

КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СНК СССР

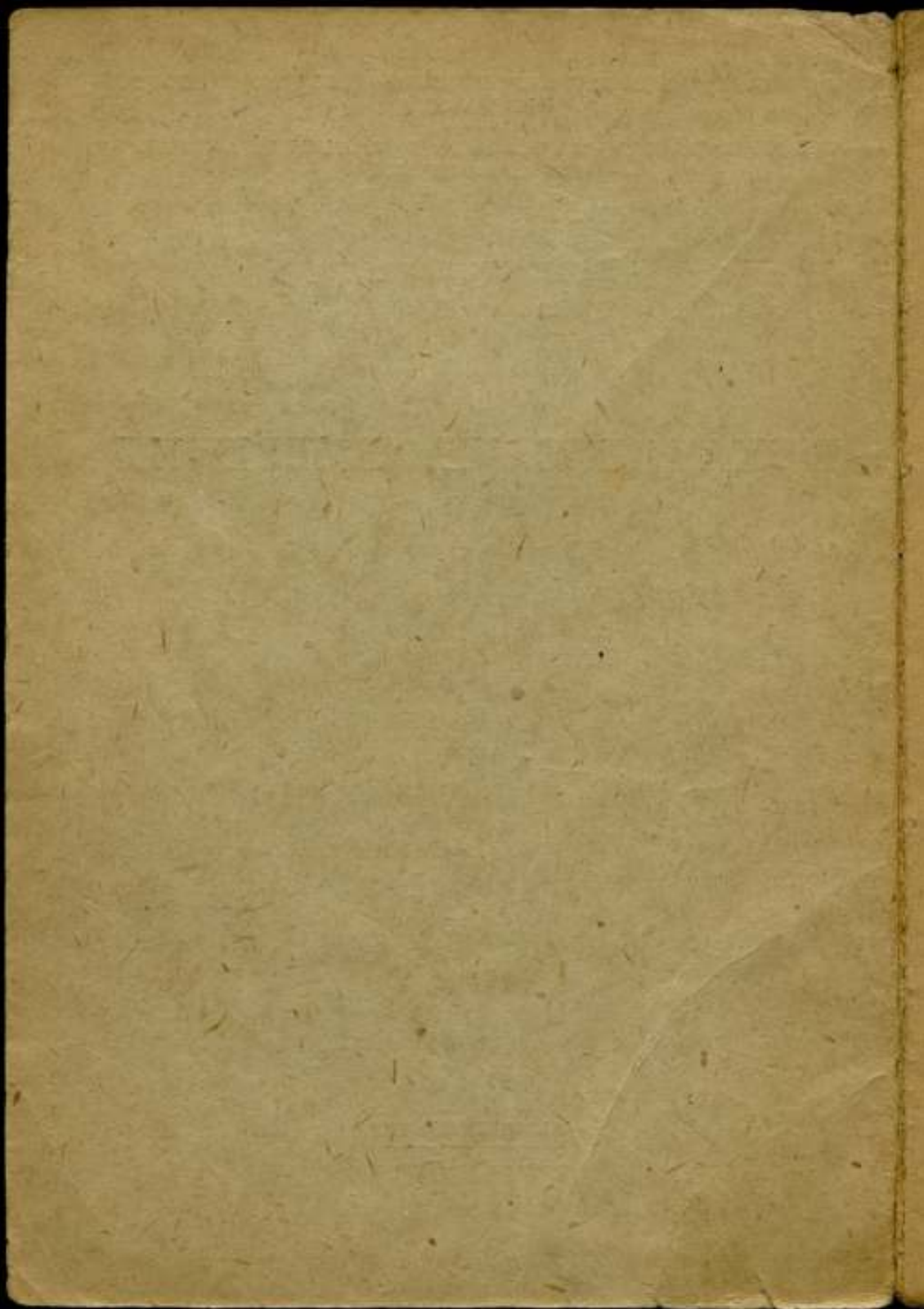
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ

СБОРНИК ТРУДОВ

Выпуск 2 (44)

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД — 1940



КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СНК СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ

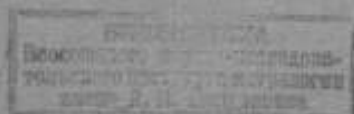
*Т. В. Угрюмову
от С. Яковича
23/III 48*

*С. Якович
1940*

СБОРНИК ТРУДОВ
Выпуск 2 (44)

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Под редакцией
проф. А. Н. ДОБРОХОТОВА



ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД—1940

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
П. Н. Агаецкий. Абсолютный метод измерения скоростей, ускорений и длительности кратковременных движений	3
Н. И. Белик. Эталонные гидростатические весы для измерения малых разностей давлений	17
Е. Ф. Долгинский. Микроанометр типа АЛД	23
Е. А. Волкова и Л. А. Рубец. Ртутные барометры	29
Л. А. Рубец. Измерение больших расходов воды методом прививки	55

П. Н. АГАЛЕЦКИЙ

АБСОЛЮТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ, УСКОРЕНИЙ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ

Получение неискаженной картины изменения во времени пути, скорости и ускорения необходимо при исследовании кратковременных движений в различных областях техники. Для регистрации этих величин в процессах продолжительностью меньше одной секунды разработано много различных методов, но большинство из них обладает рядом существенных недостатков. Кратковременность процесса исключает возможность визуальных наблюдений. Приборы, предназначенные для подобных измерений, должны быть самопишущими с безинерционными регистрирующими устройствами. Эти условия в достаточной мере могут быть обеспечены лишь электрическими методами. Но электрические методы измерения скорости и ускорения обычно сопровождаются осциллографированием, что усложняет и удорожает измерительную аппаратуру. Необходимо также отметить, что электрические методы измерения скорости и ускорения являются косвенными методами и, следовательно, имеют большое количество источников случайных погрешностей. Подобные измерительные устройства нуждаются в предварительной градуировке, проводимой, обычно, в статическом режиме, а эксплуатируются они в режиме динамическом.

Простой по осуществлению, обеспечивающий заданную точность, абсолютный метод измерения скорости, ускорения и продолжительности кратковременных движений был предложен автором.¹

Метод основан на безинерционной магнитной записи движения на стальной проволоке или ленте и позволяет фиксировать непосредственно длину и время, т. е. величины, необходимые для определения скорости и ускорения.

Сущность магнитной записи заключается в следующем.

Если в поле электромагнита, питаемого переменным током, перемещать стальную проволоку, то происходит продольное намагничивание последней. Длина отдельных полученных магнитиков будет соответствовать расстоянию, на которое переместилась проволока за время одного полупериода переменного тока. Проволока с записью представляет собою цепь отдельных магнитиков.

¹ Авторское свидетельство № 49521.

Зависимость между силой намагничивающего тока $i = J_0 \sin \omega t$ и расположением отдельных магнитиков вдоль проволоки схематически представлена на рис. 1а.

Если магнитная запись производится при помощи подковообразного электромагнита на стальной ленте, то отдельные магнитики располагаются несколько иначе, чем при записи на стальную проволоку. На ленте происходит поперечное перемагничивание и зависимость между силой переменного тока, питающего электромагнит, и расположением полюсов на стальной ленте можно схематически представить так, как показано на рис. 1б.

Свойство стальной ленты и проволоки сохранять продолжительное время полученную полярность было несколько лет назад использовано в звукозаписи.

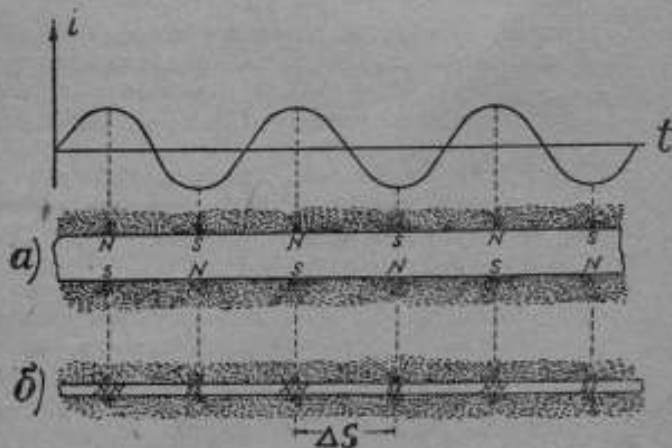


Рис. 1.

Процесс магнитной звукозаписи заключается в том, что стальная лента или проволока перемещается с постоянной скоростью в поле неподвижного электромагнита, питаемого электрическим током переменной частоты и амплитуды. Непременным условием для получения высококачественной магнитной звукозаписи является сохранение постоянной скорости движения стальной ленты или проволоки.

Соблюдение этого условия конструктивно усложняет звукозаписывающую аппаратуру, поэтому неудивительно, что магнитная звукозапись не получила широкого распространения и применяется лишь в обстановке производственной работы некоторых радиостудий и звуковых кино-ателье для последующего контроля за качеством звучания.

В отличие от магнитной звукозаписи, предложенный автором способ записи и измерения пути, скорости, ускорения и длительности кратковременных движений осуществляется в противоположных условиях: на неподвижной стальной ленте или проволоке, расположенной по направлению движения тела, производится магнитная запись при помощи электро-

магнита, соединенного с исследуемым движущимся телом и питаемого переменным током определенной, неизменной частоты. Таким образом магнитная запись для измерительных целей не требует сложных приспособлений, необходимых при звукозаписи: надо только иметь стальную проволоку, электромагнит, соединительный шнур и переменный ток определенной частоты.

Магнитная запись для измерительных целей практически осуществляется следующим образом.

Вдоль следования движущейся системы A (рис. 2) натягивают на изоляторах K и L стальную проволоку pq диаметром 0,2—1,5 мм. На системе A закреплен электромагнит B , по бокам которого находятся две втулки из диамагнитного металла. Во время движения системы A втулки a и b скользят по проволоке pq и являются направляющими для электромагнита.

В обмотку электромагнита B подводится от генераторов переменный ток с неизменной частотой f . Подводка тока осуществляется от зажима α через проволоку pq , втулки a , и b , катушку электромагнита B , металлический корпус движущейся системы A и через рельс, направляющий движение системы к зажиму β . Если движущаяся система A не металлическая, ток к электромагниту B можно подвести посредством гибкого шнура, следующего за системой A . В некоторых случаях стальную проволоку pq удобнее закреплять одним концом на движущейся системе A с тем, чтобы она следовала за системой A во время движения и проходила мимо электромагнита B , расположенного неподвижно в начале движения системы A .

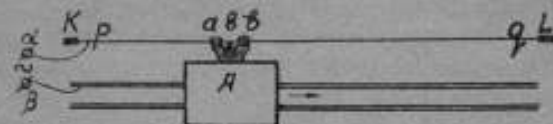


Рис. 2.

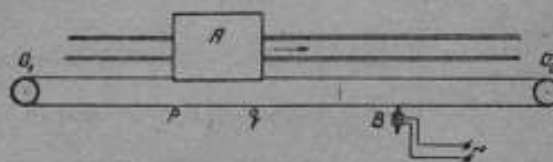


Рис. 2а.

Также хорошо оправдал себя в эксплуатации способ закрепления стальной проволоки и электромагнита (рекордера), схематически изображенный на рис. 2а.

Проволока pq перебрасывается через два блока O_1 и O_2 и концами закрепляется на движущейся системе A . Электромагнит B укрепляется неподвижно.

Во время движения электромагнита вдоль стальной проволоки последняя, через равные промежутки времени, а именно через $\frac{1}{2f}$ сек. перематнивается и в результате представляет собою цепь из отдельных магнитиков, длина которых равна отрезкам пути ΔS . Эти отрезки пути ΔS система проходит в последовательные промежутки времени, равные $\frac{1}{2f}$ сек. Таким образом на стальной проволоке будут зафиксиро-

рованы отрезки пути, последовательно проходимые системой A в известные нам промежутки времени, равные полупериоду переменного тока, питающего электромагнит B .

Как известно, скорость в момент t определяется выражением $v_1 = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, а ускорение $a_1 = \frac{\Delta v}{\Delta t}$; отсюда следует, что, выбирая частоту переменного тока, мы можем получить время $\Delta t = \frac{1}{2f}$ достаточно малое для определения скорости и ускорения с заданной точностью. Магнитная запись, полученная на стальной проволоке, нуждается в дальнейшей расшифровке, сведении в таблицу функциональной зависимости $S = f(t)$ и обработке табличных данных.

Наиболее простой способ расшифровки магнитной записи заключается в получении магнитного спектра.

В некоторых случаях магнитный спектр можно получить, не снимая проволоки. Для этого перемещают бумажный совок с мелкими железными опилками вдоль проволоки с записью, причем опилки в местах перемагничивания притягиваются к проволоке, располагаясь гирляндами. Расстояния между нижними частями соседних гирлянд, соответствующие длинам отдельных магнитиков, измеряются с помощью линейки и заносятся в таблицу.

Время t	Изменение пути ΔS	Путь S	Скорость v	Ускорение a

Рис. 3.

Проволока после расшифровки записи размагничивается путем медленного протягивания около рекордера B и снова употребляется для следующей записи.

Если желают получить документальную запись скорости движения системы A , то проволоку снимают и запись переносят с проволоки на бумагу. Для этого на гладкой деревянной доске накалывают полосу бумаги и сверху туго натягивают проволоку с записью. Бумагу осторожно посыпают мелкими железными опилками, на ней ясно вырисовывается магнитный спектр (см. рис. 1). Отдельные магнитики будут обращены друг к другу одноименными полюсами. Каждому амплитудному значению намагничивающего тока будет на проволоке соответствовать условная граница между двумя соседними магнитиками. На магнитном спектре эта условная граница определится опилками в виде линии, перпендикулярной к проволоке, и может быть с точностью до 1 мм отмечена штрихом на бумаге.

Подобная расшифровка дает возможность перенести запись с проволоки на бумажную ленту. Расстояния между соседними штрихами на бумажной ленте соответствуют отрезкам пути ΔS . Штрихи отмечаются порядковыми номерами, расстояния между штрихами измеряются и заносятся в таблицу. Таблица содержит пять граф: время, приращение пути, путь, скорость и ускорение (рис. 3).

В графе „время t “ записывают время, истекшее от момента начала движения. Общее число штрихов n , помноженное на $\frac{1}{2f}$, дает полное

время движения системы A с точностью до $\frac{1}{2f}$ сек. Это время соответствует в первой графе последнему значению. Во вторую графу „приращение пути ΔS “ заносят расстояния ΔS между соседними штрихами на бумажной ленте. Третья графа „путь S “ содержит значение пути, пройденного системой от начала движения. Эта графа необходима для построения графика $S=f(t)$.

Расстояние ΔS_k , соответствующее какому-либо полупериоду Δt_k , помноженное на $2f$, дает среднюю скорость V_k за время Δt_k . Значения средних скоростей заносятся в графу „скорость V “.

Ускорение за время Δt_k получают из выражения $a=(V_k-V_{k-1})2f$. Значения ускорения заносят в пятую графу. В таблице может быть введена еще одна графа, если встречается необходимость получения значений ускорения за промежутки времени, более продолжительные, чем Δt .

Таким образом таблица дает время движения и последовательный ряд значений пути, скорости и ускорения за равные промежутки времени. Пользуясь полученной таблицей, можно построить графики изменения этих величин во времени или же прямо иметь их значения для любого момента движения.

Частоту переменного тока f , питающего электромагнит B , выбирают больше или меньше в зависимости от ожидаемой скорости движения системы. При измерении небольших скоростей (порядка до 20 м/сек) можно пользоваться обычным переменным током с частотой f , равной 50 Hz. Магнитная запись на проволоке после расшифровки может быть стерта постоянным магнитом и проволока вновь использована для следующей записи.

Предложенный нами абсолютный метод измерения скорости, ускорения и длительности кратковременных движений был подвергнут всесторонней экспериментальной проверке. В качестве примера практического применения метода приводим результаты обработки магнитной записи, полученной при движении каретки специального разгонного механизма.

Каретка этого механизма имела возможность на расстоянии 10 м двигаться прямолинейно с некоторым переменным ускорением. Магнитная запись производилась на стальную проволоку диаметром 0,5 мм, натянутую вдоль движения каретки. Прямой электромагнит, врезанный в деревянную колодку, закреплялся на каретке разгонного механизма. Питание его переменным током частотой 50 Hz производилось от обычного генератора переменного тока через гибкий шнур, следовавший при движении за кареткой. Стальная проволока проходила через направляющее отверстие в деревянной колодке, соприкасаясь с одним концом сердечника электромагнита. Экспериментальное исследование свойства магнитной записи показало, что на стальной проволоке лучшую запись производит прямой электромагнит, примыкающий одним концом к проволоке; на стальной ленте лучшие результаты дает подковообразный электромагнит, охватывающий с боков ленту. Причиной этого

является различный характер записи на проволоке и ленте, о чем говорилось выше. Расшифровка записи производилась нами по магнитному спектру. Результаты приведены в таблице (см. стр. 13).

Следует отметить, что настоящий абсолютный метод измерения скоростей, ускорений и длительности кратковременных движений дает возможность получать непосредственно значения только для функций $S=f(t)$ и $V=f(t)$. Графики этих функций даны на рис. 4.

При построении кривой ускорения приходится для каждого момента времени находить производную от скорости. Поэтому небольшие погрешности в определении скорости вызывают значительные погрешности в определении величины ускорения.

Отсюда следует, что данный метод обеспечивает для измерения ускорения меньшую точность, чем для измерения скорости, пути и времени.

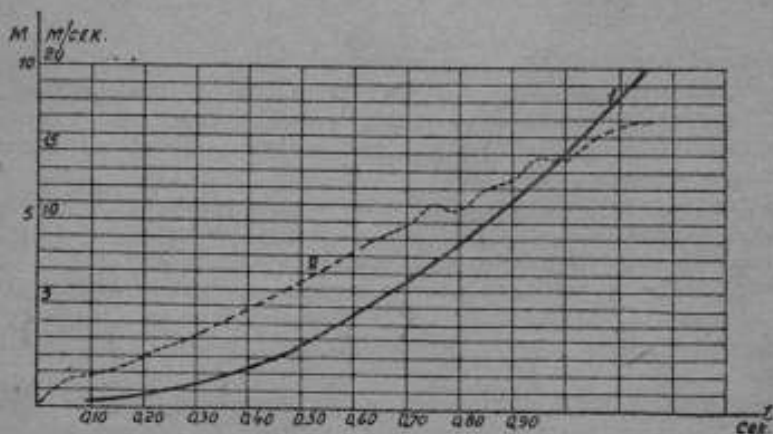


Рис. 4.

В реальных условиях движения системы, вследствие упругих колебаний движущейся системы и провода, наблюдаются быстрые изменения ускорения. График истинного изменения ускорения представляет собою сильно изломанную кривую. На рис. 5 приведена осциллограмма ускорения каретки разгонного механизма, полученная при помощи пьезоэлектрического акселерографа.¹ Масштаб записи ускорения на осциллограмме следующий: ординаты в g ($g = 9,8 \text{ м/сек}^2$), абсциссы в 0,1 сек. Подобная кривая дает представление о максимальных значениях и характере изменения ускорения, но неудобна при определении эффективного усилия, развиваемого двигателем. Для последнего желательно иметь осредненную кривую изменения ускорения. Именно осредненные значения ускорения с любой степенью осреднения дают возможность получать метод магнитной записи. На рис. 6 приведены две кривые ускорения

¹ Прибор разработан автором статьи и описан в его статье «Пьезоэлектрические методы измерения сил кратковременного действия».

каретки разгонного механизма: сплошной линией изображена кривая, построенная по точкам, представляющим средние значения ускорения за 0,01 сек.; пунктирная кривая построена по средним значениям ускорения за каждые 0,05 сек. Точность измерения скорости, ускорения

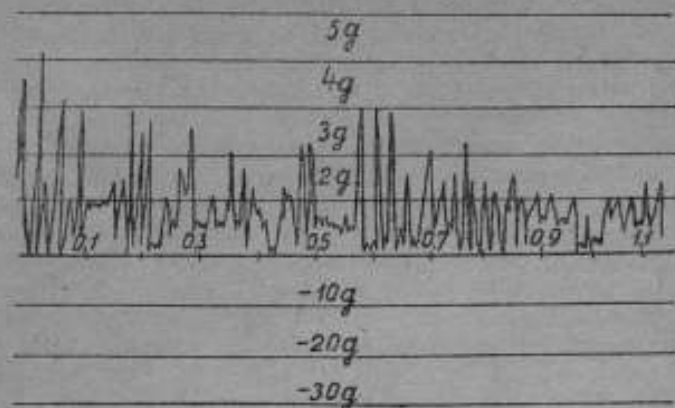


Рис. 5.

