

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

**ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

ТРУДЫ ВНИИМ

Выпуск 1 (61)

ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД—1948



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

ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ВНИИМ

Выпуск 1 (61)

Под редакцией В. Г. Махровского

ИЗДАНИЕ ВНИИМ

ЛЕНИНГРАД—1948



И. 5878

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
<i>Г. М. Кондратьев.</i> Аэрометрический ката-зонд	5
<i>А. М. Естифеев и М. И. Коточилова.</i> Прибор для определения процентного содержания шуги в водном потоке при измерении ее расхода (шугомер)	19
<i>К. Н. Васильев, А. А. Часовников, Е. А. Болкова.</i> Исследования применимости термоэлектрического анемометра с гальванометром обычного типа для изучения колебаний воздушного потока.	32
<i>А. А. Часовников.</i> К вопросу о тарировке пито-статических трубок.	46
<i>Л. А. Рубец</i> . Определение расходов воды методом прививки (оборудование и экспериментальная работа лаборатории по исследованию метода прививки)	62
<i>Л. А. Рубец</i> . Определение расходов воды методом прививки (потенциометрическое титрование)	77
<i>С. Я. Бейль.</i> К вопросу о сравнимости показаний маятниковых копров различных конструкций.	91

Ответственный редактор проф. *Б. М. Яновский*

Техн. редактор *А. А. Двораковская*

Корректор *Н. А. Кнохе*

М—07853.

Подписано к печати 25/III-48 г.

Объем 7 печ. л.

Уч.-изд. л. 7,5.

Тираж 1200 экз.

Заказ № 1620.

Типография № 3 Управления издательств и полиграфии Исполкома
Ленгорсовета

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящий сборник вошли статьи, отражающие научно-исследовательскую деятельность Аэрогидрометрической и Механической лабораторий ВНИИМ за последнее десятилетие. Большинство работ было закончено до начала Отечественной войны.

Статья Г. М. Кондратьева посвящена исследованию пригодности Аэрометрического ката-зонда для дистанционных технических измерений скоростей воздуха и газов в различных местах сушильных камер, газоходов, жилых помещениях и т. д.

В статье дано теоретическое обоснование метода измерения на основании теории регулярного режима, разработанной и опубликованной Г. М. Кондратьевым в 1936 г.

В статье А. М. Естифеева и М. И. Коточиговой изложена теория и дано описание прибора для определения процентного содержания шуги в водном потоке при измерении ее расхода.

Учет образования так называемого внутреннего льда и шуги, в связи с развитием гидроэлектростроительства в СССР, имеет весьма важное значение, в силу неблагоприятных условий для работы станций в зимний период. Вопрос о количественном учете шуги в настоящее время мало разработан, и поэтому работа А. М. Естифеева и М. И. Коточиговой является ценным вкладом в специальную техническую литературу.

Работа К. Н. Васильева, А. А. Часовникова и Е. А. Волковой посвящена экспериментальному исследованию применимости термоэлектрического анемометра с гальванометром обычного типа для изучения колебаний воздушного потока. Вопрос о взаимодействии нагретой проволоки анемометра и гальванометра является весьма сложным и полного теоретического решения до сего времени не имеет. Поэтому экспериментальная работа авторов имеет большое практическое значение.

В статье А. А. Часовникова приведены результаты работы Аэрогидрометрической лаборатории в 1941 г. по рационализации методов испытаний пито-статических трубок без снижения точности тарировки.

В двух статьях Л. А. Рубца, подготовленных к печати А. А. Часовниковым, представлен отчет о подробном исследовании в Аэрогидрометрической лаборатории метода измерения расходов воды в трубопроводах посредством прививки раствора NaCl.

Работа С. Я. Бейля посвящена вопросам о сравнимости показаний маятниковых копров различных конструкций при испытании тождественных образцов.

Вопрос имеет в настоящее время важное значение в связи с введением в технические условия на приемку сталей обязательных испытаний на ударную вязкость.

АЭРОМЕТРИЧЕСКИЙ КАТА-ЗОНД

Практика давно уже выдвинула требование сконструировать простой, достаточно прочный и постоянный анемометр, пригодный для дистанционных измерений, как например для измерения скоростей воздуха и газов в различных местах сушильных камер, в газоходах, жилых помещениях и т. д.

Так как при измерениях в эксплуатационных условиях часто направление воздушного потока неизвестно, то показания прибора должны мало зависеть от направления воздушного потока. Наконец, прибор должен быть пригоден для измерения скоростей в достаточно большом диапазоне, начиная от 0,1—0,2 м/сек и до 5—10 м/сек.

Из приборов, применяемых в современной аэрометрии [1], [2], [3], наиболее пригодным для указанной цели мог бы считаться тепловой анемометр Кинга¹, подробное описание которого имеется в различных источниках [4], [5].

Однако этот прибор требует довольно сложных электрических измерений и даже при работе в лабораторных условиях не отличается достаточным постоянством показаний, нуждаясь в повторных градуировках. Приемник анемометра Кинга — тонкая, электрически накаливаемая платиновая проволочка — хрупок и непрочен. Ориентировка приемника относительно воздушного потока влияет на его показания.

Последним недостатком страдает и весьма остроумный прибор К. Н. Васильева [5].

Эти обстоятельства заставили нас сконструировать и исследовать новый прибор — «аэрометрический ката-зонд», более простой и прочный, нежели тепловой анемометр Кинга.

Заметим здесь, что опыты, производившиеся в Московском Гидро-метеорологическом институте над аналогичным ката-зондом для водных течений, дали вполне удовлетворительные результаты [6].

¹ Мы исключаем из рассмотрения ката-термометр Хилла, который не дает возможности теле-измерений.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ИДЕЯ ПРИБОРА

Идея прибора основана на теории регулярного режима, развитой автором [7].

Приемником прибора является сплошное твердое тело; его нагревают до температуры, которая выше температуры исследуемого воздушного потока, и затем дают ему свободно охлаждаться. Быстрота падения температуры тела регистрируется, измеряется и служит мерой скорости воздушного потока.¹

В силу основной теоремы теории регулярного режима охлаждающееся тело по истечении достаточного времени с момента погружения в среду вступит в стадию упорядоченного режима, каково бы ни было начальное состояние тела. Этот режим характеризуется тем, что изменение температуры в любой точке M тела подчинено одному и тому же простому экспоненциальному закону, а именно: если обозначить u — температуру (переменную) в точке M , t — температуру (постоянную) среды, z — время, то разность $u - t$ убывает с течением времени пропорционально величине $e^{-m(z-z_0)}$, где m — положительное число, e — основание натуральных логарифмов, z_0 — начальный момент времени, т. е.

$$u - t = (u_0 - t) e^{-m(z - z_0)}. \quad (1)$$

Здесь u_0 — температура тела в начальный момент.

Этому режиму охлаждения автор и присвоил название „регулярный режим“.

Необходимой предпосылкой регуляризации режима является постоянство внешних условий, в данном случае постоянство скорости воздушного потока v и параметров, определяющих состояние воздуха, т. е. его температуры t и давления. Итак, мы предполагаем, что

$$v = \text{const}, \quad t = \text{const}. \quad (2)$$

Если эти условия соблюдаются, регулярный режим будет иметь место для самых разнообразных тел, составленных из различных материалов и имеющих произвольную форму.

Постоянная m характеризует численно темп охлаждения: чем m больше, тем быстрее тело охлаждается. Эта постоянная зависит не только от внешних условий, т. е. от физических свойств среды и от ее скорости, но и еще от самого тела: от его формы и размеров и от тепловых свойств материалов, из которых тело состоит.

Пусть выбрано геометрически и физически определенное тело и пусть параметры, которыми определяются внешние

¹ Отсюда и название прибора, в которое вошли греческие слова $\alpha\eta\rho$ — воздух и $\chi\alpha\tau\acute{\alpha}$ — вниз.

условия, от опыта к опыту не меняются, за исключением скорости v и температуры t . В этом случае число m^1 — темп охлаждения тела — будет функцией только скорости v .

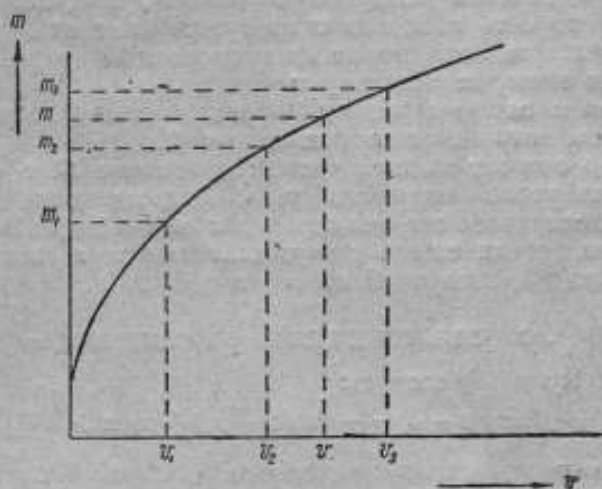


Рис. 1. Градуировочная кривая аэрометрического ката-зонда.

Подвергнем выбранное нами тело охлаждающему действию воздушных потоков различных скоростей: v_1, v_2, v_3, \dots , которые пусть будут известны, например, измерены с по-

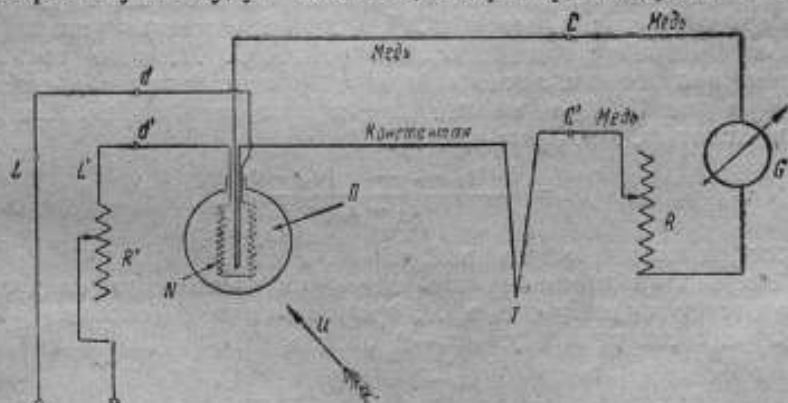


Рис. 2. Принципиальная схема аэрометрического ката-зонда.

