает, что этот метод в его современной стадии развития обеспечивает получение абсолютного значения g с погрешностью порядка единицы пятого знака.

Мы полагаем, что можно повысить достоверность результата, получаемого с помощью поворотных маятников, если подвергнуть тщательному теоретическому и экспериментальному анализу основной источник систематических погрешностей, присущий данному методу, — систему нож — опора.

Физический маятник представляет собою систему, связанную с окружающей средой. Следовательно, на него в процессе колебания действуют, кроме тяжести, силы связи.

В уравнении, устанавливающем связь между ускорением силы тяжести, периодом колебания и приведенной длиной маятника, предполагается, что отсутствует влияние связей на период и приведенную длину.

В реальных условиях эксперимента основная задача исследователя заключается в установлении количественных зависимостей для изменений, вносимых связями в колебательную систему, и в введении в результат соответствующих поправок. Эти изменения по своему характеру можно разделить на две основные группы:

1. Энергетические, — определяющие величину потенциальной энергии, сообщенной маятнику, независимо от силы тяжести при отклонении его от положения равновесия, а также определяющие расходование энергии, сообщенной маятнику, на работу сил связи. Наличием первых определяется кажущееся увеличение силы тяжести; наличием вторых определяется затухающий характер колебаний маятника.

2. Параметрические, — изменяющие основной параметр физического маятника, — его приведенную длину.

К параметрическим изменениям, вносимым связями в колебательную систему (маятник, коромысло и пр.), можно отнести: смещение оси вращения относительно опорной плоскости из-за механических свойств материала ножа и опоры, сокачания штатива, температурных изменений длины маятника и др. Эти изменения не поддаются точному учету. Хотя они малы по абсолютной величине, но пренебрежение ими недопустимо, так как их влияние на значение g , определяемое с помощью поворотных маятников, превышает допустимую для результата погрешность.

Следовательно, поправки, подлежащие учету, относятся либо к приведенной длине, либо к периоду колебаний.

Большинство причин, вызывающих изменение периода колебаний и приведенной длины маятника, хорошо изучены, и поправки на эти изменения определяются с достаточной степенью точности.

Наименее изученными являются энергетические и параметрические изменения физического маятника, имеющие место в системе нож — опора. Эти изменения мы считаем основным источником неисключенных систематических погрешностей, присутствующих в значениях g , полученных с помощью поворотных маятников. Попытки теоретического и экспериментального исследования системы нож — опора предпринимались неоднократно (Л. Эйлер, Бессель, Д. И. Менделеев), однако эти попытки не завершились удовлетворительным результатом, и вопрос исследования величины энергетических и параметрических изменений, вносимых призмой в физический маятник, не потерял значения до настоящего времени.

При работе с поворотными маятниками для определения ускорения силы тяжести пользуются следующим уравнением:

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}, \quad (1)$$

где L — приведенная длина;
 T — приведенный период.

Необходимо при рассмотрении этого уравнения учитывать следующие особенности поворотного маятника: приведенная длина является расстоянием между осями вращения маятника в прямом и перевернутом положениях, приведенную длину непосредственно измерить не представляется возможным, так как оси вращения физически не означены.

Обычно измеряют у поворотного маятника расстояние между опорными пластинами (если маятник опирается пластинами на неподвижный нож) или между лезвиями ножей (если в маятник заделаны опорные ножи). Обозначим это измеренное расстояние через L' . Оно близко по величине к приведенной длине L , но не равно ей. Наблюденный период колебаний T' также отличается от периода колебаний T .

Основная задача экспериментатора при работе с поворотными маятниками заключается в определении поправок

$$\left. \begin{aligned} \Delta L &= L - L'; \\ \Delta T &= T - T'. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В настоящей работе нас интересует вопрос влияния системы нож — опора как на величину ΔL , так и на величину ΔT .

В условиях работы поворотного маятника и другой маятниковой аппаратуры, снабженной системой нож — опора, лезвие призмы (ножа) находится под действием очень большой нагрузки. Удельная нагрузка, которую испытывает лезвие, в некоторых случаях достигает нескольких

десятков тонн на квадратный сантиметр. Учитывая это, Д. И. Менделеев (в работе „Опытное исследование колебания весов“) утверждал: „Нож (острие его) при колебаниях изгибается, подушка же вместо плоской становится от надавливания вогнутой; оба тела зыблются при качаниях“.

При этом лезвие ножа испытывает как упругие, так и остаточные деформации. Если еще учесть, что поверхность лезвия имеет шероховатости в виде отдельных выступов и впадин, то не может быть и речи о правильной цилиндрической его форме. Отмеченное обстоятельство подчеркивает сложность закономерностей, имеющих место в системе нож — опора, и несостоятельность попыток введения поправок на влияние ножевидной опоры, исходя из упрощенных геометрических построений.

Многие исследователи предлагали различные уравнения для аналитического решения этого вопроса, но их выводы и уравнения до сего времени не подвергались серьезной экспериментальной проверке.

Путь обстоятельного опытного исследования системы нож — опора представляется нам наиболее целесообразным и достоверным для определения величин ΔL и ΔT , но для этой цели необходимо располагать достаточно чувствительным инструментом. В качестве такого инструмента мы предлагаем использовать физический маятник.

Покажем, что физический маятник удовлетворяет поставленным задачам. Период колебания физического маятника для бесконечно малых амплитуд определяется следующими выражениями:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{J_0 + Mh^2}{Mgh}} = 2\pi \sqrt{\frac{r^2 + h^2}{gh}}; \quad (3)$$

приведенная длина

$$L = \frac{r^2 + h^2}{h}, \quad (4)$$

где M — масса физического маятника;

g — ускорение силы тяжести;

J_0 — момент инерции относительно оси, проходящей через центр тяжести маятника;

h — расстояние оси вращения от центра тяжести маятника;

r — радиус инерции; $r = \sqrt{\frac{J_0}{M}}$.

Следовательно, при $r = \text{const}$ можно рассматривать период колебания и приведенную длину, как функции h .

Представим графически зависимость $T = f(h)$ физического маятника при $r = \text{const}$.

Для этого отложим по оси ординат значения периода колебаний T , а по оси абсцисс — расстояния h ; получим кривую, изображенную на рис. 1.

При $h = r$ эта кривая имеет точку минимального периода c .

Участок кривой, соответствующий $h < r$, называют областью коромысел; участок, соответствующий $h > r$, называют областью маятников.

В области коромысел кривая $T = f(h)$ имеет большую крутизну, чем в области маятников, и, следовательно, обладает большей чувствительностью по периоду к изменениям величины h .

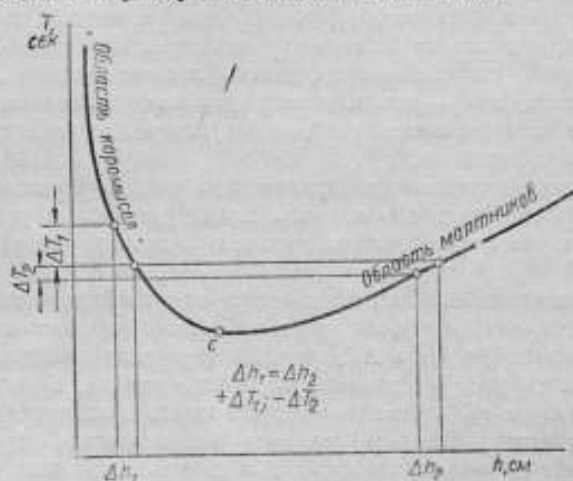


Рис. 1.

Обозначим абсциссы точек равного периода в области коромысел и в области маятников соответственно через h_1 и h_2 .

Рассматривая равные приращения $\Delta h_1 = \Delta h_2$, отмечаем, что соответствующие приращения периода ΔT_1 и ΔT_2 отличаются по абсолютной величине и знаку, причем ΔT_1 может быть значительно больше ΔT_2 .

Так, например, для секундного поворотного маятника, имеющего $\frac{J_0}{M} = 1926 \text{ см}^2$, уменьшение h_1 на 5 мк в области коромысел даст увеличение периода колебания на $\Delta T_1 = +0,000005$ сек., а изменение h_2 на такую же величину в сторону уменьшения в области маятников уменьшит период колебания, изменяя его на $\Delta T_2 = -0,000001$ сек.

Более крутой подъем кривой $T = f(h)$ в области коромысел позволяет использовать коромысло как прибор для определения величины изменения периода и смещения оси вращения маятника относительно плоскости опоры, а следовательно, экспериментально найти поправки к приведенной длине и периоду от различных причин, вызывающих их изменения, т. е. от геометрической формы лезвия ножа и опоры, твердости и упругости материала, нагрузки и пр.

Современная аппаратура для измерения малых промежутков времени дает возможность легко производить отсчет моментов времени

с погрешностью порядка 0,001 сек. Можно создать коромысло, у которого изменения h на один микрон будут вызывать изменения периода колебания в сотых и десятых долях секунды.

Еще Д. И. Менделеев считал, что коромысло весов — тот же маятник; по этому поводу в 1898 г. он писал: „Конечно, весы и маятники колеблются в очень неодинаковых условиях, у весов центр тяжести лежит близко под точкой опоры, а у маятников взаимное их расстояние велико, но причина и род явлений совершенно одни

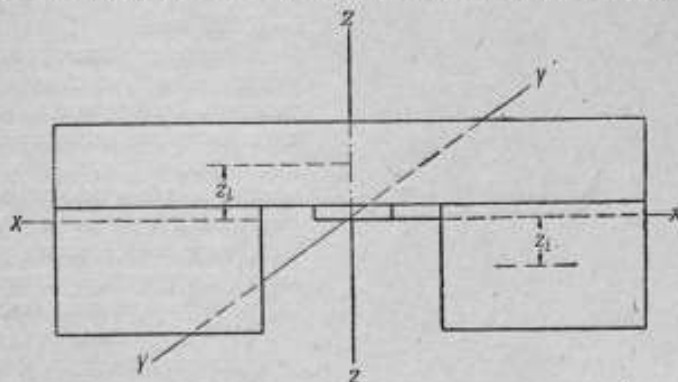


Рис. 2.

и те же, а потому заключение от весов к маятнику — по отношению к трению острого ребра призмы — нельзя считать неосновательным. Мне кажется, вообще, что связь между весами и маятниками заслуживает большего внимания, чем то, которое замечается ныне в этом отношении*.

Следовательно, коромысло специальной конструкции может служить в качестве чувствительного прибора для определения величины изменения Δh (или ΔL — приведенной длины физического маятника) от различных причин, в основном — от геометрической формы лезвия призмы (ножа), твердости и упругости материала, удельной нагрузки и прочих условий.

Для этой цели наиболее целесообразно использовать коромысло, составленное из отдельных плоскопараллельных пластин, изготовленных из однородного материала и точно обработанных (рис. 2).

У такого коромысла расстояние h центра тяжести от плоскости опоры определяется следующей зависимостью:

$$h = \frac{M_1 z_1 + M_2 z_2 + \dots + M_i z_i}{M_1 + M_2 + \dots + M_i}, \quad (5)$$

где M_i — масса отдельной плоскопараллельной пластины;

z_i — расстояние линии опоры коромысла до центра отдельной пластины.

Расчет основных параметров коромысла показывает, что для получения чувствительности по периоду в сотых долях секунды при изменении h на один микрон необходимо, чтобы период колебания был в пределах 6,00—10,00 сек., а величина $h = 100—500$ мк. На

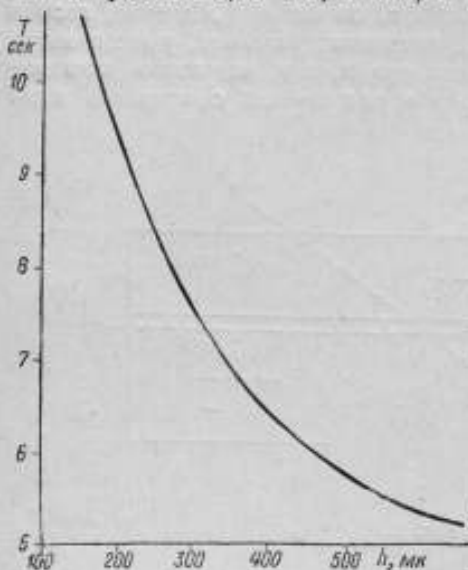


Рис. 3.

рис. 3 представлена графически зависимость $T = f(h)$ коромысла, у которого $\sqrt{\frac{J_0}{M}} = 6,527$ см.

Подобное коромысло, применяемое в качестве измерительного инструмента, позволяет провести экспериментальное исследование системы нож — опора в зависимости от различных причин и условий. Так, например, можно установить следующие закономерности и характеристики:

1) Определить эффективное значение радиуса кривизны лезвия призмы ρ .

2) Определить влияние радиуса кривизны лезвия на период колебания при неизменной твердости материала опорной

пластины и ножа в пределах от $\rho = 0,005$ мм до $\rho = 1,000$ мм, т. е. установить зависимость периода колебания, как функции радиуса кривизны лезвия ножа:

$$T = f(\rho). \quad (6)$$

3) Определить изменение периода колебания коромысла в зависимости от изменения механических свойств материала опорной пластины и ножа при неизменном радиусе кривизны его лезвия, рассматривая в этом случае период колебания как функцию механических свойств материала

$$T = f(E). \quad (7)$$

4) Исследовать изменение периода колебания коромысла в зависимости от удельной нагрузки, испытываемой лезвием ножа, при неизменности остальных параметров, т. е.

$$T = f\left(\frac{P}{l}\right), \quad (8)$$

где l — длина рабочей части лезвия ножа;
 P — вес коромысла.