и длительности кратковременных движений при помощи предлагаемого абсолютного метода зависит в основном от частоты переменного тока, питающего электромагнит. Чем выше частота, тем точнее можно полу-

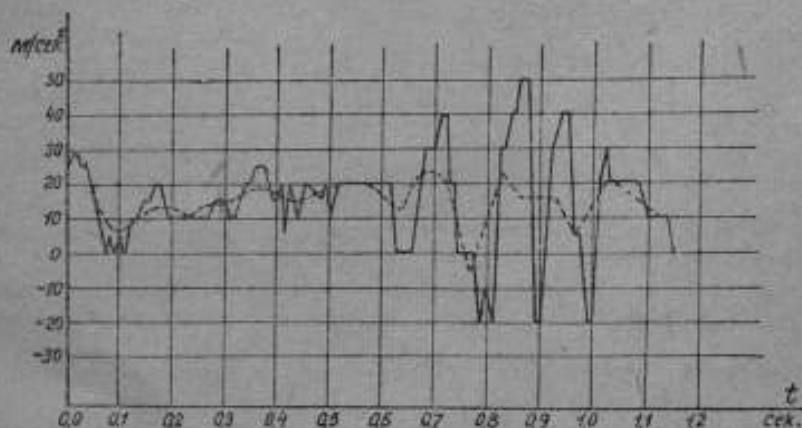


Рис. 6.

чить значения скорости и ускорения в заданный момент времени или на заданном участке пути. Но необходимо учитывать, что повышение частоты, давая большое число отсчетов, усложняет обработку результатов записи.

К источникам случайных погрешностей при пользовании методом магнитной записи следует отнести:

1) погрешности в определении длины отдельных магнитиков, 2) продольные колебания стальной проволоки, 3) непостоянство частоты переменного тока, питающего электромагнит, 4) наличие у кривой намагничивающего тока нескольких максимумов за полупериод.

Погрешности в определении длины отдельных магнитиков определяются тем, что условная граница двух соседних магнитиков находится в точке наиболее интенсивного намагничивания проволоки. Эта условная граница может расползаться. Для устранения подобного расползания необходимо:

1) применять для магнитной записи стальную проволоку, обладающую большой коэрцитивной силой, 2) электромагнит (рекордер) окружить железным экраном, ограничивающим рассеяние магнитного потока, 3) сердечник электромагнита снабдить полюсным наконечником, который должен проходить через экран и в месте соприкосновения с проволокой иметь ширину не больше 0,25 мм.

Отвечающий перечисленным требованиям магнитный рекордер (рис. 7а) изготовлен вместе с контактной втулкой, которая используется в

случае, если переменный ток, питающий рекордер, подводится по проволоке, на которой производится запись. На рис. 7 б и в — катушки со стопорными устройствами и струбцинами для укрепления на доске, служащие для перемотки проволоки при расшифровке записи.

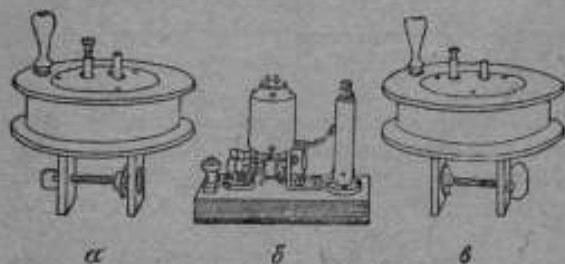


Рис. 7.

Погрешности в определении длины отдельных магнитиков лежат в пределах 1 мм. При частоте переменного тока 50 Hz это соответствует погрешности в определении скорости в 0,1 м/сек. Для ускорения погрешность составит 10 м/сек².

Значительно снизить эту погрешность можно построением осредненного графика скорости и графическим дифференцированием полученной кривой.

Продольные колебания стальной проволоки в процессе проведения магнитной записи также вызывают погрешности измерения. Но при длине проволоки порядка 10 м частота продольных колебаний бывает значительно ниже частоты переменного тока, а амплитуда их при небольшом трении проволоки о втулку не превышает 0,1 мм. Отсюда ясно, что погрешностями, которые вносят продольные колебания проволоки, можно пренебречь.

Плавное изменение частоты переменного тока в пределах 1 Hz/сек. не вносит значительных погрешностей в измерение. Но при пользовании обычными генераторами переменного тока, вследствие несимметричности обмотки статора и расположения полюсов ротора, может случиться, что

продолжительность последующих периодов переменного тока будет различна. Подобное непостоянство частоты внесет значительную погрешность в измерение. Наличие у кривой намагничивающего тока нескольких максимумов за полупериод может привести к тому, что на проволоке за время $\frac{1}{2f}$ сек. образуется не один, а несколько отдельных магнитиков, а это, в свою очередь, может при расшифровке магнитной записи ввести экспериментатора в заблуждение. Для устранения этих источников погрешностей рекомендуется питать электромагнит переменным током от лампового генератора звуковой частоты. Мощность, необходимая для записи, не превышает 5 W. Коэффициент желательнее иметь не больше 5%.

Сравнение предлагаемого абсолютного метода регистрации скорости, ускорения и длительности движений с существующими методами записи этих величин, как-то: методом электроконтактов, методом рапидсъемки, с записью движения при помощи камертонного прибора, показало, что метод магнитной записи по точности и простоте осуществления имеет перед ними ряд преимуществ.

Метод электроконтактов заключается в том, что на равном расстоянии друг от друга по пути следования движущейся системы располагают контакты, замыкающие при движении системы электрическую цепь. При каждом замыкании электрического тока самопишущий прибор производит отметку на равномерно-движущейся бумажной ленте. Этот метод обладает теми недостатками, что при больших скоростях точность измерения понижается вследствие того, что отметки времени на бумажной ленте делаются более частыми. Кроме того близкое расположение контактов друг к другу при больших скоростях создает повышенную частоту электрических импульсов, а это требует наличия безинерционного самописца.

Метод киносъемки неудобен тем, что для устранения перспективных искажений требует расположения киноаппарата на большом расстоянии от движущейся системы, что в свою очередь вызывает большие погрешности в отсчетах при обработке кинофильма.

В камертонном приборе для записи скорости движения системы имеется барабан, приводимый во вращение проволокой, которая намотана на него и свободным концом закреплена на движущейся системе. На вращающийся барабан камертон наносит синусоиду известного периода. Этот способ измерения скорости неудобен тем, что упругие колебания проволоки, инерция барабана и уменьшенный масштаб записи значительно снижают точность измерений.

Низкая точность и конструктивная сложность являются общими недостатками упомянутых методов.

По сравнению с ними метод магнитной записи обладает очевидными преимуществами и мы находим возможным рекомендовать его применение в разнообразных областях техники, в случаях, когда при движениях малой продолжительности требуется зарегистрировать величину скорости и ускорения на любом участке пути.

Дополнение

Со времени написания настоящей статьи прошло два года. Предложенный автором метод измерения скоростей и ускорений нашел достаточно широкое применение. Экспериментальная проверка метода в различных производственных условиях предоставила автору материал, позволивший внести некоторые дополнения в область применения магнитной записи для измерения скоростей и ускорений. Приводим эти дополнения.

Описанный в статье метод измерения скоростей и ускорений заключается в нанесении на неравномерно-движущуюся стальную проволоку магнитной записи с помощью электромагнита, питаемого переменным током неизменной частоты. В результате записи получают ряд значений средней скорости, за равные промежутки времени $\Delta t = \frac{1}{2f}$. Таким образом в отношении $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ переменной величиной является ΔS при $\Delta t = \text{const}$.

В таком виде предложенный метод применим для исследования лишь непериодических движений, так как в случае регистрации этим методом

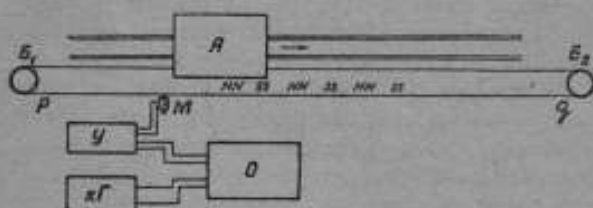


Рис. 8.

скорости периодического движения будем иметь многократное наложение записи на проволоку, исключающее возможность обработки результатов записи. Для измерения скорости и ускорения периодических и непериодических движе-

ний автор предложил и экспериментально проверил конструктивно простой метод измерения, аналогичный методу электроконтактов, упомянутому выше.

Принцип метода заключается в том, что роль электроконтактов выполняет калиброванная посредством намагничивания стальная проволока. Вместо замыкателя, регистрирующего прохождение движущейся системы через фиксированные точки пути, применен магнитный адаптер. Индуцированный в адаптере переменный ток после усиления записывается осциллографом или шоринфоном одновременно с маркой времени, получаемой от камертонного генератора.

В результате записи получается ряд значений средней скорости на известных одинаковых участках пути. Таким образом в отношении $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ переменной величиной, определяемой из осциллограммы, является ΔS при $\Delta t = \text{const}$.

Скорость движения тела в любом участке пути определится уравнением $V = \frac{\Delta S}{\Delta t}$, где V — скорость в заданном участке пути, ΔS — длина отдельного магнита равномерно калиброванной проволоки, Δt —

полупериод переменного тока, соответствующий прохождению системой заданного участка пути.

Практическая реализация этого метода измерения скоростей производится по схеме, изображенной на рис. 8.

A — движущаяся система, pq — стальная проволока, намагниченная через равные промежутки длины, B_1 и B_2 — блоки, через которые перебрана проволока pq , закрепляемая концами на системе A , M — магнитный адантер, $У$ — усилитель, O — осциллограф, $KГ$ — камертонный генератор для нанесения марки времени на осциллограмме.

В некоторых случаях вместо осциллографа можно с успехом применять шоринифон. Для нанесения марки времени последний снабжается вторым резцом.

Запись на пленке увеличивается с помощью проекционного фонаря и затем расшифровывается со сведением числовых данных в таблицу.

Оба описанных метода, являясь практически безинерционными, во многих случаях дают возможность исследователю регистрировать с погрешностью 1—2% изменения скорости при кратковременном движении.

Таблица времени, пути, скорости и ускорения, полученная при расшифровке магнитной записи движения каретки разгонного механизма

Время в сек	Прираще- ние пути в см	Путь в см	Скорость в м/сек	Ускорение в м/сек ²	Среднее ускорение за 0,05 сек
0,01	0,35	0,35	0,35	35	} 30
0,02	0,7	1,05	0,7	35	
0,03	1,0	2,05	1,0	30	
0,04	1,3	3,35	1,3	30	
0,05	1,5	4,85	1,5	20	
0,06	1,65	6,5	1,65	15	} 5
0,07	1,65	8,15	1,65	0	
0,08	1,7	9,85	1,7	5	
0,09	1,7	11,55	1,7	0	
0,10	1,75	13,3	1,75	5	
0,11	1,75	15,05	1,75	0	} 8
0,12	1,8	16,85	1,8	5	
0,13	1,9	18,75	1,9	10	
0,14	2,0	20,75	2,0	10	
0,15	2,15	22,9	2,15	15	
0,16	2,3	25,2	2,3	15	} 15
0,17	2,5	27,7	2,5	20	
0,18	2,7	30,4	2,7	20	
0,19	2,8	33,2	2,8	10	
0,20	2,9	36,1	2,9	10	

Продолжение

Время в сек	Прираще- ние пути в см	Путь в см	Скорость в м/сек	Ускорение в м/сек ²	Среднее ускорение за 0,05 сек
0,21	3,0	39,1	3,0	10	10
0,22	3,1	42,2	3,1	10	
0,23	3,2	45,4	3,2	10	
0,24	3,3	48,7	3,3	10	
0,25	3,4	52,1	3,4	10	
0,26	3,5	55,6	3,5	10	13
0,27	3,5	59,2	3,6	10	
0,28	3,75	62,95	3,75	15	
0,29	3,9	66,85	3,9	15	
0,30	4,05	70,9	4,05	15	
0,31	4,15	75,05	4,15	10	15
0,32	4,25	79,3	4,25	10	
0,33	4,4	83,7	4,4	15	
0,34	4,6	88,3	4,6	20	
0,35	4,8	93,1	4,8	20	
0,36	5,05	98,15	5,05	25	20
0,37	6,3	103,45	5,3	25	
0,38	5,5	108,95	5,5	20	
0,39	5,65	114,6	5,65	15	
0,40	5,8	120,4	5,8	15	
0,41	6,0	120,4	6,0	20	14
0,42	6,05	132,45	6,05	5	
0,43	6,25	138,7	6,25	20	
0,44	6,35	145,05	6,35	10	
0,45	6,5	151,55	6,5	15	
0,46	6,7	158,25	6,7	20	16
0,47	6,85	165,1	6,85	15	
0,48	7,0	172,1	7,0	15	
0,49	7,2	179,3	7,2	20	
0,50	7,3	186,6	7,3	10	
0,51	7,5	194,1	7,5	20	20
0,52	7,7	201,8	7,7	20	
0,53	7,9	209,7	7,9	20	
0,54	8,1	217,8	8,1	20	
0,55	8,3	226,1	8,3	20	
0,56	8,5	234,6	8,5	20	20
0,57	8,7	243,3	8,7	20	
0,58	8,9	252,2	8,9	20	
0,59	9,1	261,3	9,1	20	
0,60	9,3	270,6	9,3	20	

Время в сек	Прираще- ние пути в см	Путь в см	Скорость в м/сек	Ускорение в м/сек ²	Среднее ускорение за 0,05 сек
0,61	9,5	280,1	9,5	20	8
0,62	9,7	289,8	9,7	20	
0,63	9,7	299,5	9,7	0	
0,64	9,7	309,2	9,7	0	
0,65	9,7	318,9	9,7	0	
0,66	9,7	328,6	9,7	0	22
0,67	9,9	338,5	9,9	20	
0,68	10,2	348,7	10,2	30	
0,69	10,5	359,2	10,5	30	
0,70	10,8	370,0	10,8	30	
0,71	11,2	381,2	11,2	40	24
0,72	11,6	392,8	11,6	40	
0,73	11,8	404,6	11,8	20	
0,74	12,0	416,6	12,0	20	
0,75	12,0	428,6	12,0	0	
0,76	12,0	440,6	12,0	0	-6
0,77	12,0	452,6	12,0	0	
0,78	12,0	464,6	12,0	0	
0,79	11,8	476,4	11,8	-20	
0,80	11,7	488,1	11,7	-10	
0,81	11,5	499,6	11,5	-20	24
0,82	11,8	511,4	11,8	30	
0,83	12,1	523,5	12,1	30	
0,84	12,5	536,0	12,5	40	
0,85	12,9	548,9	12,9	40	
0,86	13,4	562,3	13,4	50	14
0,87	13,9	576,2	13,9	50	
0,88	14,0	590,2	14,0	10	
0,89	13,8	604,0	13,8	-20	
0,90	13,5	617,6	13,5	-20	
0,91	13,6	631,2	13,6	0	16
0,92	13,7	644,9	13,7	10	
0,93	14,0	658,9	14,0	30	
0,94	14,6	673,3	14,6	40	
0,95	14,8	688,1	14,8	40	
0,96	15,2	703,3	15,2	40	0
0,97	15,2	716,5	15,2	0	
0,98	15,2	733,7	15,2	0	
0,99	15	748,7	15	-20	
1,00	14,8	763,5	14,8	-20	

Продолжение

Время в сек	Прираще- ние пути в см	Путь в см	Скорость в м/сек	Ускорение в м/сек ²	Среднее ускорение за 0,05 сек
1,01	15	773,5	15	20	} 22
1,02	15,3	793,8	15,3	20	
1,03	15,5	809,3	15,5	20	
1,04	15,7	825,0	15,7	20	
1,05	15,9	840,9	15,9	20	
1,06	16,1	857,0	16,1	20	} 16
1,07	16,3	873,3	16,3	20	
1,08	16,5	889,8	16,5	20	
1,09	16,6	906,6	16,6	10	
1,10	16,7	929,1	16,7	10	
1,11	16,8	939,9	16,8	10	} 8
1,12	16,9	956,8	16,9	10	
1,13	17	973,8	17	10	
1,14	17,1	990,9	17,1	10	
1,15	17,1	1008	17,1	0	

Н. И. БЕЛИК

ЭТАЛОННЫЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ ВЕСЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ РАЗНОСТЕЙ ДАВЛЕНИЙ

Введение

Измерение малых разностей давлений, необходимое при исследовании малых скоростей, представляет метрологическую задачу значительной трудности.

До настоящего времени не имеется стандартного типа приборов, позволяющих с большой точностью измерять давления, меньшие 0,01 мм водяного столба. Как в отечественной, так и в иностранной литературе встречаются описания единичных экземпляров высокочувствительных микроманометров. Эти приборы можно разделить на следующие классы: а) жидкостные, б) мембранные, в) крутильные и г) электрические. Большинство из упомянутых приборов не абсолютные, а дают относительные значения измеренной разности давлений и поэтому требуют градуировки. В связи с этим задача о создании эталонного прибора малых разностей давлений приобретает особое значение, позволяющее ввести в действие ряд приборов, показания которых не могли быть сравнимы.

Осуществленные в аэрогидрометрической лаборатории ВНИИМ гидростатические весы реагируют на разность давлений порядка 0,3 мм водяного столба. Верхний предел измеряемых избыточных давлений близок к 11 мм водяного столба.

Гидростатические весы

1. Гидростатические весы с одним „колоколом“¹. К одному из концов коромысла подвешен вверх дном цилиндрической формы сосуд „колокол“, частично погруженный в жидкость, наполняющую ванну.

Внутренняя полость колокола соединяется посредством двух трубок, служащих одна для изменения давления, другая для соединения с испытуемым прибором.

¹) Z. F. Instrumentenkunde, № 11, 1925, стр. 515.

Исх. Е. Ф. Долянский, „Измерение скоростей и давлений в воздушном потоке“, Стандартгиз, 1935.

Изменение давления под колоколом нарушает равновесие весов. Величина груза, восстанавливающего равновесие весов определяет разность давлений между атмосферным давлением и давлением под колоколом.

Если обозначить:

P —вес дополнительного уравнивающего груза, F —площадь поперечного сечения „колокола“ в свету, F_1 —кольцевая площадь поперечного сечения стенок колокола, F_2 —площадь свободной поверхности жидкости находящейся в ванне, γ —удельный вес жидкости в ванне, то формула, определяющая искомое избыточное давление, имеет вид:

$$\Delta p = \frac{P}{F} \left(1 - \frac{F_1}{F_2} \right) \quad (1)$$

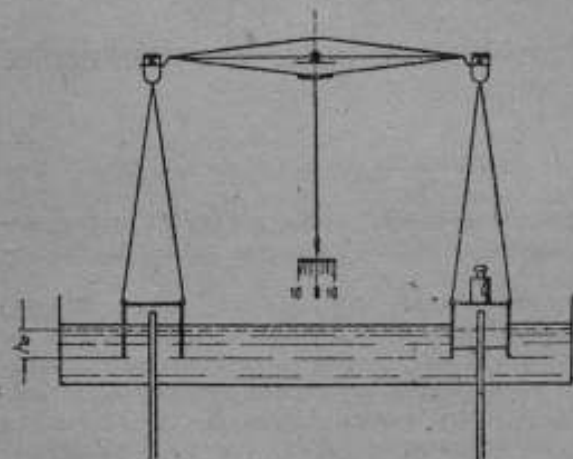


Рис. 1. Схема эталонных гидростатических весов

2. Гидростатические весы с двумя колоколами¹ осуществленные Московским горным институтом, отличаются от предыдущих тем, что к концам коромысла прикреплено два „колокола“, частично погруженных в жидкость, находящуюся в ванночках под колоколами.

Расчетная формула прибора сохраняет вид уравнения (1) при измерении давлений больших атмосферного.

3. Гидростатические весы ВНИИМ². Схема гидростатических весов ВНИИМ дана на рис. 1. Отличие гидростатических весов ВНИИМ от весов МГИ заключается в применении одной общей ванны для двух колоколов.

Допустим, что колокола гидростатических весов имеют строго цилиндрическую форму, одинаковый вес, одинаковые размеры и повешены вертикально; тогда при сообщении полостей колоколов с атмосферой, т. е. при $\Delta p = 0$, уровни жидкости будут одинаковыми как на внешней, так и на внутренней поверхности, и колокола будут погружены на одну и ту же глубину (см. рис. 1—пунктирная линия). Каждый из колоколов испытывает одинаковую подъемную силу, равную

$$P_0 = \gamma \cdot h_0 \cdot f, \quad (2)$$

¹ П. И. Воронов и Р. Р. Лёве, „Журнал технической физики“, том VIII, 1938, стр. 812.

² Предварительные исследования, а также осуществление описанной установки проведены научным сотрудником А. А. Часовниковым. Окончательное исследование, изложенное в настоящей статье, проведено автором.

где h_0 — глубина погружения, f — площадь поперечного сечения стенок колокола, γ — удельный вес жидкости.

Силы поверхностного натяжения также влияют на глубину погружения, однако, в данном случае сумма их моментов равна нулю.

Если давления в пространстве под колоколами не будут равны, то равновесие весов нарушится. Для восстановления равновесия необходимо положить некоторую нагрузку на соответствующую чашку весов.

Обозначим:

Δp — разность давлений (в нашем случае избыточное давление по сравнению с атмосферным, см. рисунок), P — нагрузка восстанавливающая равновесие весов, F — площадь сечения колокола.

Эти величины связаны следующей зависимостью:

$$P - \Delta p F = 0, \text{ откуда } \Delta p = \frac{P}{F}. \quad (3)$$

Простота уравнения (3) обуславливается применением одной ванны, так как в этом случае подъемная сила, вследствие общего уровня жидкости на внешней поверхности обоих колоколов не изменяется. Что же касается незначительной разности в весе жидкости, прилипшей к внутренней и внешней стенкам колоколов, то, как показал опыт, его можно пренебречь.