мощью трубок Пито. Одновременно определим каждый раз из опыта соответствующие значения m : m_1, m_2, m_3, \dots

¹ От температуры t постоянная m не зависит, ибо она определяется скоростью изменения разности $u - t$, стремящейся к нулю.

Эти опытные данные позволяют изобразить графически зависимость m от v , как показано на рис. 1. Мы получаем таким путем „градуировочную кривую“ для тела, а само оно становится „зондом воздушного потока“, ибо, погрузив его в поток, скорость которого v требуется измерить, и определив из опыта m , находим по градуировочной кривой соответствующую этому m величину v .

В этом и заключается идея предложенного автором прибора, схема которого показана на рис. 2.

Прибор состоит из двух частей: приемника Π , т. е. только что упомянутого нагретого тела, охлаждаемого потоком, и измерителя разности температур u и t — дифференциальной термопары, соединенной с чувствительным гальванометром типа Депрэ-д'Арсонваля G по схеме рис. 2.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПА ОХЛАЖДЕНИЯ m

Из формулы (1) следует:

$$\ln(u-t) = -m(z-z_0) + \text{const.} \quad (3)$$

Из этого уравнения видно, что, если построить график охлаждения, откладывая по оси ординат величины натурального логарифма разности температур u и t , а по оси абсцисс соответствующие им моменты времени z , то все точки графика охлаждения расположатся на одной прямой, угловой коэффициент которой и есть искомое число m .

Эта графическая интерпретация регулярного режима дает простой способ экспериментального определения m : по секундомеру отмечают моменты z', z'', \dots прохождения указателя гальванометра через деления шкалы A', A'', \dots и по точкам строят полулогарифмический график охлаждения, изображенный на рис. 3. Взяв на нем две произвольные точки I и II, вычисляют m , пользуясь формулой:

$$m = \frac{\ln(u_1 - t) - \ln(u_{II} - t)}{z_{II} - z_1} \quad (4)$$

непосредственно вытекающей из (3).

Из теории применяемого здесь гальванометра следует, что отсчет по шкале, т. е. A , пропорционален соответствующей разности температур $u-t$, поэтому

$$u-t = kA, \quad (5)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Подставляя в формулу (4) на место $u_1 - t$ и $u_{II} - t$ равные им числа kA_1 и kA_{II} , находим

$$m = \frac{\ln A_1 - \ln A_{II}}{z_{II} - z_1} \quad (4')$$

Следовательно, m не изменяется, если при построении полулогарифмического графика охлаждения по оси ординат откладывать вместо чисел $u-t$ отсчеты A по шкале гальванометра. Это чрезвычайно упрощает работу с зондом, так как избавляет от необходимости градуировать термометр.

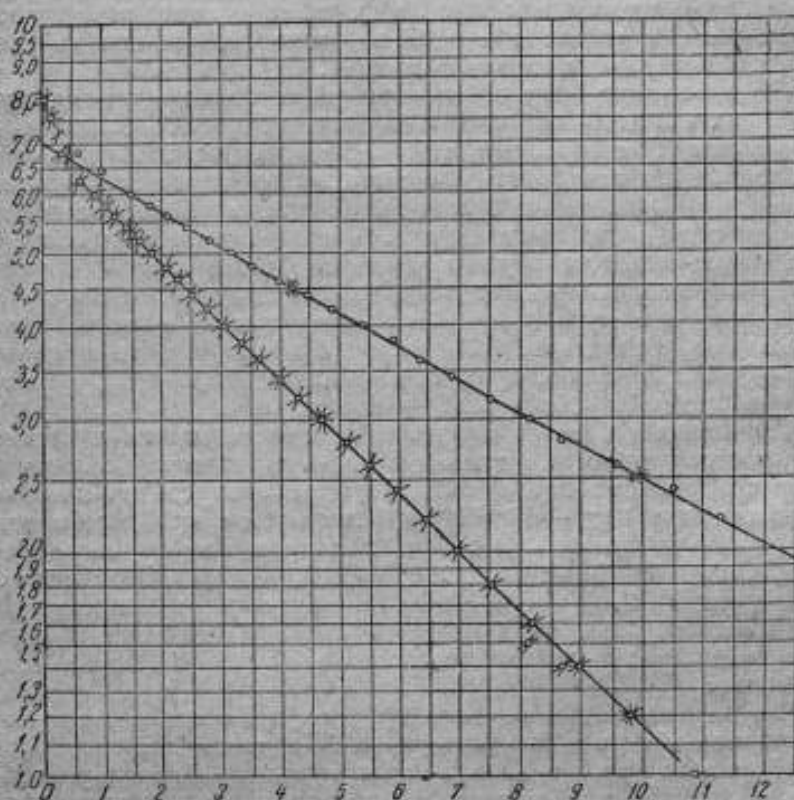


Рис. 3. График охлаждения аэрометрического кат-зонда.

Для вычисления m , теоретически говоря, достаточно про- извести два отсчета, как это явствует из формулы (4'), и нет необходимости строить график охлаждения. Однако представляется полезным сделать ряд отсчетов и изобразить их графически, ибо этим путем m определяется более надежно: во-первых, оно находится, как среднее из нескольких отсчетов, и, во-вторых, осуществляется контроль над правильностью ведения опыта, ибо, если точки не лягут на прямую, это послужит указанием на дефект установки или на непостоянство режима воздушного потока.

3. УСТРОЙСТВО КАТА-ЗОНДА

Из самой идеи прибора и схемы, представленной на рис. 2, видно, что он может быть приспособлен для измерений на расстоянии, ибо медные провода, ведущие от точек C и C' , т. е. от металлов термопары, к гальванометру G , могут быть произвольно удлинены; например, зонд может находиться в газоходе, а гальванометр G и реостат R вне его на расстоянии нескольких десятков метров.

Во избежание появления паразитных термоэлектродвижущих сил выгодно выбрать схему электрических соединений и металлы термопары так, как указано на рис. 2. При монтаже следует позаботиться о хорошей электрической изоляции проволочек термопары и проводов, особенно если они находятся во влажной атмосфере. Пренебрежение этим обстоятельством ведет к грубым ошибкам. Спаи U и T осуществляются спаиванием металлов, но отнюдь не простым скручиванием; все остальные соединения также должны быть исполнены тщательно. Толщина проволочек термопары: 0,25—0,35 мм. Никакие спаи в самих проволочках, всякие резкие перегибы, „барашки“ — недопустимы.

Гальванометр, здесь применяемый, принадлежит к весьма распространенному типу: это магнито-электрический гальванометр с вращающейся катушкой. Чувствительность его должна быть порядка 10^{-8} — 10^{-9} а на 1 мм шкалы при расстоянии от зеркала до шкалы в 1 м. Вполне пригодны гальванометры, изготавливаемые в Ленинграде мастерскими Физического института ЛГУ. Вместо этого зеркального гальванометра со шкалой на расстоянии можно применить при более грубых технических измерениях обыкновенный милливольтметр для термопар.

В одной из наших моделей прибора применен переносный милливольтметр тех же мастерских ЛГУ типа С II.

Приемник прибора Π может быть сконструирован различным образом. Прежде всего, можно варьировать в известных пределах форму и размеры его.

Выбор формы определяется условиями, в которых происходят измерения скорости. Если направление измеряемого воздушного потока известно и имеется возможность определенным образом ориентировать приемник Π по отношению к потоку, то приемнику можно придать форму диска или какую-либо выпуклую обтекаемую форму. Если же направление потока неизвестно, то предпочтения заслуживает шаровая форма, имеющая еще преимущество наибольшей простоты. В нашей модели приемнику придана шаровая форма.

Размеры приемника желательно, конечно, уменьшить, но в силу конструктивных трудностей приходится брать основной размер не менее 30—35 мм.

Материал для изготовления приемника выбирается произвольно, — его можно сделать сплошным металлическим — алюминиевым, медным и т. д. Мы остановились на алюминии по причине, указанной ниже.

Предполагая, что прибор находится в месте, недоступном в момент наблюдения, необходимо предусмотреть приспособление, позволяющее нагревать зонд выше температуры среды, в которой он находится, не извлекая его оттуда.

С этой целью внутрь приемника введена маленькая нихромовая спираль N (рис. 2), по которой пропускается ток от осветительной сети через реостат R' или от батареи аккумуляторов. Для подвода тока служат провода L, L' .

Необходимость ввода в шар спирали N не позволяет уменьшить диаметр его ниже 30 мм.

4. ПРОИЗВОДСТВО ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Из предыдущего ясно, к каким операциям сводится определение скорости v воздушного потока посредством катазонда.

1. Устанавливают, при выключенном токе, указатель гальванометра на нуль шкалы.

2. Включают нагреватель N через реостат R' и следят за повышением температуры t приемника.

3. По достижении желательной степени нагрева приемника нагреватель выключают; приемник охлаждается под действием воздушного потока.

4. Следят за спаданием показаний гальванометра, отмечая по секундомеру моменты z', z'', z''', \dots прохождения указателя через деления шкалы A', A'', A''', \dots .

Эта операция может быть упрощена, а именно: можно отметить по секундомеру промежуток времени $z = z_{II} - z_I$, протекший между моментами z_I и z_{II} прохождения указателя через два каких-либо, вообще произвольных, деления шкалы A_I и A_{II} .

Обработка опытных данных, необходимая для получения скорости v , включает в себе следующие операции:

а) построение полулוגарифмического графика охлаждения (рис. 3) и вычисление m по формуле (4) или (4');

б) определение v по градуировочной кривой данного зонда (рис. 1).

5. РОЛЬ РАДИАЦИИ

Темп охлаждения зонда определяется не одним только прямым действием воздушного потока, но и радиационным теплообменом приемника с окружающими твердыми и жидкими телами.

Этот вид теплообмена даже при сравнительно малых разностях температур приемника и этих тел зависит от радиационных

констант поверхности приемника и окружающих тел и от их взаимного расположения; поэтому темп охлаждения, т. е. m , изменится, если при прочих равных условиях будет меняться окраска приемника. Это обстоятельство необходимо учесть при градуировке прибора. Кроме того, изменение m , опять-таки при прочих равных условиях, произойдет, если температура воздуха t будет отличаться от температуры окружающих его тел.