Из анализа и сопоставления опытных данных, полученных по этой программе, можно установить величину и характер поправок ΔL и ΔT .

В качестве иллюстрации наших предположений об изменении приведенной длины ΔL и периода ΔT маятника, вызываемых системой нож — опора под воздействием различных причин, приведем полученные Д. И. Менделеевым результаты из его работы „Опытное исследование колебания весов“.

В этой работе он высказал следующее: „Из всех видов сопротивлений или сил, возникающих от движения, которому они стремятся противодействовать, наименее изученным и наиболее темным остается поныне трение твердых тел. А то видоизменение его, которое проявляется в маятниках и весах, снабженных ножами (призмами), опирающимися на подушку, не только почти не изучалось, но и очень трудно для изучения, потому что здесь нет тех видимых относительных перемещений трущихся тел, какие свойственны „скользящему“ и „катящему“ трению, так как острое ребро ножа покоится на подушке и существует только перемена углов и угловых скоростей между гранями ножа и подушки. А между тем на преодоление этого вида трения, очевидно, идет часть энергии колебания, если они потухают в пустоте“.

Д. И. Менделеев придавал огромное значение вопросам исследования трения ножа маятника или весов на опоре. Для определения значения длины секундного маятника и величины ускорения силы тяжести с метрологической точностью он наметил обширную программу экспериментального изучения физической картины механизма колебания маятников и весов, снабженных системой нож — опора.

К сожалению, из всей этой программы Д. И. Менделееву удалось осуществить только часть опытов с весами Неметца.

В этих опытах под средним ножом весов испытывались 10 опорных пластин, изготовленных из материалов различной твердости. При этом производились наблюдения за изменением величины периода колебания — декремента затухания — и чувствительности весов в зависимости от твердости материала опорных пластин.

В результате были получены экспериментальные данные, помещенные в табл. 1.

Таблица 1

Наименование определяемых величин	Призма весов опирается на пластину из:						
	закаленной стали	агата	мягкой стали	латуни	красной меди	рога	твердого каучука
Нагрузка, необходимая для отклонения коромысла на одно деление, $K, \text{мг}$	0,043	0,047	0,050	0,063	0,071	0,093	0,193
Время одного размаха t , сек.	33,4	31,5	29,8	27,8	25,4	18,2	15,0
Декремент затухания D	1,029	1,032	1,031	1,034	1,065	1,156	1,252

Из этой таблицы видно, что чувствительность и время одного размаха уменьшаются, а декремент затухания увеличивается с уменьшением твердости материала опорных пластин.

На основании этих опытных данных Д. И. Менделеев сделал следующие выводы:

1) Тот вид трения, который существует (в весах, маятниках и т. п.) между острием призмы и подставкою, на которую он опирается, несомненно влияет, не только на декремент D колебаний, но и на чувствительность весов K , а также и на время t одного размаха.

2) Зависят ли эти изменения от округленности острия ножа или от различия в деформации (происходящей вследствие давления груза) ножа и подставки, или еще от каких-либо причин (прилипания и т. п.), во всяком случае нельзя думать, что этого нет при обычном устройстве (в весах, маятниках и т. п.) ножа и подставки из стали и агата (кварца, кремня и т. п.), а потому в определении не только декрементов, но и времени размахов явно участвует трение ножей.

3) Поэтому в определении напряжения тяжести g и длины секундного маятника должно делать поправку на трение ножа. Эта поправка должна увеличивать время одного размаха, а потому длина секундного маятника — при исключении трения ножа — должна быть короче, а g менее, чем ныне общепринято, потому, что ныне на трение ножа поправки не делается*.

Следовательно, основной вывод, сделанный Д. И. Менделеевым, заключается в том, что при абсолютных определениях ускорения силы тяжести необходимо делать поправку на трение лезвия ножа об опорную пластину маятника. По его мнению, поправка на трение должна увеличивать время одного размаха маятника (или весов) и значение g будет несколько меньше наблюдаемого.

Д. И. Менделеев считал „трение ножа на подставке“ явлением очень сложным: „Я предполагаю, в ряде начатых опытных исследований этого вида трения, идти с более подробных определений влияния твердости ножа и подставки...“. Под „трением ножа на подставке“ он понимал всю сумму причин, вызвавших столь резкие изменения периода колебания, декремента затухания и чувствительности весов Неметца при замене твердых опорных пластин на пластины из более мягкого материала. Характер этих причин не подвергался полному анализу как самим Д. И. Менделеевым, так и исследователями после него.

Всю сумму причин, повлиявших на изменение периода колебания в опытах Д. И. Менделеева с весами Неметца, необходимо, как выше было нами сделано, разделить в основном на две группы:

1) причины, связанные с энергетическими изменениями колебательной системы;

2) причины, связанные с параметрическими или геометрическими изменениями, вызывающие смещение оси вращения относительно плоскости опоры.

Причины, связанные с энергетическими изменениями колебательной системы, необходимо разделить на две подгруппы: а) вызываю-

щие изменения начального значения энергии и б) вызывающие изменения, обуславливающие расходование этой энергии в процессе колебания. Вторая подгруппа полностью характеризуется декрементом затухания.

Рассмотрим влияние затухания на изменение периода колебания в опытах Д. И. Менделеева с весами Неметца.

Анализ уравнения, выражающего затухающие колебания системы, дает возможность установить, что при наличии сил сопротивления (трения и др.) период колебания увеличивается по отношению к периоду незатухающих колебаний. Это выражается следующей зависимостью:

$$T = T_0 \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{\pi^2 \lg^2 e}}, \quad (9)$$

где T — наблюдаемый период колебаний с учетом влияния сил сопротивления;

T_0 — период колебаний без затухания;

λ — логарифмический декремент затухания, равный

$$\lambda = \lg \left(\frac{A_k}{A_{k+1}} \right);$$

e — основание натуральных логарифмов;

A_k и A_{k+1} — амплитуды колебания.

Разлагая выражение (9) в ряд

$$T = T_0 \left(1 + \frac{\lambda^2}{2\pi^2 \lg^2 e} - \frac{\lambda^4}{8\pi^4 \lg^4 e} + \dots \right),$$

и ограничивая ряд только первыми двумя членами, получим с достаточной точностью выражение для T_0 :

$$T_0 = T \frac{2\pi^2 \lg^2 e}{\lambda^2 + 2\pi^2 \lg^2 e}. \quad (10)$$

Выражение (10) позволяет по наблюдаемому периоду колебаний и логарифмическому декременту затухания исключить влияние необратимых потерь энергии на период колебания.

Воспользуемся выражением (10) для определения поправок на необратимые потери энергии, имевшие место в опытах Д. И. Менделеева. В случае опорной пластины из закаленной стали под средним ножом весов Неметца наблюдаемый декремент затухания равен $D = 1,029$, следовательно, величина поправочного члена равна

$$\frac{\lambda^2}{2\pi^2 \lg^2 e} = 0,0000414.$$

Наблюдаемый период затухающих колебаний имел значение

$$T = 33,3 \text{ сек.}$$

Период свободных колебаний для этого случая будет равен

$$T_0 = 33,2986 \text{ сек.}$$

Таким образом, необратимые потери энергии вызвали увеличение периода колебания на

$$T - T_0 = 0,00138 \approx 0,0014 \text{ сек.}$$

На основании изложенного выше можно сказать, что поправка периода колебания маятника на необратимые потери энергии весов будет иметь отрицательный знак и уменьшать наблюдаемое значение периода на величину

$$\sigma_T = -T_0 \frac{\lambda^2}{2\pi^2 l g^2 e} \quad (11)$$

Введение в ряд наблюдений Д. И. Менделеева поправок на необратимые потери энергии — на декремент (см. табл. 2) — лишь в незначительной степени влияет на изменение величины периодов колебаний весов на опорах из различных материалов.

Таблица 2

Наименование материала опорных пластин	Наблюдаемый декремент затухания D	Логарифмический декремент затухания λ	Наблюдаемый период колебаний T в сек.	Период колебаний с учетом поправки на декремент T_0 в сек.	$T - T_0$ в сек.	Изменение периода в ‰
Закаленная сталь	1,029	0,01242	33,3	33,2986	0,0014	0,0011
Агат	1,032	0,01368	31,5	31,4984	0,0016	0,0010
Мягкая вольфрамовая сталь	1,031	0,01326	29,8	29,7986	0,0014	0,0017
Латунь	1,034	0,01452	27,8	27,7584	0,0016	0,0016
Красная медь	1,065	0,02735	25,4	25,3917	0,0053	0,0203
Рог	1,156	0,06295	18,2	18,1802	0,0194	0,1034
Твердый каучук	1,252	0,09760	15,0	14,9670	0,0330	0,2202

Величина изменения периода при введении этой поправки не превышает 0,22‰ при наиболее мягкой опоре (твердый каучук), а при самой твердой опоре (закаленная сталь) составляет всего 0,0041‰.

Следовательно, кроме необратимых потерь энергии необходимо искать другие причины, вызвавшие изменение периода колебания коромысла весов Немеца при замене твердых опорных пластин на мягкие.

Рассмотрим процесс работы лезвия ножа и попытаемся установить основные причины, вызывающие изменение периода колебаний маятника, весов и пр. Маятник или коромысло, опирающиеся ножом на пластину или пластиной на нож, совершают гармонические колебания если их в начальный момент вывели из состояния равновесия, т. е. если им сообщили некоторый запас энергии.

Величина энергии при заданных M , r , h и угле поворота θ будет определяться силой тяжести.

Однако, если в системе нож — опора имеют место упругие деформации, вызывающие момент упругих сил при отклонении маятника на угол θ , то кроме восстанавливающего момента, определяемого силой тяжести, на маятник будет действовать добавочный момент упругих сил. В начальных условиях (при отклонении) маятнику сообщается дополнительная потенциальная энергия на упругую деформацию. В этом случае будет наблюдаться кажущееся увеличение силы тяжести, а следовательно, и уменьшение периода колебаний маятника на величину, определяемую соотношением момента упругих сил и момента силы тяжести.

Помимо момента упругих сил на изменение периода колебаний может влиять изменение h .

Наблюденные Д. И. Менделеевым уменьшения периода колебаний коромысла весов не дают достаточного материала для разделения и определения величины энергетической и параметрической поправки.

Только дополнительные эксперименты с коромыслом и маятником в условиях качания ножа на пластине и пластины на ноже, с изменением свойств и характеристик ножа и опоры, позволят определить характер и величину изменений ΔL и ΔT , вносимых системой нож — опора физического маятника.

Предлагаемый нами измерительный инструмент в виде специального коромысла сможет помочь проведению этого важного исследования.

Для весов Немеца, на которых Д. И. Менделеев производил свои опыты, $\sqrt{\frac{J_0}{M}} = 2,67$. Зависимость периода колебания T_0 от расстояния h оси вращения до центра тяжести коромысла представлена графически на рис. 4, а также в табл. 3, согласно вычисленным значениям T_0 , помещенным в табл. 2.

Зависимость $T = f(h)$, как показывает график рис. 4 и данные табл. 3, позволяет оценить величины Δh по величинам ΔT в опытах Д. И. Менделеева и предположить, что уменьшение периода колебания при переходе на мягкие опоры происходило благодаря смещению оси вращения коромысла в сторону основания ножа.

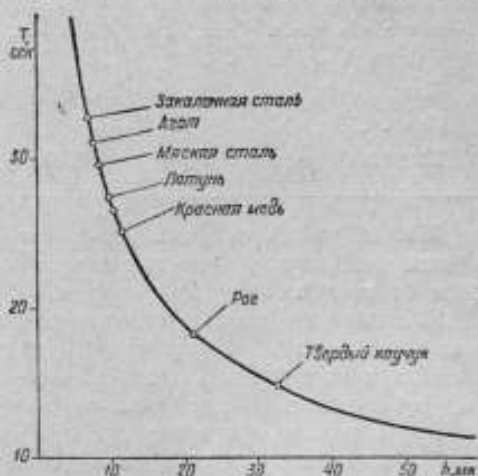


Рис. 4.

Таблица 3

Наименование материала опорных пластин	Период колебаний веса Нейста с поправкой на декремент T_0 в сек.	Расстояние от оси вращения до центра тяжести h в $\mu\text{к}$	Эквивалентное приращение $\Delta h = h_{\text{к}} - h_{\text{сталь}}$ в $\mu\text{к}$
Закаленная сталь	33,2986	6,5	—
Агат	31,4984	7,7	1,2
Мягкая вольфрамовая сталь	29,7986	8,5	2,0
Латунь	27,7984	9,8	3,3
Красная медь	25,3947	11,6	5,1
Рог	18,1805	22,6	16,1
Твердый каучук	14,9670	32,7	26,2

Можно также предположить, что изменения периодов вызваны увеличением момента упругих сил в системе нож — опора при переходе от жестких к мягким опорам.

В заключение этой статьи приведем некоторые параметры измерительных коромысел, употребляемых нами в исследовании механизма колебания маятника с системой нож — опора.