Таким образом применение общей ванны дает большие преимущества как в расчетном смысле, так и главным образом в смысле уменьшения погрешности. Действительно, в случае отдельных ванн и при одном колоколе, формула для определения Δp (см. уравнение 1) имеет дополнительно член, содержащий величины F_1 , F_2 — площади поперечных сечений кольца колокола и ванны. Таким образом здесь для уменьшения погрешности Δp требуется возможно большая ванна. Кроме того для оценки члена $\frac{F_1}{F_2}$ требуются дополнительные линейные измерения для определения величин F_1 и F_2 , что в итоге дает значительно большую погрешность величины Δp .

В действительности нельзя сделать оба колокола совершенно одинаковыми. По этой причине уравнение (3) для реальной установки имеет иной вид.

Если обозначим:

P — вес уравновешивающих веса гирек, Δp — избыточное давление, f_1 — кольцевую площадь левого колокола, f_2 — кольцевую площадь правого колокола, F — площадь внутреннего поперечного сечения колокола, к которому подводится давление, F_1 — суммарная площадь свободной поверхности жидкости в ванне и в колоколе, соединенном с атмосферой, h — изменение уровня жидкости в колоколе под давлением, h_1 — изменение уровня жидкости в ванне, то получим уравнение:

$$P - \Delta p F + (f_1 - f_2) h_1 \gamma = 0$$

откуда

$$\Delta p = \frac{P}{F} + \frac{h_1}{F} (f_1 - f_2) \gamma \quad (4)$$

так как

$$\frac{h_1}{h} = \frac{F}{F_1}, \text{ то } h_1 = \frac{F}{F+F_1}(h + h_1),$$

а

$$h + h_1 = \frac{\Delta p}{\gamma},$$

следовательно

$$\Delta p = \frac{P}{F \left(1 - \frac{f_1 - f_2}{F_1 + F}\right)} \approx \frac{P}{F} \left(1 + \frac{f_1 - f_2}{F_1 + F}\right).$$

Погрешность измеряемой величины Δp определяется в основном чувствительностью весов и погрешностью величины F .

Чувствительность гидростатических весов зависит от вязкости жидкости. Опыт показал, что применение спирта повышает чувствительность весов, примерно, в 10 раз по сравнению с весами, колокола которых погружены в воду.

Чувствительность весов лаборатории, работающих на спирте, равна 1 мг на 0,2 деления шкалы микроскопа, что соответствует давлению около 0,3 μ водяного столба. Погрешность величины F , определяемая погрешностью измерения диаметров колоколов, по данным лаборатории

калибров равна приблизительно 0,05%.

Суммарная погрешность весов лаборатории составляет

$$\delta(\Delta p) \leq 0,07\% + \frac{0,3 \mu}{\Delta p} \cdot 100\% \text{ или}$$

абсолютная погрешность—

$$\Delta(\Delta p) \leq 7 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta p + 3 \cdot 10^{-4} \text{ мм водяного столба.}$$

Значения абсолютной и относительной погрешностей приведены в табл. 1.

Прибор состоит из аналитических весов для нагрузок до 100 г. Чашки весов заменены двумя колоколами, подвешенными на концах коромысла способом, аналогичным подвеске обычных чашек, и погружены в общую ванну, заполненную спиртом-ректификатом до определенного уровня, который можно наблюдать через окошко в стенке ванны. Оба колокола цилиндрической формы сделаны из латуни и покрыты с внешней и внутренней стороны позолотой. Диаметры их в свету, измеренные в лаборатории калибров ВНИИМ, равны:

$$D_{\text{а}} = 66,80 \pm 0,02 \text{ мм.}$$

$$D_{\text{в}} = 66,74 \pm 0,02 \text{ мм.}$$

Ванна имеет следующие примерные размеры: длина $l \approx 275$ мм, ширина $л \approx 140$ мм, глубина $h \approx 50$ мм, ширина в месте изгиба

$n^1 \cong 43$ мм. В дно ванны впаиваны две металлические трубки $d \cong 10$ мм, высота от дна $h^1 \cong 33$ мм. Нижние концы этих трубок, выведенные из ванны, снабжены насадками для присоединения резиновых шлангов.

Расчетная формула прибора, при пользовании правым колоколом для избыточного давления, имеет вид

$$\Delta p = 0,2859 G,$$

где Δp — разность давлений в мм водяного столба, G — вес добавочной нагрузки в граммах.

Испытание прибора

Предварительное испытание имело целью:

1) выяснить постоянство точки равновесия (нуля), 2) определить чувствительность прибора, 3) установить период колебания весов, 4) выяснить влияние небольших толчков и пульсирующих давлений на показания прибора.

Результаты предварительного испытания показали:

1. Положение равновесия в течение нескольких дней сохраняет постоянство, но если продолжительное время держать в спирту колокола, то вследствие испарения спирта появляются осадки в виде капель на стенках и внутренней поверхности колоколов. Эти капли при работе прибора могут явиться причиной некоторого смещения точки равновесия. Поэтому рекомендуется каждый раз после работы прибора снимать колокола и высушивать их, а также выливать спирт из ванны.

2. Чувствительность весов без нагрузки равна $0,3 \mu$ водяного столба. При нагрузке колоколов чувствительность незначительно снижается. В диапазоне от 0 до 10 мм водяного столба чувствительность уменьшается в 1,5 раза, что, при измерении давлений свыше 5 мм водяного столба, дает увеличение абсолютной погрешности примерно на $0,15 \mu$ водяного столба.

3. При погружении колоколов в спирт для восстановления нарушенного равновесия требуется время порядка нескольких секунд для возвращения весов в первоначальное положение.

4. Небольшие толчки, при измерении не сильно пульсирующих давлений с амплитудой $2-5 \mu$ водяного столба, допустимы.

Было проведено испытание нескольких микроанометров аэрогидрометрической лабораторией ВНИИМа путем сличения с гидростатическими весами.

Испытание показало:

1. Одножидкостный микроанометр с уравновешенной каплей другой жидкости,¹ заполненный спиртом-ректификатом и каплей керосина, реагирует на разность давлений, равную $0,0025$ мм водяного столба. Точность его показаний порядка $0,005$ мм водяного столба на диапазоне от 0 до 1 мм водяного столба.

2. У двух микроанометров типа Фусс (Fuess) на уклоне $0,05$, $t = 15^\circ,5 \text{ C}$ и $\gamma_{10/4} = 0,8088 \text{ г/см}^3$ обнаружено непостоянство коэффи-

¹ Система Н. И. Белика.

циентов обоих приборов. Пользование средним коэффициентом исследованного прибора приводит к относительной погрешности порядка $3,4\%$.

3. Сличение образцового микроманометра типа „Аскания“ с гидростатическими весами в статических условиях показало, что средняя погрешность микроманометра „Аскания“ составляет $\pm 0,01$ мм водяного столба в пределах измерений от 0 до 10 мм.

4. Максимальная абсолютная погрешность микроманометра типа АДД при пользовании средним коэффициентом на диапазоне измерений от 0 до 10 мм водяного столба может достигнуть $\pm 0,04$ мм водяного столба. Средняя абсолютная погрешность, равна $\Delta = \pm 0,014$ мм водяного столба, а средняя относительная $\delta = 0,4\%$.

Заключение

Работа по осуществлению эталонной установки для измерения давлений в пределах от 0 до 10 мм водяного столба закончена.

Изготовленный в лаборатории первый прибор может служить эталоном.

Е. Ф. ДОЛИНСКИЙ

МИКРОМАНОМЕТР ТИПА АЛД

Образцовым микроманометром лаборатории в пределах от 0 до 120 мм водяного столба является микроманометр типа „Аскания“. Точность этого прибора в статических условиях измерений определяется погрешностью порядка 0,01—0,03 мм водяного столба. При этой абсолютной ошибке и сравнительно широких пределах изменений, относительная точность прибора высока. Однако, существенным и притом принципиальным недостатком прибора является своеобразная „компенсационность“ прибора. Измерение сводится к поддержанию постоянства уровня жидкости. При незначительных колебаниях разности давлений, значительное гидравлическое сопротивление прибора очень сильно осложняет наблюдения, увеличивает неучитываемую погрешность отсчетов и совершенно не позволяет оценить амплитуду колебаний измеряемой разности давлений.

Кроме того для некоторых измерений, связанных с градуировками, прибор очень неудобен, так как сам он служит (кроме пресса) источником изменения разности давлений (вследствие подъема левого сосуда). Сравнение его показаний с показаниями гидростатических весов представляет трудоемкую работу.

Указанные недостатки заставили нас искать тип прибора по точности, примерно, равный прибору „Аскания“, но лишенный его недостатков.

Наблюдения показали, что точность отсчета высоты мениска жидкости при помощи оптической системы, состоящей из лупы и вогнутого зеркала (система примененная в микроманометре Прайдтля), почти не уступает точности, примененной в приборе „Аскания“.

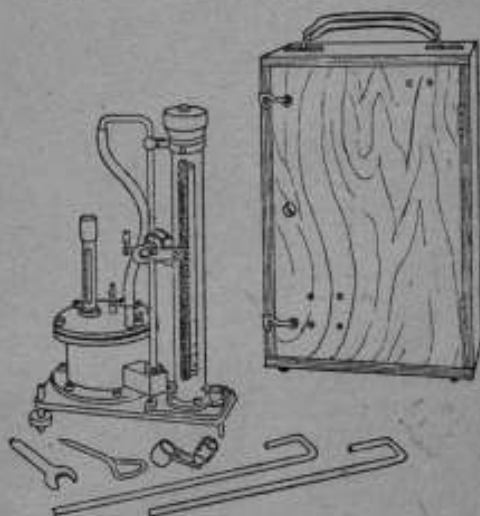


Рис. 1. Общий вид микроманометра типа АЛД

С другой стороны прибор, состоящий из катетометра и винта с гайкой, вполне надежен и дает высокую точность. Поэтому мы остановились на приборе, составными частями которого являются катетометр, винт с гайкой и оптическая система из линзы и зеркальца.

Мы разработали рабочие чертежи прибора, сдали их заводу „Эталон“ и провели наблюдение за изготовлением двух опытных приборов.

Таблица 1

№ наблюдений	Разн. давлен. по приб. № 1 в мм спиртового столба	Разн. давлен. по приб. № 2 в мм спиртового столба	Погрешность в сотых мм спиртового столба
1	0	0	—
2	10,1 ₂	10,1 ₄	1
3	21,4 ₁	21,3 ₃	9
4	21,5 ₂	21,5 ₂	6
5	37,5 ₂	37,5 ₄	1
6	37,7 ₂	37,6 ₇	3
7	56,7 ₂	56,7 ₂	3
8	74,1 ₂	74,1 ₂	4
9	74,2 ₂	74,2 ₄	1
10	90,4 ₂	90,4 ₂	3
11	90,5 ₂	90,5 ₂	2
12	110,0 ₂	110,0 ₁	4
13	134,2 ₂	134,2 ₂	—
14	156,9 ₂	157,0 ₂	5
15	173,9 ₂	173,8 ₂	2
16	195,9 ₂	195,9 ₂	3
17	185,8 ₂	185,7 ₂	1
18	168,8 ₂	168,8 ₂	—
19	156,3 ₂	156,4 ₂	9
20	139,3 ₂	139,3 ₄	2
21	120,3 ₂	120,4 ₂	2
22	99,0 ₂	99,0 ₂	3
23	65,3 ₂	65,4 ₂	8
24	47,9 ₂	47,9 ₂	2
25	34,2 ₂	34,2 ₂	5
26	22,9 ₂	22,9 ₁	3
27	11,9 ₂	11,4 ₂	2
28	0	0	—

Общий вид прибора представлен на рис. 1.

Изготовленные образцы подвергались подробному исследованию.

Испытание точности без приведения каждый раз уровня в среднее положение, проведенное двумя наблюдателями (2 серии по 10 наблюдений в каждой), показали погрешность, не превышающую 0,01 мм спиртового столба (т. е., примерно, 0,008 мм водяного столба).

Испытание точности отсчета со „сбиванием“ и приведением каждый раз уровня в среднее положение, проведенное аналогично вышеописанному, дало, как и следовало ожидать, более высокую погрешность — в среднем равную $\pm 0,02$ мм спиртового столба, а в отдельных случаях достигающую даже 0,04 мм спиртового столба. В итоге, при надлежащей точности уровня, погрешность отсчета рассматриваемого прибора можно считать порядка 0,02—0,03 мм спиртового столба. Эту точность, в связи с целями, для которых предназначен прибор, следует считать вполне удовлетворительной.

Дальнейшие испытания были проведены путем сравнения показаний приборов друг с другом и микроманометром „Аскания“. Для сравнения

приборов друг с другом всего было взято 11 серий, примерно, по 15—20 точек в каждой.

Столь большое число наблюдений обуславливалось постепенным устранением ряда мелких конструктивных недостатков прибора, к которым относились: 1) устранение люфта винта, имевшее место вследствие несовершенства сборки прибора и некоторых конструктивных недостатков его крепления, 2) создание больших возможностей для регулировки положения стеклянной трубки, 3) создание приспособления, фиксирующего положение колонки.

Результаты этих испытаний позволили учесть все мелкие недостатки пробных образцов и устранить их при создании окончательно исправленных чертежей, пригодных для выпуска серийной продукции образцовых приборов этого типа.

Данные одной из серий сравнительного испытания приборов № 1 и № 2 приведены в табл. 1 (данные приведены в окончательной форме после пересчета показаний приборов на разности давлений).

Средняя погрешность приведенной серии составляет 0,03 мм спиртового столба, или, примерно 0,02 мм водяного столба. Принимая во внимание, что при создании прибора предполагалась погрешность одного прибора 0,025 мм водяного столба, результаты испытания следует считать более чем удовлетворительными. За пределы максимальной допускаемой погрешности 0,05 мм водяного столба, (или 0,06 спиртового столба), вышли только 3 точки (№№ 3, 19, 23). Это позволяет отнести их к числу „промахов“ наблюдателя.

Примерно та же точность порядка 0,025—0,035 мм водяного столба сохраняется и при испытании по микроманометру „Аскания“.

После испытания двух первых пробных экземпляров микроманометров типа АД-№№ 1 и 2 — завод „Эталон“ в апреле — мае 1939 г. изготовил партию в 17 приборов, а в конце августа и начале сентября — вторую — из 33 приборов. Все указанные приборы были испытаны в Аэрогидрометрической лаборатории ВНИИМ. Ниже приведены результаты испытаний и выводы, оценивающие качества прибора.

Методика испытаний

Пределы измеряемой микроманометром типа АД разности давлений составляют 0—160—170 мм водяного столба (в зависимости от плотности спирта). Вследствие этого испытание его при помощи образцового микроманометра „Аскания“ не представляется возможным (пределы измеряемой разности последнего 0—120 мм водяного столба). Эталонная установка с гидростатическими весами также непригодна (пределы 0—10 мм водяного столба).

Выход из затруднения был найден в том, что создана была установка, работающая при помощи двух образцовых микроманометров типа „Аскания“ (рис. 2).

Как следует из схемы при $\Delta p \leq 120$ мм водяного столба работает лишь 1-й образцовый прибор. При $\Delta p > 120$ мм водяного столба первый прибор поддерживает 120 мм, а второй осуществляет разности давлений, избыточные по отношению к 120 мм водяного столба. Подобная уста-

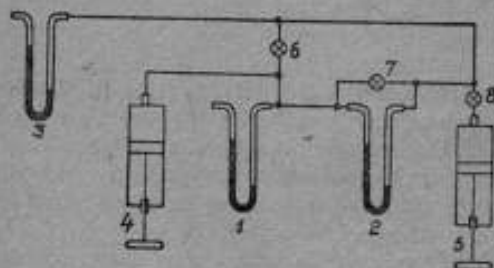


Рис. 2.

новка позволяет создавать разности давлений до 240 мм водяного столба. Погрешность осуществляемой разности давлений при $\Delta p > 120$ мм естественно возрастает в два раза по сравнению с погрешностью прибора „Аскания“, т. е. достигает значений 0,02—0,06 мм водяного столба (погрешность отсчета по микроманометру „Аскания“—0,01—0,03 мм водяного столба). Кроме того измерения при $\Delta p > 120$ мм водяного столба требуют трех наблюдателей. Указанные недостатки (увеличение погрешности и лишний наблюдатель) тем не менее вполне компенсируются возможностью увеличить пределы измерений образцового прибора в два раза.

Каждый прибор испытывался в 21 точке от нуля до 50 мм водяного столба через каждые 5 мм и через каждые 10 мм. водяного столба при давлениях, больших 50 мм. Для наблюдений, погрешность которых была максимальной, т. е. близкой к сумме абсолютных погрешностей всех наблюдений, брались контрольные точки.

При обработке наблюдений определялся коэффициент прибора, как частное от деления показаний образцового прибора на показания испытываемого.

Средний коэффициент каждого прибора определяется лишь по наблюдениям, для которых разность давлений превышала 50 мм водяного столба, по той причине, что до 50 мм небольшие по абсолютной величине погрешности наблюдений, лежащие полностью в пределах ошибок прибора, сильно влияют на коэффициент прибора, искажая его действительное значение.

Определение плотности спирта, которым заполнялись испытываемые приборы, производилось в Ареометрической лаборатории.

Погрешность определения плотности спирта оказывает значительное влияние на результаты испытания приборов. Эти результаты испытания нельзя считать надежными, если во время наблюдений температура значительно меняется. Так, при разности температур в начале и в конце наблюдений в 1—2° С результаты получаются совершенно искаженными. Учет поправок на температуру, для каждого измерения, конечно, возможен, но сильно усложняет обработку наблюдений. По этой причине рекомендуется заранее заполнить прибор, чтобы жидкость в нем приняла температуру помещения, в котором ведутся наблюдения. Влияние тела наблюдателя на изменение температуры прибора и жидкости в нем при обычных лабораторных температурах невелико.

Результаты испытаний

В табл. 2 приведены обработанные результаты испытаний 49 приборов, изготовленных заводом „Эталон“.

δ_k средн.—дает в процентах среднюю относительную погрешность, вычисленную из 21 измерения;

δ_k макс.—дает в процентах наибольшую относительную погрешность из 21 измерения;

δ_p средн.—дает в миллиметрах водяного столба среднюю относительную погрешность из 21 измерения.

Таблица 2

№ прибора	$\delta_{\text{ср.}}^{\text{в}} \%$	$\delta_{\text{макс.}}^{\text{в}} \%$	$\Delta p_{\text{ср.}}^{\text{в}}$ в мм водяного столба	№ прибора	$\delta_{\text{ср.}}^{\text{в}} \%$	$\delta_{\text{макс.}}^{\text{в}} \%$	$\Delta p_{\text{ср.}}^{\text{в}}$ в мм водяного столба
3	0,01	0,06	0,01	28	0,03	0,05	0,04
4	0,04	0,09	0,04	29	0,02	0,06	0,03
5	0,01	0,05	0,02	30	0,03	0,05	0,03
6	0,02	0,07	0,04	31	0,03	0,06	0,03
7	0,02	0,10	0,01	32	0,00	0,02	0,01
8	0,01	0,04	0,01	33	0,03	0,05	0,04
9	0,06	0,10	0,06	34	0,02	0,03	0,03
10	0,04	0,12	0,04	35	0,03	0,06	0,04
11	0,04	0,12	0,05	36	0,03	0,08	0,04
12	0,02	0,07	0,02	37	0,02	0,05	0,03
13	0,02	0,04	0,02	38	0,03	0,05	0,04
14	0,03	0,07	0,04	39	0,02	0,05	0,02
15	0,02	0,05	0,03	40	0,02	0,06	0,03
16	0,03	0,08	0,03	41	0,04	0,06	0,04
17	0,02	0,06	0,02	42	0,00	0,05	0,01
18	0,02	0,06	0,03	43	0,02	0,04	0,04
19	0,03	0,10	0,03	44	Прибор за таким номером завод не изготавл		
20	0,02	0,06	0,02				
21	0,02	0,08	0,02	45	0,02	0,07	0,04
22	0,01	0,05	0,02	46	0,02	0,04	0,04
23	0,02	0,05	0,03	47	0,03	0,06	0,03
24	0,06	0,10	0,06	48	0,01	0,02	0,01
25	0,03	0,06	0,04	49	0,01	0,03	0,02
26	0,04	0,06	0,04	50	0,03	0,04	0,03
27	0,02	0,05	0,03	51	0,04	0,04	0,04
				52	0,03	0,05	0,03

Как видно из табл. 2, средняя относительная погрешность прибора не превышает 0,06% и, как правило, значительно меньше. Средняя абсолютная погрешность прибора не превышает 0,04 мм водяного столба.

Таким образом, точность показаний прибора, примерно, соответствует точности микроманометра „Аскания“. Приведенные результаты сравнения показаний прибора АДД с приборами „Аскания“ не могут считаться исчерпывающими, так как в них не сохранено основное метрологическое условие, по которому погрешность образцового прибора должна быть по крайней мере в 3 раза меньше погрешности испытуемого.

Поэтому для оценки абсолютной погрешности прибора АДД его испытали при помощи эталонных гидростатических весов¹. Результаты представлены в табл. 3.