Наши рассуждения основаны на предположении, что стенки, ограничивающие изучаемую воздушную среду, имеют ту же температуру t , как и среда. Практически это осуществляется при измерениях в закрытых камерах и в аэродинамической трубе во время градуировки прибора. Следовательно, опасность ошибки с этой стороны в большинстве случаев будет устранена. Поэтому действительно m будет функцией только v , и перенесение данных градуировочной кривой на действительные условия измерения будет законным. При измерении больших скоростей — порядка 5 м/сек и более — влияние радиации незначительно и им можно пренебречь.

Если же по соседству с приемником зонда находятся источники радиации, температура которых выше t , например нагретые неизолированные поверхности, измерение может сопровождаться заметными ошибками. Они будут в значительной степени ослаблены или устранены, если приемник прибора защитить экраном от непосредственного действия радиации, а также если рационально выбрать окраску приемника. Руководясь этим соображением, мы и выбрали алюминий в качестве материала приемника, так как его интегральная лучеиспускающая способность, даже в окисленном состоянии, невелика.

6. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ АЭРОМЕТРИЧЕСКОГО КАТА-ЗОНДА

В изготовленных нами моделях приемник имеет форму шара, размеры которого различны: в одной модели — диаметр 30 мм (эта модель была испытана во ВНИИМе), во второй — 45 мм и в третьей — 40 мм.

Разрез приемника изображен на рис. 4, а на рис. 5 представлена та часть общей установки, показанной на рис. 2, которая ограничена клеммами c, c' и клеммами d, d' (служащими для включения нагревателя N).

Медно-константановые проволочки термопары заключены в двухканальную фарфоровую трубку, которая, в свою очередь, помещается в латунной никелированной трубке (горизонтальная трубка на рис. 5), снабженной двумя отростками; один из них (справа на рис. 5) служит для вывода холодного спая T термопары, а внутри другого (слева на рис. 4) проходят проволочки,

ведущие к горячему спая U ; в этом последнем отростке проложены и провода, ведущие от клемм d, d' к нагревателю N .

Устройство приемника видно из рис. 4. В алюминиевом шаре A сделана выемка цилиндрической формы с плоским дном, которая сверху снабжена нарезкой, так что в нее ввинчивается полый внутри цилиндр B из талькохлоритового камня, несущий навитую на нем нагревательную обмотку D . Фарфоровая двухканальная трубка F с проволочками термопары c, c' проходит внутри полости цилиндра B и горячий спай C упирается в дно выемки.¹

Кольцевое пространство E между стенкой выемки и витками нагревательной обмотки должно быть заполнено каким-либо по возможности плотным веществом в целях лучшей передачи тепла от нагревателя к металлу приемника. Наполнитель должен выбрать так, чтобы он не мешал вывинчивать в случае надобности цилиндр B из шара. Поэтому годен жидкий или порошкообразный электроизолирующий или твердый материал — легкоплавкий — вроде парафина, воска и т. д. Однако последние два вещества и им подобные приходится исключать, ибо их нагревание и охлаждение часто сопровождаются выделением или поглощением скрытой теплоты, вследствие чего совершенно искажается процесс охлаждения, и теория регулярного режима, лежащая в основе действия прибора, не может быть применена. Первоначально мы остановились на минеральном масле, но оно оказалось мало практичным, так как легко выгорает при случайном перегреве и просачивается сквозь вырезку при поворачивании прибора. Поэтому в качестве наполнителя был употреблен мельчайший порошок плавленого кварца завода им. Ломоносова.

Для измерения температурной разности $u - t$ или, лучше сказать, величины A , ей пропорциональной, применялась термопара из медно-константановых проволочек диаметром

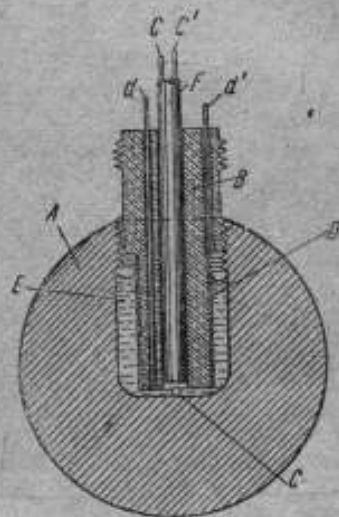


Рис. 4. Разрез приемника аэрометрического ката-зонда
Г. М. Кондратьева.

- A — шар из алюминия,
- B — сердечник из талькохлорита,
- C — горячий спай терм. пары,
- c, c' — проволочки термопары,
- D — нагревательная обмотка,
- d, d' — выводы нагревательной обмотки,
- E — порошок кварца,
- F — фарфоровая двухканальная трубка.

¹ Идея этого устройства принадлежит Н. З. Долгому.

0,3 мм с гальванометром типа СII мастерских Физического института ЛГУ.

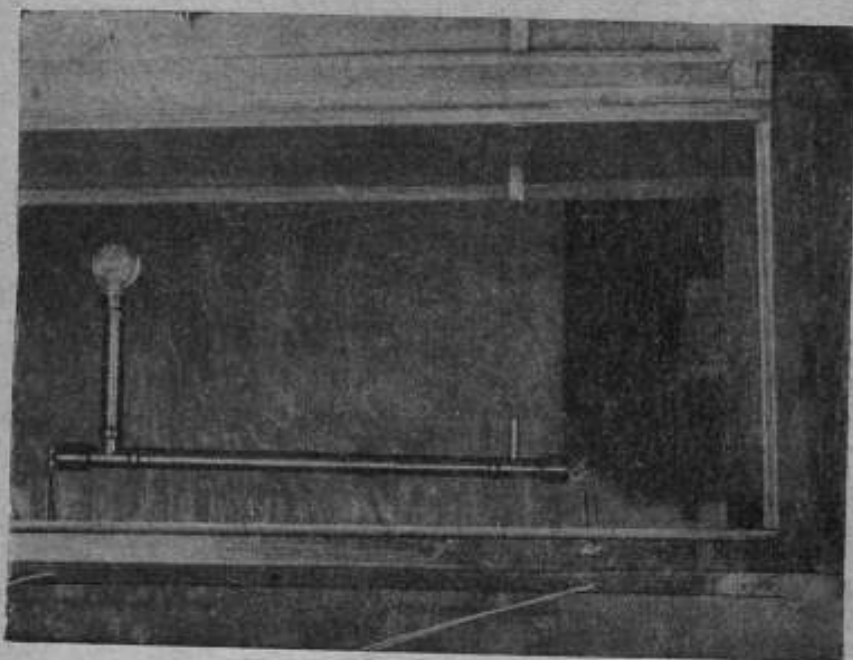


Рис. 5. Установка аэрометрического ката-зонда в аэродинамической трубе.

7. ГРАДУИРОВКА АЭРОМЕТРИЧЕСКОГО КАТА-ЗОНДА

Градуировка прибора на большие скорости не представляла особых затруднений и могла быть выполнена обычными методами аэрометрии. Градуировка же на малые скорости — меньше 80 см/сек — потребовала разработки специального метода, который мы назвали „метод пушинок“. Это — абсолютный метод, дающий возможность прямого градуирования какого угодно прибора — например вышеупомянутого теплового анемометра Кинга.

При градуировке была использована аэродинамическая труба (рис. 5), режим которой, особенно при малых скоростях, отличался хорошим постоянством.

Результаты градуировки, характеризующие зависимость m от v , представлены на рис. 6 (кривые 1, 2, 3) и сведены в таблицы 1, 2, 3, соответственно каждой модели.

Таблица 1

Зависимость m от v (для первой модели)

m 1/час	v м/сек	m 1/час	v м/сек	m 1/час	v м/сек	m 1/час	v м/сек
4,0	0,030	6,6	0,510	9,2	1,230	11,8	2,060
4,1	0,040	6,7	0,630	9,3	1,265	11,9	2,095
4,2	0,055	6,8	0,555	9,4	1,295	12,0	2,130
4,3	0,070	6,9	0,580	9,5	1,325	12,1	2,160
4,4	0,080	7,0	0,605	9,6	1,355	12,2	2,195
4,5	0,095	7,1	0,630	9,7	1,390	12,3	2,225
4,6	0,110	7,2	0,660	9,8	1,415	12,4	2,260
4,7	0,125	7,3	0,685	9,9	1,450	12,5	2,290
4,8	0,140	7,4	0,710	10,0	1,480	12,6	2,325
4,9	0,160	7,5	0,735	10,1	1,515	12,7	2,360
5,0	0,170	7,6	0,765	10,2	1,545	12,8	2,390
5,1	0,190	7,7	0,790	10,3	1,575	12,9	2,425
5,2	0,210	7,8	0,820	10,4	1,610		
5,3	0,230	7,9	0,845	10,5	1,640		
5,4	0,245	8,0	0,875	10,6	1,670		
5,5	0,265	8,1	0,905	10,7	1,705		
5,6	0,285	8,2	0,930	10,8	1,740		
5,7	0,305	8,3	0,960	10,9	1,770		
5,8	0,325	8,4	0,990	11,0	1,800		
5,9	0,345	8,5	1,020	11,1	1,835		
6,0	0,370	8,6	1,050	11,2	1,870		
6,1	0,390	8,7	1,080	11,3	1,900		
6,2	0,415	8,8	1,110	11,4	1,930		
6,3	0,435	8,9	1,140	11,5	1,965		
6,4	0,460	9,0	1,170	11,6	1,995		
6,5	0,480	9,1	1,200	11,7	2,030		

Таблица 2

Зависимость m от v
(для второй модели)

m 1/час	v м/сек
2,1	0,01
3,0	0,21
4,0	0,58
5,0	1,12
6,0	1,90
7,0	2,93

Зависимость m от v (для третьей модели)

m 1/час	v м/сек	m 1/час	v м/сек	m 1/час	v м/сек	m 1/час	v м/сек
3,0	0,010	4,8	0,445	6,6	1,160	8,4	2,085
3,1	0,025	4,9	0,480	6,7	1,210	8,5	2,145
3,2	0,042	5,0	0,510	6,8	1,255	8,6	2,200
3,3	0,060	5,1	0,545	6,9	1,305	8,7	2,255
3,4	0,080	5,2	0,580	7,0	1,355	8,8	2,310
3,5	0,100	5,3	0,615	7,1	1,405	8,9	2,370
3,6	0,120	5,4	0,655	7,2	1,455	9,0	2,430
3,7	0,142	5,5	0,690	7,3	1,505	9,1	2,485
3,8	0,165	5,6	0,730	7,4	1,560	9,2	2,540
3,9	0,190	5,7	0,770	7,5	1,610	9,3	2,600
4,0	0,215	5,8	0,810	7,6	1,660	9,4	2,660
4,1	0,240	5,9	0,850	7,7	1,715	9,5	2,715
4,2	0,265	6,0	0,890	7,8	1,770	9,6	2,770
4,3	0,295	6,1	0,930	7,9	1,820	9,7	2,830
4,4	0,322	6,2	0,975	8,0	1,870	9,8	2,882
4,5	0,352	6,3	1,020	8,1	1,925	9,9	2,940
4,6	0,382	6,4	1,065	8,2	1,980	10,0	3,000
4,7	0,412	6,5	1,110	8,3	2,030		

Выводы

1. Из анализа графиков рис. 6 видно, что ката-зонд второй модели, имеющий приемником алюминиевый шар диаметром 45 мм, является мало чувствительным анемометром для скоростей порядка 3 м/сек и выше. Лучше в этом смысле ката-зонд диаметром 40 мм (третья модель) и, наконец, наибольшим диапазоном измерений обладает ката-зонд первой модели с прослойкой из порошка плавяного кварца. Он нами и принят в качестве рабочего прибора.