Для исследования влияния различных причин (радиуса кривизны лезвия ножа, твердости и упругости материала ножа и опоры и других причин) на изменение периода колебания физического маятника нами употребляются коромысла с различной массой.

Все коромысла одной конструкции, по типу, изображенному на рис. 2.

Измерительное коромысло весом в 1000 г составлено из плоско-параллельных стеклянных пластин, изготовленных с большой точностью по плоскостности и параллельности. Пластины притерты друг к другу на оптический контакт.

К перемычке в центре, как показано на рис. 2, притираются на оптический контакт сменные опорные пластинки из различных материалов.

Такое измерительное коромысло дает возможность определять эффективный радиус кривизны лезвия ножа с погрешностью $\pm 0,5 \mu\text{к}$. С такой же точностью можно определять и изменение Δh расстояния h от линии опоры до центра тяжести измерительного коромысла в зависимости от различных причин.

Кроме этого, нами употребляются измерительные коромысла, изготовленные из агата и стали весом в один и пять граммов, дающие возможность измерять упругую деформацию лезвия ножа.

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТЕЙ СЛАБЫХ ВОДНО-СПИРТОВЫХ РАСТВОРОВ

Предлагаемый в работе новый, не зависящий от весового, интерференционный метод определения плотностей слабых водно-спиртовых растворов основан на зависимости между разностями плотностей и показателей преломления растворов и воды.

Исследования в области слабых водно-спиртовых растворов показали, что этот метод дает возможность повысить точность и надежность ареометрических измерений при определении плотности и концентрации растворов.

Он удобен как по скорости, так и по легкости выполнения, и может быть с большим успехом применен в научно-исследовательских институтах и заводских лабораториях.

История физики свидетельствует о том, что показатели преломления жидких и газообразных тел привлекали особое внимание как русских, так и иностранных ученых.

Первое время интересы исследователей концентрировались на вопросе нахождения математической зависимости между показателем преломления и плотностью.

Эту зависимость отдельные авторы пытались выразить математически следующими формулами:

$$\frac{n-1}{D} = \text{const}; \quad \frac{n^2-1}{D} = \text{const}; \quad \frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{D} = \text{const} \quad \text{и т. д.}$$

Однако исследования однородных газов и жидкостей, а также крепких и слабых растворов показали, что все эти формулы следует считать только первым грубым приближением.

Отсутствие достаточно точной математической зависимости показателей преломления от плотности вещества являлось причиной, по которой оптический метод определения плотности растворов до настоящего времени не мог служить не только образцовым, но даже рабочим методом.

Поэтому основной задачей в области применения оптического метода в денсиметрии является установление достаточно строгой эмпирической зависимости показателя преломления от плотности вещества.

Нахождение этой связи обусловлено применением наиболее совершенной методики как при определении показателей преломления, так и при определении плотностей.

Одним из наиболее точных методов определения показателей преломления представляется интерференционный метод, который и был применен в настоящей работе.

Определение плотностей производилось дифференциальным пикнометрическим методом, который, как известно, дает наивысшую точность, по сравнению с другими весовыми способами.

Настоящая работа состоит из четырех частей: определение разности плотностей растворов и воды дифференциальным пикнометрическим методом, исследование разности показателей преломления этих же растворов интерференционным методом, установление эмпирической зависимости разности показателей преломления от разности плотностей и оценка точности оптического метода, по сравнению с весовым.

Для разрешения этих вопросов была разработана новая схема упрощенного типа для переливания и составления растворов, почти полностью устраняющая возможность растворения газов в испытуемой жидкости.

Кроме того, была разработана новая методика заполнения камер, при которой отсутствует искажение интерференционной картины.

Совершенно необходимой оказалась разработка термостатного приспособления для интерферометра, позволяющего выдерживать растворы при точно заданной постоянной температуре длительные промежутки времени.

Разрешение этих принципиально второстепенных задач в значительной мере обеспечило успех всей работы.

Определение плотности проводилось, как сказано ранее, дифференциальным пикнометрическим методом. Сущность метода заключается в определении малых разностей масс жидкостей, попеременно заполняющих заданные пикнометры.

При определении разности плотностей исследуемого раствора и воды применялись три пикнометра. Объем каждого пикнометра равнялся 100 *мл*, диаметр капилляров — около 1 *мм*.

При этом два пикнометра наполнялись дистиллированной водой, а третий — исследуемым раствором. Наполнение пикнометров производилось в разреженной атмосфере.

После наполнения пикнометры помещались в термостат, температура в котором поддерживалась с погрешностью не выше $\pm 0,005^\circ \text{C}$.

Затем пикнометры попарно уравнивались на чашках весов (первый помещался на правую чашку, третий — на левую или второй на правую чашку, третий — на левую).

В дальнейшем они опоражнивались и вновь наполнялись с той только разницей, что первые два пикнометра наполнялись исследуемым раствором, а третий — водой. В работе исследовались 42 раствора, причем каждый из них подвергался четырехкратному определению разности плотностей.

Вычисление разности плотностей воды и растворов производилось по формуле

$$\Delta D = \frac{M_1 + M_2 + D_0 [(\Delta V'_1 - \Delta V_1) - (\Delta V'_3 - \Delta V_3)]}{(V_1 + \Delta V'_1) + (V_3 + \Delta V_3)}$$

где M_1 и M_2 — разности в массах пикнометров при первом и втором наполнениях;

V_1 и V_3 — объемы пикнометров до нижнего деления шкалы;

ΔV_1 и ΔV_3 — объемы жидкостей в капиллярах от нижней части шкалы до уровня жидкости при первом наполнении;

$\Delta V'_1$ и $\Delta V'_3$ — соответствующие объемы при втором наполнении.

Знаменатель представляет сумму емкостей двух пикнометров, наполненных исследуемым раствором.

Разности плотностей, определенные этим методом, имеют погрешность того же порядка, что и погрешность существующей константы плотности воды, т. е. примерно $1 \cdot 10^{-6}$ г/см³.

Исследование разности показателей преломления растворов производилось специально приспособленным газовым интерферометром. Так как при этом большое значение имеет постоянство температуры, то было сконструировано термостатное приспособление к интерферометру, позволяющее исследовать растворы при строго определенных постоянных температурах 15 и 20° С, величина которых не уклонилась более чем на 0,005° С.

Термостатное приспособление исключило необходимость пересчета значения разности показателей преломления на определенную температуру, что почти всегда вносит ошибки, обуславливаемые погрешностями температурных коэффициентов показателей преломления.

Точность определения разности показателей преломления зависит от методики наполнения кювет, поэтому на методику было обращено особое внимание. Перед наполнением кюветы тщательно высушивались сухим воздухом в течение одного часа.

Далее производилась откачка воздуха из кюветы в продолжение 8—10 мин., после чего кювета наполнялась исследуемой жидкостью. Жидкость пропускалась через камеру в объеме в десять раз большем, чем необходимо для наполнения кюветы. Это делалось для того, чтобы протекающий раствор увлек за собой остатки растворенного газа. При такой методике наполнения кювет искривления интерференционных полос не наблюдалось, как это имеет место при наполнении кювет в атмосфере воздуха.

Соответствующие исследования показали, что постоянство температуры в интерферометре достигается через 1,5 часа после включения термостата. Поэтому наблюдения начинались обычно через два часа после установки камеры в интерферометре.

При измерениях разности показателей преломления пользовались красной линией кадмия длиной волны $\lambda = 6448,5 \text{ \AA}$, желтой линией натрия $\lambda = 5892,9 \text{ \AA}$ и зеленой линией ртути $\lambda = 5460,7 \text{ \AA}$. Соответствующая линия выделялась монохроматором. На всем протяжении

хода компенсатора (около 100 полос) интерференционные полосы были вполне отчетливы и резки. Дисперсия особо не определялась, ввиду близости дисперсии воды и слабых водно-спиртовых растворов.

Исследование одного и того же раствора производилось в шести кюветах длиной 200 мм, 150 мм и 100 мм — по две штуки каждого размера.

За рабочий день удавалось произвести исследование только одного водно-спиртового раствора при одной температуре. Для ускорения процесса исследования кюветы, наполненные раствором, предварительно помещались в воздушный термостат, температура в котором поддерживалась близкой к температуре 15 или 20° С.

Всего было изучено 42 раствора двукратным исследованием.

Разности показателей преломления вычислялись по следующей формуле

$$\Delta n = \frac{\sum_1^6 m_i}{\sum_1^6 L_i} \lambda,$$

где m — число смещенных полос;

L — длины кюветы;

λ — длина волны падающего света.

Разности показателей преломления были получены с семью десятичными знаками, некоторые из результатов приводятся в табл. 1.

Решающей частью нашей работы являлось нахождение эмпирической формулы, выражающей зависимость между разностями плотностей и разностями показателей преломления водно-спиртовых растворов и воды.

Графический метод исследования привел к убеждению в целесообразности искать упомянутую зависимость в виде ряда

$$Y = a + bx + cx^2 + \dots,$$

где $x = \Delta n$;

$$y = \frac{\Delta D}{\Delta n}.$$

Определение неизвестных коэффициентов a , b , c и т. д. производилось способом наименьших квадратов по методу П. Л. Чебышева, в результате чего была получена эмпирическая формула

$$\Delta D = 3,3603 (\Delta n) - 216,83 (\Delta n)^2 - 11730 (\Delta n)^3.$$

Найденная формула была проверена по разностям плотностей 42 водно-спиртовых растворов, измеренных так, как указывалось ранее, и дала погрешность, не превышающую $3 \cdot 10^{-6}$ г/см³.

Результаты подсчетов по формуле и измерений дифференциальным пикнометрическим методом показали, что они отличаются друг от друга в шестом десятичном знаке, как это видно из табл. 2.

Таблица 1

Зависимость Δn от ΔD при $t = 20^\circ \text{C}$
 Вода и водно-спиртовой раствор

Разность плотностей, полученных дифференциальным пикнометрическим методом	Камера	$\lambda = 5460.7\text{Å}^*$		$\lambda = 5892.9\text{Å}^*$		$\lambda = 6448.5\text{Å}^*$	
		число смещенных полос	$\Delta n \cdot 10^7$	число смещенных полос	$\Delta n \cdot 10^7$	число смещенных полос	$\Delta n \cdot 10^7$
0,0000467	I	2,563	139,5	2,375	139,2	2,163	138,8
	II	2,562		2,368		2,163	
	III	3,780		3,488		3,190	
	IV	3,780		3,468		3,190	
	V	5,147		4,763		4,343	
	VI	5,146		4,766		4,343	
0,0002120	I	11,658	634,7	10,780	533,4	9,839	631,6
	II	11,657		10,779		9,838	
	III	17,194		15,905		14,511	
	IV	17,193		15,907		14,511	
	V	23,411		21,631		19,757	
	VI	23,409		21,630		19,756	
0,0005460	I	35,665	1941,9	32,976	1937,5	30,099	1932,4
	II	35,662		32,970		30,097	
	III	52,601		48,622		44,394	
	IV	52,599		48,630		44,393	
	V	71,619		66,209		60,443	
	VI	71,613		66,201		60,438	

Таблица 2

Подсчет по формуле $\Delta D_1 \cdot 10^6$	Дифференциальный пикнометрический метод $\Delta D \cdot 10^6$	$(\Delta D_1 - \Delta D) \cdot 10^6$
47	47	0
211	212	-1
7552	7550	+2
8878	8878	0
9668	9669	-1
12540	12542	-2
18514	18514	0
20784	20784	0

Заключение

Основные принципиальные результаты проделанной работы заключаются в следующем:

1. Зависимость между показателем преломления и плотностью, выраженная уравнениями

$$\frac{n-1}{D} = \text{const}, \quad \frac{n^2-1}{D} = \text{const}, \quad \frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{D} = \text{const},$$

является первым приближением.

Порядок погрешностей этих формул составляет $1 \cdot 10^{-3}$ г/см³ для области исследованных в настоящей работе растворов.

2. Погрешность примененного оптического метода определения плотности в области исследованных растворов не превышает $3 \cdot 10^{-6}$ г/см³, а погрешность эталонного весового метода составляет $1 \cdot 10^{-5}$ г/см³.

На этом основании оптический метод может быть применен как в области исследования эталонных денсиметров, так и в области исследования водно-спиртовых растворов.

3. Отсутствие достаточно точных значений величин показателей преломления воды привело к необходимости дать зависимость между разностями плотностей и разностями показателей преломления в виде формулы

$$\Delta D = a \cdot \Delta n + b (\Delta n)^2 + c (\Delta n)^3.$$

Кроме того, работа показала необходимость новых исследований по определению с метрологической точностью констант воды — плотности и показателя преломления, которые позволят с надлежащей степенью точности установить $F(n, D) = 0$, имеющую большое значение как для физических, так и для метрологических работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорошевский А. Г. и Дворжанчик С. В., Журнал Русского физико-химического общества, т. 40, 1908, т. 41, 1909.
2. Филиппова Н. С., Тартаковский И. С. и Манжалей М. Е., Журнал физической химии, т. 15, стр. 515, 1941.
3. Сумароков В. П. и Давыдова М. И., Журнал прикладной химии, т. 14, стр. 256, 1941.
4. Бродский А. И. и Шершонер Ж. М., Журнал физической химии, т. 2, 1931; т. 5, стр. 303 и 638, 1934.
5. Бродский А. И. и Филиппова Н. С., Журнал физической химии, т. 5, стр. 623, 1934; т. 7, стр. 418, 1936.
6. Бродский А. И., "Заводская лаборатория", т. 3, стр. 282, 1939.
7. Скарре О. К., Демиденко С. Г. и Бродский А. И., Журнал физической химии, т. 9, стр. 152, 1937.