Данные табл. 3 указывают, что максимальная абсолютная погрешность прибора АДД не превышает 0,04 мм водяного столба, а средняя абсолютная погрешность — 0,014 мм водяного столба.

¹ См. ст. Н. И. Бейлика, стр. 17.

Таблица 3

№ по пор.	Показания гидростатическ. весов в мм водного столба	Показания микроманометра АДД № 1, в мм спирт. столба	Абсолютная погрешность микроманометра АДД № 1, в мм водяного столба	Относительная погрешность микроманометра АДД № 1 в %
1	1,000	1,20	0,012	1,1
2	2,000	2,44	0,012	0,6
3	3,000	3,66	0,018	0,6
4	4,000	4,83	0,020	0,5
5	5,000	6,06	0,005	0,1
6	6,000	7,27	0,006	0,1
7	7,000	8,51	0,018	0,25
8	8,000	9,76	0,045	0,6
9	9,000	10,92	0,000	0,0
10	10,000	12,14	0,001	0,1

Для измерения колеблющихся разностей давлений микроманометр АДД снабжается двумя демпферами, выполненными в виде эбоцитовых втулочек, устанавливаемых в нижнем конце трубки. Внутренний диаметр первого демпфера — 1 мм, второго — 0,5 мм.

Опыт показал, что при установке второго демпфера амплитуда колебаний, равная, примерно, 5—8 мм, уменьшается до 0,1—0,2 мм.

Результаты проведенных испытаний, равноценных и по количеству материала несколько превышающих типовые испытания, позволяют рекомендовать микроманометр типа АДД в качестве образцового прибора как для учреждений системы Комитета по делам мер и измерительных приборов, так и для заводских лабораторий. Кроме того прибор удобен для непосредственных измерений, требующих высокой относительной точности и в частности для измерения в пульсирующих потоках.

Е. А. ВОЛКОВА и Л. А. РУБЕЦ

РТУТНЫЕ БАРОМЕТРЫ

До настоящего времени атмосферное давление измерялось главным образом с метеорологической целью. Однако чисто практические нужды и вопросы метрологии настоятельно выдвигают требования, связанные с необходимостью измерять давление с точностью, далеко превосходящей обычные метеорологические нужды.

Эти новые требования поставили перед Аэрогидрометрической лабораторией ВНИИМ задачу создать эталонный барометр, погрешность которого была бы порядка $\pm 0,001$ мм.

Величина погрешности 0,001 мм диктуется следующими соображениями.

1. Для осуществления международной термодинамической шкалы надо знать атмосферное давление с точностью до $\pm 0,01$ мм. В самом деле, зависимость между измеряемой температурой и атмосферным давлением выражается следующими формулами

$$t_p = t_{760} + 0,0369 (p - 760) - 0,000022 (p - 760)^2 \text{ (пары воды),}$$

$$t_p = t_{760} + 0,0909 (p - 760) - 0,000048 (p - 760)^2 \text{ (пары серы).}$$

Пренебрегая погрешностью, вытекающей из первой формулы, вследствие ее сравнительной малости, получаем из второй формулы погрешность

$$\Delta t = 0,091 \cdot \Delta p.$$

Необходимость знать температуру с погрешностью до $\pm 0,001$ создает потребность знать атмосферное давление с наибольшей погрешностью $\pm 0,01$ мм.

$$\Delta p = \frac{0,001}{0,09} \approx \frac{0,001}{0,1} = 0,01 \text{ мм ртутного столба.}$$

2. Для точных интерференционных измерений в воздухе (порядка одного метра) необходимо определять барометрическое давление с точностью до $\pm 0,005$ мм ртутного столба, чтобы погрешность в отсчете по барометру не увеличивала погрешности в определении длины.

Из приборов прикладной метрологии, тесно сопрягающихся с точной барометрией, в первую очередь следует указать альтиметры, высотомеры, дифференциальные барометры, депримомеры, обслуживающие авиацию, геодезию, горно-рудное дело.

Аэрогидрометрическая лаборатория разработала технические условия на конструирование эталонного барометра и произвела анализ свойств различных типов барометров, обуславливающих требуемую для того или иного типа точность.

Настоящая работа показывает: 1) что обычно указываемая точность существующих приборов является несколько преувеличенной, вследствие недостаточного учета ряда факторов, влияющих на точность измеряемого давления и 2) что построение барометра, погрешность которого не превышала бы 0,001 мм ртутного столба в настоящее время невозможно, вследствие того, что некоторые физико-химические константы, входящие в расчетную формулу барометра, известны до сего времени недостаточно точно.

I. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Барометр изобретен Э. Торичелли в 1643 г. во Флоренции. Поставленный Торичелли опыт показал, что воздух оказывает давление на поверхность ртути в чашке, и что это давление уравнивается столбом ртути высотой около 760 мм.

Опыты Паскаля и Перье в 1648 г. дали возможность установить зависимость атмосферного давления от высоты места наблюдений.

Принцип ртутного барометра, установленный Торичелли, не изменился до настоящего времени. Современные барометры отличаются от своего прототипа главным образом отдельными деталями, позволяющими измерять высоту ртутного столба с гораздо большей точностью, чем это было во времена Торичелли.

Как известно, ртутные барометры бывают трех различных типов: чашечные, сифонные и сифонно-чашечные.

Чашечный барометр представляет собой прибор, весьма мало отличающийся от барометра Торичелли. Этот тип барометра особо широко распространен в качестве рабочего прибора, не претендующего на высокую точность показаний.

Сифонный барометр имеет преимущество перед чашечным, так как в нем наблюдается положение двух менисков в открытом и закрытом коленах прибора, и разность этих показаний дает наблюдаемую величину высоты ртутного столба, соответствующую измеряемому атмосферному давлению. В этом типе барометров возможно введение поправок на давление газовой смеси над ртутным столбом.

Сифонно-чашечный барометр, как показывает само название, представляет комбинацию обоих предыдущих типов. Он применяется в качестве особо точного прибора, так как его устройство позволяет вводить без особых затруднений ряд поправок, благодаря которым можно повысить точность его показаний.

II. ОБЩИЕ УСЛОВИЯ, КОТОРЫМ ДОЛЖНЫ УДОВЛЕТВОРЯТЬ РТУТНЫЕ БАРОМЕТРЫ

Ртутные барометры любой системы должны удовлетворять следующим основным условиям: 1) ртуть в них должна быть химически чистой, 2) в торичеллиевом пространстве не должно быть следов воздуха или

водяных паров, 3) влияние капиллярной депрессии должно быть возможно меньше, 4) шкала барометра должна занимать вертикальное положение, 5) материал шкалы должен обладать малым коэффициентом расширения, 6) конструкция отсчетного приспособления должна обеспечивать точность отсчета, соответствующую общей точности, требуемой от прибора данного типа.

Ртуть, ее очистка и наполнение барометров

В барометрах почти без исключения применяется ртуть по следующим причинам:

1) высокая плотность ртути делает прибор портативным, так как длина трубок не превышает 900 мм, 2) упругость ртутных паров очень незначительна, 3) ртуть сравнительно легко очищается, 4) ртуть не смачивает стенок трубки, поэтому мениск хорошо виден.

Для получения правильных показаний барометра необходимо перед наполнением барометрической трубки производить определение плотности ртути.

Произведенные различными исследователями определения плотности чистой ртути привели к результатам, расходящимся между собой в пятом десятичном знаке. Наиболее достоверные значения находим у следующих исследователей:

Марек	13,59544 г/см ³
Тизен и Шеель	13,59545 .
Гун и Батэка	13,59547 .
Шеель и Бланкенштейн	13,59549 .

Среднее из этих четырех величин, равное 13,59546 г/см³, является наиболее вероятным значением плотности ртути при 0°. Хеннинг и Егер (Henning und Jaeger)¹ считают результаты этих исследований недостаточно надежными и рекомендуют принять величину средней плотности ртути, округляя ее до единицы 4-го знака, т. е.

$$\rho = 13,5955 \text{ г/см}^3 \text{ при } t = 0^\circ$$

а) Способы очистки ртути. В настоящее время можно рекомендовать как наиболее совершенный способ очистки ртути — электрохимический.

Ртуть, подлежащая очистке, помещается в прибор, в котором находятся платиновые электроды, а электролитом служит 10-процентный раствор азотной кислоты. При электролизе из ртути выделяются металлические примеси — кроме золота, серебра и элементов платиновой группы, которые после промывки и высушивания ртути удаляются посредством перегонки в вакууме. Перегонку производят в дистилляторе Лейбольда, дающем разрежение 10^{-5} мм ртутного столба. Пропускная способность его 12—15 кг ртути за 6 час. Прибор Лейбольда имеет преимущество по сравнению с лабораторным прибором типа Вейнгольда, дающим всего 1—2 кг очищенной ртути за тот же промежуток времени.

¹ Henning und Jaeger, Allgemeine physikalische Konstanten, Handbuch der Physik, B. II, 1926

В тех случаях, когда необходима особо тщательная очистка ртути от примеси металлов, ртуть перед окончательной перегонкой в вакууме, предварительно перегоняют в приборе Гулетта. При этом способе через ртуть пропускают пузырьки воздуха, благодаря чему происходит окисление паров легко окисляющихся металлов, например, цинка, кадмия, свинца, которые трудно удалить как при перегонке при атмосферном давлении, так и в вакууме.

б) Наполнение барометров. Барометрический вакуум. Основной задачей при наполнении барометров ртутью является удаление воздуха и водяных паров из барометрической трубки.

Одним из важнейших условий получения надежных показаний барометра является высокое качество вакуума.

Осуществления этого условия можно достигнуть различными способами. Так, было предложено кипячение барометрических трубок под пониженным давлением, с целью удалить прилипшие к стеклянным стенкам пузырьки воздуха и следы влаги.

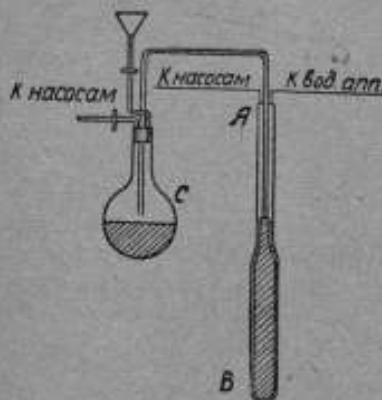


Рис. 1.

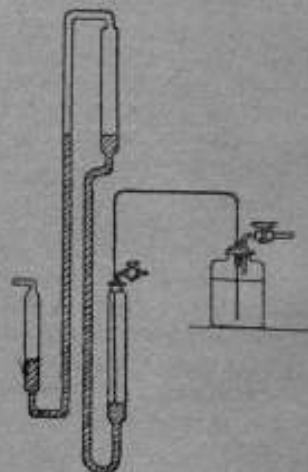


Рис. 2.

По способу Д. И. Менделеева, оставшийся воздух можно удалить с помощью капиллярной трубки, находящейся в верхней части прибора. Поднимая уровень ртути в барометре, достигают того, чтобы ртуть переливалась через капиллярную трубку, увлекая с собой пузырьки воздуха.

Этой же цели служит вспомогательная камера, устроенная Гульельмо. Наклонением барометра остатки воздуха через капиллярную трубку перегоняются в вспомогательную камеру.

В барометре Ламбрехта в середине стеклянной трубки имеется расширение со впаянным конусообразным сужением. Пузырьки воздуха, случайно попавшие в трубку, не поднимаются в Торичеллиевое пространство, а задерживаются в указанном расширении.

Наиболее надежным и совершенным способом получения и сохранения вакуума является соединение камеры с насосом. О состоянии ваку-

ума в таком приборе можно судить по показаниям вакуумметра (например, Мак Леода), присоединенного к прибору.

Наполнение барометров. Долгое время применялся так называемый „горячий способ“ наполнения барометрической трубки ртутью. Жидкость в трубке доводилась до кипения для освобождения от пузырьков воздуха.

В настоящее время этот способ почти совсем оставлен, так как он не дает уверенности в совершенстве вакуума, и в то же время встречает серьезные технические затруднения.

Другой способ наполнения, так называемый „холодный“, основан на наполнении барометров ртутью при комнатной температуре. Схема прибора для наполнения барометра одним из „холодных“ способов изображена на рис. 1.

Барометрические трубки укреплены в вертикальном положении запаянным концом вниз. Из прибора выкачивается воздух. В колбу вливается необходимое для наполнения барометра количество ртути, которая из колбы, под давлением, переливается в барометрическую трубку через тонкую стеклянную трубку.

Таким образом наполнение ртутью происходит в безвоздушном пространстве.

Другой „холодный“ способ изображен на рис. 2. Удаление воздуха происходит при переливании ртути через дополнительную капиллярную трубку АВ. Преимущество второго способа заключается в том, что для наполнения прибора ртутью не требуется его разборка.

Оба эти способа наполнения барометров ртутью предложены Д. И. Менделеевым.

Современным, наиболее рациональным методом наполнения ртутью барометрической трубки следует признать описанную ниже разновидность „холодного способа“.

К барометрической трубке припаявается стеклянная наделка с запаянным отростком (рис. 3). Трубка предварительно прокаливается в электрической печи при температуре 300—400°. Верхняя часть наделки соединяется герметически с трехступенчатым стеклянным насосом, дающим разрежение порядка 10^{-6} мм ртутного столба.

Степень разрежения определяется чувствительным вакууметром, например, типа Мак Леода. Отросток наделки опускается в сосуд с налитой в него химически чистой ртутью. Ударом о стенку сосуда запаянный конец отростка отламывают. Под действием атмосферного давления вся система (отросток, наделка и барометрическая трубка) наполняется ртутью. После наполнения трубка отпаяется от наделки и насос отсоединяется.

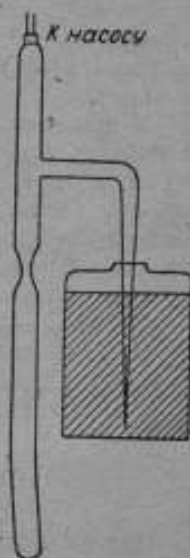


Рис. 3.

III. СПОСОБЫ ОТСЧЕТА

Наиболее простым способом является отсчет невооруженным глазом при помощи нониуса. Точность, которую можно достичь при этом способе, не превышает $\pm 0,1$ мм.

При необходимости производить более точные отсчеты, высота ртутного столба измеряется при помощи оптической трубы со шкалой (катетометр). Точность подобных установок около $0,01$ мм.

Наконец, в барометрах, от которых требуется максимальная возможная точность, в настоящее время применяют микроскоп, соединенный с коллиматором; при этом достигается точность отсчета в $0,001$ мм.

При изменении высоты ртутного столба изменяется и уровень ртути в резервуаре (в случае чашечного барометра). Чтобы отсчет можно было всегда производить от уровня ртути в чашке, в чашечных барометрах устраивают либо подвижную шкалу, либо подвижное дно, что дает возможность всегда приводить нуль шкалы к уровню ртути в чашке.

У некоторых типов барометра уровень ртути в резервуаре не наблюдается. Изменения уровня ртути в чашке в таких барометрах учитываются при нанесении делений на шкалу. Каждое деление шкалы делается несколько короче истинных миллиметров, пропорционально отношению площадей сечения трубки и чашки. В случае шкалы, разделенной на миллиметры, введение поправки на изменение уровня в чашке должно производиться следующим образом.

Пусть Q — сечение резервуара, q — сечение трубки.

При изменении давления на $\pm \Delta b$ мм, высота ртутного столба в трубке меняется на $\pm \Delta b'$ мм, а в резервуаре $\pm \frac{q}{Q} \Delta b'$ мм;

$$\Delta b = \pm \Delta b' \pm \frac{q}{Q} \Delta b' = \pm \Delta b' \left(1 + \frac{q}{Q} \right).$$

При вычислении необходимо полученный отсчет давления умножить на $\left(1 + \frac{q}{Q} \right)$. Для компенсированной шкалы величина делений, соответствующих изменению давления на 1 мм, соответственно равна

$$h = \frac{1}{1 + \frac{q}{Q}}.$$

В некоторых барометрах шкала наносится на самой оправе барометра, в других случаях она помещается отдельно от тела барометра.

Вспомогательным приспособлением для отсчета высоты ртутного столба служит нониус. В наиболее простом виде нониус шкалы барометра представляет собой металлическое кольцо, охватывающее трубку. Соответствующий срез этого кольца наводят на вершину ртутного мениска.

В некоторых барометрах нониус имеет две установки: грубую от руки и точную — путем вращения винта (с горизонтальной осью), свя-

занного с нониусом через эксцентрик. Подобное устройство имеет си-фонно-чашечный барометр Клейншмидта.

В случае трубок с относительно большим диаметром (12—15 мм) применение нониуса становится затруднительным, так как мениск представляет собой почти плоскую поверхность и точность наведения кольца невелика. Чтобы иметь возможность производить наблюдения в этих случаях, пользуются зеркальным изображением, даваемым поверхностью ртути. Плоскость зеркала делит расстояние между объектом и его изображением пополам. Этот принцип разработан Перне¹. Последний помещал в закрытом колене барометра на различных уровнях несколько острий и подводил при наблюдении верхнюю поверхность ртути к одному из острий. Одновременно в открытом колене барометра, подвижное острие приводилось в соприкосновение с нижней поверхностью ртути.

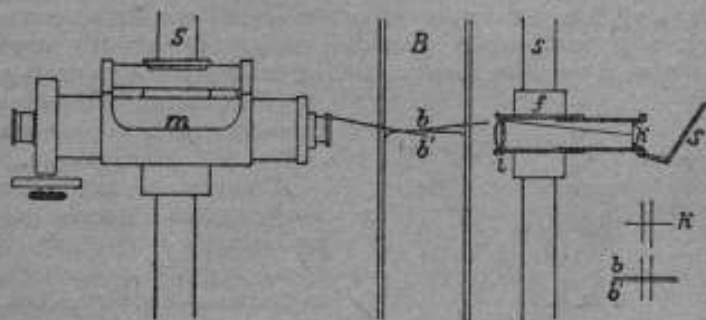


Рис. 4.

Наблюдаемые в микроскоп острие и его зеркальное изображение получались одинаково отчетливыми.

Этот способ имеет следующие недостатки. Отсчет ртутного мениска ограничен определенными положениями острий, и при обычном устройстве барометрической трубки (трубка неподвижна) невозможно получить отсчет в любом положении.

Марек² старался уменьшить этот недостаток, отказавшись от острий. Он с помощью линзы получал на оси барометра действительное изображение горизонтальной нити (рис. 4). Этому действительному изображению соответствует зеркальное. Линза и нити находятся в подвижной трубке коллиматора, которую можно установить в любом положении. Но при этом способе изображение получается недостаточно отчетливым.

Разница в освещении при способах Перне и Марека объясняется тем, что острие, являясь само по себе как бы светящимся телом, посылает лучи во все стороны, тогда как пучок лучей, дающий изображение нити — ограничен.

¹ Pernet, Z. f. Instrumentenkunde, B. 6, 1886, s. 377.

² Marek, Travaux et mémoires du B. I. des poids et mesures. V. III, 1884.

Способ освещения ртутных менисков. На точность барометрических измерений в значительной степени оказывает влияние способ освещения ртутных менисков, в зависимости от которого наблюдаемое положение ртутной поверхности может меняться. Один из подобных способов освещения был предложен Коллинс и Блайсделл,¹ сконструировавшими следующее оптическое приспособление (рис. 5).

Лучи от точечного источника света *З* проходят через сферическую линзу *4* и идут горизонтально через поверхность ртути в зрительную трубу *В*. У кожуха *б* срезана нижняя часть. Верхняя часть образует с мениском щель, ширину которой можно произвольно менять, передвигая оптический элемент по направляющим стержням *б*. Результаты измерений значительно ухудшаются, если параллельные лучи света образуют угол с осью микроскопа, или в случае бокового смещения оптического элемента. Это может произойти в случае кривизны барометрической трубки или направляющих стержней. Кроме того здесь имеет значение оптическое свойство стеклянной трубки пропускать совершенно параллельные лучи только через центральную часть трубки.

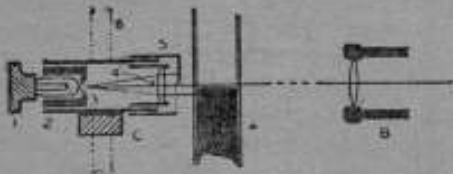


Рис. 5.

При замене сферической линзы цилиндрической — результаты получаются благоприятные.

Так как при наблюдениях невооруженным глазом близость наблюдателя к прибору изменяет температуру ртути и шкалы, а следовательно вносит дополнительную ошибку в показания, то все

усовершенствованные барометры снабжены оптическими приспособлениями для отсчета.

Эти приспособления могут иметь различные устройства, которые однако в основном сводятся к двум типам: рейка со шкалой помещается либо на самом катетометре (катетометрический способ), либо отдельно от него вблизи ртутного столба (способ компарации).

Катетометрический способ наблюдения имеет следующие недостатки: 1) при выдвигании окуляра всегда происходит некоторое смещение его оптической оси, 2) шкала катетометра все время меняет свою температуру, причем в разных частях шкалы температура неодинакова.

Даже при тщательном выполнении микрометрического винта, устанавливающего трубу, невозможно каждый раз совершенно одинаково установить трубу в горизонтальное положение так, чтобы показания уровня при разных наблюдениях были одинаковыми.