Испытанная нами модель с масляной прослойкой годна для работ в лаборатории, но не в эксплуатационных условиях.

2. Достоинством прибора является его простота, прочность и постоянство, так как материалы, из которых изготовлен приемник, обладают достаточно постоянными физическими свойствами.

Если приходится иметь дело с высокими температурами, нагреватель может быть изготовлен из платины.

Градуировка термометры не требуется; ее постоянство не имеет существенного значения; это следует из основных положений теории регулярного режима.

3. Прибор может быть применен для измерения скорости газовых потоков высокой температуры, где отказываются работать обычные анемометры.

4. При условии стандартизации прибора отпадает необходимость в индивидуальной градуировке каждого экземпляра, что обязательно для обычных анемометров, в том числе и для ката-термометра.

5. Описанный метод дает возможность исследовать скорости в различных местах какого-либо пространства, пользуясь одним гальванометром, к которому приключаются

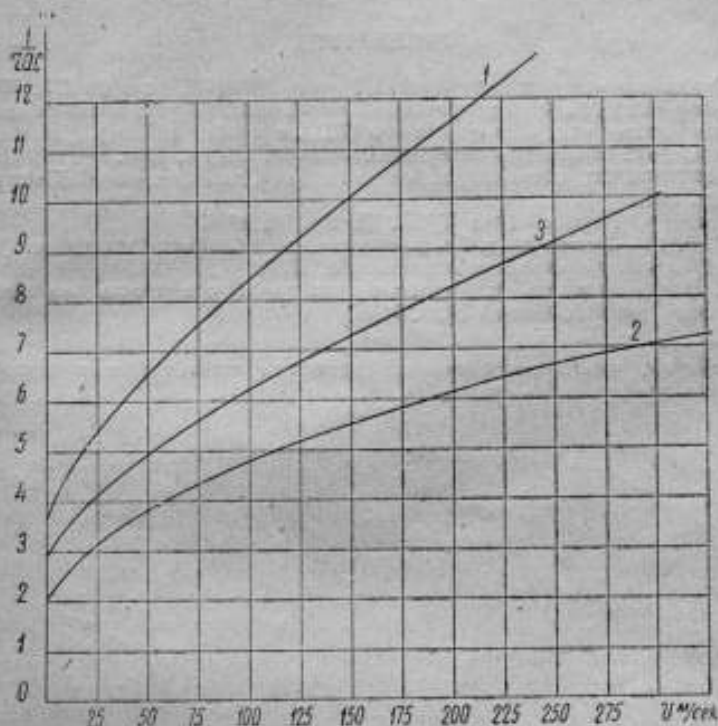


Рис. 6. Градуировочные кривые аэрометрических ката-зондов шаровой формы

поочередно приемники ката-зондов, расположенные в этих местах.

6. Недостатком метода и, следовательно, прибора является необходимость пользоваться секундомером и применять вычислительные операции для получения искомой величины. Хотя эти операции и могут быть номографированы и тем самым упрощены, тем не менее прибор не дает возможности прямого отсчета скорости.

7. Прибор не может быть использован для автоматической записи скорости и для ее автоматического регулирования.

8. Прибор не может быть применен для исследования меняющихся со временем скоростей, в частности для периодических меняющихся скоростей.

9. Хотя произведенное нами исследование и доказало с полной несомненностью пригодность аэрометрического ката-зонда для технических измерений,¹ тем не менее следует продолжить исследования прибора в целях выяснения его точности и дальнейшего улучшения конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Микроманометры и анемометры. Труды ВНИИМ, вып. 10 (26), 1936.
2. Temperature, Its Measurement and Control, 1941. (Труды Конференции по тепловым измерениям, состоявшейся в США в ноябре 1939 г.)
3. Э. Оуэр. Измерения воздушных потоков. ОНТИ, 1935.
4. Handbuch der meteorologischen Instrumente, под редакцией Kleinschidt, 1935, стр. 390.
5. Technical Physics of the USSR, III, No. 10, 1936.
6. Г. В. Железняков. Гидрометрический ката-зонд (диссертация). Известия Гидро-метрологического института, 1939.
7. Г. М. Кондратьев. Испытания на теплопроводность по методам регулярного режима, Стандартгиз, 1936.

¹ Отметим, что аэрометрический [ката-зонд применяется в настоящее время для измерений на судах.

А. М. Естифеев и М. И. Коточигова

ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ ШУГИ В ВОДНОМ ПОТОКЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ЕЕ РАСХОДА (ШУГОМЕР)

1. ЦЕЛЬ И НАЗНАЧЕНИЕ ПРИБОРА

Развитие гидроэнергостроительства и вопросы эксплуатации гидростанций в зимний период выдвинули ряд задач по борьбе с неблагоприятными для работы станций зимними затруднениями.

Особенно важным в этом отношении является учет образования так называемого внутриводного льда и шуги.

В связи с переохлаждением водной массы в период, когда водный поток еще не покрыт ледяным покровом, при отрицательных температурах воздуха внутри воды образуются мельчайшие кристаллы льда, увеличивающиеся по мере дальнейшего охлаждения. Проходя через водоприемные сооружения и решетки гидростанций, эти кристаллы осаждаются на металлических частях решеток и закупоривают их (случай, имевший место на Волховской гидростанции в 1928 г., когда произошла полная остановка станции). Они осаждаются также и на дне реки, куда заносятся при турбулентном движении потока (так называемый донный лед). На горных реках (Чирчик), не покрывающихся в верховьях в течение всей зимы ледяным покровом, процесс внутриводного образования кристаллов льда носит длительный характер. При уменьшении скорости потока внутриводный лед выплывает на поверхность и переносится в виде так называемых шуговых ковров или шуги.

Количественный учет явления внутриводного ледообразования и учет расхода шуги в настоящее время сравнительно мало разработан. Определение расходов шуги на средне-азиатских реках производится при помощи так называемых шуголов системы Аксакова и Глинки; на кавказских реках — шугомерами системы Малхазяна. Эти приборы основаны на весовом принципе определения процента содержания шуги и приме-

няются главным образом для определения расхода шуги, всплывшей на поверхность.

Нами предложен шугомер, основанный на принципе изменения объема пробы вследствие таяния кристаллов льда при нагревании смеси шуги с водой выше 0°C . Изменение объема смеси при нагревании является результатом изменения плотности льда при таянии и аномалии воды, достигающей наибольшей плотности при температуре $+4^{\circ}\text{C}$.

Прежде чем перейти к описанию конструкции прибора, остановимся на основных физических свойствах воды и процессах кристаллизации внутри водной массы.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Физические процессы, происходящие при превращении воды в твердую фазу (лед), весьма сложны; многое в физике воды и льда остается еще неясным и требует дальнейшего изучения.

Прежде всего отметим, что вода в отличие от других жидкостей обладает рядом специфических свойств, главными из которых являются следующие: а) плотность воды при понижении ее температуры до $+4^{\circ}$ увеличивается, дальнейшее понижение температуры (до 0° и ниже 0°C) влечет за собой уменьшение плотности (см. рис. 1); б) при переходе воды в твердую фазу происходит увеличение ее объема, равное приблизительно 9% от первоначального; в) температура

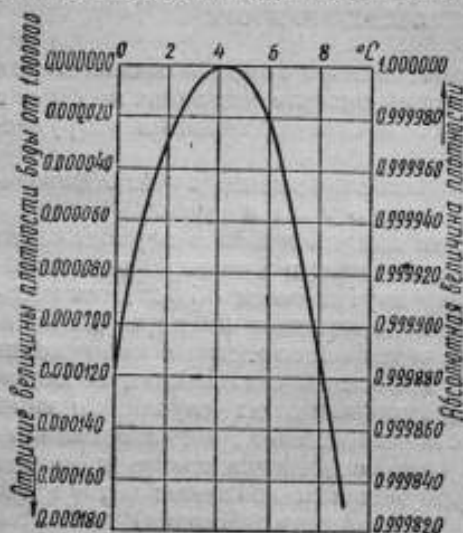


Рис. 1. Зависимость плотности воды от температуры.

замерзания воды с увеличением давления понижается примерно на 1° на каждые 130 ат ; г) вода обладает наибольшей теплоемкостью по сравнению с другими телами; при переходе же в твердую фазу теплоемкость уменьшается почти вдвое; при повышении температуры от 0° теплоемкость вначале падает, затем после достижения 27° растет (см. рис. 2); д) теплота плавления у воды больше, чем у других жидкостей, и равна 80 кал .

Аномалии воды, по мнению ряда исследователей, объясняются особенностью молекулярной ее структуры.

Не вдаваясь в подробное рассмотрение различных воззрений, посвященных анализу строения воды [1], остановимся вкратце на гипотезах, получивших наибольшее распространение.

Согласно воззрениям, высказанным еще Пирро (1827), подтвержденным Уайтингом (1884) и развитым впоследствии Рентгеном, Таманом и др., вода состоит из трех видов молекул: моногидроль (H_2O), дигидроль ($(H_2O)_2$) и тригидроль ($(H_2O)_3$). Позднейшими же исследованиями было установлено наличие удвоенных и учетверенных тригидролей, т. е. $(H_2O)_6$ и $(H_2O)_{12}$.