Н. С. МИХЕЛЬСОН

К РЕФОРМЕ СПИРТОМЕТРИИ

Распоряжением Комитета по делам мер и измерительных приборов в спиртометрии вводится нормальная температура 20°C взамен сохранившейся до настоящего времени температуры 15°C . Для осуществления перехода на новую температуру необходимо было провести значительную подготовительную работу, что и было заблаговременно выполнено научными сотрудниками ареометрической лаборатории ВНИИМ.

Сейчас, когда близится уже время осуществления перехода спиртометрии на новую температуру, своевременно ознакомить широкие круги работников в области метрологии и поверочного дела с основными вопросами, касающимися спиртометрии, с теорией, на которой построен столь распространенный в промышленности металлический спиртомер, с теми изменениями, которые необходимо в него внести для приспособления его к новой температуре, и, наконец, с порядком составления спиртомерных таблиц, к которым поверителям приходится постоянно прибегать при пользовании спиртомерами.

1. Основные сведения по спиртометрии

Крепость водно-спиртовых растворов определяется процентным содержанием в растворе безводного спирта. Процент этот исчисляется или по отношению к объему смеси, или по отношению к ее весу. Иначе говоря, крепость раствора исчисляется или в объемных процентах, или в весовых. Весьма простым, не требующим никаких особых пояснений, является определение крепости спирта в весовых процентах. Так, водно-спиртовой раствор крепостью в p весовых процентах представляет собою смесь спирта с водой, в которой на каждые 100 весовых единиц смеси приходится p таких же весовых единиц безводного спирта. Не столь простым является понятие об объемных процентах. Так как при определении объема существенным фактором является температура, то естественно, что температура должна играть существенную роль при определении процента по объему. Ввиду этого для полной определенности крепость водно-спиртового раствора в процентах по объему исчисляется применительно к одной определенной температуре, называемой нормальной

температурой, которая до последнего времени принималась равной 15° С, а в настоящее время устанавливается в 20° С. Соответственно этому принимают, что водно-спиртовой раствор крепостью в q объемных процентов при 20° С представляет собою раствор, в котором на каждые 100 объемных единиц смеси при температуре 20° С приходится q таких же объемных единиц безводного спирта той же температуры. Таким же образом определяется и объемный процент при 15° С.

Самый расчет крепости в процентах по объему или по весу, по данным соответственно объемным или весовым количествам безводного спирта и воды, также представляет существенные различия.

Крепость раствора в весовых процентах может быть рассчитана весьма просто, непосредственно по данным весовым количествам безводного спирта и воды, взятым для составления смеси. Так, 50 г безводного спирта, смешанные с 30 г воды, дадут раствор $\frac{50 \cdot 100}{80} = 62,5\%$ (по весу).

Иначе дело обстоит с определением процента по объему.

Дело в том, что растворение спирта в воде представляет процесс, сопровождающийся значительным сжатием, т. е. сокращением объема взятых для растворения веществ. Это-то сокращение и делает невозможным непосредственное определение крепости в процентах по объему по данным объемным количествам безводного спирта и воды, взятым для составления смеси. Для пояснения сказанного представим себе, что мы смешали 1 л воды при 20° С с равным по весу (т. е. с 0,99823 кг) количеством безводного спирта той же температуры.

Так как взаимодействие растворяющихся при этом веществ сопровождается выделением тепла и связанным с этим повышением температуры смеси, то для суждения о крепости раствора в процентах по объему при 20° С необходимо будет прежде всего охладить смесь до температуры в 20° С, что мы и предполагаем выполненным.

Так как при 20° С плотность безводного спирта равна 0,78927, то взятое нами для составления смеси количество безводного спирта займет при 20° С объем, равный

$$\frac{0,99823}{0,78927} = 1,2648 \text{ л.}$$

Если бы при смешении не происходило сжатия, то общий объем смеси был бы равен 2,2648 л и крепость спирта в объемных процентах выразилась бы числом

$$\frac{1,2648 \cdot 100}{2,2648} = 55,84\%.$$

На самом же деле, как оказывается, при таком смешении получается спирт крепостью 57,89%. Большая крепость, получаемая в действительности, объясняется тем, что при процессе смешении 1 л воды и 1,2648 л безводного спирта мы получаем не 2,2648 л

раствора, а вследствие сжатия меньшее количество, именно — 2,1847 л. Из этого примера видно, что для определения процента по объему недостаточно задать объемные количества смешиваемых жидкостей, а необходимо еще знать закон сжатия раствора. Таким образом, непосредственным расчетом определить крепость в объемных процентах не представляется возможным, тогда как крепость в весовых процентах определяется весьма просто. В рассматриваемом случае крепость спирта в весовых процентах, очевидно, равна 50%, так как безводный спирт и вода были взяты в равных весовых количествах.

Несмотря, однако, на простоту определения крепости в процентах по весу, учет спирта у нас в Союзе ведется в объемных процентах, ввиду большей простоты измерения спирта в объемных единицах сравнительно с весовыми.

В конечном итоге, то или другое определение крепости спирта — в весовых или объемных процентах — не представляется существенным, так как всегда можно перевести проценты по весу в проценты по объему. Формула, позволяющая решать эту задачу, следующая:

$$q = p \cdot \frac{D}{D_0},$$

где p — процент по весу;

q — процент по объему;

D — плотность водно-спиртового раствора;

D_0 — плотность безводного спирта.

Обе плотности берутся для одной и той же температуры в 20 или 15° С. В первом случае получаем процент по объему при 20°, во втором — при 15° С.

Чтобы оправдать приведенную формулу, предположим, что мы имеем смесь безводного спирта с водой плотности D . Рассчитаем весовое количество безводного спирта, заключающееся в 100 г этой смеси, приняв во внимание сначала, что крепость ее равна p весовым процентам, а затем, что она же выражается в q объемных процентах.

Раз смесь крепости $p\%$ (весовых), то в 100 г ее заключается p г безводного спирта.

С другой стороны, 100 г раствора плотности D занимают объем, равный $\frac{100}{D}$ мл, а так как в 100 мл раствора содержится q мл безводного спирта, то в $\frac{100}{D}$ мл смеси безводного спирта будет содержаться $\frac{q}{D}$ мл. Вес этого безводного спирта будет равен $\frac{q}{D} \cdot D_0$.

Итак, с одной стороны, вес безводного спирта, заключающийся в 100 г рассматриваемой смеси, равен p г, а, с другой, — $q \cdot \frac{D_0}{D}$ г; следовательно,

$$p = q \cdot \frac{D_0}{D},$$

откуда

$$q = p \cdot \frac{D}{D_0}.$$

Пример. Перевести 50% по весу в проценты по объему.

Из таблиц Главной палаты мер и весов следует, что спирту в 50% (по весу) соответствует при температуре 20° С плотность $D = 0,91382$, а безводному спирту при той же температуре — плотность $D_0 = 0,78927$.

Поэтому

$$q_{20} = 50 \cdot \frac{0,91382}{0,78927} = 57,89\%$$

В основе всей спиртометрии в Советском Союзе лежат таблицы плотностей водно-спиртовых растворов, разработанная в период 1924—1927 гг. комиссией Главной палаты мер и весов в составе профессоров М. С. Вревского, А. Н. Георгиевского и Б. М. Кояловича¹.

Комиссия эта положила в основу своей работы знаменитый труд Д. И. Менделеева „Исследование водных растворов по удельному весу“. Этот богатый и исключительный по глубине и полноте исследования материал был тщательно изучен комиссией, математически обработан и развернут в таблицу плотностей под названием „Удельные веса водно-спиртовых растворов, отнесенные к воде при наибольшей плотности, расположенные по весовым процентам для температур выше и ниже нуля“. Тем самым в основу спиртометрии была положена наиболее достоверная и притом наша отечественная таблица плотностей Главной палаты мер и весов взамен практиковавшейся до того времени, утратившей уже метрологическую ценность, таблицы плотностей Траллеса-Брикса.

На основе таблицы Главной палаты мер и весов была составлена таблица плотностей водно-спиртовых растворов по объемным процентам при 15° С, а затем и по объемным процентам при 20° С.

2. Металлический спиртомер в условиях новой нормальной температуры

В основу устройства металлического спиртомера с десятью гирьками, как известно, положены следующие условия.

Металлический спиртомер, погруженный в водно-спиртовый раствор некоторой плотности D_0 , при некоторой определенной температуре должен погружаться до верхнего деления шкалы. В некотором другом растворе большей плотности D_1 должен останавливаться на нижнем

¹ М. С. Вревский, О выборе экспериментального материала, положенного в основание алколометрических таблиц Главной палаты мер и весов, 1927 г.

А. Н. Георгиевский, Перечисление опытных данных Менделеева с введением поправок на международную водородную шкалу температур, приведением удельных весов к целым градусам и их исправлением на значение плотности воды.

Б. М. Коялович, Математическая обработка экспериментальных данных в таблицах Главной палаты, 1927 г.

См. журнал Прикладной химии, т. 1, № 3, 4 и 5.

нулевым делением шкалы. В том же растворе спиртомер, нагруженный некоторой гирькой (помеченной числом 90), должен погружаться до верхнего деления шкалы и всплывать до нулевого в растворе плотности D_2 . Нагруженный более тяжелой гирькой, помеченной числом 80, спиртомер опять должен в предыдущем спирте погружаться до верхнего деления и всплывать до нижнего в спирте плотности D_3 , и т. д., так что с последней, наиболее тяжелой, десятой гирькой, помеченной числом 0, он должен погружаться до верхнего деления шкалы в спирте плотности D_{10} и всплывать до нижнего деления в дистиллированной воде при той же температуре. Спирты, плотность которых D_0, D_1, \dots, D_{10} , называют предельными спиртами; первый из них D_0 — наименьшей плотности — называется исходным предельным спиртом. Плотность исходного предельного спирта устанавливается произвольно, но так, чтобы спиртомер мог учитывать спиртовый раствор возможно большей крепости.

На основании этих условий можно получить формулы, лежащие в основе построения как самого металлического спиртомера, так и принадлежащих к нему гирек. Вывод их можно найти в труде И. Турубинер и М. Иппиц „Техника измерения плотности“ (Машгиз, 1949).

Формулы эти следующие:

$$w_k = r + \sqrt[11]{(w_0 - r)^{11-k} (w - r)^k}; \quad (1)$$

$$m_k = p_k \cdot M; \quad (2)$$

$$p_k = -1 + \sqrt[11]{\left(\frac{w_0 - r}{w - r}\right)^k}; \quad (3)$$

$$D_{k,n} = \frac{D_k \cdot D_{k+1}}{D_k + \frac{n}{10} (D_{k+1} - D_k)}, \quad (4)$$

- где w — удельный объем дистиллированной воды;
 w_0 — удельный объем исходного предельного спирта;
 w_k — удельный объем промежуточного предельного спирта;
 r — удельный объем латуни, из которой делается спиртомер и гирьки;
 M — масса спиртомера без гирек;
 m_k — масса гирьки, помеченной числом $100 - 10k$;
 p_k — множитель, на который необходимо умножить массу спиртомера, чтобы получить массу гирьки;
 D_k и D_{k+1} — плотности двух предельных спиртов, в которых металлический спиртомер, нагруженный гирькой k , погружается соответственно до верхнего и нижнего деления шкалы;
 $D_{k,n}$ — плотность спирта, в котором спиртомер с гирькой k погружается до промежуточного деления n шкалы, считая от нулевого деления.

Вышеприведенные формулы имеют место независимо от того, для какой нормальной температуры создается металлический спиртомер. Однако совершенно ясно, что металлический спиртомер, правильно учитывающий крепость спирта при одной температуре, принятой за нормальную, не может служить для определения крепости спирта при другой температуре. И так как спиртометрия, как уже было сказано, переходит к учету спирта с температуры 15° С на нормальную температуру 20° С, то и возникает вопрос, возможно ли приспособить прежние спиртомеры к новым температурным условиям или же они окажутся вовсе непригодными и придется отказаться от прежних спиртомеров и создавать совершенно новые.

Последнее, конечно, нежелательно как вследствие высокой стоимости прибора, так и потому, что изготовление их заново в том количестве, в котором они распространены в промышленности, потребовало бы значительного времени.

Ввиду этого ареометрическая лаборатория и поставила перед собой вопрос, нельзя ли в порядке некоторого ремонта прежних металлических спиртомеров сделать их пригодными для обслуживания спиртовой промышленности при новой нормальной температуре 20° С.

Ниже приводятся обоснования и результаты решения этой задачи.

Основными уравнениями для расчета и конструирования металлического спиртомера служат уравнения равновесия спиртомера, погруженного без всякой гирьки в предельные спирты плотности D_0 и D_1 , а именно:

$$M = (V + v) \cdot D_0 \quad (5)$$

и

$$M = V \cdot D_1, \quad (6)$$

в которые входят пять переменных: M , V , v , D_0 и D_1 ,

где V — объем спиртомера до нижнего деления шкалы;

v — объем стержня на протяжении шкалы.