Чтобы избавиться от этих недостатков катетометрического способа, применяют способ компарации, заключающийся в том, что отсчет производится не по шкале катетометра, а по отдельной шкале, поставленной рядом с измеряемым ртутным столбом, вдали от наблюдателя. Если расстояние шкалы и объекта от вертикальной оси катетометра

¹ Collins and Blaisdell, The Illumination of Mercury menisc. The Review of Scientific Instruments, Vol. 7, No 15, 1936.

не изменяется, то негоризонтальность оптической оси трубы не влияет на результат, так как при способе компарации труба, находящаяся примерно в горизонтальном положении, наводится сначала на наблюдаемый предмет, а затем круговым движением переводится на шкалу.

При круговом движении микроскопа положение уровня не изменяется.

IV. КЛАССИФИКАЦИЯ БАРОМЕТРОВ И ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТИПОВ

Настоящая работа позволяет сделать примерное подразделение ртутных барометров на отдельные метрологические группы.

1. Эталонный барометр. К этой группе в настоящее время можно отнести те измерители атмосферного давления, погрешность которых не превышает 0,006 мм ртутного столба (численные значения погрешностей взяты из помещенных ниже сводных таблиц).

Из существующих в настоящее время барометров указанному условию удовлетворяют: а) барометр Британской национальной физической лаборатории (NPL) и б) американский барометр типа Битти, Бенедикт и Блайсделл.

2. Образцовый барометр 1-го разряда. Эту группу должны составлять те приборы, погрешность которых не превышает 0,03 мм ртутного столба. К образцовым барометрам 1-го разряда можно отнести: а) нормальный барометр Вильда № 2 и б) барометр Менделеева, а также некоторые типы менее распространенных барометров, как то: в) барометр Казелла, г) нормальный барометр К. Притц, д) нормальный барометр А. Ф. Зунделла.

3. Образцовый барометр 2-го разряда. Ко второму разряду должны быть отнесены барометры, погрешность которых лежит в пределах от 0,1 до 0,04 мм.

Наиболее употребительными приборами, удовлетворяющими этому условию, являются: а) барометр Вильда-Фусса и б) барометр Вильда-Турретини.

4. Рабочие барометры. Рабочим барометром следует считать прибор, погрешность которого превышает 0,1 мм. Типов барометров, которые следует отнести к этой группе, довольно много. Настоящая работа не дает возможности установить наибольшую допускаемую погрешность для рабочих барометров, так как они в свою очередь подразделяются на различные классы в зависимости от конструкции, обусловливаемой назначением прибора.

1. Эталонные барометры

а) **Эталонный барометр NPL (Англия).** Прибор представляет собой тип сифонно-чашечного барометра (рис. 6), причем U-образная трубка изготовлена просверливанием канала в куске нержавеющей стали. Расширения трубки, представляющие собой верхнее и нижнее колена барометра, имеют квадратное сечение со стороной равной 45 мм. Закрытое колено барометра соединено с насосом, создающим в приборе разрежение, близ-

кое к давлению насыщенных паров ртути. В местах образования ртутных менисков устроены плоско-параллельные стеклянные окошки.

Измерения высоты ртутного столба производятся при помощи микрометрических микроскопов, укрепленных на вертикальной колонке. Последняя имеет движение в горизонтальном направлении для возможности визирования либо поверхности ртути, либо делений шкалы. Шкала из инвара помещена отдельно от тела барометра.

Установка на мениск производится по способу Марека. Оптическая система, кроме микроскопов, имеет еще 2 коллиматора. Поверхность ртути располагается между прямым изображением горизонтальной нити и ее зеркальным изображением на поверхности ртути.

Барометр имеет специальное приспособление, дающее возможность опускать уровень ртути в трубке ниже стекла, когда не производится наблюдения. Это делается с целью не загрязнять ртутью стеклянных окошек прибора. Канал этого приспособления можно разобщить от барометрической трубки при помощи переключающего крана.

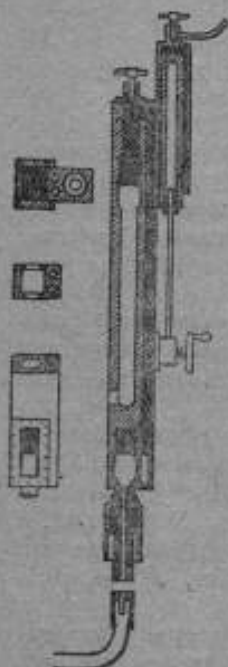


Рис. 6.

Для измерения температуры столбика ртути служит специальный ртутный термометр. Резервуар его длиной в 760 мм погружен в ртуть, заполняющую отверстие, просверленное в теле прибора параллельно барометрической трубке.

б) Барометр системы Битти, Бенедикт и Блайсделл (США). Барометр состоит из двух стеклянных трубок (представляющих собой каждый отдельный барометр). Верхняя и нижняя части каждого барометра имеют диаметр 32 мм и соединены между собой стеклянной трубкой диаметром 8 мм. Трубки помещаются в латунном футляре со стеклянными окнами с передней и задней стороны.

Воздух из барометра выкачивается насосом, и кроме того верхние трубки соединены с уловителем из древесного угля, уничтожающим могущие держаться пузырьки воздуха.

Вакуум определяется манометром Мак Леода и бывает всегда меньше 0,001 мм. Температура барометра определяется тремя ртутными



Рис. 7.

термометрами. Температура в помещении устанавливается при помощи термостата с точностью до $\pm 1^\circ \text{C}$ и измеряется несколькими платиновыми термометрами, показания которых можно наблюдать на специальной доске. Освещение ртутных менисков производится по системе Коллинса и Блайсделла, дающей возможность брать отсчеты высоты ртутного столба со средним отклонением в 0,002 мм.

Измерения производятся при помощи компаратора со зрительными трубами. Шкала из инвара помещается отдельно от барометра. Один оборот микрометрического барабана соответствует $(1 \pm 0,001)$ мм.

2. Образцовые барометры 1-го разряда

а) **Нормальный барометр Вильда № 2.** Барометр (рис. 8) состоит из U-образной стеклянной трубки. Два колена этой трубки оканчиваются стеклянными сосудами с приделанными к ним плоско-параллельными стеклянными пластинками, через которые ведутся наблюдения. Для определения положения поверхности обоих ртутных менисков служат острия. Верхнее острие укреплено неподвижно, нижнее можно передвигать микрометрическим винтом. Для повышения и понижения уровня ртути в сосудах служит специальный поплавок.

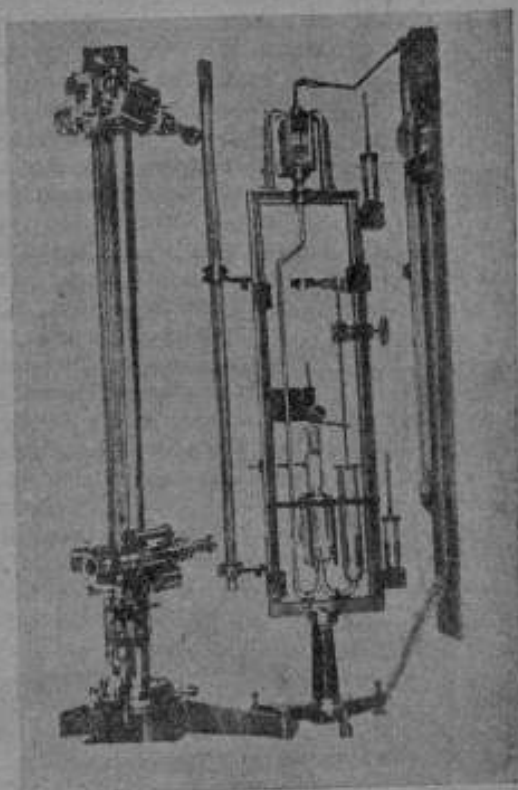


Рис. 8.

Температуру ртути измеряют двумя термометрами, опущенными в стеклянные цилиндры с ртутью, помещенные рядом с трубкой барометра. Измерения производятся при помощи катетометра с двумя микрометрическими микроскопами, снабженными уровнями; 1 деление барабана микрометра равно 0,0025 мм.

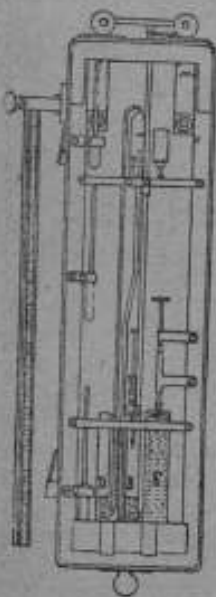
Благодаря тому, что наблюдения ведутся через плоско-параллельные стекла, погрешность от неправильной рефракции световых лучей отсутствует.

Однородность отсчета обоих ртутных менисков исключает личные ошибки наблюдения.

Погрешность установки микроскопов в этом приборе очень мала. Неправильная установка на $\frac{1}{2}$ деления уровня соответствует погрешности на шкале 0,003 мм.

При помощи воздушного насоса в барометре поддерживается постоянный вакуум. Упругость газов над ртутью можно измерить с точностью до 0,001 мм.

б) Барометр № 2 ВНИИМ.¹ Описываемый барометр представлен на рис. 9. *A* и *B* представляют собой закрытое и открытое колена барометра. Соединяющая их трубка *C* изогнута так, что верхнее колено диаметром в 30 мм расположено вертикально над второй трубкой такой же ширины.



В конструкции этого барометра для освобождения от остатков воздуха применен способ переделивания ртути через помещенную в верхней части прибора капиллярную трубку. С помощью пресса повышают уровень ртути в закрытом колене, заставляя ртуть переливаться по капиллярной трубке, вытесняя этим оставшийся воздух. Сосуд *D* сообщается капиллярной трубкой с открытым коленом барометра. Это устройство применяется в барометрах Вебера.² Благодаря ему нарушенное равновесие уровней восстанавливается в течение 1—2 минут, и нуль прибора остается без изменения.

Шкала прикреплена сбоку к раме барометра.



Три термометра, укрепленные на той же раме, служат для определения температуры барометра и шкалы.

Отсчет по барометру производится катетометром с двумя трубками.

Поверхность ртути устанавливается при помощи острий. В закрытом колене два острия из черного стекла укреплены неподвижно.

Рис. 9.

В открытом колене острие, соединенное со стержнем, можно передвигать.

Наводка на фокус производится методом Корню.³ Перед объективом зрительной трубы помещается экран с двумя прорезанными в нем горизонтальными щелями. Лучи от визируемого предмета, пройдя через объектив, пересекаются, давая резкое изображение предмета. Чтобы это изображение оказалось в плоскости, в которой лежат нити микрометра, необходимо добиться его неподвижности. Смещение при этом вверх или вниз изображения показывает, что плоскость нитей микрометра встречает лучи до или после пересечения их.

¹ См. Временник Г. П. М и В.* ч. 2. И. Лебедев.

² Weber, Zeitschrift f. Instrumentenkunde, 1893, S. 63.

³ Согни, Travaux et mémoires du B. I. des poids et mesures, T. X, p. 12.

3. Образцовые барометры 2-го разряда

а) Барометр Вильда — Туреттини. Этот барометр принадлежит к типу сифонно-чашечных (рис. 10). Он состоит из двух стеклянных трубок, вставленных в железный резервуар. Дно резервуара состоит из кожного мешка, который можно поднимать при помощи винта. У этого барометра нет отдельной шкалы; деления нанесены на самой металлической оправе, окружающей длинное колено трубки.

Для измерения высоты ртутного столба делается два отсчета: кольцевой конус наводят на нижний и верхний уровни ртути.

В этом барометре можно определять поправку, вызываемую присутствием воздуха в Торичеллиевом пространстве.

Термометр, резервуар которого имеет тот же диаметр, что и трубка барометра, и находится в тех же условиях, показывает температуру ртути с большей точностью, чем в тех конструкциях, где термометр помещен отдельно от тела барометра.

б) Барометр Вильда — Фусса. Сифонно-чашечный барометр Вильда-Фусса имеет устройство такое же как у барометра Вильда — Туреттини. Резервуар этого барометра (рис. 11) имеет подвижное кожаное дно. Две стеклянные трубки входят своими концами в металлическую чашку со ртутью. Обе трубки сначала идут параллельно между собой, потом длинная трубка изгибается так, что верхнее ее колено приходится над второй широкой и короткой трубкой, сообщающейся с атмосферой. Всю систему окружает латунная оправка с двумя прорезями наведения нониуса на мениски при отсчете. На оправе у края прорези нанесены деления.

По барометру Вильда-Фусса можно производить отсчет с точностью до 0,05 мм. Сравнительно широкая трубка (14—15 мм) и отсчет менисков в верхнем и нижнем коленах уменьшают капиллярную депрессию.

Указанные два последних типа барометров служат обычно как контрольные на метеорологических обсерваториях. Барометр Вильда-Фусса

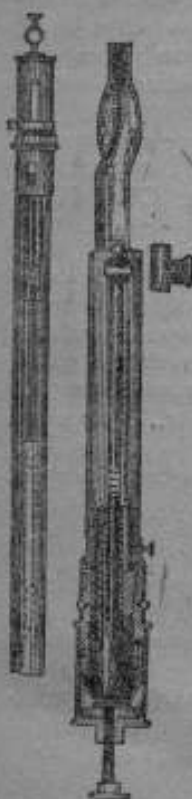


Рис. 11.

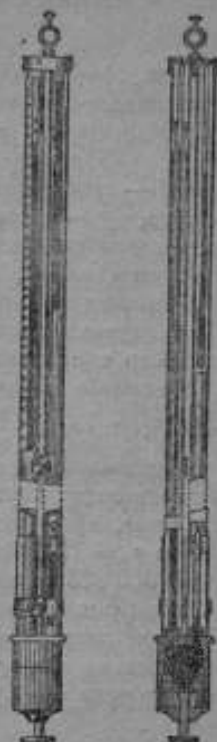


Рис. 10.

удобен для транспортировки, так как выдерживает длительные поездки, почти не меняя инструментальной поправки. В этих барометрах можно непрерывно следить за качеством вакуума в Торричеллиевом пространстве.

V. РАСЧЕТНАЯ ФОРМУЛА БАРОМЕТРА, ПОПРАВКИ И ПОГРЕШНОСТИ ПРИБОРОВ

Атмосферное давление, определяемое при помощи ртутного барометра вычисляется по формуле:

$$B = \rho g (h_1 - h_2) + p_0, \quad (1)$$

где B — атмосферное давление, ρ — плотность ртути наполняющей барометр, g — ускорение силы тяжести в месте нахождения барометра, p_0 — давление воздуха, водяных паров и насыщенных паров ртути над ртутным столбом, h_1, h_2 — высоты уровней ртути в закрытом и открытом коленях барометра (для сифонного барометра).

В случае чашечного барометра разность $h_1 - h_2$ означает высоту ртутного столба над уровнем ртути в чашке.

Величина B выражается в единицах одной из систем: CGS, MTS, MkGS, т. е. в $\frac{\text{дн}}{\text{см}^2}$, пьезах или $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$.

Барометрическая практика определяет обычно атмосферное давление в миллиметрах ртутного столба. Миллиметром ртутного столба называется давление, производимое столбом ртути высотой в 1 мм, при плотности ртути $\rho_0 = 13,5951 \text{ г/см}^3$, в месте, где ускорение силы тяжести равно $g_0 = 980,665 \text{ см/сек}^2$. Это определение вытекает из постановления VII Международной конференции по мерам и весам 1927 г., принятого Главной палатой мер и весов 21 марта 1929 г.¹

Если выразить атмосферное давление в миллиметрах ртутного столба, то формула (1) примет вид

$$H = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{g}{g_0} (h_1 - h_2) + h_0, \quad (2)$$

где h_0 — остаточное давление газов и паров над ртутью.

Обратимся к последовательному рассмотрению величин, входящих в формулы (1) и (2).

1. Плотность ртути ρ зависит от температуры и может быть представлена в виде функции последней

$$\rho_t = \rho_0 \cdot [1 + f(t)].$$

Величина ρ_0 для ртути, при 0°С очищенной электро-химическим методом с применением дестиллятора Лейбольда, должна быть принята равной $\rho_0 = 13,5955 \text{ г/см}^3$ (стр. 31), при этом, как следует из рассмотренных данных, относящихся к определению ρ_0 , остаточная погрешность в значе-

¹ VII Международная конференция установила $\rho_0 = 13,595 \text{ г/см}^3$, а VIII Международная конференция 1933 г. добавила четвертый знак. Принятая величина $\rho_0 = 13,5951 \text{ г/см}^3$, по нашему мнению, подлежит пересмотру, как несогласующаяся с современными исследованиями (см. стр. 31).

нии ρ_0 имеет порядок $\Delta\rho_0 = \pm 0,00006 \text{ г/см}^3$, или относительная погрешность в значении ρ_0 выразится

$$\Delta\rho_0 = \pm 0,0004\%.$$

Величина $f(t)$ — поправка на температуру ртути, принимая данные Шеель и Бланкенштейн выразится

$$f(t) = - \left[18,182 + 0,078 \frac{t}{100} \right] \frac{t}{100} \cdot 10^{-3}$$

Остаточная относительная погрешность величины $f(t)$ составляет

$$\delta f(t) = \frac{1818,2 + 0,156 t}{\left(18,182 + 0,078 \frac{t}{100} \right) t} \Delta t^2 / \rho_0$$

поэтому относительная погрешность сомножителя $[1 + f(t)]$ будет при t , близком к 20°C :

$$\delta[1 + f(t)] = \frac{\Delta \cdot f(t)}{1 + f(t)} = \frac{(1818,2 + 0,156 t) 10^{-7} \Delta t}{\left[1 - \left(18,182 + 0,078 \frac{t}{100} \right) 10^{-3} \frac{t}{100} \right]} 100\%.$$

2. Ускорение силы тяжести g является функцией широты и высоты места, поэтому

$$g_{y,z} = g_0 [1 + F(y, z)],$$

где g_0 — ускорение силы тяжести на широте 45° при отсутствии аномалий.

Современные методы измерения величины g дают возможность определять ее относительное значение в лучшем случае с погрешностью $\pm 2 \cdot 10^{-3} \text{ см/сек}^2$, но как правило можно считать, что она будет нам известна с ошибкой $3 - 4 \cdot 10^{-3} \text{ см/сек}^2$.

Различные исследователи (Гельмерт, Кассини и др.) дают различные методы для вычисления величины g_0 ; значения, вычисленные по этим методам, отличаются друг от друга до $7 - 8 \cdot 10^{-3} \text{ см/сек}^2$.

Наконец, следует отметить, что абсолютные измерения силы тяжести, произведенные в Потсдаме в 1898 — 1904 гг., по отношению к которым вычисляются значения, получаемые в различных местах — расходятся с произведенными в последнее время абсолютными же измерениями в Вашингтоне, равно как и с производимыми теперь измерениями в Теддингтоне. Вашингтонские измерения показывают, что результаты измерений, полученные в Потсдаме, значительно больше тех, которые должны были быть, если бы принять за основу Вашингтонские измерения. Измерения в Теддингтоне в настоящее время еще не закончены, но согласно предварительной обработке также получается, что Потсдамские измерения дают величину g больше.

Принимая, как это делается обычно, в настоящее время, за основу Потсдамскую систему g , учитывая все указанные выше обстоятельства,

можно с известной степенью уверенности считать, что погрешность в определении относительной величины g не превышает $\pm 4 \cdot 10^{-3}$ см/сек², а следовательно относительная погрешность множителя $g_0 [1 + t(y, z)]$ будет порядка 0,0004%.

3. Разность высот уровней ($h_1 - h_0$) должна быть исправлена введенной поправки на температуру шкалы. Поэтому:

$$h_1 - h_2 = h_t = h_0 [1 + \psi(t)],$$

где h_0 — расстояние между заданными штрихами при $t = 20^\circ\text{C}$. Поправки на температуру шкалы, а также на неправильное нанесение делений могут быть получены путем сравнения шкалы прибора с образцовыми мерами длины при различных температурах. Остаточная погрешность величины h_t от обеих указанных выше причин в случае соответствующей обработки шкалы (полировка под зеркало, ширина штрихов порядка 4 μ) может быть доведена до значения, не превышающего 0,2 μ .

4. Отклонение шкалы от вертикали также требует введения поправки; однако целесообразнее осуществить установку прибора так, чтобы не было необходимости в этой поправке. Такая установка шкалы, при которой отклонение ее оси от вертикали, не превысит 2', может быть осуществлена сравнительно без особых затруднений. При этом наклоне погрешность в отсчете, происходящая от указанного наклона, не превышает 0,1 μ , т. е. относительная погрешность в отсчете при высоте ртутного столба в 760 мм не превысит 0,000013%.

5. Для чашечных барометров (и вообще для приборов, у которых сечения верхнего и нижнего колен не равны, по существу конструкции) необходимо учесть поправку на капиллярную депрессию. Для определения этой поправки следует воспользоваться исследованиями Фользома.¹

Это исследование позволяет подсчитать величину капиллярной депрессии ртутного столба в зависимости от диаметра трубки.

Связь между величиной капиллярной депрессии и диаметром трубки может быть выражена уравнением

$$h = \frac{k}{e^{nd}},$$

где $k = 7,6962$, $n = 0,268$, d — внутренний диаметр трубки — в миллиметрах.