Соотношение числа тех или иных молекул при данной температуре определяет характер изменения плотности воды.

Так, при охлаждении воды, находящейся при температуре выше 4° , плотность ее по Раману повышается, как результат уве-

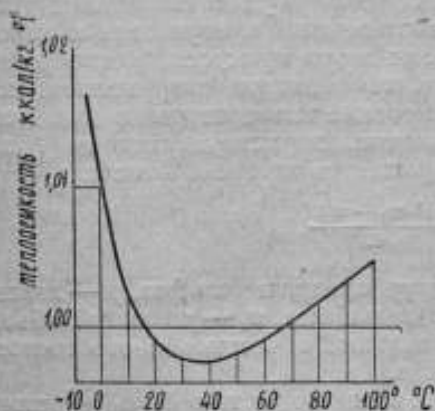


Рис. 2. Зависимость теплоемкости воды от температуры.



Рис. 3. Диаграмма состояния воды.

личения % содержания наиболее плотных молекул $(H_2O)_2$. Дальнейшее охлаждение воды сопровождается увеличением % содержания относительно менее плотных молекул $(H_2O)_3$, что и вызывает уменьшение плотности при температурах ниже 4° .

Увеличение объема воды при замерзании, а также изменение теплоемкости может быть объяснено, на основе воззрений Бернеля и Фаулера, тем, что при плавлении происходит не только переход молекул из координированного в беспорядочное состояние, но также изменение внутренней структуры самих молекул.

По мнению этих авторов, увеличенная скрытая теплота плавления льда объясняется, исходя из четырехкоординатной

(тетраэдрической) структуры воды, разрушением отдельных связей между молекулами, для чего требуется большая затрата тепловой энергии.

Позднейшие исследования показали, что сами элементы Н и О, входящие в состав водяной молекулы, имеют несколько разновидностей: были открыты более тяжелые изотопы водорода H^2 и более тяжелые изотопы кислорода O^{17} и O^{18} .

Комбинации различных атомов водорода и кислорода дают возможность получить восемнадцать разновидностей воды.

Переход жидкой фазы в твердую происходит при подвижном или динамическом состоянии фаз, причем обе фазы непрерывно превращаются одна в другую. Если вода не подвергается нагреванию или охлаждению, то в одинаковые промежутки времени происходит обмен одинаковых количеств частиц, как с той, так и с другой стороны.

Всякий приток или отток тепла будет сопровождаться нарушением равновесия и постепенным превращением одной фазы за счет другой. Во время этого процесса, несмотря на приток тепла или охлаждение, температура соприкасающихся фаз остается постоянной. Изменение температуры от давления и связь ее с другими величинами, характеризующими фазы до и после превращения, выражается законом Томсона:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{A(v_2 - v_1)}{L},$$

где T — абсолютная температура превращения фаз, p — давление, A — термический эквивалент работы, v_1 — удельный объем начального состояния, v_2 — удельный объем конечного состояния, L — теплота изменения фаз.

Графически этот закон, как известно, может быть выражен системой трех линий (рис. 3): линией кипения, линией плавления и так называемой линией возгонки [2]. Если состояние тела завершается точкой, расположенной внутри какой-нибудь области, то, как говорят, оно находится в устойчивом равновесии. Если же точка находится на линии раздела двух фаз, то возможно одновременное существование их обеих.

Следует отметить особенность направления линии плавления для воды. Так как удельный объем воды меньше удельного объема льда, то при плавлении $\frac{dT}{dp}$ отрицательно, т. е. тангенс угла наклона касательной к кривой в данной точке отрицателен; это означает, что кривая плавления направлена вниз, в отличие от тех тел, которые при плавлении расширяются.

В некоторых случаях в области несколько ниже кривой плавления вода может находиться в жидкой фазе: это соответствует переохлаждению воды. В таком состоянии вода весьма легко выделяет кристаллы льда, почему представление о переохлаждении воды аналогично представлению о перенасы-

щенном растворе, в особенности если рассматривать жидкую воду как раствор молекул льда в воде (воззрения Сезерленда и др.).

С точки зрения взглядов Бернеля и Фаулера, в период переохлаждения происходит изменение структуры молекул жидкости — последняя постепенно принимает структуру молекул твердого тела.

Переохлаждение воды при спокойном ее состоянии может достигать весьма низкой температуры (по данным Дебрэ и Дофура, до -20°). В водотеках переохлаждение воды достигает сравнительно небольшой величины (порядка нескольких сотых градуса).

В период переохлаждения воды происходит выделение ледяных кристаллов и образование так называемого внутриводного или донного льда.

Необходимость переохлаждения воды при кристаллизации внутриводной массы вытекает из того, что процесс кристаллизации сопровождается выделением скрытой теплоты плавления, отвод которой от места образования кристалла, имеющего температуру 0° , возможен лишь при наличии температурного градиента между кристаллом и окружающей его средой. Для поддержания же переохлажденного состояния воды по мере кристаллизации необходим отвод тепла из водной массы, что и происходит при наличии обнаженной водной поверхности. Согласно воззрениям В. Я. Альтберга, ядрами кристаллизации являются твердые частицы, находящиеся в толще потока и у дна.

Благодаря турбулентному движению потока в реках происходит более или менее полное перемешивание различных слоев воды, в силу чего тепло с поверхности на глубину переносится не только за счет молекулярной теплопроводности, но также и за счет турбулентной теплопроводности, которая в десятки тысяч раз выше молекулярной. Этим и объясняется возможность быстрого охлаждения потока при турбулентном движении.

Прилипание кристаллов внутриводного льда к различным поверхностям зависит от характера сил, действующих на границе раздела твердое тело — вода.

Следует различать: силы взаимного притяжения молекул; силы валентности, являющиеся результатом недостаточной валентной насыщенности молекул, и, наконец, электростатические силы. Указанные три категории сил создают на поверхности раздела твердое тело — вода силовое поле, в значительной мере влияющее на характер происходящих здесь процессов.

В частности, от действия этих сил зависит явление смачивания тела водою. Если силы, действующие между молекулами воды, меньше сил притяжения между молекулами данного

тела и воды, то поверхность тела покрывается пленкой воды — тело смачивается водой. Если силы, действующие между молекулами воды, больше сил между молекулами тела и воды, то тело не смачивается и вода находится на поверхности тела не в виде пленки, а в виде легко отделяющихся капель.

Тела, смачиваемые водой, носят название гидрофильных, несмачиваемые — гидрофобных. К гидрофильным телам относятся кристаллические вещества, как кварц, силикаты, кальций, окисленные минералы и т. д. К гидрофобным телам — каучук, парафин, органические пластмассы, битумы, лаки, краски. Металлы смачиваются не сразу, очевидно, вследствие наличия на их поверхности слоя адсорбированного воздуха.

Чем гидрофильнее тело, т. е. чем оно легче смачивается водой, тем оно ближе по своей структуре к воде, и наоборот: тела гидрофобные весьма отличаются по своей структуре от воды. Пленка воды, покрывающая поверхность гидрофильного тела, играет большую роль в образовании и осаждении внутриводного льда. Адсорбированный поверхностный слой воды отличается от свободной жидкости более устойчивым положением молекул и их ориентировкой.

На основании наблюдений Пиотровича над образованием кристаллов на поверхности различных тел, можно следующим образом характеризовать процесс осаждения кристаллов на поверхности тел, погруженных в воду: около гидрофильных тел, а также у поверхности кристаллов внутриводного льда, находящихся в потоке, существует малоподвижный адсорбированный слой воды; рост кристаллов происходит за счет молекул, находящихся в этом слое. При переохладении воды до $-0,05^\circ$ жидкие кристаллы переходят в фазу льда лучевой формы.

Между молекулами тела и малоподвижными молекулами жидких кристаллов, находящимися в адсорбированном слое, появляются силы взаимодействия, зависящие от строения взаимодействующих молекул, от расстояния между ними, а также от температуры тела и воды.

Образование кристаллов в самом адсорбированном слое возможно лишь при большем переохладении воды (ниже $-0,05^\circ$). При меньшем переохладении образование кристаллов на поверхности тела возможно исключительно в результате удара плывущих в потоке кристаллов льда. При ударе кристалл льда разрушает пленку адсорбированного слоя и входит во взаимодействие с жидкими кристаллами слоя. Происходит постепенный рост кристалла и уменьшение прослойки между ним и телом с увеличением сил их взаимодействия.

Если температура прослойки повышается и приближается к значениям, близким к 0° , то тепловое движение молекул разрушает кристаллы: силы взаимодействия падают, и кристаллы

льда под влиянием пловучести и скорости течения могут покинуть слой адсорбции.

У гидрофобных тел отсутствует адсорбированный слой воды вследствие того, что силы взаимодействия между молекулами тела и воды недостаточны для удержания слоя воды у поверхности тела. В этом случае адсорбция кристаллов льда поверхностью тела затрудняется, и кристаллы не пристают к поверхности тела.

3. КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА

Шугомер (рис. 4) состоит из резервуара 8 цилиндрической формы. Нижнее днище 1 его — выдвижное для взятия пробы. Открытие и закрытие днища 1 производится при помощи штока 2, который приводится в движение маховичком 3 через посредство муфты и промежуточной штанги. Маховичок насажен непосредственно на верхнюю штангу 4, скрепленную наглухо с цилиндрической муфтой, свободно вращающейся в трубе 5. Вращение верхней штанги и муфты передается нижней штанге 6, имеющей связь с муфтой при помощи квадрата.

Наличие двух штанг вызывается необходимостью увеличить глубину погружения прибора.

¹ Детали конструкции разработаны заводом „Эталон“, изготовившим прибор.