Одна из этих пяти переменных, именно последняя, должна удовлетворять уравнению

$$\omega_1 = r + \sqrt[11]{(\omega_0 - r)^{10} \cdot (\omega - r)}, \quad (7)$$

являющемуся частным случаем ур-ния (1) при $k = 1$, или, что то же, уравнению

$$\frac{1}{D_1} = \frac{1}{\delta} + \sqrt[11]{\left(\frac{1}{D_0} - \frac{1}{\delta}\right)^{10} \cdot \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{\delta}\right)}, \quad (8)$$

в котором δ и D — определенные постоянные;

δ — плотность латуни;

D — плотность дистиллированной воды;

D_0 и D_1 — плотности исходного и следующего за ним предельного спирта.

Все плотности берутся при одной и той же температуре, для которой рассчитывается спиртомер.

Из остальных переменных, входящих в ур-ния (5) и (6), две могут быть выбраны произвольно, другие же две определяются этими уравнениями.

Так как подогнать надлежащим образом массу спиртомера практически оказывается наиболее легко выполнимым, то задавать ее наперед нецелесообразно. С другой стороны, так как подогнать надлежащим образом объемы V и v чрезвычайно затруднительно (к тому же для них имеются в спиртомерной мастерской определенные штампы), то приходится заключить, что величины V и v необходимо сохранить неизменными.

Сохранение же величины объемов V и v неизбежно влечет за собой и необходимость сохранить значения плотностей предельных спиртов D_0 и D_1 , или же, изменяя их, сохранить неизменным их отношение. Необходимость последнего следует из соотношения

$$\frac{V}{v} = \frac{D_0}{D_1 - D_0}, \quad (9)$$

являющегося следствием ур-ний (5) и (6).

Посмотрим, возможно ли это последнее в условиях новой нормальной температуры. Для этого обратимся к ф-ле (8). Формула эта, как раньше установлено, имеет место для любой температуры. Будем ее рассматривать в двух предположениях: рассчитанной для 15°C и для 20°C .

Умножим все члены этой формулы в первом предположении на плотность D воды при 15° , а во втором — на плотность воды при 20°C , и напишем ее следующим образом:

$$\frac{1}{D_1 D} = \frac{1}{D_0 D} + \sqrt[11]{\left(\frac{1}{D_0 D} - \frac{1}{D_1 D}\right)^{10} \cdot \left(1 - \frac{1}{D_1 D}\right)}. \quad (10)$$

В этой формуле отношения $\frac{D_0}{D}$, $\frac{D_1}{D}$ и $\frac{\delta}{D}$ выражают относительные плотности предельных спиртов и латуни, взятых по отношению к воде при температуре, при которой рассчитаны плотности спиртов и латуни.

Исходный предельный спирт для прежнего спиртомера и был задан, а все другие предельные спирты определены в относительных плотностях $\frac{15^\circ\text{C}}{15^\circ\text{C}}$. Таким же образом была определена и плотность латуни. Именно в конструирование прежнего металлического спиртомера были положены следующие исходные данные:

$$\frac{D_0(15^\circ\text{C})}{D(15^\circ\text{C})} = 0,795543 \text{ г/мл} = A_0;$$

$$\frac{\delta(15^\circ\text{C})}{D(15^\circ\text{C})} = 8,5 \text{ г/мл}.$$

Из ф-лы (9) следует, что если для нового спиртомера принять за исходный предельный спирт, относительная плотность которого при 20° С, вычисленная по отношению к воде при 20° С, равна величине A_0 , т. е. если в ф-ле (10) положить

$$\frac{D_0(20^\circ \text{C})}{D(20^\circ \text{C})} = A_0$$

и, кроме того, принять

$$\frac{\delta(20^\circ \text{C})}{D(20^\circ \text{C})} = 8,5 \text{ г/мл},$$

то сохранение объемов V и v будет обеспечено.

Принять $\frac{\delta(20^\circ \text{C})}{D(20^\circ \text{C})} = 8,5 \text{ г/мл}$ мы имеем возможность в силу того, что для плотности латуни предоставляется допуск в $\pm 0,02$. Действительно, если рассчитать плотность латуни $\frac{\delta(15^\circ \text{C})}{D(15^\circ \text{C})}$, принимая, что $\frac{\delta(20^\circ \text{C})}{D(20^\circ \text{C})} = 8,5 \text{ г/мл}$, то найдем, считая объемный коэффициент расширения латуни равным 0,00005721, что

$$\frac{\delta(15^\circ \text{C})}{D(15^\circ \text{C})} = 8,495 \text{ г/мл}.$$

Величина эта не выходит из предела допуска.

Итак, за исходный предельный спирт в данных условиях следует принять тот, для которого относительная плотность

$$\frac{D_0(20^\circ \text{C})}{D(20^\circ \text{C})} = 0,795543 \text{ г/мл} = A_0.$$

Тогда, следовательно, плотность исходного предельного спирта будет

$$D_0\left(\frac{20^\circ \text{C}}{4^\circ \text{C}}\right) = A_0 \cdot D^{(20)} = 0,795543 \cdot 0,998229 = 0,794134.$$

При этом плотность латуни принимается равной

$$\frac{\delta(20^\circ \text{C})}{D(4^\circ \text{C})} = 8,5 \text{ г/мл}.$$

Такому пропорциональному изменению основных величин D_0 и δ будет соответствовать такое же пропорциональное изменение плотности второго предельного спирта D_1 , да и всех остальных предельных спиртов, как это видно из ф-лы (8) и ей подобных, получаемых при других значениях k .

Обозначив плотность второго предельного спирта

$$\frac{D_1(15^\circ \text{C})}{D(15^\circ \text{C})} = A_1,$$

будем иметь

$$D_1\left(\frac{20^\circ \text{C}}{4^\circ \text{C}}\right) = A_1 \cdot D_1^{(20)} = 0,811021.$$

Плотности предельных спиртов для спиртомера с нормальной температурой 20° С при $D_0 = 0,794134$ приведены в табл 1.

Таблица 1

№	Обозначение гири	Плотность, г/см ³	№	Обозначение гири	Плотность, г/см ³
1	90	0,811021	6	40	0,900345
2	80	0,828227	7	30	0,919220
3	70	0,845758	8	20	0,938442
4	60	0,863619	9	10	0,958014
5	50	0,881813	10	0	0,977942

Установлением величины плотности D_0 вопрос о приспособлении металлического спиртомера к новой температуре не заканчивается. Необходимо исследовать в какой мере в результате этого должна измениться вся масса самого спиртомера и его десяти гирек.

Для определения массы M спиртомера обратимся к ф-ле (6), выражающей условие равновесия спиртомера в спирте плотности D_1 :

$$M = V \cdot D_1.$$

Применяя эту формулу к прежнему спиртомеру при погружении его в спирт, температура которого 15° С, имеем

$$M = V^{(15)} \cdot A_1 \cdot D^{(15)}.$$

В спирте, температура которого 20° С, новый спиртомер должен удовлетворять уравнению

$$M_1 = V^{(15)} \cdot (1 + 5\beta) \cdot A_1 \cdot D^{(20)},$$

откуда

$$\frac{M_1}{M} = (1 + 5\beta) \cdot \frac{D^{(20)}}{D^{(15)}} = (1 + 5 \cdot 0,0000572) \cdot \frac{0,998229}{0,999127} = 0,999387;$$

$$M_1 = M (1 - 0,000613) = M - 0,000613M.$$

Поэтому

$$\Delta M = M_1 - M = -0,000613M.$$

Таким образом, массу прежнего спиртомера необходимо будет уменьшить на 0,000613-ю часть его прежней массы.

Принимая M равным 30 г (наибольшее значение M), найдем, что массу такого спиртомера придется уменьшить на 0,0184 г. Такое уменьшение массы вполне возможно; оно легко может быть осуществлено за счет уменьшения массы гири спиртомера.

Вместе с изменением массы спиртомера должны быть изменены и массы принадлежащих ему гирек, что вытекает из ф-лы (2).

Ниже приводится соответствующий этому расчет.

По выведенным ранее ф-лам (2) и (3)

$$m_k = p_k \cdot M,$$

где

$$p_k = -1 + \sqrt[11]{\frac{(w_0 - r)^k}{(w - r)^k}}.$$

При тех плотностях исходного предельного спирта и латуни, которые положены в основу нового спиртомера, ясно, что мы получим для множителей p_k прежние их значения (табл. 2).

Но так как массу спиртомера приходится уменьшить на $\Delta M = 0,000613M$, то и массу гирек придется уменьшить на

$$\Delta m = p_k \cdot \Delta M.$$

Наибольшее уменьшение массы падает на самую тяжелую гирьку. Для спиртомера с массой 30 г оно будет равно

$$\Delta m = p_{10} \cdot \Delta M = -0,0048 \text{ г.}$$

Такое уменьшение массы наибольшей гирьки, достигающей почти 8 г, конечно, вполне возможно. В табл. 3 приведены новые массы гирек для прежнего спиртомера с массой 30 г, а также числа, указывающие, насколько следует уменьшить массу каждой из десяти гирек. Гирьки расположены в порядке возрастания их веса.

Таблица 2

k	Обозначение гирьки	Множитель p_k	k	Обозначение гирьки	Множитель p_k
1	90	0,02351	6	40	0,14962
2	80	0,04757	7	30	0,17664
3	70	0,07220	8	20	0,20431
4	60	0,09741	9	10	0,23263
5	50	0,12321	10	0	0,26161

Таблица 3

k	Обозначение гирьки	$m_{k, \tau}$	$\Delta m_{k, \tau}$	k	Обозначение гирьки	$m_{k, \tau}$	$\Delta m_{k, \tau}$
1	90	0,7053	0,0004	6	40	4,4886	0,0028
2	80	1,4271	0,0009	7	30	5,2992	0,0033
3	70	2,1660	0,0013	8	20	6,1293	0,0038
4	60	2,9223	0,0018	9	10	6,9789	0,0043
5	50	3,6963	0,0023	10	0	7,8483	0,0048

Из всего сказанного следует, что задача приспособления прежнего металлического спиртомера к новой температуре 20° С разрешается весьма легко лишь небольшим уменьшением массы самого спиртомера и его гирек; это вполне возможно выполнить в порядке обычного ремонта. При этом плотность исходного предельного спирта следует принять равной 0,794134 г/см³.

Само собою разумеется, что и для вновь изготавливаемых металлических спиртомеров для 20° С необходимо принять тот же исходный предельный спирт.

Остановимся еще на одном вопросе, связанном с установлением новых условий для спиртомера для 20° С, именно: не повлечет ли за собой такое изменение условий сужение пределов пользования прибором, т. е. позволит ли новый спиртомер при одинаковых температурных условиях учитывать спирт той же крепости, как и прежний спиртомер. Оказывается, что и в этом отношении новый спиртомер несколько не уступает прежнему и даже, правда, весьма значительно превосходит его. Так, плотности исходного предельного спирта для нового спиртомера соответствует крепость спирта в 99,01% в объемных процентах при 20° С, а для прежнего спиртомера — 98,9% в объемных процентах при 15° С.

3. Порядок составления таблиц к стеклянным спиртомерам для 20° С

С переходом спиртометрии на нормальную температуру 20° С необходимо было составить новые таблицы к спиртомерам, что и было своевременно выполнено сотрудниками ареометрической лаборатории ВНИИМ. Эти таблицы рассчитаны были следующим образом.

А. Таблица к стеклянному спиртомеру

Из таблицы плотностей спиртовых растворов по объемным процентам при 20° С выбирается изотерма 20°. Каждое из этих чисел исправляется на расширение стекла при различных температурах от 30 до —25° С по формуле

$$D^{(t)} = \frac{D^{(20)}}{1 + \beta(t - 20)}$$

где β — коэффициент объемного расширения стекла, принимаемый равным 0,000244.

Плотности эти вычислялись с точностью до единицы пятого десятичного знака. Они представляют собой истинные величины плотностей, соответствующие каждому показанию спиртомера при различных температурах в промежутке от 30 до —25° С. Остается лишь узнать, какая крепость соответствует каждой такой плотности. Для этого служит та же таблица плотностей спиртовых растворов, но уже не одна изотерма 20° С, а все ее изотермы. Именно, в соответствующей каждой температуре t изотерме отыскиваются такие две последовательные плотности, между которыми заключается исправленная на температуру плотность $D^{(t)}$. Этим двум числам соответствует

по таблице крепость спирта, равная двум числам процентов, отличающимся между собой на $0,5\%$. Простым интерполированием остается определить, какой процент будет соответствовать рассматриваемой плотности.

Поясним это примером. Допустим, что стеклянный спиртомер со шкалой объемных процентов при 20°C , погруженный в некоторый спиртовый раствор, температура которого 12°C , показал крепость 69% . Какова истинная крепость этого раствора при 20°C ?

В таблице плотностей спиртовых растворов, в изотерме 20°C , раствору крепости 69% соответствует плотность $D^{(20)} = 0,88799$. Плотность эту мы должны исправить на расширение стекла по формуле

$$D^{(12)} = \frac{0,88799}{1 - 8 \cdot 0,0000244} = 0,88816.$$

После этого в таблице плотностей, именно в изотерме 12° , находим две плотности: $0,88845$ и $0,88720$, между которыми заключается $D^{(12)}$. Этим плотностям соответствуют крепости $71,5\%$ и $72,0\%$. Остается простым интерполированием найти, какая же крепость будет соответствовать плотности $D^{(12)} = 0,88816$. Расчет дает, что этой плотности соответствует крепость раствора, равная $71,6\%$. Это число и заносится в таблицу, в столбец, помеченный числом 69 , и в строку температуры 12°C .