Эта формула позволяет найти поправку высоты ртутного столба в зависимости от погрешности диаметра трубки. Подсчитаем погрешность от непостоянства диаметра.

В сифонном барометре, принимая диаметр трубки 60 мм и считая допуск на диаметр $\pm 0,005$ мм, имеем погрешность в отсчете от непостоянства диаметра порядка $\pm 15 \cdot 10^{-5} \mu$, т. е. величину, незаметно влияющую на показания барометра.

¹ Folsom, Manometer Errors due to Capillarity. The Magazine of Measurement and Control Instruments, 1936, v. 9, № 2, 36.

В чашечном барометре имеем поправку на капиллярную депрессию, выражаемую приведенной выше формулой. Колебания этой величины выражаются формулой:

$$\Delta h = - \frac{k\pi}{e^{nd}} \Delta d.$$

Для обычного стационарного барометра с внутренним диаметром трубки около 8 мм с допуском на постоянство диаметра $\pm 0,2$ мм получаем

$$\Delta h = - \frac{7,6962 \times 0,268}{e^{0,268 \times 8}} 0,2, \text{ т. е.}$$

$$\Delta h \approx 0,048 \text{ мм.}$$

6. Поправка на давление газов, остающихся над ртутью для барометров с откачкой воздуха обычно определяется при помощи манометра Мак Леода. Остаточная погрешность в этом случае соответствует точности самого манометра, т. е. будет равна примерно $5 \cdot 10^{-6}$ мм ртутного столба.

В случае барометров с запаянным верхним коленом поправка на давление остающихся газов может быть определена методом Д. И. Менделеева или Араго.

а) Метод Д. И. Менделеева. Первоначально наблюдения велись с двумя барометрами. По одному барометру велись наблюдения за высотой столба ртути при различных объемах пространства над ртутью. Другой барометр служил для наблюдения за изменением атмосферного давления во время испытания.

В дальнейшем метод претерпел изменение в том отношении, что применялся один барометр, причем его открытое колено соединялось с сосудом, содержащим определенный объем воздуха при неизменной температуре. Благодаря такому устройству давление на ртуть в открытом колене было все время постоянно. Это давление определялось при различных объемах пространства над ртутью.

При испытании желательно иметь возможно больший первоначальный объем испытываемого пространства, так как изменение давления остаточных паров и газов над ртутью при сжатии значительно заметнее, чем при разрежении, а следовательно искомое давление этих паров и газов может быть определено с большей точностью. Наблюдения должны производиться для каждого объема пространства над ртутью при увеличении этого объема и при уменьшении, так как в обоих этих случаях иногда получаются различные друг от друга результаты.

Произведенные Д. И. Менделеевым опыты показали, что при малых количествах газов (как это имеет место в барометрах) закон Бойля-Мариотта справедлив, и наблюдения могут быть обработаны по этому закону в случае, если точность испытываемого прибора не превышает 0,05 мм ртутного столба.

б) Метод Араго. Пусть при некотором количестве ртути в барометре объем пространства над ртутью φ_1 , а высота барометрического

столба h_1 (рис. 12). Давление газов над ртутью в этом случае равно X_1 мм ртутного столба. Увеличивая количество ртути в барометре мы создаем новый объем барометрической камеры v_2 . Если бы в камере была абсолютная пустота, то высота барометрического столба не изменилась бы. Но ввиду наличия в пространстве над ртутью газов и паров и вследствие уменьшения объема этого пространства, происходит сжатие находящихся там газов. Таким образом при новом количестве ртути, в барометрической камере давление делается равным X_2 мм ртутного столба, а высота барометрического столба становится равной h_2 , несколько отличной от прежней.

Гидростатическое уравнение для первого случая может быть написано в виде

$$P = h_1 + X_1,$$

где P — атмосферное давление.

Для второго случая уравнение принимает вид

$$P = h_2 + X_2.$$

Кроме того, согласно закона Бойля-Мариотта, объемы барометрической камеры и давление газов в ней связаны зависимостью

$$v_1 X_1 = v_2 X_2.$$

Решая совместно три приведенных уравнения, находим

$$X_2 = X_1 + (h_1 - h_2),$$

$$X_1 = \frac{v_2}{v_1 - v_2} (h_1 - h_2),$$

или, обозначая $\frac{v_1}{v_2} = n$,

$$X_1 = \frac{h_1 - h_2}{n - 1},$$

откуда

$$P = h_1 + \frac{h_1 - h_2}{n - 1}.$$

Давление газовой смеси над ртутью этим способом может быть определено с точностью, не превышающей 0,01 мм ртутного столба.

Приведенные соображения показывают, что конструкция барометров, от которых желают получать показания с погрешностью не более 0,05 мм ртутного столба, должна предусматривать откачку газов и паров из барометрической камеры.

7. Погрешности отсчета при определении h_1 и h_2 , происходящие от несовершенства оптической части барометра, также должны быть

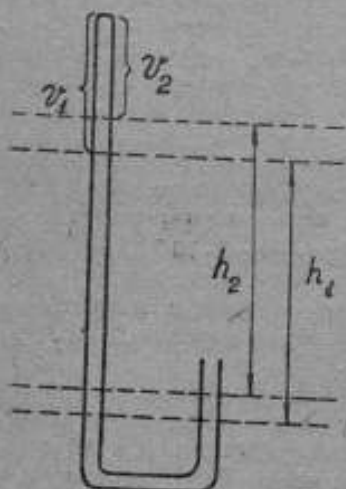


Рис. 12.

отнесены к погрешности величины $(h_1 - h_2)$. Погрешность отсчета является индивидуальной для каждого типа барометра.

Суммируя все вышеуказанное, приходим к заключению, что точность барометра может быть установлена на основе одной из двух точек зрения:

1) барометрическое давление измеряется в абсолютных единицах

$$\left(\frac{\text{дн}}{\text{см}^2}, \text{ пьезлх}, \frac{\text{нГ}}{\text{м}^2} \right),$$

2) давление атмосферы измеряется в условных единицах — в так называемых международных „миллиметрах ртутного столба“.

В соответствии с указанными точками зрения расчетная формула барометра выразится в одном из указанных ниже видов.

1. В случае измерения давления в абсолютных единицах расчетная формула будет иметь вид:

$$B = \frac{p_0}{1 + f(t)} g_{\text{места}} (h_2 - h_1) [1 + \psi(t)] + p_0.$$

Остаточная погрешность в измеренном давлении будет

$$\Delta B = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_5 + \Delta_6 + \Delta_7 + \Delta_8 + \Delta_9,$$

где Δ_1 — погрешность в определении плотности ртути при 20°C , Δ_2 — погрешность плотности ртути, происходящая от ошибки в определении t° при измерении давления, Δ_3 — погрешность в значении ускорения силы тяжести, Δ_4 — погрешность от неправильного нанесения штрихов на шкале, Δ_5 — погрешность в отсчете по шкале, происходящая от ошибки в определении температуры шкалы при измерении давления, Δ_6 — погрешность в оценке остаточного давления над ртутным столбом, Δ_7 — погрешность от невертикальной установки прибора, Δ_8 — погрешность в оценке капиллярной депрессии, Δ_9 — погрешность в отсчете, происходящая от несовершенства оптической части прибора.

Значение суммарной погрешности барометров различных классов будет разобрано далее.

2. В случае измерения давления в миллиметрах ртутного столба, принимая, что относительное значение ускорения силы тяжести в месте установки барометра известно с точностью $\pm 4 \cdot 10^{-3} \text{ см/сек}^2$, имеем выражения для атмосферного давления

$$H = \frac{p_0}{p_0 [1 + f(t)]} \cdot \frac{g_{\text{места}}}{g_0} (h_2 - h_1) [1 + \psi(t)] + h_0,$$

или

$$H = \frac{1}{1 + f(t)} [1 + F(y, z)] (h_2 - h_1) [1 + \psi(t)] + h_0.$$

В этом случае принимая те же обозначения для погрешностей, что и раньше, имеем выражение для остаточной погрешности в измеренном давлении

$$\Delta H = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_5 + \Delta_6 + \Delta_7 + \Delta_8 + \Delta_9.$$

Переходим к рассмотрению погрешностей для различных классов барометров, оценивая их со всех изложенных точек зрения.

Погрешности барометров различных классов

а) **Эталонные барометры.** 1. Для определения плотности ртути в приборах такого типа необходима постановка специальной работы. Абсолютная погрешность ρ_0 будет выражаться величиной $5 \cdot 10^{-6}$ г/см³; относительная погрешность $\Delta\rho_0 = 0,00004\%$.

2. Погрешность ρ_1 , принимая точность термометра $0,01^\circ$, выразится в $0,00018\%$.

3. В виду разногласий в результатах измерений величины g в Потсдаме и Вашингтоне (а также, повидимому, и в Теллингтоне) следует признать желательным производство абсолютных измерений в месте установки эталонного барометра. Эти измерения для данного места земной поверхности, как показывают вышеуказанные работы, могут быть произведены с точностью до $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ см/сек². Относительная погрешность величины g в этом случае будет равна:

$$\Delta_g = 0,00031\%.$$

4. Погрешность в величине $(h_2 - h_1)$, происходящая от неправильного нанесения делений на шкалу барометра, при соблюдении условий указанных на стр. 44, выражается величиной $\pm 0,5 \mu$, т. е. относительная погрешность в значении величины $(h_2 - h_1)$ выразится так:

$$\delta(h_2 - h_1) = 0,00007\%.$$

5. Погрешность в отсчете по шкале, происходящая от ошибки в определении температуры в случае применения шкалы из инвара, термический коэффициент которого равен $2 \cdot 10^{-6}$, при возможной погрешности в наблюдении температуры $\pm 0,01^\circ$, выразится

$$\delta[1 + \psi(t)] = 2 \cdot 10^{-8}\%.$$

Для этого случая величина Δ_5 в таблице не приводится ввиду ее крайней малости.

Если взять сорт инвара, термический коэффициент которого равен $1,2 \cdot 10^{-6}$, а термометр с погрешностью, не превышающей $\pm 0,1^\circ$,

то
$$\delta[1 + \psi(t)] = 12 \cdot 10^{-6}\%.$$

6. Погрешность в определении остаточного давления воздуха и паров воды и ртути над ртутным столбом в эталонных барометрах, конструируемых с приспособлением для откачки газов, определяется погрешностью манометра Мак Леода, т. е. величиной, равной $5 \cdot 10^{-6}$ мм ртутного столба.

7. Как уже было указано, погрешность в показаниях барометра, происходящая от невертикальности установки прибора, выражается при допуске в наклоне $2'$ величиной $0,13 \mu$, или относительная погрешность будет для такого прибора равна $0,000017\%$.

8. В оценке капиллярной депрессии для эталонных барометров, при допуске в линейных размерах камеры для отсчета в 0,005 мм, получаем относительную погрешность, равную $2 \cdot 10^{-8} \%$, т. е. для таких барометров величину Δ_8 можно принять равной нулю.

9. Погрешность в отсчете, происходящая от оптической части барометра, зависит от клиновидности стекол (главным образом от переднего) и от их неперпендикулярной установки. Если изображения нитей лежат в одной плоскости со шкалой, то наклон трубы микроскопа погрешности не внесет.

При клиновидности стекол в $2''$ и при расстоянии изображения нитей от стекла 50 мм, погрешность в отсчете будет равна 0,2 μ .

Такого же порядка погрешность будет в случае наклона стекол на угол, не превышающий $12''$. Так как производится два отсчета — у нижнего и у верхнего окон, то суммарная погрешность будет равна 0,8 μ или 0,0001%.

Таблица 1

Погрешности эталонного барометра, выраженные в различных системах

Система Погрешность	CGS дл в см ²	MTS в пьезах	MkGS в $\frac{\text{нГ}}{\text{м}^2}$	Высота ртутного столба в мм	Относитель- ная погреш- ность, в %
Δ_1	0,4	$4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$	—	$4 \cdot 10^{-5}$
Δ_2	2,0	$20 \cdot 10^{-5}$	$20 \cdot 10^{-3}$	$136 \cdot 10^{-5}$	$18 \cdot 10^{-5}$
Δ_3	3,1	$31 \cdot 10^{-5}$	$32 \cdot 10^{-3}$	$235 \cdot 10^{-5}$	$31 \cdot 10^{-5}$
Δ_4	0,7	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$53 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Δ_5	0,12	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Δ_6	0,007	$7 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-7}$
Δ_7	0,17	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$13 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Δ_8	0,0002	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0,00	$2 \cdot 10^{-8}$
Δ_9	1,0	$10 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$80 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5}$
Суммарная погрешность прибора	7,5	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	$53 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$

б) Образцовые барометры 1-го разряда. 1. Погрешность в определении плотности ртути, при обычных тщательных определениях, выражается величиной $5 \cdot 10^{-5}$ г/см³; относительная погрешность $\Delta \rho_0 = 0,0004 \%$.

2. Погрешность в определении плотности ртути в зависимости от температуры, при которой происходят наблюдения $\Delta \rho_t$, при точности показаний термометров $\pm 0,05^\circ$ выразится в 0,0009%.

3. Погрешность в значении ускорения силы тяжести в местах установки образцовых барометров 1-го разряда не должна превышать $5 \cdot 10^{-11}$ см/сек², т. е. относительная погрешность $\Delta g_{\text{мест}} = 0,00051 \%$.

4. Погрешность от неправильности нанесения штрихов на шкале барометра может быть допущена равной 2μ , т. е. $\delta (h_2 - h_1)$ может быть равной $\pm 0,00026\%$.

5. Погрешность от неправильной оценки температуры шкалы (серебряной или латунной), при $\alpha = 19,8 \cdot 10^{-6}$, считая погрешность в измерении температуры $\pm 0,1^\circ$, выразится величиной $\delta (1 + \alpha t) = 0,00029\%$.

6. Давление смеси газов в образцовых барометрах 1-го разряда (с откачкой воздуха) может определяться манометром, точность которого равна примерно $0,001$ мм. Тогда δp_0 будет равна $0,00013\%$.

7. Невертикальность установки для образцовых барометров 1-го разряда может быть допущена $\pm 10'$; в этом случае относительная погрешность в измеренной высоте ртутного столба будет равна $\pm 0,00043\%$.

8. Относительная погрешность в оценке капиллярной депрессии при применении шлифованной трубки $d = 30$ мм, с допуском на непостоянство внутреннего диаметра $\pm 0,1$ мм, будет равна $\pm 0,000013\%$.

9. Погрешности в отсчете от несовершенства оптической системы для этих приборов могут достигать значения $\pm 0,01$ мм; тогда относительная погрешность будет равна $\pm 0,0013\%$.

Таблица 2
Погрешности образцового барометра 1-го разряда, выраженные в различных системах

Система Погрешность	CGS дм в $\frac{\text{дм}}{\text{см}^2}$	MTS в пьезах	МкГС кГ в $\frac{\text{кГ}}{\text{м}^2}$	Высота ртутного столба в мм	Относительная погрешность, в %
Δ_1	4,0	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-2}$	—	$4 \cdot 10^{-4}$
Δ_2	9,0	$9 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$68 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$
Δ_3	5,2	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$39 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$
Δ_4	2,6	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$20 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$
Δ_5	2,0	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$15 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Δ_6	1,3	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$10 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Δ_7	4,3	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$32 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$
Δ_8	0,13	$0,13 \cdot 10^{-4}$	$0,13 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$0,13 \cdot 10^{-4}$
Δ_9	13,0	$13 \cdot 10^{-4}$	$13 \cdot 10^{-2}$	$100 \cdot 10^{-4}$	$13 \cdot 10^{-4}$
Суммарная погрешность прибора	41,5	$41,5 \cdot 10^{-4}$	$41,8 \cdot 10^{-2}$	$28,5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$

в) Образцовые барометры 2-го разряда. 1. Часть перечисленных выше погрешностей барометров будет равнозначущая для барометров 1-го и 2-го разрядов. Ниже будут приведены только те из них, которые численно отличны от соответствующих погрешностей барометров 1-го разряда (нумерация погрешностей сохраняется прежняя).

2. Погрешность в измерении температуры ртути для барометров 2-го разряда можно допустить в пределах $\pm 0,1$, тогда δp_0 будет равна $0,0018\%$.

4. Погрешность от неправомерности нанесения штрихов на шкале барометра может быть допущена равной $\pm 0,01$ мм, тогда $\delta(h_2 - h_1)$ может быть равной $0,0013\%$.

6. В образцовых барометрах 2-го разряда можно не делать откочки газовой смеси. Как выше было указано, погрешность в определении давления этой смеси выражается (при способе Араго) $\Delta p_0 = \pm 0,01$ мм, т. е. δp_0 будет равна $\pm 0,0013\%$.

7. Невертикальность установки шкалы для образцовых барометров 2-го разряда может быть допущена в пределах $\pm 30'$, в этом случае относительная погрешность в измеренной высоте ртутного столба будет равна $\pm 0,0038\%$.

9. Погрешность в отсчете вследствие несовершенства оптической системы не должна превышать $\pm 0,03$ мм; тогда относительная погрешность будет порядка $\pm 0,004\%$.

Таблица 3
Погрешности образцового барометра 2-го разряда, выраженные в различных системах

Система Погрешность	CGS в $\frac{\text{дм}}{\text{см}^2}$	MTS в пьезах	МкGS в $\frac{\text{Г}}{\text{м}^2}$	Высота ртутного столба в мм	Относительная погрешность, в %
Δ_1	4,0	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-2}$	—	$4 \cdot 10^{-4}$
Δ_2	18,0	$18 \cdot 10^{-4}$	$18 \cdot 10^{-2}$	$14 \cdot 10^{-3}$	$18 \cdot 10^{-4}$
Δ_3	5,2	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$
Δ_4	13,0	$13 \cdot 10^{-4}$	$13 \cdot 10^{-2}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$13 \cdot 10^{-4}$
Δ_5	2,0	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Δ_6	13,2	$13,2 \cdot 10^{-4}$	$13,2 \cdot 10^{-2}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$13 \cdot 10^{-4}$
Δ_7	38,5	$38,5 \cdot 10^{-4}$	$38,5 \cdot 10^{-2}$	$29 \cdot 10^{-3}$	$38 \cdot 10^{-4}$
Δ_8	0,0	$0,13 \cdot 10^{-4}$	$0,13 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$
Δ_9	40,0	$40 \cdot 10^{-4}$	$40 \cdot 10^{-2}$	$30 \cdot 10^{-3}$	$40 \cdot 10^{-4}$
Суммарная погрешность прибора	134	$134 \cdot 10^{-4}$	$13,5 \cdot 10^{-2}$	0,1	$13 \cdot 10^{-3}$

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все приведенные выше исследования позволяют поставить определенные технические условия, которым должны удовлетворять эталонные и образцовые барометры.

а) **Эталонный барометр**, погрешность которого не превышает $7 \cdot 10^{-4}\%$, должен удовлетворять следующим основным условиям.

1. Ртуть должна быть очищена с наибольшей тщательностью и ее плотность должна быть определена с погрешностью, не превышающей $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ г/см³.

2. Температура ртути в барометре должна определяться с погрешностью, не большей $0,01^\circ$.

3. В месте установки эталонного барометра должны быть произведены абсолютные измерения ускорения силы тяжести с погрешностью, не большей $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ см/сек².

4. Шкала барометра должна быть изготовлена из инвара или другого материала, имеющего аналогичные с ним коэффициенты упругости и термического расширения (коэффициент расширения порядка $1,2 \cdot 10^{-6}$).

5. Шкала прибора должна быть полирована под зеркало, ширина штрихов не должна превышать 4 μ .

Примечание. Указанная обработка шкалы должна быть произведена на 100 мм у нижнего и у верхнего окон. Середина шкалы по ее длине может быть полирована обычным образом и деления в промежутке от нижнего до верхнего окна можно не наносить; однако расстояние от нижнего деления верхней части шкалы до верхнего деления ее нижней части должно быть определено с той же точностью, что и деления на шкалах.

6. Конструкция барометра должна быть снабжена устройством для непрерывной откачки газов, находящихся над ртутным столбом, и манометром типа Мак Леода.

7. Остаточное давление над ртутью должно определяться с точностью, не меньшей $5 \cdot 10^{-6}$ мм ртутного столба.

8. Переднее и заднее окна в верхней и нижней камерах барометра должны отстоять друг от друга на расстоянии порядка 60 мм, при допуске на линейные размеры камеры $\pm 0,005$ мм.

9. Стекла окон барометрических камер должны быть ограничены параллельными плоскостями. Допускаемая клинообразность передних стекол 2", задних — 5".

10. Стекла окон барометрических камер должны быть установлены вертикально. Допускаемое отклонение от вертикали 12".

11. Шкала барометра должна быть установлена параллельно передним стеклам с погрешностью, не большей 2'.

12. Отсчет по шкале должен производиться одновременно с визированием высоты ртутного столба.

б) Образцовые барометры 1-го разряда, погрешность которых не превышает $\pm 0,004\%$, должны удовлетворять следующим основным условиям.

1. Плотность ртути должна быть известна с точностью, не меньшей $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ г/см³.

2. Температуру ртути при наблюдениях следует знать с погрешностью, не превышающей $\pm 0,05^\circ\text{C}$.