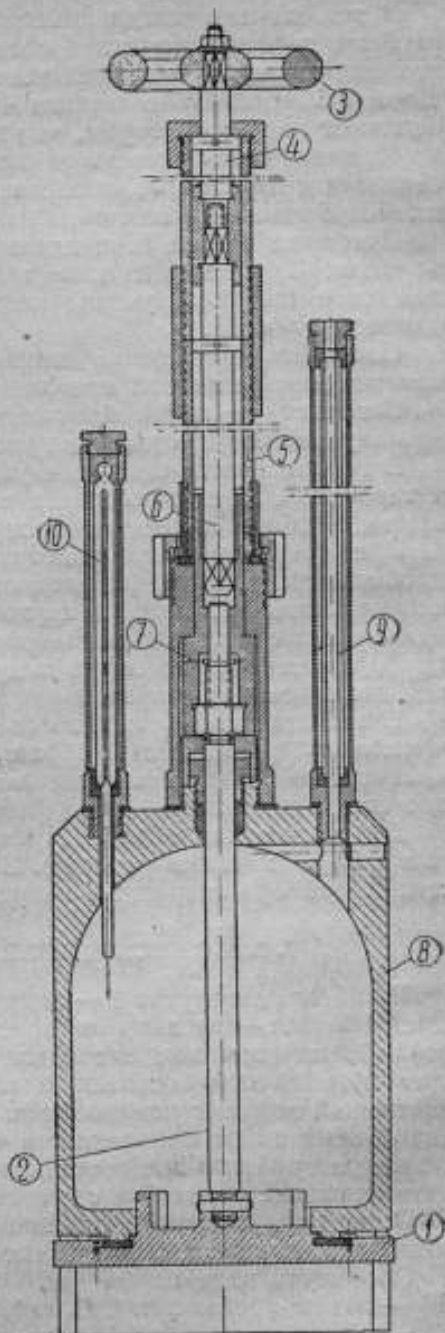


Рис. 4. Разрез шугомера.

В тех случаях, когда приходится работать на небольшой глубине, верхняя штанга 4 может быть вынута из трубы, и маховичок тогда непосредственно надевается на нижнюю штангу 6. Вынимание штанги 4 осуществляется путем разъединения наружной трубы, что достигается вращением муфты.

Нижняя часть штанги 6 при помощи второго квадрата сцеплена с муфтой 7, которая при вращении маховичка 3 и штанги 6 также вращается.

Вращение муфты 7 передается гайке, насаженной резьбой на шток 2. Вращение этой гайки вызывает поступательное движение штока 2, управляющего открытием и закрытием нижнего днища 1.

Плотность прилегания днища 1 к цилиндру достигается при помощи резиновой прокладки.

Плотность в месте прохождения потока через верхнюю крышку цилиндра осуществляется сальником и гайкой.

В верхней части цилиндра укреплены отсчетная трубка 9 и термометр 10 для регистрации температуры воды в момент взятия пробы и после таяния шуги.

Преимущество данной конструкции состоит в том, что взятие пробы не сопровождается сотрясением прибора, как в обычных конструкциях батометра с пружинами.

Во избежание дополнительной кристаллизации при введении прибора в переохлажденную воду цилиндр покрашен с наружной и внутренней сторон.

Так как для правильных показаний шугомера необходимо исключить возможность образования кристаллов на самом приборе, то наилучшим решением вопроса было бы изготовление его из материалов гидрофобных, например из пластмасс.

Для упрощения обработки первый экземпляр прибора изготовлен из металла (железа). Во избежание кристаллизации стенки прибора снаружи и изнутри покрыты лаком.

4. ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИБОРА

Размеры резервуара 8 — наружный диаметр 132 мм и высота 150 мм — приняты в предположении объема пробы около 1,5 литра, что определяется возможностью получить достаточное для отсчета снижение горизонта воды в трубке 9 при ничтожной шугонасыщенности потока (порядка 0,1%). Изменение объема смеси определяется при этом в 0,125 см³, что при диаметре трубки 4 мм (исключая капиллярное поднятие) дает снижение горизонта порядка 10 мм.

Определим применимость прибора при других процентных содержаниях шуги и необходимые для этого размеры трубки 9.

Обозначим через:

V_0 — объем пробы при 0°C, см³,

V_{0n} — объем воды в пробе, см³,

$V_{0л}$ — объем льда в пробе, см³,
 p — процентное содержание шуги в пробе,
 $\delta = 0,92$ — плотность льда,
 Δh — понижение уровня воды в отсчетной трубке, см,
 d_0 — диаметр отсчетной трубки, см.

До таяния кристаллов льда:

$$V_0 = V_{0н} + V_{0л}, \quad (1)$$

$$V_{0л} = \frac{p}{100} \cdot V_0. \quad (2)$$

После таяния, вследствие уменьшения объема $V_{0л}$ до величины $0,92 V_{0л}$ общий объем пробы выразится через

$$V'_0 = V_{0н} + 0,92 V_{0л}. \quad (3)$$

Изменение объема (уменьшение) равно:

$$\Delta V_0 = V_0 - V'_0 = V_{0н} + V_{0л} - (V_{0н} + 0,92 V_{0л}),$$

$$\Delta V_0 = 0,08 V_{0л}. \quad (4)$$

Подставив значение $V_{0л}$, получим:

$$\Delta V_0 = 0,08 \cdot \frac{p}{100} \cdot V_0 = 0,0008 p V_0. \quad (5)$$

Понижение уровня воды Δh в трубке диаметром d_0 определяется по формуле:

$$\Delta h = \frac{\Delta V_0}{\frac{\pi d_0^2}{4}}. \quad (6)$$

5. ВЫВОД ОСНОВНЫХ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ РАБОЧИХ КРИВЫХ

Отсчет по трубке 9 будет точно отражать изменение объема пробы вследствие таяния кристаллов лишь в том случае, если температура пробы в резервуаре 8 до и после таяния кристаллов остается равной 0°. Достигнуть этого, однако, невозможно.

При температуре выше 0° изменение горизонта воды в трубке 9 будет результатом влияния трех факторов: 1) таяния кристаллов льда в трубе 5, 2) изменения объема резервуара 8 при нагревании, 3) изменения объема воды в пробе при нагревании.

Первый фактор влечет за собой понижение уровня воды в трубке 9 вследствие уменьшения объема кристаллов при их таянии. Второй фактор также вызывает понижение уровня воды в трубке 9 вследствие увеличения объема резервуара 8. Третий фактор вызывает вначале при нагревании от 0° до 4° понижение уровня вследствие увеличения плотности воды;

при дальнейшем же нагревании плотность воды уменьшается, объем пробы растет и, следовательно, влияние третьего фактора скажется в уменьшении снижения горизонта, вызванного действием первых двух факторов. Влияние третьего фактора может стать при больших температурах настолько значительным (вследствие увеличения коэффициента объемного расширения воды), что оно компенсирует влияние первых двух. Таким образом, результирующее изменение горизонта будет зависеть от температуры пробы и резервуара в момент отсчета.

Ниже приводится вывод основных соотношений для установления количественной связи между изменением горизонта в трубке $h_0 - h_1$ и отмеченными факторами, зависящими от p , t , α_1 , α_2 , D_0 , H_0 , d_0 , V_0 , где

- p — процентное содержание шуги,
- t — температура, °C,
- α_1 — коэффициент линейного расширения материала сосуда,
- α_2 — то же материала трубки,
- D_0 — внутренний диаметр резервуара, см,
- H_0 — внутренняя высота резервуара, см,
- d_0 — внутренний диаметр трубки, см,
- h_0 — уровень воды в отсчетной трубке при 0°, см.

Обозначим дополнительно через V_1 объем пробы при температуре t° и соответственно через D_1 и d_1 — диаметры резервуара и трубки.

На основании предыдущего имеем:

$$V_{об} = V_0 - \frac{p}{100} V_0 = V_0 \frac{100-p}{100}$$

$$V_1 = (V_{об} + 0,92 V_{об}) \cdot f(t),$$

где $f(t)$ — зависимость изменения единицы объема воды при 0° от изменения температуры — определяется выражением:

$$f(t) = 1 - 6,4807 \cdot 10^{-5} \cdot t + 8,6697 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 2,8211 \cdot 10^{-7} \cdot t^3$$

(для $-10^\circ < t < +4^\circ\text{C}$)

или

$$f(t) = 1 - 6,4268 \cdot 10^{-5} \cdot t + 8,50526 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 6,78977 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 + 4,01209 \cdot 10^{-10} \cdot t^4$$

(для $+4^\circ\text{C} < t < +33^\circ\text{C}$)

Преобразуя формулу для V_1 , получим:

$$V_1 = \left(\frac{100-p}{100} \cdot V_0 + 0,92 \frac{p}{100} \cdot V_0 \right) \cdot f(t) =$$

$$= V_0 \cdot \left(\frac{100-p+0,92p}{100} \right) \cdot f(t) =$$

$$= V_0 \cdot f(t) \cdot \left(\frac{100-0,08p}{100} \right). \quad (7)$$

С другой стороны,

$$V_0 = \frac{\pi D_0^3 H_0}{4} + \frac{\pi d_0^3 h_0}{4}, \quad V_1 = \frac{\pi D_1^3 H_1}{4} + \frac{\pi d_1^3 h_1}{4}; \quad (8)$$

а так как

$$\begin{aligned} D_1 &= D_0 (1 + \alpha_1 t), \\ H_1 &= H_0 (1 + \alpha_1 t), \\ d_1 &= d_0 (1 + \alpha_2 t), \end{aligned}$$

то

$$V_1 = \frac{\pi D_0^3 H_0}{4} (1 + \alpha_1 t)^3 + \frac{\pi d_0^3 h_1}{4} (1 + \alpha_2 t)^3. \quad (9)$$

Отсюда:

$$h_1 = \frac{V_1 - \frac{\pi D_0^3 H_0}{4} (1 + \alpha_1 t)^3}{\frac{\pi d_0^3}{4} (1 + \alpha_2 t)^3}$$

или

$$h_1 = \frac{V_0 f(t) \frac{100 - 0,08 p}{100} - \frac{\pi D_0^3 H_0}{4} (1 + \alpha_1 t)^3}{\frac{\pi d_0^3}{4} (1 + \alpha_2 t)^3}. \quad (10)$$