Б. Таблицы к металлическому спиртомеру

Порядок составления таблиц к металлическому спиртомеру в основном такой же, как и к стеклянному, и отличается только начальной стадией.

Прежде всего принимаются во внимание плотности всех предельных спиртов, указанные в ранее приведенной таблице. Эти плотности соответствуют погружениям металлического спиртомера без гирьки и со всеми различными гирьками до верхнего и нижнего деления шкалы спиртомера.

Затем по ф-ле (4)

$$D_{k,n} = \frac{D_k \cdot D_{k+1}}{D_k + \frac{n}{10}(D_{k+1} - D_k)}$$

вычисляются плотности, соответствующие всем промежуточным делениям шкалы, помеченным цифрами $1, 2, 3, \dots, 9$, при погружении спиртомера без гирьки и со всеми различными гирьками. Всего различных плотностей мы будем иметь 111 (считая и плотность воды), начиная с отсчета 110 и далее через одну единицу до 0 .

Получив таким образом все 111 плотностей, мы должны исправить их на расширение латуни по формуле

$$D^{(t)} = \frac{D^{(20)}}{1 + \beta(t - 20)},$$

где β — объемный коэффициент расширения латуни — принимается равным 0,00005721. Эти плотности, вычисляемые с шестью десятичными знаками, округляются с точностью до одной единицы пятого десятичного знака.

Дальнейший расчет ведется тем же порядком, как и для спиртомера стеклянного. Именно, в таблице плотностей по объемным процентам при 20° С, опять в соответствующей изотерме, отыскиваются две последовательные плотности, между которыми заключается исправленная на расширение латуни плотность. Этим двум последовательным плотностям соответствуют крепости спирта, разнящиеся на 0,5%. Остается простым интерполированием определить, какая крепость спирта будет соответствовать плотности $D_{k,l}$. Эти числа рассчитываются с точностью до 0,001% и округляются до 0,01%. Таким образом будет составлена таблица к металлическому спиртомеру для всех целых его делений, начиная с 110 до 0. Простым интерполированием таблица пополняется числами для промежуточных дробных делений спиртомера через каждые 0,2 деления. Все полученные числа окончательно округляются до 0,1%.

Поясним сказанное примером. Допустим, что металлический спиртомер, сконструированный для температуры 20° С, погруженный в спиртовой раствор, температура которого 26° С, показал отсчет 72. Какова истинная крепость этого раствора при 20° С?

Отсчет 72 по шкале получается при нагрузке спиртомера гирькой 70, т. е. третьей гирькой, считая за первую самую легкую гирьку 90. Следовательно, в данном случае в ф-ле (4) надо принять $k = 3$ и $l = 2$. Из таблицы плотностей предельных спиртов следует, что

$$D_3 = 0,845758 \text{ и } D_4 = 0,863619.$$

Тогда по ф-ле (4) получим

$$D_{3,2} = \frac{0,845758 \cdot 0,863619}{0,845758 + \frac{2}{10} \cdot 0,017861} = 0,859987.$$

Эту плотность исправляем на расширение латуни по известной формуле и окончательно получаем $D_{3,2} = 0,859692$.

С полученным числом обращаемся к таблице плотностей спиртовых растворов, к изотерме 26° С, и находим, что найденная плотность заключается между двумя последовательными плотностями: 0,86101 и 0,85966.

Этим плотностям соответствуют крепости спиртовых растворов 77,5% и 78,0%.

Простым интерполированием находим, что плотности 0,85969 будет соответствовать крепость 77,989%.

Это и будет истинной крепостью данного раствора при 20° С. Число это, округленное до 0,1, т. е. 78,0, и вносится в таблицу, в графу, помеченную числом 72, и в строку температуры 26° С.

СЛИЧЕНИЕ ЧАСОВ НА ХРОНОСКОПЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОШИБОК МИНУТНОГО ПЕРИОДА

1. Сличение часов

Сущность сличения часов заключается в получении разности показаний различных часов в один и тот же физический момент. В значительной части работ службы времени производится сличение часов: при приеме ритмических сигналов времени — сличение хронометра с ведущими часами, ежесуточное сличение часов для определения их относительных ходов, при астрономических определениях поправок часов — сличение образцовых часов с ведущими астрономическими часами.

Образцовые же приборы, измеряющие время, поверяются главным образом сличением с приборами более высокого класса точности.

Одним из общепринятых приборов для сличения часов в службах времени является хронограф.

На хронографе сличение осуществляется посредством записи показаний на движущейся ленте; результат сличения получается из измерения хронограммы на компараторе и соответствующих вычислений.

В настоящее время все большее применение для сличения часов в службах времени находит хроноскоп.

Сличение часов на хроноскопе производится без хронограммы. Необходимо отсчитать десятые, сотые и тысячные доли секунд показания часов на хроноскопе и произвести надлежащие вычисления. Часы, минуты и секунды берутся с циферблата часов (без участия хроноскопа).

2. Устройство хроноскопа

Основной частью хроноскопа является синхронный мотор, питаемый напряжением переменного тока высокой частоты. Частота генератора для сличения часов, регулированных по среднему времени, должна быть $1000 \text{ гц} \pm 1 \cdot 10^{-6}$; регулированных по звездному времени — $1002,738 \text{ гц} \pm 1 \cdot 10^{-6}$.

Усилитель хроноскопа, вращающий синхронный мотор, питается от сети переменного тока напряжением 120—130 в. Синхронный мотор вращает два диска с цифрами (в металлических дисках — цифры выпилены, в прозрачных — нанесены краской). Численные значения отсчитываются на фоне вспышки неоновой лампы, получаемой от конденсатора через контакты реле. Для исключения запаздывания реле к прибору приключается постоянно действующее реле, разряжающее конденсатор на неоновую лампу. Вспышка неоновой лампы регулируется на длительность менее одной тысячной доли секунды.

Большой диск, посаженный на ось мотора, вращающийся со скоростью 10 оборотов в секунду, разделен через 0,002 сек. на 50 частей; при некотором навыке отсчеты производятся с точностью до 0,001 сек.

Малый диск делает один оборот в секунду, разделен на 10 частей, дает отсчеты десятых долей секунды.

Диски должны быть закреплены на осях так, чтобы цифровое обозначение 00 на большом диске стояло против одной из цифр малого диска. В это положение устанавливается большой диск после открепления пусковой головки.

Проводка, подводящая напряжение с частотой 1000 гц и соединяющая реле с хроноскопом, должна быть экранирована, и оболочка — заземлена для исключения воздействия посторонних токов на радиоприемник.

Через 1—2 мин. после включения напряжений 120 в и частоты 1000 гц, когда будет слышен тон высокой частоты, раскручивают за пусковую головку мотор до такого числа оборотов, чтобы звук, возникающий от пересечения магнитного поля зубцами ротора, слился со звуком частоты 1000 гц. Это будет означать, что ротор мотора вращается синхронно с частотой 1000 гц.

3. Сличение часов на хроноскопе

Пусть астрономические часы (R) дают секунду, первую после удаленного зуба контактного колеса, с номером R . Ближайшая же предыдущая (перед секундой R) секунда образцовых часов (N), положим, контактного хронометра будет иметь номер N .

Пусть отсчеты по дискам хроноскопа — десятые, сотые и тысячные доли секунды будут:

для астрономических часов — r ,

для образцовых часов — n .

В момент сличения для астрономических часов будем иметь запись

$$A_{(R)} + B_{(R)} + R + r,$$

где $A_{(R)}$ и $B_{(R)}$ — соответственно часы и минуты астрономических часов.

Для образцовых часов в момент сличения получим отсчет

$$A_{(N)} + B_{(N)} + N + n.$$

Тогда для одного и того же сличения будем иметь два варианта его обработки.

а) Первый случай: $r > n$. В этом случае, когда $r > n$, отсчеты сличаемых часов лежат по одну сторону от нуля хроноскопа, что видно из рис. 1 (верхняя часть).

Действительный момент начала R секунды астрономических часов будет

$$A_{(R)} + B_{(R)} + R.$$

Действительный же момент показания образцовых часов, соответствующий моменту начала R секунды астрономических часов, будет

$$A_{(N)} + B_{(N)} + N + (r - n).$$

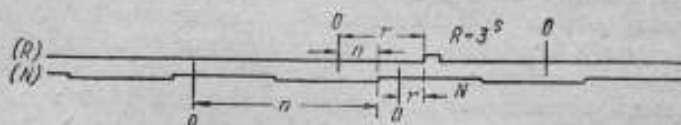


Рис. 1.

Положим, что образцовые часы имеют те же часы и минуты, что и астрономические, т. е. $A_{(R)} = A_{(N)}$ и $B_{(R)} = B_{(N)}$.

Тогда разность показаний астрономических (R) и образцовых (N) часов будет равна

$$(R) - (N) = (R - N) - (r - n). \quad (1)$$

б) Второй случай: $r < n$. Это значит, что отсчеты долей секунды сличаемых часов лежат по обе стороны от нуля хроноскопа (на рисунке — нижняя часть).

Момент начала R секунды астрономических часов будет также равен

$$A_{(R)} + B_{(R)} + R.$$

Показание же образцовых часов для этого момента будет

$$A_{(N)} + B_{(N)} + N + (r + 1^s - n) = A_{(N)} + B_{(N)} + N + (r - n) + 1^s.$$

Разность показаний сличаемых часов, при том же условии равенства показаний часов и минут обоих часов, будет

$$(R) - (N) = (R - N) - (r - n) - 1^s. \quad (2)$$

В том случае, когда сличаемые часы имеют разные показания часов, минут и секунд, ф-лы (1) и (2) можно представить в следующем виде:

для $r > n$

$$(R) - (N) = (A_{(R)} + B_{(R)} + R + n) - (A_{(N)} + B_{(N)} + N + r); \quad (3)$$

для $r < n$

$$(R) - (N) = (A_{(R)} + B_{(R)} + R + n) - (A_{(N)} + B_{(N)} + N + r + 1^s). \quad (4)$$

4. Наблюдения и обработка сличения часов на хроноскопе

В примере 1 приводится прием и обработка приема ритмических сигналов станции PEC-6^h со сличением часов на хроноскопе, причем при сличении часов „до приема“ $r > n$, а „после приема“ $r < n$.

В этом примере $A_{(R)} = A_{(N)}$, $B_{(R)} \neq B_{(N)}$.

Пример 1

21-VII 1948 ВСТ

PEC-6^h.

	8 ^h			2 ^m		
	24	I	23	0-15,5		22 ^s 877
55				0-46		22 ^s 885
	85	II	23	1-15,5		877
116				1-46		885
	146	III	23	2-15,5		877
177				2-46		885
	207	IV	23	3-15,5		877
237				3-45		869
	267	V	22	4-14,5		861
298				4-45		869

	22,879		22,874+5	
			22,876	
			-8	
	N ^o 8 ^h 2 ^m		22,868	
	(R) - (N) + 40,687			
	R ^o 8 ^h 3 ^m		03,555	
2954N 7 ^h 52 ^m				
	8 ^h 6 ^m		22,769 - 22,306	
68R 7 ^h 53 ^m				
	8 ^h 7 ^m		3,074 63,000	
			074 + 40,694	
			075	
			076	
			076	
			075	
			075	
			62 ^m 23 ^s	
			- 52 ^m 26 ^s	
			9 ^m 57 ^s	

$$(1) - [N + (r - n)].$$

$$(2) R.$$

$$(3) (R - N) - (r - n).$$

Замечания к примеру 1

Схема как приема, так и обработки весьма проста, следует сделать только несколько замечаний:

1) Значения наблюдаемых величин записываются карандашом, вычисленных — чернилами.

2) Прием на целых секундах и половинах вычисляется отдельно для введения поправки вида $\frac{T_1 - T_2}{2}$, где T_1 и T_2 — моменты ритмических сигналов, полученные из совпадений сигналов с целыми и половинами секунд хронометра.

3) В среднее значение приема по целым и половинам секунд вводится поправка за половину разности $(1 - \frac{60}{61})$, равную 0,008.

4) В разность $(R) - (N)$ вводится две поправки:

а) за относительный ход часов (+ 0,019);

б) за ошибку минутного периода секунд 3, 5, 7, 9 и 11 астрономических часов 68R; в данном случае она равна + 0,001.

5) Хроноскоп между сравнениями часов „до приема“ и „после приема“ выключался.

6) Для определения номера секунды образцовых часов, после которой появляется первая секунда, следующая за удаленным зубцом контактного колеса астрономических часов, надо включить на реле хроноскопа астрономические часы и их контакты сравнить с ударами секундной стрелки хронометра визуально и по слуху. Если трудно определить по слуху контакт, каких часов получается раньше, то их по очереди надо включить на хроноскоп и сделать отсчеты долей секунды. Меньший отсчет показывает, что эти часы раньше дают контакт.

В примере 2 дано наблюдение и обработка сличения астрономических часов для вывода их относительных ходов.