3. Наибольшая допустимая погрешность в значении ускорения силы тяжести в месте установки барометра 1-го разряда $5 \cdot 10^{-3}$ см/сек².

4. Шкала должна быть изготовлена из серебра или из латуни.

5. Точность нанесения штрихов на шкалу 2 μ .

6. Температура шкалы должна быть известна с точностью до $\pm 0,1^\circ$.

7. Конструкция барометра должна допускать откачку газов из барометрической камеры, а остаточное давление должно измеряться с погрешностью, не превышающей $\pm 0,001$ мм.

8. Невертикальность установки шкалы барометров 1-го разряда может быть допущена в размере $10'$.

9. Барометрическая трубка вблизи ртутных менисков должна иметь расширения диаметром до 30 мм. Длина этих расширений должна быть порядка 150 мм. Внутренняя поверхность расширенных частей трубки должна быть шлифована. Допуск на диаметр $\pm 0,1$ мм.

10. Оптическая система должна обеспечивать точность отсчета $\pm 0,01$ мм.

в) Образцовые барометры 2-го разряда, погрешность которых не превышает $\pm 0,013\%$, должны удовлетворять следующим условиям:

1. То же, что образцовый барометр 1-го разряда.

2. Температура ртути должна быть известна с точностью не меньшей $\pm 0,1$.

3. То же, что образцовый барометр 1-го разряда.

4. То же, что образцовый барометр 1-го разряда.

5. Точность нанесения штрихов на шкале $\pm 0,01$ мм.

6. То же, что образцовый барометр 1-го разряда.

7. Давление газов над ртутью должно быть известно с точностью $\pm 0,01$ мм.

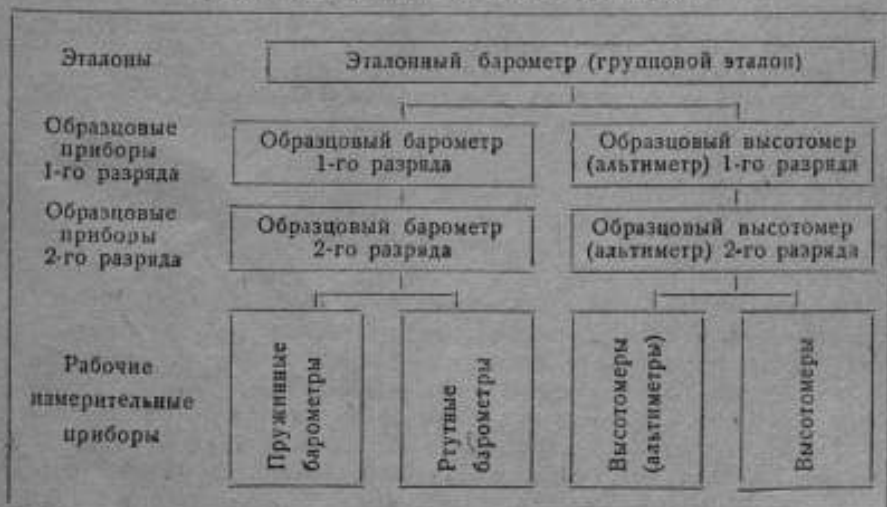
8. Отклонения шкалы барометра от вертикали не должно превышать $\pm 30'$.

9. То же, что образцовый барометр 1-го разряда.

10. Оптическая система должна обеспечивать точность отсчета $\pm 0,03$ мм.

Рассуждения настоящей статьи приводят к помещенной на стр. 53 поверочной схеме. К осуществлению этой схемы ВНИИМ в настоящее время приступает.

Проект поверочной схемы по барометрии.



ЛИТЕРАТУРА

1. Sears L. E. and Clark J. S. — Proceedings of the Royal Society of London March 1933. pp. 130—146.
2. Beattie, Benedict and Blaisdell — Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, Vol. 71 № 6, 7, 8, Jan. 1937.
3. W. J. Marek. — Repertorium für Experimental Physik für Physikalische Technik 1880. Bd. 16. S. 585.
4. K. Prytz. — Quecksilber — Normalbarometer ohne Fernrohr Ablesung. Zeitschrift für Instrumentenkunde. 1896.
5. L. Weber. — Eine neue Form des Quecksilbersbarometer. Zeitschrift für Instrumentenkunde 1893. S. 63.
6. I. Pernet. — Zeitschrift für Instrumentenkunde 1886. S. 379.
7. Д. И. Менделеев. Об упругости газов, ч. I 1875.
8. „Временник Главной Палаты мер и весов“, ч. II, 1895 стр. 105. Барометр № 2. Главной Палаты мер и весов.
9. A. F. Sundell. Barometervergleichen. 1887.
10. P. Schreiber. „Über die Aragosche Verfahren“. Repertorium der Physik Bd. 22. S. 162.
11. M. Thiesen. Über die Ablesung von Normalbarometern. Zeitschrift für Instrumentenkunde 1886. S. 89.
12. H. Wild. Über die Bestimmung des Luftdrucks. Repertorium für Meteorologie V. III. № 1. 1874.
13. Сифонно-чашечный барометр Kleinschmidt'a „Meteorologische Zeitschrift“. 1929.
14. S. C. Collins and B. E. Blaisdell. The Review of Scientific Instruments Vol. 7. № 5. 1936.
15. А. Клоосовский. Метеорология, ч. I, 1908.
16. Г. И. Вильд. Нормальные барометры Главной геофизической обсерватории. Приложения к 22 т. „Записок Академии Наук“, 1893.
17. E. Kleinschmidt. „Luftdruckmessung“, Handbuch der Meteorologischen Instrumente, 1935.
18. Richard G. Folsom. Manometer Errors due to Capillarity. „The Magazine of Measurement and Control Instruments“, Vol. 9, № 2. 1936.
19. Н. В. Колобок. Метеорологические приборы, 1932.
20. Руководство метеорологическим станциям И. Разряда. № 1, изд. Г. Г. О, 1928.

Л. А. РУБЕЦ

ИЗМЕРЕНИЕ БОЛЬШИХ РАСХОДОВ ВОДЫ МЕТОДОМ ПРИВИВКИ

Широко развивающееся гидро-электрическое хозяйство Советского Союза ставит перед научно-исследовательскими учреждениями и, в частности, перед ВНИИМом задачу освоения методов по измерению больших расходов воды в открытых руслах и в трубопроводах.

В настоящее время наиболее рациональными методами таких измерений следует признать американский метод Гибсона, применимый для определения расхода в трубах, и метод смешивания какого-либо раствора с основным измеряемым потоком, иначе называемый, методом прививки. Метод прививки применим для измерения расходов воды в открытых руслах и в трубопроводах в тех случаях, когда скорость потока или какие-нибудь добавочные обстоятельства могут обеспечить надежное перемешивание вод прививаемого и основного потоков.

В настоящей статье разбирается только метод прививки, причем основное место в ней занимает критический обзор метрологической литературы по данному вопросу, с целью обеспечить правильную постановку эксперимента при стандартизации метода.

1. История вопроса

Первое сообщение, которое было сделано о методе прививки мы встречаем в 1863 г. Автор Шлезинг (Schloesing) [1] указывает на принцип определения расхода воды, газа и пара методом смешивания и приводит пример определения расхода гидравлического насоса с расходом около 2500 л/сек. К сожалению в своей статье Шлезинг совершенно не касается химической стороны вопроса, а также не указывает, сравнивались ли результаты, полученные по методу прививки с результатами, полученными каким-либо другим методом. Вследствие указанных причин нельзя составить представления о точности достигнутых им результатов.

Следующая известная нам работа в этой области была произведена Штроемeyerом (Stromeyer) в 1896—1905 гг. Мы не имели возможности получить этой статьи, так как, повидному, в ленинградских библиотеках ее нет, но в 1914 г. Штроемeyer, оспаривая свой приоритет в области этого метода, поместил небольшую заметку в V. D. J. [2], где изложил сущность высказанных им взглядов.

С новыми работами, произведенными в 1900—1904 гг., выступил ван-Итерсон (van-Iterson) [3].

Любопытно отметить, что как Штроемeyer, так и ван-Итерсон производили свои исследования независимо друг от друга и не были знакомы с работой Шлезинга, а так как некоторые авторы считали — основоположником метода ван-Итерсона, то это и побудило Штроемейера выступить в V. D. J. 1914 г. с упомянутой заметкой.

Но еще более достойно удивления, что работы всех трех указанных исследователей были так основательно забыты, что в настоящее время часто основоположником метода прививки считают Буше (Boucher) и Мелле (Mellet), издавших результаты своих работ в 1910 г. [4] и [5].

В 1912 г. заведующим СПб гидрометрическим районом, инженером путей сообщения Н. М. Бернадским и лаборантом Верхневолжской гидрометрической станции А. О. Юрковым была произведена работа по исследованию метода прививки на Верхней Волге. В 1914 г. указанными лицами была издана обстоятельная работа [6] с подробным указанием способов, которыми они пользовались, и весьма солидными теоретическими исследованиями химических оснований титрования речных вод.

Следует отметить, что в 1913 г. русскими инженерами, повидимому, впервые в мире был произведен опыт электрохимического титрования, причем был использован мост Кольрауша.

С тех пор метод разбавления воды исследуемого потока раствором хлористого натрия применялся многократно, и в настоящее время завоевал себе в ряде стран (Германия, Швейцария) прочное признание.

Из английской литературы известна пока лишь статья об электрометрическом титровании галогенных растворов [7].

Что касается Германии и Швейцарии, то нами был рассмотрен ряд статей, в которых исследуется сущность метода, аппаратура, применяемая при методе прививки, и приводятся сравнительные данные о результатах метода прививки по сравнению с другими методами измерения расходов жидкостей.

Наиболее интересными работами, в смысле сравнительных результатов, являются статьи Киршмера (Kirschmer) и Эстерера (Esteret), помещенные в V. D. J. в 1930 г. [8] и [9].

В 1929 и 1930 гг. на озере Вальхензее (Walchensee) были приняты объединенными силами различных организаций сравнительные испытания измерения расходов воды. Особый интерес представляют испытания в апреле 1930 г., при которых расходы воды в канале измерялись следующими способами: а) прививкой, б) вертушками, в) водосливом и г) солескоростным методом (Аллена). В качестве контроля служил объемный метод, для чего был построен бак емкостью 1600 м³. При этих испытаниях метод прививки дал следующую точность: из 26 измерений среднее значение погрешностей было 0,66%, при отдельных значениях от —2,91% до +1,43%, причем ошибок, превышающих 1%, из указанного числа было всего 5. Ошибок, значения которых не превосходили 0,5% было 15.

Дальнейшие работы относятся к улучшению метода титрования и вспыскивающей аппаратуры [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

В 1938 г. появилась статья Дрейера (Dreyer) [18], трактующая об объективном способе фиксации измерения окраски во время титрования.

Заканчивая краткий обзор развития метода прививки, следует указать, что значительная по количеству названий литература по методу прививки до 1937 г. не дала ничего нового в химическом и гидромеханическом отношении по сравнению с указанной работой Бернадского и Юркова, изданной в 1914 г. Статья же Киршмера в январском номере журнала *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, посвященная вопросу внесения большей точности в процесс титрования, должна быть в ряде пунктов поставлена под сомнение, так как автор допустил некоторые погрешности, которые будут разобраны ниже.

2. Сущность метода прививки

Метод измерения расходов воды при помощи приливания в измеряемый поток какой-либо другой жидкости основан на следующем.

В некоторую точку потока неизвестного расхода Q вливается раствор определенной концентрации C_1 , причем значение расхода этого раствора q должно быть известно с наибольшей точностью. Считая, что вода в измеряемом потоке сама содержит прививаемое вещество, имея концентрацию C_0 , можно сказать, что через поперечное сечение потока в месте всprysкивания раствора в единицу времени пройдет $QC_0 + qC_1$ грамм прививаемого вещества.

Раствор в потоке будет постепенно перемешиваться с основной массой воды измеряемого потока и можно будет считать, что где-то ниже по течению оба потока, вода и прививаемый раствор, будут полностью перемешаны. Выбрав такую точку, где смешение предполагается достаточно полным, берут пробу, концентрация которой будет некоторая C_2 . Тогда количество прививаемого вещества, проходящее через поперечное сечение потока в единицу времени в месте пробы, будет $(Q + q) C_2$.

Так, как количество прививаемого вещества, проходящего через поперечное сечение потока, будет оставаться постоянным для любого сечения, при условии, что в поток дополнительно не поступает прививаемое вещество, то в случае, когда между местом прививки и местом пробы расход воды остается постоянным, будет иметь место следующее равенство

$$QC_0 + qC_1 = (Q + q) C_2. \quad (1)$$

или

$$Q = q \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}. \quad (2)$$

Значение концентрации C_1 , C_2 и C_0 определяется титрованием, причем возможно применить или чисто химический способ Мора (Mohr) или Фольгардта (Volhard) или электрохимический (потенциометрическое или кондуктометрическое титрование). В настоящей работе разбирается лишь химический способ.

3. Погрешности метода

Погрешности в результате, получаемые при измерении расходов методом прививки, по своему существу распадаются на две группы: 1) погрешности от неточностей механических процессов и 2) погрешности от неточности химических процессов.

Первая из указанных групп ошибок состоит в неточности определения расхода прививаемого раствора q , в погрешности в определении объемов при составлении растворов и в неполном перемешивании прививаемого раствора с основным потоком, вторая — в погрешности титрования.

Неточность в определении расхода прививаемого раствора q для случая открытых русел может быть сведена, при применении соответствующей аппаратуры, к очень малой величине.

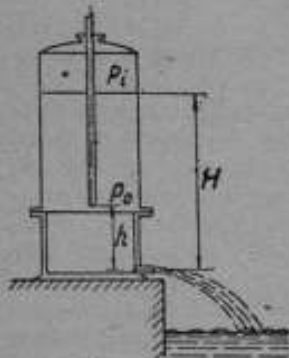


Рис. 1.

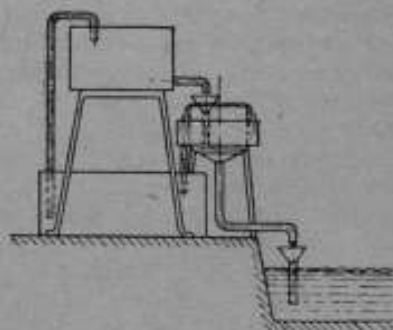


Рис. 2.

Сосуд, предложенный Кемпеном (Kempton) (рис. 1) и представляющий некоторое изменение обычной Мариоттовской склянки, сосуд с водосливом, построенный по типу проф. Унвина (Urwinn) (рис. 2), или плавающий сифон типа Штроемера (рис. 3), или тот же сифон несколько видоизмененный Ленгардтом (рис. 4), обеспечивают весьма высокое постоянство расхода подаваемого раствора и дают возможность, при соответствующей предварительной тарировке прибора, знать величину этого расхода с погрешностью порядка $0,2\%$.

При всprыскивании раствора в трубопровод положение несколько усложняется, так как расход прививаемого раствора сам будет зависеть от колебаний напора основного потока. Хотя теоретическое исследование дает некоторую возможность судить о колебаниях значения расхода прививаемого раствора, но окончательно этот вопрос можно будет выяснить только после проведения соответствующих экспериментальных исследований. Во всяком случае можно ожидать, что погрешность δq при несколько меняющемся напоре основного потока, будет не больше $0,5\%$.

Погрешность в концентрации пробы воды, происходящая от неполного перемешивания для открытых русел, уменьшается вследствие того, что:

1. Перед пуском в реку прививаемого раствора, туда пускают слабый раствор какой-либо безвредной краски, например флуоресцина и, наблюдая за смешением этого раствора с основным потоком, судят о наличии застойных областей. Производя таким образом несколько исследований в различных местах по течению реки, можно подобрать такой участок, где застойные области отсутствуют.

2. Впрыскивающий аппарат должен выпускать раствор в реку несколькими струйками, распределяемыми по всей ширине реки.

3. Пробы должны браться в нескольких местах по сечению реки на нескольких вертикалях, по несколько проб на каждой.

Что касается приливания раствора в водопровод, то там полное перемешивание обеспечивается скоростью движения воды в трубах.

Погрешность от неточности в отсчете объема мерной посуды, происходящая при составлении раствора нужной для титрования концентрации, при аккуратной работе не будет превышать 0,03—0,05%.

Погрешности титрования составляют

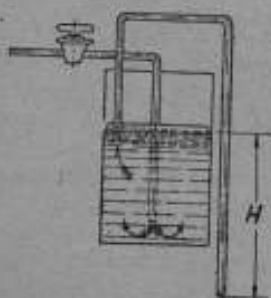


Рис. 3.

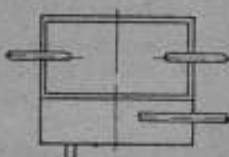
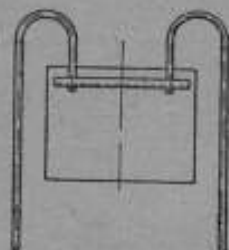


Рис. 4.

предмет значительных споров в чисто химической литературе и в статьях, посвященных методу прививки.

До настоящего времени основным веществом, применяемым для измерения расхода, является поваренная соль. Правда, некоторые исследователи (Шпрехер, Эстерер) предлагают применять красящие вещества, но этот метод относится к области физических измерений, так как определение концентрации таких растворов производится оптическим способом.

Крепость C_1 раствора NaCl , выпускаемого в поток, должна быть как можно большей, но все же она не должна превышать 250 г/л, так как в противном случае, при уменьшении температуры возможно появление соли в виде осадка.

Расход q прививаемого раствора должен быть таким, чтобы взятая после смешения проба имела концентрацию порядка 0,05 г/л. Меньшая концентрация плохо титруется, а при большей получается засоленность реки.

Говори о прививке NaCl и о титровании растворов по способу Мора раствором AgNO₃, различные исследователи ищут способы повышения точности этого процесса. Почти все эти исследователи впадают в ту или иную ошибку, и предлагаемые ими способы оказываются несостоятельными. Так Мелле [17] приходит к выводу, что точность определения конечного расхода Q вовсе не зависит от ошибок титрования, так как каждое титрование происходит с одинаковой ошибкой. По Мелле

$$Q = q \frac{k \left(N_1 - \frac{N_1}{P} \right)}{k \left(N_2 - \frac{N_2}{P} \right) - k \left(n - \frac{n}{P} \right)},$$

где k — молекулярный вес NaCl, N_1 — количество раствора AgNO₃, необходимого для титрования прививаемого раствора концентрации C_1 , N_2 — то же для пробы C_2 , n — то же для воды C_0 , P — процент погрешности каждого титрования. Производя сокращения, Мелле получает

$$Q = q \frac{N_1}{N_2 - n},$$

т. е. что определенный расход не зависит от погрешности титрования.

Соглашаясь с Мелле в том, что все три титрования действительно происходят с одинаковой погрешностью, все же следует указать, что знак этой погрешности может быть любой, а потому производить сокращение, как это производит Мелле, недопустимо.

Н. М. Бернадский и А. О. Юрков, вслед за Мелле, повторяют его ошибку в несколько иной форме. Эти авторы считают, что Мелле делает неправильное допущение, принимая ошибку постоянной там, где она фактически переменна. Строя собственный метод титрования (вариант способа Мора), Бернадский и Юрков находят условия, при которых погрешность титрования будет действительно всегда одинаковой. На основании утверждения Мелле указанные авторы также считают, что ошибка при двукратном титровании раствора пробы и раствора, усиленного титрованной соляной кислотой, будет исключена.

По Бернадскому $N_1 + P_1$ — количество AgNO₃, выражающее концентрацию приливаемой в раствор HCl, $N_2 + P_2$ — количество AgNO₃, выражающее суммарную концентрацию HCl + NaCl, N_3 — количество AgNO₃, выражающее действительное содержание NaCl в растворе.

Тогда он считает, что

$$N_3 = N_2 + P_2 - (N_1 + P_1) = N_2 - N_1 - (P_1 - P_2),$$

т. е., исходя из равенства $P_1 = P_2$, он говорит, что искомая концентрация NaCl определяется $N_3 = N_2 - N_1$ без влияния ошибки титрования, тогда как при непосредственном определении она выразится через $N_3 + P_3$.

Совершенно ясно, что автор делает ошибку, так как в их случае величина N_3 получится с погрешностью, равной $P_1 + P_2$, тогда как при непосредственном определении она получится с погрешностью P_2 .

что при примерном равенстве погрешностей дает, при такой системе, не улучшение результата, а его ухудшение, примерно в два раза.

Там, где Бернадский и Юрков не повторяют чужих ошибок, а идут собственным путем, там они получают весьма ценный результат, до настоящего времени почти не использованный химиками. Они предлагают в титруемый раствор NaCl прибавлять некоторое количество $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$, что дает при том же количестве титрующего реагента и при той же его концентрации более резкую окраску, т. е. позволяет замечать покраснение раствора от меньшего количества приливаемых капель реагента. Ошибка титрования при этом, естественно, уменьшается.

Обратное оттитрование раствора никакого влияния на точность титрования оказать не может.

Весьма интересны рассуждения Киршмера о возможности получения результатов титрования с погрешностью, не превышающей $0,1\%$ [12].