Из выражения (8) получим:

$$h_0 = \frac{V_0 - \frac{\pi D_0^3 H_0}{4}}{\frac{\pi d_0^3}{4}}.$$

Для определения изменения горизонта в трубке $h_0 - h_1$ будем иметь:

$$\begin{aligned} h_0 - h_1 &= \frac{V_0 - \frac{\pi D_0^3 H_0}{4}}{\frac{\pi d_0^3}{4}} - \frac{V_0 f(t) \frac{100 - 0,08 p}{100} - \frac{\pi D_0^3 H_0}{4} (1 + \alpha_1 t)^3}{\frac{\pi d_0^3}{4} (1 + \alpha_2 t)^3} \\ &= \frac{(V_0 - \frac{\pi D_0^3 H_0}{4}) (1 + \alpha_2 t)^3 - \frac{100 - 0,08 p}{100} V_0 f(t) + \frac{\pi D_0^3 H_0}{4} (1 + \alpha_1 t)^3}{\frac{\pi d_0^3}{4} (1 + \alpha_2 t)^3}. \quad (11) \end{aligned}$$

Отсюда, заменяя в числителе $(1 + \alpha_2 t)^3$ через $1 + 2\alpha_2 t$ и $(1 + \alpha_1 t)^3$ через $1 + 3\alpha_1 t$ (в виду малости квадратов и кубов членов, содержащих α_1 и α_2 , ими можно пренебречь), получим:

$$h_0 - h_1 = \frac{(V_0 - \frac{\pi D_0^3 H_0}{4}) (1 + 2\alpha_2 t) - \frac{100 - 0,08 p}{100} V_0 f(t) + \frac{\pi D_0^3 H_0}{4} (1 + 3\alpha_1 t)}{\frac{\pi d_0^3}{4} (1 + \alpha_2 t)^2}$$

После преобразований имеем:

$$h_0 - h_1 = \frac{V_0 \left[1 + 2\alpha_2 t - \frac{100 - 0,08 p}{100} f(t) \right] + \frac{\pi D_0^3 H_0}{4} (3\alpha_1 - 2\alpha_2) t}{\frac{\pi d_0^3}{4} (1 + \alpha_2 t)^2}. \quad (12)$$

Заменяя в знаменателе $(1 + \alpha_2 t)^2$ через $1 + 2\alpha_2 t$ и решая уравнение (12) относительно p , найдем:

$$p = 1250 \left\{ 1 - \frac{1}{V_0 f(t)} \left[V_0 (1 + 2\alpha_2 t) + \frac{\pi D^2 H_0}{4} (3\alpha_1 - 2\alpha_2) t \right] \right\} + \frac{1250 \cdot \frac{\pi d^2}{4} (1 + 2\alpha_2 t)}{V_0 f(t)} (h_0 - h_t) \quad (13)$$

На основе уравнения (12) строятся семейство кривых для

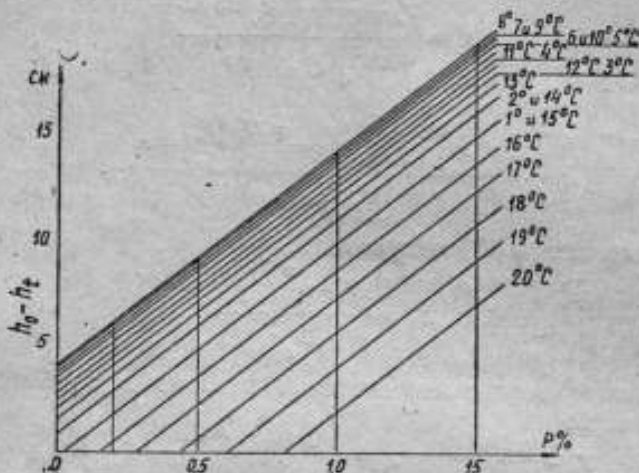


Рис. 5. Зависимость изменения уровня воды в отсчетной трубке шугомера от процента шугнасыщенности при данной температуре

$$p = \Phi(h_0 - h_t) \text{ при } t = \text{const}$$

разных p при заданных размерах и материале сосуда (см. рис. 6).

Уравнение (13) дает непосредственную зависимость:

$$p = \Phi(h_0 - h_t)$$

для разных t (см. рис. 5).

6. СПОСОБ ПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИБОРОМ И ЕГО ПРИМЕНИМОСТЬ

Для определения расхода шуги при помощи описанного прибора в створе реки, где производятся измерения, намечается ряд вертикалей, а в зависимости от характера распределения шуги по вертикали — число точек взятия пробы (от 2 до 5). Увеличение числа точек взятия пробы, вообще

говоря, нежелательно в связи со стремлением сокращения периода наблюдений.

Погружая прибор при закрытом днище на определенную глубину, где предположено взятие пробы, приводят во вращение маховичок, управляющий открытием дна. Цилиндр и отсчетная трубка наполняются смесью шуги с водой. Обратным вращением маховичка закрывают днище, после чего прибор вынимается из воды.

Путем небольшого наклона сливают некоторое количество воды из отсчетной трубки, чтобы получить начальный отсчет по трубке, который и фиксируется вместе с температурой воды. Затем прибор погружается в термостат или оставляется просто в помещении с температурой выше нуля.

После того как произойдет нагревание прибора до температуры 5—10° и шуга растает, производится второй отсчет по термометру и трубке. По разности отсчетов при данной температуре по соответственным кривым (рис. 5) определяется процентное содержание шуги.

Для осуществления измерения расхода шуги гидрометрическая станция должна быть снабжена комплектом шугомеров и иметь нескольких наблюдателей. В этом некоторое неудобство указанного способа. Однако он дает возможность получить значение расхода шуги, отнесенное к строго определенному моменту времени, что не имеет места при применении какого-нибудь другого способа.

Преимуществом данного метода является простота манипуляций при отсчете и обработке. Получив среднее процентное содержание шуги на вертикали, исходя из участковых расходов воды, измеренных обычным способом, определяют участковый расход шуги, а затем и полный расход.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фрицман. Тяжелая вода. Список приведенных в данной книге работ включает 699 названий статей, посвященных этому вопросу.
2. Вейнберг. Лед, стр. 25.

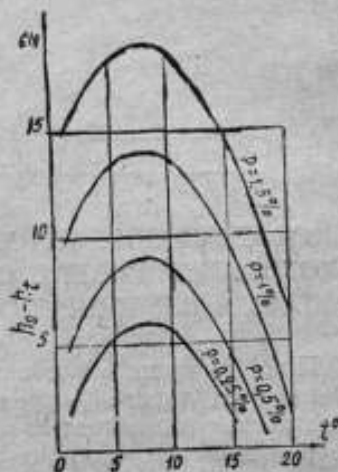


Рис. 6. Зависимость изменения уровня воды в отсчетной трубке шугомера от температуры при данном проценте шугонасыщенности.

$$h_0 - h_t = \varphi(t) \text{ при } p = \text{const.}$$

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АНЕМОМЕТРА С ГАЛЬВАНОМЕТРОМ ОБЫЧНОГО ТИПА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

При изучении колебаний воздушных потоков с использованием осциллографа приходится считаться главным образом только с инерционностью нагретой проволоки теплового анемометра, так как инерция подвижной системы осциллографа ничтожна. В том же случае, когда изучаются колебания большого периода (т. е. малой частоты), приходится пользоваться гальванометрами обычного типа, обладающими значительными периодами собственных колебаний, надо считаться также и с инерционностью подвижной системы самого гальванометра.

Вопрос о взаимодействии нагретой проволоки переменной температуры и гальванометра является весьма сложным и полного теоретического решения до сих пор не имеет. Поэтому весьма существенно было установить опытным путем, как ведет себя система: нагретая нить — гальванометр, если подвергнуть нить действию пульсирующего потока, изменяющегося по заранее известному синусоидальному закону.

Известный голландский гидромеханик И. Бюргерс (Дельфт) дает следующее решение задачи об амплитуде колебаний вследствие инерции разогретой проволоки и гальванометра [1].

Пусть θ есть разность температуры нити и воздуха и $\bar{\theta}$ — ее среднее значение.

Возьмем уравнение гальванометра в обычной форме:

$$m\ddot{\varphi} + l\dot{\varphi} + k\varphi = f(\theta - \bar{\theta}), \quad (1)$$

в правой стороне которого стоит функция от колебаний температуры нити с течением времени, определяющая вынужденные колебания подвижной системы гальванометра, а в левой m, k, l — общеизвестные постоянные, φ — угол поворота стрелки гальванометра.

Бюргерс дает решение этого уравнения в нижеследующей комплексной форме:

$$\varphi = - \frac{f b e^{i \omega t}}{i} \cdot \frac{1}{N}, \quad (2)$$

$$\text{где } N = \left(1 + \frac{i \omega k}{i} - \frac{m \omega^2}{i}\right) \left(1 + \frac{i \omega}{\lambda}\right). \quad (3)$$

Здесь b и λ — постоянные и ω — угловая частота пульсации потока воздуха.

Когда $\omega \rightarrow 0$, $N = 1$, а когда $\omega \rightarrow \infty$, то $\varphi \rightarrow 0$.

Угловая частота пульсаций потока воздуха определяется по формуле:

$$\omega = 2 \pi \nu = \frac{2 \pi}{T},$$

где ν — частота и T — период. При этом предполагается, что скорость потока изменяется по закону синуса или косинуса; в комплексной форме это может быть записано:

$$V = \bar{V} + a e^{i \omega t}, \quad (4)$$

где a — амплитуда колебаний незначительной величины.

Входящая в равенство (2) постоянная b вычислена Бюргерсом на основании общеизвестной формулы Кинга для охлаждения тонких нитей в потоке воздуха также в предположении закона (4):

$$b = \frac{a \bar{\theta} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial v}}{0,24 i^2 R_0},$$

где i — сила тока, нагревающего нить и R_0 — начальное сопротивление нити.

Разность $\bar{\theta} - \bar{\theta}$ можно вычислить также по формуле Кинга; в предположении закона пульсаций (4) эта разность оказывается равной

$$\bar{\theta} - \bar{\theta} = - \frac{b e^{i \omega t}}{1 + \frac{i \omega}{\lambda}},$$

здесь $\lambda = \frac{0,24 i^2 R_0}{c \bar{\theta}}$ и c — теплоемкость проволоки.

Однако выбор зависимости вращающего момента от разности температур $\bar{\theta} - \bar{\theta}$, т. е. функции $f(\bar{\theta} - \bar{\theta})$, настолько затруднителен, что Бюргерсу, повидимому, по этой причине, не удалось исследовать амплитуду колебаний гальванометра полностью и он ограничился рассмотрением лишь величины N , характеризующей уменьшение амплитуды колебаний гальванометра.