Пример 2

1949 — V — 19,91 МИД

				$T_0 - 81R = +12^s,616^{1)}$	
				$81R - N = -27^s,099$	
				$T_2 - N = -14^s,483$	
				$T_0 = 21^h 48^m 44^s,070^{2)}$	
				$N = 21^h 48^m 58^s,55^{3)}$	
N	$21^h 17^m 30^s,838$	$30^s,099$	N	$21^h 16^m 11^s,840$	$71^s,553$
$81R$	$21^h 17^m 3^s,938$	$3^s,000$	$68R$	$21^h 15^m 3^s,394$	$3^s,000$
	932	$-27^s,099$		396	$-68^s,553$
$A = +31^m 24^s,5^{4)}$	936	$-0^s,057^{5)}$	$A = +32^m 43^s,6^{3)}$	394	$-0^s,069$
	943	$81R - N = -27^s,156$		392	$68R - N = -68^s,622$
	938	$(-24^s,548)$		390	$(-65^s,566)$
	937	$-2^s,608$		393	$-3^s,056$
N	$21^h 20^m 57^s,830$	$57^s,801$	N	$21^h 23^m 26^s,826$	$26^s,285$
$67R$	$13^h 10^m 3^s,634$	$3^s,000$	$86R$	$13^h 12^m 1^s,118$	$1^s,000$
	638	$-8^h 10^m 54^s,801$		116	$-8^h 11^m 25^s,285$
$A = +27^m 56^s,8$	634	$-15^h 48^m 35^s,341^{6)}$	$A = +25^m 28^s,3$	116	$-15^h 48^m 35^s,341$
	623	$+ 4^s,590^{7)}$		110	$+ 4^s,185$
	626	$- 0^s,049^{8)}$		094	$- 0^s,052$
	631	$67R - N =$		111	$86R - N =$
		$= 23^h 59^m 25^s,601$			$= 23^h 59^m 56^s,493$
		$+ 34^s,399$			$+ 3^s,507$
		$(+ 36^s,941)$			$(+ 6^s,472)$
		$- 2^s,543$			$- 2^s,965$
		$+ 0^s,448^{9)}$			
$81R - 68R = +41^s,466$					
$(+ 41^s,018)$					
$81R - 67R = -61^s,555$					
$(- 61^s,490)$					
$81R - 86R = -30^s,663$					
$(- 31^s,020)$					

Замечания к примеру 2

- 1) Поправка часов 81R, полученная из приема ритмических сигналов.
 - 2) Эпоха сличения часов ВНИИМ (поясное время).
 - 3) Эпоха сличения часов ВНИИМ (в показании хронометра N).
 - 4) Разность эпохи в показании хронометра и показания хронометра для среднего момента сличения астрономических часов.
 - 5) Поправка за относительный ход часов 81R.
 - 6) Истинное звездное время для эпохи сличения часов ВНИИМ.
 - 7) Перевод A среднего времени в звездное со знаком минус.
 - 8) Поправка за относительный ход часов 67R.
 - 9) Относительный суточный ход часов 81R и 68R.
- Численные значения в скобках даны для соответствующих разностей предыдущего дня.

Далее приводится порядок сличения часов и их обработки при астрономических наблюдениях (пример 3).

Пример 3

56

14-V-49 ВЛД

А.

$$\omega_{01} = -0',145$$

До наблюдений

+1)

N_1 19^h40^m31^s.025
 SR 11^h10^m 1^s.632
 626
 621
 626
 610
621

40^m31^s.595
 5^s.000

N_2 19^h41^m17^s.025
 $81R$ 19^h41^m 3^s.206
 208

41^m17^s.180
 7^s.000
 -45^s.585

19^h41^m17^s.000²⁾
 19^h41^m
 $p_1 = +0',006$

17^s.174
 3^s.175
 170
 174
 182
 173
175
 -1³⁾

81R 19^h40^m 21^s.405

После наблюдений

+2

N_1 21^h18^m16^s.771
 SR 12^h48^m 1^s.516
 510
 504
 498
 494
504

16^s.733
 5^s.000

N_2 21^h19^m18^s.769
 $81R$ 21^h19^m 3^s.130
 126
 130
 136
 131
131

21^h19^m18^s.000
 21^h19^m
 $p_2 = +0',001$

18^s.351
 3^s.353
 348
 353
 360
 351
353
 -2

81R 21^h 18^m5^s.373

$SR_{n-d} = 1^h 38^m 0^s.000$
 $81R_{n-d} = 1^h 37^m 43^s.968$
 +15^s.935
 + 0^s.120

$81R = 1^h 38^m 0^s.023$
 $81R - SR = +0',023$

$\omega_{SR}^m = +0',000235$
 $\omega_{81}^m = -0',000100$
 $\omega_{SR}^m = +0',000135$

$SR \sim 12^h 5^m 3^s$ ⁴⁾
 $SR \approx 12^h 5^m 0^s.000$ ⁵⁾
 * -SR = +16^s.763⁶⁾

$$43^m 5^s.0 \times (+0',000235) = +0',010$$

$$1949 - V - 14,859^{8)}$$

$$\begin{aligned}
 & 12^h 5^m 16^s,763 \\
 & \quad + 0,491^{9)} \\
 & \hline
 & 12^h 5^m 17^s,254 \\
 & - 15^h 25^m 16^s,866^{10)} \\
 & \hline
 & \quad - 0,499^{11)} \\
 & \hline
 & 20^h 39^m 59^s,889 \\
 & \quad - 3^m 23^s,144^{12)} \\
 & \hline
 & 20^h 36^m 36^s,745 \\
 & \quad - 1^m 15^s,930^{13)} \\
 & \hline
 & 20^h 35^m 20^s,815 \\
 & - 20^h 35^m 7^s,422 \\
 & \hline
 & \quad + 13^s,393 \\
 & \quad - 0,008^{16)} \\
 & \quad - 0,007^{17)} \\
 & \quad - 0,005^{18)} \\
 & t_{\text{ср.}} = + 16,0^{\circ} \text{ C} \\
 & \text{PC} = + 13^s,323^{20)} \\
 & \text{PC} - \text{AH} = - 0^s,050^{21)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & 15^h 29^m 59^s,627^{14)} \\
 & \quad - 7,045^{15)} \\
 & \hline
 & \quad - 0,014^{15)} \\
 & \quad + 0,010^{7)} \\
 & \hline
 & 15^h 29^m 52^s,578 \\
 & \quad 12^h 5^m 0^s,000^{5)} \\
 & \hline
 & 20^h 35^m 7^s,422 \\
 & T_2 - 81R = + 13^s,373^{19)} \\
 & 81R - 68R = + 39^s,217 \\
 & T_2 - 68R = + 52^s,590 \\
 & 81R - 67R = - 1^s,268 \\
 & T_2 - 67R = + 12^s,105 \\
 & 81R - 86R = + 30^s,050 \\
 & T_2 - 86R = + 43^s,423
 \end{aligned}$$

Замечания к примеру 3

- 1) Поправка отсчета за ход хронометра.
- 2) Сличение часов на ленте хронографа (для определения параллакса перьев) производится одновременно со сличением часов на хроноскопе. N_2 записан на перо, записывающем контакты микрометра. $81R$ записан на перо, записывающем контакты образцовых часов SR во время астрономических наблюдений. Если же сличение произведено при скрещенных перьях хронографа, то получим значение параллакса с обратным знаком.
- 3) Поправка отсчета за ход хронометра.
- 4) Эпоха наблюдения в показании образцовых часов SR .
- 5) Эпоха фиктивной звезды.
- 6) Поправка образцовых часов SR .
- 7) Поправка за относительный ход часов SR , за интервал времени, протекший от момента фиктивной звезды до момента сличения часов SR после наблюдений.
- 8) Приведение к эпохе ВНИИМ (0,910 суток).
- 9) Минус нутация на эпоху наблюдений.
- 10) Местное звездное время.
- 11) Нутация на день наблюдения.
- 12) Перевод из звездного времени в среднее.
- 13) Редукция к времени 2-го пояса за долготу ВНИИМ.
- 14) $S - T$ для эпохи сличения часов после наблюдений.
- 15) Перевод из звездного времени в среднее интервала времени, протекшего от момента фиктивной звезды до момента сличения часов SR после наблюдений ($43^m 5^s,0$).
- 16) Поправка за параллакс перьев хронографа.
- 17) Приведение к эпохе ВНИИМ (0,910 суток) за абсолютный ход часов $81R$.
- 18) Ошибка минутного периода 3, 5, 7, 9 и 11 секунд часов $81R$; ошибка минутного периода часов SR равна нулю.
- 19) Поправка часов $81R$, полученная из астрономических наблюдений.
- 20) Поправка часов $81R$, полученная из приема ритмических сигналов.
- 21) Разность поправок часов $81R$, полученных из приема ритмических сигналов и астрономических наблюдений.

В примере 4 приводится сравнение по проволочной телеграфной связи часов ЦНИБ времени 50Sh (Москва) с часами ВНИИМ 82R и СМ (Ленинград).

Пример 4

26—V 1949 АИО 10⁶

50Sh	81R	СМ
20 ^m 3 ^s 804 20 ^m 0 ^s 472 472 472 470 472	+ 2 ¹⁾ 22 ^m 46 ^s 802 22 ^m 3 ^s 322 318 322 328 326 323 + 5 ³⁾	+ 3 ¹⁾ 22 ^m 34 ^s 801 22 ^m 7 ^s 566 566 566 566 566
50Sh — N = — 3 ^s 668	81R — N = — 43 ^s 524 50Sh — 81R = + 39 ^s 856 50Sh — СМ = + 24 ^s 094 p ₁ = + 24 ^s 094 ³⁾ p ₂ = + 24 ^s 305 ⁴⁾ Δ = + 0 ^s 1 ¹ 6 ⁵⁾	СМ — N = — 27 ^s 762 (+ 39 ^s 962) ⁶⁾ (+ 24 ^s 200) ⁶⁾
+ 40 ^s 145 + 39 ^s 962 <u>ω₍₈₁₎ = — 0^s183⁷⁾</u>		+ 24 ^s 586 + 24 ^s 200 <u>ω_(СМ) = — 0^s386⁷⁾</u>

Замечания к примеру 4

1) Поправка за ход хронометра N в эпохе сравнения часов 50Sh.

2) Поправка за ошибку минутного периода часов 81R.

3) Разность показаний часов 50Sh и СМ, полученная в Ленинграде.

4) Разность показаний часов 50Sh и СМ, полученная в Москве.

5) Запоздывание: $\Delta = \frac{p_2 - p_1}{2}$.

6) Разность показаний часов, исправленная за запаздывание.

7) Относительные суточные ходы часов 81R и СМ.

5. Определение ошибок минутного периода

Секундные сигналы от астрономических часов получают путем замыкания и размыкания электрической цепи включенным в нее колесным прерывателем, состоящим из добавочной зубчатки, насаженной на секундную ось часов, и контактного рычага. Обычно секунды, даваемые этим контактным колесом, неравномерны. Эта неравномерность вызывается многими причинами, главные из которых следующие: ошибки нарезки зубцов колесного прерывателя, неравенство четного и нечетного падения зубцов спускового колеса, эксцентриситет контактного и спускового колеса, их взаимное расположение и различие в работе спуска часов при правом и левом колебаниях маятника.

Неравномерность секундных интервалов порождает ошибки минутного периода. Ошибками минутного периода будут отклонения реальных секундных интервалов от условных равномерных.

Сумма ошибок минутного периода равна нулю.

Эти ошибки легко определяются при помощи хроноскопа.

Если мы дадим электрические сигналы от контактного прерывателя на реле хроноскопа, то получим в течение одной минуты n отсчетов на дисках хроноскопа. Из этих отсчетов составим отклонения от арифметической середины — вида:

$$\frac{1}{n} \sum_{n=1}^{n=60} a_n - a_i = v_i.$$
 Величины v_i и будут ошибками минутного периода для всех номеров секунд от 1 до 60.

Тогда
$$\sum_{i=1}^{i=60} v_i = 0.$$

Если минута разделена на секундные интервалы, то получим 60 значений v_i ; при двухсекундных интервалах — 30 значений. Значения a_i для секунд, соответствующих удаленным зубцам контактного колеса, находятся посредством средних арифметических из a_{i-1} и a_{i+1} .

Для определения ошибок минутного периода достаточно произвести записи отсчетов хроноскопа для секундных сигналов в течение 10 мин. Из этих отсчетов получится 10 значений ошибок минутного периода для всех секундных контактов колесного прерывателя. Из 10 значений выводится окончательное значение ошибок минутного периода секундных контактов. Кроме того, из 10 отсчетов хроноскопа для одной и той же секунды находят среднюю ошибку повторяемости секундных сигналов.

Ошибка повторяемости секундных сигналов зависит от чистоты зубцов, от смазки импульсного колеса и полетт покоя, от крепления винтов подвески и ряда других малоизученных причин.

Перед определением ошибок минутного периода на хроноскопе необходимо убедиться в стабильности частоты. Для этого достаточно сделать несколько отсчетов секундных сигналов в течение минуты от часов, свободных от ошибок минутного периода, приняв во внимание их минутный ход.