Киршмер задается абсолютной погрешностью титрования ± 2 капли раствора AgNO_3 объемом $0,03$ мл каждая. При этом он не указывает непосредственно, какой берется объем титруемого раствора (хотя косвенно можно видеть, что он подразумевает 1 л), и главное — он не только не указывает, какова должна быть концентрация AgNO_3 , чтобы при приливании 2 капель в 1 л раствора NaCl концентрацией $C = 0,05$ г/л можно было заметить покраснение, а выводит эту концентрацию из требования, чтобы относительная погрешность была равна $\pm 0,1\%$, а абсолютная ± 2 капли. Получившаяся концентрация оказалась равной $2,423$ г/л.

Сама постановка вопроса показывает, что здесь допущена ошибка, так как с тем же успехом можно было бы задаться какой-либо значительно меньшей погрешностью и получить для этого случая требуемую концентрацию.

Порочность рассуждений Киршмера заключается в том, что в действительности, чтобы получить результат титрования с абсолютной погрешностью 2 капли, требуется раствор строго определенной концентрации, и тогда, в зависимости от количества затраченного на титрование раствора AgNO_3 , определится относительная погрешность.

Произведенные в Аэрогидрометрической лаборатории опыты показали, что в случае концентрации, указываемой Киршмером ($2,423$ г/л), окраску можно заметить с точностью до ± 2 капель (объемом около $0,04$ мл) для 100 мл титруемого раствора NaCl концентрацией $0,05$ г/л, т. е. результат получается с погрешностью примерно $1,5\%$.

Подобная небрежность по отношению к постановке вопроса о точности титрования заставляет с осторожностью относиться и к последующим утверждениям Киршмера об усилении растворов, высказанным в той же статье.

Вопрос об усилении растворов встает в связи с тем, что крайне нежелательно производить выпаривание проб речной воды, взятых до пуска в нее приливаемого раствора. Концентрация этой воды C_0 настолько мала, что непосредственно производить титрование иногда не представляется возможным. Нежелательность выпаривания объясняется следую-

ними двумя соображениями: а) тратится очень много времени и б) вследствие значительного содержания в речной воде различных органических примесей, при выпаривании иногда получается столь густая окраска, что пытаться производить титрование бесполезно.

С этой целью Кишмер предлагает два метода, при которых, избегая выпаривания, можно определить C_0 с достаточной точностью.

1-й метод заключается в том, что каким-либо подходящим раствором AgNO_3 титруют пробу воды, взятой после смешения (C_2). Эта проба, как было указано, имеет концентрацию около 0,05 г/л. Чтобы все пробы титровать одним и тем же раствором AgNO_3 (а это, как дальше будет указано, чрезвычайно существенно), необходимо пробу приливаемого раствора разбавить дистиллированной водой, примерно в 5000 раз, и после определить концентрацию C_1 .

Для определения концентрации воды в потоке разбавляют приливаемый раствор опять в 5000 раз, но на этот раз речной водой.

Для первого разбавления имеем: содержание NaCl в разбавленном растворе

$$\frac{C_1}{5000} \text{ г/л.}$$

Количество раствора AgNO_3 , потребного для титрования некоторого объема этого раствора, обозначим n_1 , т. е. $C_1 = 5000$.

При втором разбавлении содержание NaCl

$$\left(\frac{C_1}{5000} + \frac{49990}{50000} \cdot C_0 \right) \approx \frac{C_1}{5000} + C_0.$$

Раствора AgNO_3 в этом случае потребуется n_1^a

$$n_1^a = \frac{C_1}{5000} + C_0,$$

где a соответствует 5000; или совместно с уравнением (1)

$$n_1^a = n_1 + C_0,$$

т. е.

$$C_0 = n_1^a - n_1.$$

Погрешность определения C_0 будет, конечно, значительно больше погрешности определения C_1 . С целью контроля Кишмер рекомендует сделать второе разбавление речной воды, на этот раз в 10000 раз. Тогда примерное количество NaCl будет

$$\frac{C_1}{10000} + C_0.$$

Количество AgNO_3 , потребное для титрования этой смеси, обозначим n_1^b .

$$n_1^b = \frac{C_1}{10000} + C_0, \text{ где } b \text{ соответствует } 10000.$$

Совместно с уравнением (1) получаем:

$$n_1^b = \frac{n_1}{2} + C_0,$$

$$C_0 = n_1^b - \frac{n_1}{2}.$$

Погрешность среднего результата из двух определений C_0 будет равна погрешности каждого из определений C_0 , так как можно считать, что как в первом, так и во втором случаях количество AgNO_3 получается с одинаковой погрешностью.

2-й метод. Составляют два раствора, беря по 1 л речной (или промышленной) воды и добавляют к ней отличающиеся друг от друга количества прививаемого раствора.

При титровании 1-го раствора $C_0 + \frac{C_1}{x}$ получаем n_a мл раствора AgNO_3 , а при титровании 2-го раствора $C_0 + \frac{C_1}{y}$ получаем n_b мл раствора AgNO_3 .

$$C_0 + \frac{C_1}{x} = n_a \quad (2)$$

$$C_0 + \frac{C_1}{y} = n_b,$$

откуда определяем C_1 .

Для контроля можно взять третий раствор $C_0 + \frac{C_1}{z}$.

К раствору пробы также прибавляют небольшое количество прививаемого раствора. Тогда имеем

$$C_2 + \frac{C_1}{z} = n_c, \quad (3)$$

что вместе с уравнением (2) дает

$$C_2 - C_0 = n_c - n_a.$$

Вычитая из уравнения (3) величину $\frac{C_1}{x}$, определенную ранее, получаем

$$C_2 = n_c - \frac{C_1}{x}.$$

Этот способ дает возможность вовсе не определять концентрацию C_0 .

4. Опыты лаборатории

Значительные разногласия между утверждениями различных авторов в определении точности титрования и точности определения расходов методом прививки заставили лабораторию произвести ряд опытов. Совершенная новизна этой области для сотрудников лаборатории заставила осваивать метод с самого начала.

Первой задачей стояло определить, с какой погрешностью можно получить результат титрования по способу Мора, применяя различные растворы AgNO_3 .

Лабораторные весы были отданы в регулировку и поверку. Измерительная посуда — колбы и бюретки — была проверена весовым способом в лаборатории мер массы.

Был составлен раствор „чистого для анализов“ NaCl , для чего была взята навеска $31\,002 \pm 0,4$ мг; $\delta = \pm 0,001\%$. Это количество NaCl было всыпано в бутылку (сосуд № 2), емкость которой после определения в лаборатории мер массы оказалась равной 6244 ± 1 мл; $\delta = 0,016\%$. Таким образом концентрация раствора для прививки оказалась равной $4,9651$ г/л с погрешностью $\pm 0,017\%$. Чтобы производить титрование раствора той концентрации, с которой в дальнейшем всегда придется иметь дело, раствор из сосуда № 2 был разбавлен в 100 раз двукратным разбавлением. Получилась концентрация $0,0497$ г/л, погрешность которой была $\pm 0,08\%$. AgNO_3 был взят в количестве $5006,0 \pm 0,4$ мг; $\delta = \pm 0,008\%$.

Кристаллы AgNO_3 были всыпаны в колбу емкостью около 2 л, причем получилась светло-оранжевая окраска раствора.

Раствор был составлен заново. Навеска AgNO_3 $5006,8 \pm 0,4$ мг; $\delta = \pm 0,008\%$. Это количество было всыпано в колбу емкостью $2000,1 \pm 0,3$ мл; $\delta = 0,015\%$. Концентрация AgNO_3 $2,5033$ г/л; $\delta = 0,023\%$.

Титровали 100 мл раствора NaCl в присутствии 6 капель 10% раствора $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ опыта	Концентрация AgNO_3 в г/л	Количество AgNO_3	Полученная концентрация NaCl в г/л	δ опыт. в %	δ теор. в %
1	~ 2,5	5,88 мл	50,57	+1,8	} $\pm 1,4$
2	~ 2,5	5,81 .	50,0	+0,6	
3	~ 2,5	5,92 .	50,9	+2,4	
4	~ 2,5	5,88 .	50,6	+1,8	
5	~ 1,25	11,597 .	49,9	+0,4	} $\pm 0,7$
6	~ 1,25	11,487 .	49,4	-0,6	
7	~ 0,83	17,426 .	50,05	+0,7	$\pm 0,5$

Полученные данные, хорошо согласуются с теоретическими рассуждениями, на основании которых были получены числа приведенные в последнем столбце таблицы.

В самом деле, считая, что при 100 мл титруемого раствора возможно заметить его покраснение с точностью ± 2 капля, а объем последних, на основании многократных наблюдений, можно считать в среднем около 0,04 мл, имеем абсолютную погрешность титрования

$\pm 0,08$ мг, а это для 5,8 мг дает 1,4%, для 11,6 мг — 0,7%, а для 17,4 мг — 0,5%.

Титрование производилось следующим образом. В колбу, содержащую 100 мл титруемого раствора NaCl, окрашенного от 6 до 10 каплями 10-процентного раствора K_2CrO_4 , приливается из бюретки раствор $AgNO_3$ в количестве, близком к тому, которое было бы достаточно для образования AgCl во всем титруемом объеме. С возможной точностью замечались начальный и конечный отсчеты по бюретке. Для лучшего распознавания конца реакции такое же количество раствора NaCl с одинаковым количеством индикатора вливалось в другую колбу, и в него приливалось то же количество раствора $AgNO_3$, как и в первую. В обеих колбах количество осадка AgCl было, таким образом, одинаково. Затем в первую колбу вливался раствор $AgNO_3$ порциями по 2 капли и замечалось покраснение раствора в 1-й колбе по сравнению с цветом раствора во 2-й колбе.

Первые опыты лаборатории заключались в определении объема сосуда по методу прививки.

Если умножить обе части уравнения (2) на время, то уравнение примет вид

$$V = v \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}, \quad (3)$$

где V — измеряемый объем, v — объем прилитого раствора, C_1 , C_2 и C_0 , как и раньше, — соответствующие концентрации раствора NaCl.

В качестве измеряемого объема V была взята бутылка, емкость которой была определена весовым способом в лаборатории мер массы. Эта емкость оказалась равной $12,449 \pm 1$ мл при относительной погрешности $\delta = 0,001\%$.

Количество прилитого раствора примерной концентрации $C_1 = 5$ г/л NaCl было 125 мл, что диктовалось требованием получить в пробе концентрацию C_2 , близкую к 0,05 г/л. В качестве промышленной на первые опыты была взята дистиллированная вода, т. е. $C_0 = 0$.

Опыты производились в следующем порядке.

Из сосуда № 2 было взято 100 мл „крепкого“ (около 5 г/л) раствора NaCl в колбу № 130 (действительной емкостью 99,97 мл) и 25 мл в бюретку № 12 (действительной емкостью 25 мл). Этот раствор был влит в сосуд № 1, который был доливлен до черты дистиллированной водой. Доливание производилось порциями и после наливания каждой порции раствор тщательно перемешивался.

Из сосуда № 2 были взяты 100 мл раствора, концентрация которого была двукратным разбавлением уменьшена в 100 раз. Погрешность разбавления была порядка 0,08%. Этот разбавленный раствор титровался указанным выше способом раствором $AgNO_3$ концентрацией 1,25 г/л в количестве 100 мл, его концентрация $\frac{C_1}{100}$ выражалась в количестве миллилитров раствора $AgNO_3$.

Затем из сосуда № 1 бралась проба в количестве 100 мл и титровалась тем же способом и тем же раствором $AgNO_3$. Концентрация

пробы в миллилитрах раствора $\text{AgNO}_3 - C_2$. Количество индикатора $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ в обоих титрованиях было одинаково.

Результаты некоторых определений объема сосуда № 1 приведены в табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	Количество AgNO_3			Полученный объем сосуда мл	Абсолютная погреш- ность мл	Относитель- ная по- грешность %
	для C_1 мл	для C_2 мл	для C_0 мл			
1	1162	11,67	—	12320	129	1,03
2	1171	11,64	—	12450	1	0,01
3	910	10,60	1,50	12492,5	42,5	0,30
4	905,1	10,52	1,50	12384	65	0,52
5	910	10,53	1,49	12437,5	11,5	0,10

В опытах № 1 и 2 составление основного раствора производилось дистиллированной водой, а в остальных — водопроводной водой, причем в опытах № 3 и 4 разбавление раствора до концентрации проб было произведено также водопроводной водой. В опыте № 5 раствор был составлен посредством водопроводной воды, а разбавление его было произведено дистиллированной водой.

Крупным неудобством в методе прививки является, на первый взгляд, необходимость производить точные навески NaCl и AgNO_3 и иметь химически чистые реактивы для составления соответствующих растворов и точно титрованный раствор AgNO_3 .

На самом деле это неудобство полностью отсутствует, так как при условии, что все титрования одной серии производятся: а) одним и тем же раствором AgNO_3 , б) в присутствии равных количеств одного и того же индикатора и в) во всех случаях количество титруемого раствора берется одинаковым, — знание точного титра раствора AgNO_3 , его чистоты и чистота растворяемого NaCl не играют роли, так как результаты определения входят и в числитель и знаменатель основной формулы, т. е. все поправочные коэффициенты сократятся.

Это свойство придает особую ценность разбираемому способу, так как в полевых условиях было бы чрезвычайно трудно производить точные навески, прокаливания и т. п. операции. Кроме того, если и в существующих условиях трудно завозить большие количества соли (особенно в горных условиях), то эта трудность сильно увеличилась бы при требовании иметь для растворов химически чистый и совершенно сухой NaCl .

Дистиллированной воды требуется также сравнительно мало, так как составление прививаемого раствора может быть осуществлено речной (промышленной) водой. При желании можно учесть поправку, происходящую от такого разбавления согласно приводимой формулы, но величина этой поправки будет совершенно ничтожна.

При условии составления прививаемого раствора при помощи речной воды, уравнение (1) примет вид:

$$QC_0 + q(C_0 + C_1) = (Q + q)C_2 \quad (4)$$

или

$$Q = q \frac{C_1 - C_2 + C_0}{C_2 - C_0} \quad (5)$$

Так как величина C_0 ничтожна по сравнению с C_1 , то практически результаты формулы (5) не будут отличаться от тех, которые получались по формуле (2).

Чтобы считать, что метод прививки полностью освоен, необходимо после окончания испытаний на лабораторных установках провести следующие испытания:

1. Испытание на какой-либо из крупных водопроводных установок.
2. Испытание на реке с небольшим расходом и спокойным течением.
3. Испытание на горной реке со значительным расходом и с бурным течением.

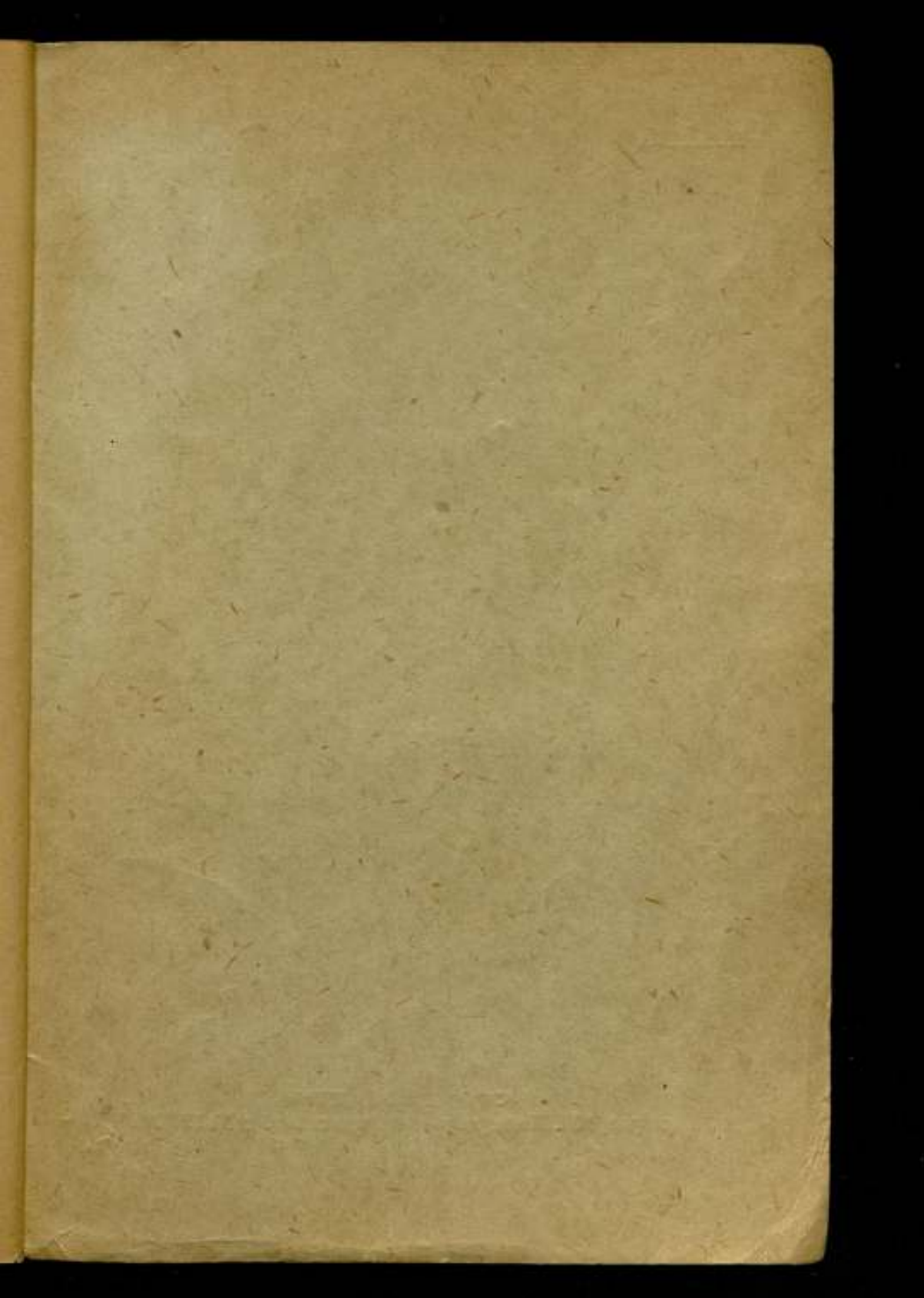
ЛИТЕРАТУРА

1. M. Th. Schloesing, Nouvelle méthode pour juger les fluides. Comptes rendus du deuxième semestre de L'Académie des Sciences, Paris, 1863.
2. C. E. Stromeuer, The gauging of Streams by Chemical Means, V. D. I. 1914 (выдержки).
3. F. van Iterson, Méthode chimique pour la mesure du débit des conduites d'eau, le Génie civil, 1904.
4. A. Boucher, Jaugeages par titration. Bull. technique de la Suisse Romande 1910.
5. R. Mellet, Application de la titration des chlorures au jaugeage de débit (Ibid).
6. Н. М. Бернадский и А. О. Юркова, Материалы по вопросу о применении химического метода к измерению расхода воды, Изд. СПб округа путей сообщения СПб, 1914.
7. W. C. Clark, The Electrometric Titration of Halides, Journal of the Chemical Society, 1926.
8. O. Kirschmer, Vergleichs Wassermessungen am Walchensee. V. D. I., 1930, H. 17.
9. O. Kirschmer, W. Ester, Die Genauigkeit einiger Wassermessverfahren. V. D. I. 1930, H. 44.
10. O. Lütchg, Ueber unsere letzten Erfahrungen mit Titrations-Verfahren für Wassermessungen. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1928.
11. O. Kirschmer, Das Salzverdünnungsverfahren für Wassermessungen, W. und W. 1931.
12. O. Kirschmer, Bemerkungen zur Auswertung von Wassermessungen nach dem Salzverdünnungsverfahren. W. und W. 1937, Nr. 1.
13. O. Piloty, Erfahrungen im Hochgebirge-Wassermessdienst unter besonderer Berücksichtigung des Salzverdünnungs-Verfahrens. W. u. W. 1937m Nr. 10/11
14. W. Esterer, Das Farbverdünnungsverfahren für Wassermessungen. W. u. W. 1937, Nr. 10/11.
15. O. Kirschmer, Erfahrungen mit dem Salzverdünnungs Verfahren. W. und W., N. 10/11.
16. A. Lernhart, Ein neuartiges Einspritzgefäß (Schwimmheber) für Wassermessungen nach dem Salzverdünnungsverfahren. W. und W. 1937, Nr. 13/14.
17. R. Mellet, La houille blanche, N. 11, 1910.
18. H. Dreyer, Entwicklung eines objektiven Kolorimeters zur Messung geringer Anfärbungen und Trübungen. W. W. 1938, H. 5/6.

Отв. редактор *А. Н. Доброхотов*
Техн. редактор *П. В. Дворников*
Корректор *Н. П. Сарбаева*

Сдано в набор 25/I—1940 г. Под-
писано к печати 11/IV 1940 г.
Печ. лист. $4\frac{1}{4}$. Тираж 500 экз. Тип.
знаков в печ. листе 30000. Лениобла-
горант № 1814. Заказ № 608.

Тип. арт. „Советский Печатник“.
Ленинград, Моховая, 40.



Цена 5 руб.

СКЛАД ИЗДАНИЯ:
Ленинград, 105. Международный проспект, д. № 19. ВНИИМ