Таблица 1

№ сек.	67R				68R				№ сек.
	11/X 1948	2/V 1949	26/V 1949		28/VI 1948	2/V 1949	26/V 1949		
	v_i	v_i	v_i	v_i	v_i	v_i	v_i	v_i	
1	$\pm 0^{\circ},012$	$\pm 0^{\circ},012$	$\pm 0^{\circ},013$	$\pm 0^{\circ},0005$	$\pm 0^{\circ},010$	$\pm 0^{\circ},001$	$0^{\circ},000$	$\pm 0^{\circ},0003$	3
3	+	+	+	5	0	0	-	3	3
5	11	10	11	5	0	4	-	4	4
7	1	1	1	5	1	1	-	1	4
9	+	+	+	4	1	2	+	1	3
11	-	-	-	3	2	3	+	3	4
13	1	0	0	12	+	4	+	5	4
15	4	3	4	6	3	2	+	2	4
17	1	1	1	6	-	1	+	1	3
19	-	+	+	7	4	4	-	4	4
21	-	10	8	5	5	+	+	1	4
23	8	9	6	19	4	4	+	1	4
25	7	4	3	4	4	4	+	4	4
27	7	4	4	9	5	5	-	5	5
29	0	0	0	8	5	1	-	0	3
31	-	5	6	4	-	4	-	5	5
33	6	8	8	10	4	+	+	1	6
35	+	+	+	4	-	4	+	3	4
37	3	3	3	5	1	2	+	2	4
39	-	2	-	5	+	0	-	0	4
41	-	1	-	3	0	4	-	4	4
43	+	2	+	10	+	2	+	3	5
45	1	2	2	7	0	1	+	0	4
47	2	3	3	5	+	2	+	0	4
49	+	4	+	7	0	2	+	2	3
51	-	2	-	5	0	4	+	3	5
53	0	1	1	6	0	3	+	4	4
55	4	3	3	7	5	0	+	1	3
57	10	8	9	12	2	6	+	4	4
59	+	14	+	16	+	2	+	3	3
	+	66	+	65	+	62	+	35	
	-	66	-	65	-	52	-	35	

81R								86R		№ сек.
25/X 1947	11/X 1948	6/II 1949	2/V 1949	26/V 1949		26/V 1949				
v_i	v_i	v_i	v_i	v_i	v_i	v_i	v_i			
$\pm 0^{\circ},009$	$\pm 0^{\circ},012$	$\pm 0^{\circ},007$	$\pm 0^{\circ},008$	$\pm 0^{\circ},008$	$\pm 0^{\circ},008$	$\pm 0^{\circ},0005$	$\pm 0^{\circ},009$	$\pm 0^{\circ},0004$	1	
+	+	+	+	+	+	+	+	+	3	
5	4	6	7	6	7	5	5	8	4	
8	10	9	10	9	9	4	2	2	5	
10	5	6	7	6	6	3	3	6	7	
6	1	0	1	0	0	5	14	5	9	
9	5	6	5	4	5	4	15	4	11	
10	4	4	3	2	3	4	10	5	13	
3	3	2	2	3	2	3	6	2	15	
4	4	3	3	4	4	4	4	4	17	
5	5	4	5	5	5	5	2	4	19	
2	2	5	5	2	5	2	5	5	21	
7	3	4	4	4	3	4	2	4	23	
4	6	7	6	7	7	4	8	5	25	
7	6	3	3	3	3	7	6	4	27	
7	10	8	8	8	8	5	4	4	29	
11	12	10	10	9	9	7	4	4	31	
10	11	9	10	9	9	7	1	3	33	
10	6	8	9	9	9	2	1	3	35	
13	2	2	2	2	2	4	4	5	37	
8	8	5	5	5	5	7	11	5	39	
8	6	4	6	5	5	4	12	4	41	
7	1	4	0	0	5	5	4	3	43	
2	7	7	7	7	7	5	2	2	45	
0	1	4	4	4	4	5	2	3	47	
3	3	0	1	1	2	3	3	4	49	
1	5	7	8	8	8	7	10	1	51	
0	5	4	4	4	3	3	10	3	53	
0	5	2	2	2	3	+	8	4	55	
5	5	6	7	7	7	2	2	4	57	
12	20	9	10	9	9	5	1	5	59	
+	88	+	81	+	80	+	82			
-	88	-	81	-	80	-	82			

Вводить поправки за ход часов в ошибки минутного периода в случае суточного хода часов меньшего $1^{\circ},5$, вряд ли имеет смысл. Для определения ошибки повторяемости секунда суточные ходы больше $0^{\circ},150$ следует учитывать.

В 1947, 1948 и 1949 гг. был произведен ряд наблюдений на хроноскопе для определения ошибок минутного периода и повторяемости секунд часов эталонной группы лаборатории времени ВНИИМ: 67R, 68R, 81R и 86R¹. Результаты наблюдений приведены в табл. 1.

Как правило, каждое определение производилось в течение 10 мин., за исключением:

67R 11/X 1948 г. . . . 4 мин.

68R 28/VI 1948 г. . . . 15 мин.

86R 26/V 1949 г. . . . 8 мин.

¹ Часы: 67R и 86R регулированы по звездному времени; 68R и 81R — по среднему.

Часы 67R, 68R и 81R дают контакты через 2 сек., так как удалены зубцы, соответствующие секунде с номером 1. Часы 86R дают контакты через 1 сек.; удалена нулевая секунда.

Для часов с двухсекундным интервалом для одного определения в течение 10 мин. производится 290 отсчетов на хроноскопе; для односторонних — 300 (отсчитываются только нечетные секунды).

Отсчеты на хроноскопе производятся со средней ошибкой $\pm 0^{\circ},001$.

В табл. 1 приведены значения поправок секунд часов за ошибку минутного периода (v_i) и ошибок повторяемости секунд сигналов (v_i).

Из рассмотрения табл. 1 видно, что ошибки минутного периода часов 67R, достигая значительных величин ($-0^{\circ},016$), довольно устойчивы во времени; некоторое исключение составляют секунды 23, 25, 27, 35 и 39. Ошибки повторяемости — малы, за исключением секунда 13, 23, 33, 43, 57 и 59.

Такая устойчивость ошибок минутного периода часов 67R отчасти объясняется их качеством и условиями, в которых они помещены. В мае

1947 г. они были установлены внизу Менделеевской трубы, построенной для исследования качания длинных маятников, на глубине 15 м от уровня земной поверхности, что дало устойчивость температуры и значительно снизило влияние на часы колебаний верхнего слоя почвы.

После установки в трубе часы не регулировались на уменьшение ошибки повторяемости. Для часов 68R между первым и вторым определением заметно изменение ошибок минутного периода (до $0^s,019$); в этот период (февраль 1949 г.) часы перемещены со столба на противоположную стену — для уменьшения сотрясений от мотора компаратора, установленного в комнате над столбом. Механизм часов чистке и регулировке не подвергался. Ошибки повторяемости секунд весьма малы. Обращает на себя внимание малая величина ошибок минутного периода в последнем определении (не превышает $0^s,005$).

В часах 81R вполне понятно изменение значений v_1 от первого ко второму определению, так как в июне — июле 1948 г. часы были остановлены и механизм был подвергнут чистке и регулировке. После их последней откочки 31/VII 1948 г. часы находятся в одних и тех же условиях, но, несмотря на это, в промежутке второго и третьего определений произошло заметное изменение v_1 , в особенности — v_{12} . Это показывает на возможность изменения v_1 при отсутствии перерегулировки часового механизма. Последние три определения (на протяжении 3,7 мес.) хорошо согласуются между собой. Ошибки повторяемости секунд малы. В часах 86R v_1 достигают значительной величины, но по повторяемости секунд не уступают часам 68R.

При определении ошибок минутного периода на хронографе, проведенных в лаборатории времени ВНИИМ за период с 1918 по 1931 г., отдельные определения производились в течение 31 мин.; средняя ошибка одного отсчета равна $\pm 0^s,004$ ¹. При определении же ошибок минутного периода на хроноскопе, как указано выше, наблюдения производятся в течение 10 мин. и отсчеты производятся с точностью до $0^s,001$.

6. Выводы

1. Хроноскопический метод сличения часов и определения ошибок минутного периода более рационален, чем хронографический; экономичнее и точнее последнего в 3—4 раза.

2. Изменение ошибок минутного периода и повторяемости секундных сигналов часов возможно при отсутствии перерегулировки часового механизма. Желательно периодическое определение этих ошибок.

3. После каждой остановки часов необходимо вновь определить v_1 и v_2 , и в случае большой ошибки повторяемости секунд следует произвести регулировку механизма.

Эти операции производятся до создания постоянного давления.

¹ Н. Х. Прейшич, О хронографических методах исследования колесных прерывателей в часах, Труды ВНИИМ, вып. 3(19)

СОДЕРЖАНИЕ

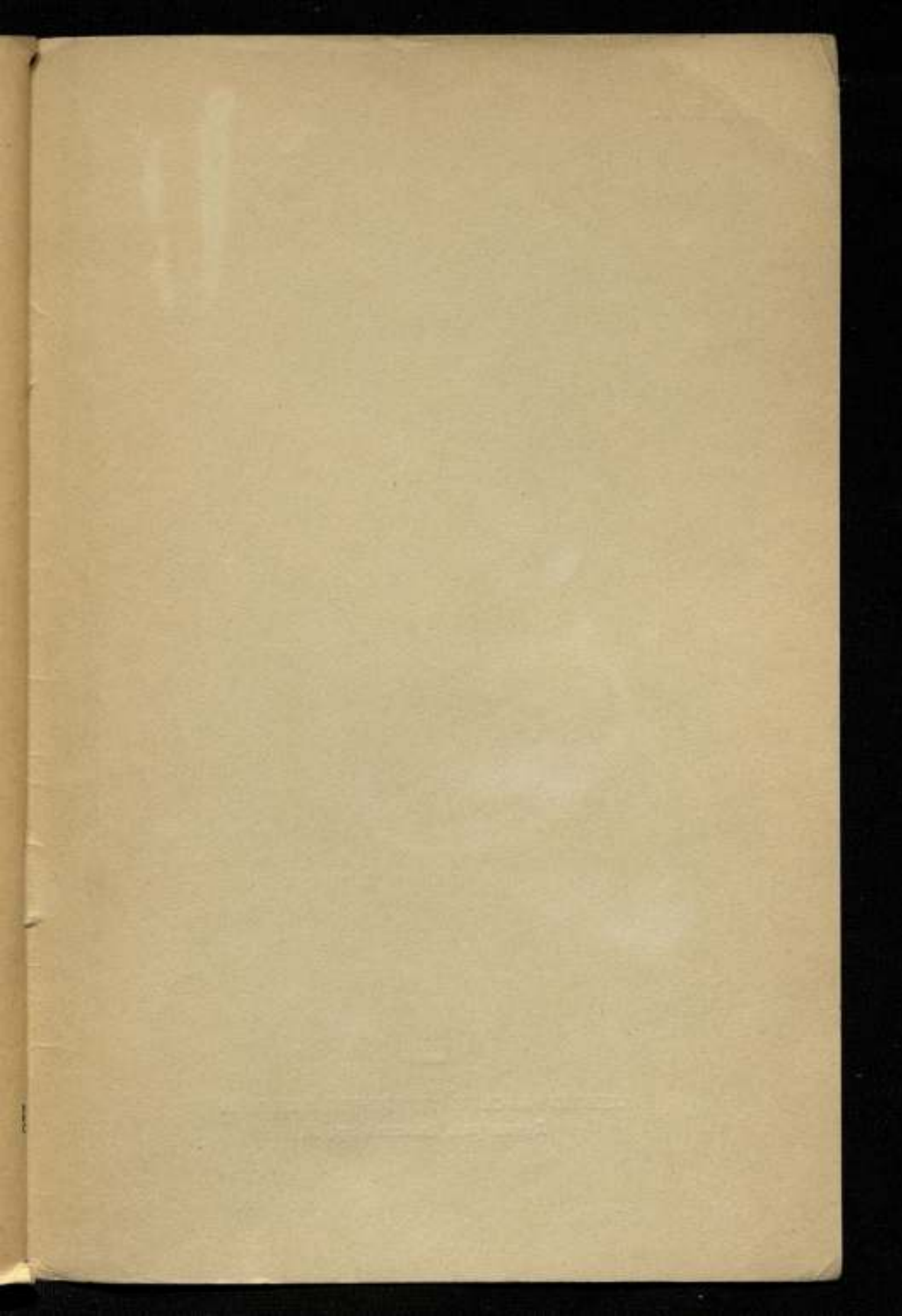
Предисловие	3
П. Н. Агаецкий, Способ обнаружения и исключения систематических погрешностей при определении абсолютного значения ускорения силы тяжести с помощью маятниковой аппаратуры	5
П. Н. Агаецкий и К. Н. Егоров, Коромысло, как инструмент для исследования системы воз — опора маятниковых приборов	18
П. А. Налимов, Интерференционный метод определения плотностей слабых водно-спиртовых растворов	31
Н. С. Михельсон, К реформе спартометрии	37
В. Д. Деревянкин, Сравнение часов на хроноскопе и определение ошибок минутного периода	50



Корректор *Е. Ф. Кандалева*

Подписано к печати 11/ХII 1950 г. М39776
Формат бумаги 60×9,1/16. Печ. л. 4
Уч.-изд. лист. 4,6. Тираж 600 экз.
Заказ 2520

1-я типография Машгиза,
Ленинград, ул. Монсенко, 10



2 р. 75 к.



ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
Ленинград, Невский пр., 58