После ряда преобразований, вводя угловую частоту соб-

ственных колебаний гальванометра n_0 , модуль комплексного числа N , мы можем привести к виду:

$$|N| = \sqrt{1 + \frac{\omega^2}{n_0^2} \left(2 - 4k + \frac{n_0^2}{\lambda^2}\right) + \frac{\omega^4}{n_0^4} \left(1 - \frac{2n_0^2}{\lambda^2}\right) + \frac{\omega^6}{n_0^6} \cdot \frac{n_0^2}{\lambda^2}} \quad (5)$$

Эту формулу можно упростить надлежащим выбором нагреваемой проволоки, которая характеризуется постоянной λ , и постоянных гальванометра.

Положим:

$$4k = 2 + \frac{n_0^2}{\lambda^2} \text{ и } \lambda^2 = 2n_0^2,$$

тогда формула (5) примет вид:

$$|N| = \sqrt{1 + \frac{\omega^6}{n_0^6}}$$

Отсюда следует, что, когда период собственных колебаний гальванометра приближается к периоду изучаемых пульсаций потока, гальванометр быстро теряет восприимчивость к пульсациям.

Скудость изложенного теоретического материала заставила нас поставить ниже описываемые опыты с целью решить вопрос, может ли обычного типа гальванометр в достаточной мере правильно записывать колебания, если частота последних невелика. Для опытов был взят аperiодический гальванометр Молля, время успокоения подвижной части которого равно 2 сек.

Экспериментальная часть

Исследование вопроса о возможности применения гальванометра обычного типа в соединении с термоэлектрическим анемометром к изучению колебаний воздушного потока малой частоты производилось с помощью установки, схематически изображенной на рис. 1 и 2.

Механическая часть этой установки (рис. 1) представляет собою столик 1, на котором укрепляется термоэлектрический анемометр 2 системы К. Н. Васильева, могущий с помощью кривошипно-шатунного механизма 3 и системы передач 4 от мотора 5 совершать колебательные движения синусоидального характера сравнительно большого периода, от 0,8 до 4,5 сек.

Электрическая часть установки (рис. 2) включает в себе термоэлектрический анемометр 1 системы К. Н. Васильева с горизонтальной нитью; нить накала анемометра нагревается до некоторой температуры от батареи аккумуляторов 4, при чем сила тока накала может регулироваться посредством реостата 5 и контролироваться с помощью милли-

амперметра 3. Изменения температуры нити анемометра, возникающие вследствие движения его в воздухе с различными скоростями, фиксировались с помощью термопары (составляющей неотъемлемую часть анемометра) и гальванометра Молля 2. С целью уменьшения чувствительности гальванометра последний был зашунтирован посредством сопротивления 9. Для получения непрерывной записи показаний гальванометра была использована фотокамера с барабаном 8, который получает вращение от часового механизма. Зеркальце гальванометра освещалось при посредстве осветителя 7, который получал питание от трансформатора 6, включенного в осветительную сеть.

Наши опыты имели целью установить, насколько правильно система термоэлектрический анемометр — гальванометр может

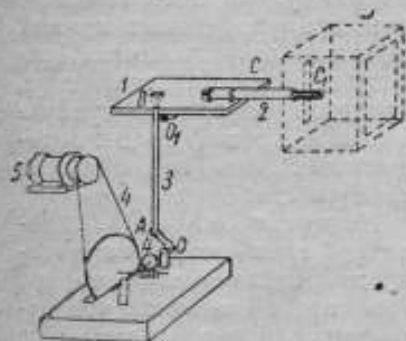


Рис. 1. Схема установки для исследования возможности применения гальванометра к измерению пульсации потока (механическая часть).

1 — колебательный столик; 2 — термоэлектрический анемометр; 3 — кривошипно-шатунный механизм; 4 — червячная и ременная передачи; 5 — электромотор.

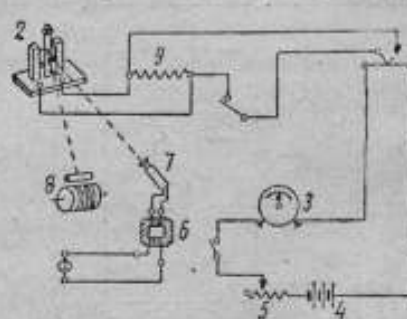


Рис. 2. Схема установки для исследования возможности применения гальванометра к измерению пульсации потока (электрическая часть).

1 — термоэлектрический анемометр; 2 — гальванометр Молля; 3 — миллиамперметр; 4 — батарея; 5 — реостат; 6 — трансформатор; 7 — осветитель и гальванометр; 8 — фотокамера с вращающимся барабаном; 9 — добавочное сопротивление (шунт).

отображать колебательные движения (пульсации) в отношении периодов колебаний, фазы и амплитуды их.

Чтобы получить возможность определять периоды колебаний и судить о фазах механических и электромеханических (гальванометр) колебаний по записи, цепь осветителя автоматически разрывалась всякий раз, когда колебательный столик завершал цикл движения. Масштаб времени на записи, к сожалению, за отсутствием подходящего прерывателя тока (хронографа), наносился путем перекрывания пучка света рукой через каждые 5 секунд, отсчет которых производился выбиванием соответствующего такта.

Как было выше указано, при проведении опытов мы исполь-

зовали термоэлектрический анемометр с горизонтальной нитью. Отличительной чертой этого прибора является некоторое расхождение градуировочных кривых при градуировке анемометра в двух положениях, разнящихся на 180° . Это обстоятельство, может быть, очевидно, объяснено механическими особенностями конструкции анемометра, заключающимися в том, что стержни, несущие нить накала и концы термопары, расположены так, что в одном случае нить накала подвергается действию невозмущенного потока, тогда как во втором случае поток, по видимому, несколько возмущается движущимися впереди стержнями, несущими концы термопары. Это явление не имеет значения при измерении скоростей, направление которых более или менее постоянно, но в нашем случае, когда направление движения изменяется на 180° , пренебрегать этим явлением нельзя. Вообще следует иметь в виду, что использование

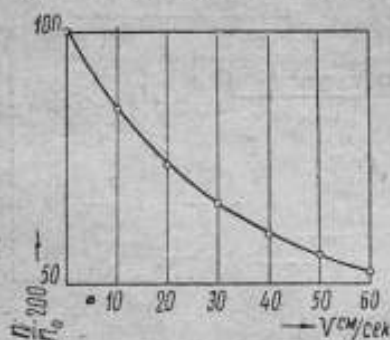


Рис. 3. Средняя градуировочная кривая термоэлектрического анемометра.

в особенности на малых скоростях, производится при помощи так называемой ротативной машины; воспользоваться же этой машиной мы не могли вследствие ремонта здания. Поэтому при обработке записей колебаний мы пользовались средней градуировочной кривой, которая в виде графика зависимости $\frac{n}{n_0}$ от v и представлена на рис. 3, где v — скорость движения воздуха, n — показание гальванометра при скорости v , n_0 — показание гальванометра при $v = 0$.

Как метод нанесения масштаба времени, так и применение анемометра с горизонтальной нитью мы считаем допустимым на первом этапе работы, когда нас интересует более качественная сторона дела, чем количественная.

При проведении эксперимента через нить накала анемометра пропускался ток силой в $0,08-0,09$ а, сопротивление шунта гальванометра составляло $0,6$ ом, лампочка осветителя работала от ветви трансформатора в 12 в, барабан фотокамеры

вращался со скоростью 1 оборот в 65 секунд; записи показаний гальванометра производились при частоте колебаний столика от 15 до 70 в минуту с максимальной скоростью термопары анемометра от 10 до 50 см/сек.

Следует отметить, что для устранения возмущающего действия стержня анемометра приемная часть последнего помещалась в специальный ящик и двигалась в особой прорези, тогда как стержень оставался вне ящика (на рис. 1 изображено пунктиром).

Был произведен ряд записей показаний гальванометра, но окончательной обработке подвергались три ленты. Общий вид записи показаний гальванометра, приемной частью которого является термоэлектрический анемометр, помещенный на колебательный столик, представлен на рис. 4.

На рис. 5 представлен другой образец записи, характерной особенностью которого является то, что максимальный нагрев

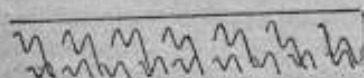


Рис. 4. Общий вид записи показаний гальванометра.



Рис. 5. Образец записи показаний гальванометра, когда максимальный нагрев проволоки анемометра при малых скоростях больше, чем проволоки, находящейся в покое.

проволоки при малых скоростях больше, чем проволоки, находящейся в покое. Нужно иметь в виду, что это явление не случайное. Оуэр [2], говоря о значении температуры проволоки при малых скоростях, замечает, что, если температура проволоки слишком мала, прибор будет недостаточно чувствителен; кроме того, в силу влияния изменений температуры окружающего воздуха n_0 будет более непостоянным, чем при высокой температуре проволоки. С другой стороны, при слишком высокой температуре наблюдается следующее любопытное явление. При очень малых скоростях v значения n больше, чем значения n_0 (при $v=0$). Это показывает, что температура проволоки не уменьшается, а увеличивается с увеличением ско-

рости до некоторых малых величин. При силе тока накала $i=0,08$ а это явление не имеет места, а при $i=0,09$ а оно проявляется полностью. Следовательно, при $i=0,09$ а нагрев достигает высокой температуры.

Образец записи, изображенный на рис. 4, совершенно ясно показывает сдвиг фаз порядка 90° . Разрыв цепи осветителя происходит, в действительности, когда правая часть столика занимает крайнее низшее положение, т. е. когда скорость проволоки анемометра близка к 0; на прилагаемом же образце записи разрыв происходит, когда скорость близка к максимальной (сдвиг фаз на 90°).

На основании записей рис. 4 и 5 можно заключить, что значения максимальной скорости, даваемые анемометром, когда столик проходит среднее положение, неодинаковы при движении столика сверху вниз и наоборот, при чем одно из этих значений значительно меньше другого. С увеличением скорости движения анемометра амплитуды скоростей уменьшаются, и при некоторых значениях скорости порядка $32,5$ см/сек (по анемометру) меньший максимум совсем исчезает. Это явление как бы показывает, что система термоэлектрический анемометр — гальванометр не успевает следить за движением столика, и половина периода пропадает. С другой стороны, неравенство максимальных скоростей, показываемых анемометром при прохождении им одной и той же точки пути в двух взаимно противоположных направлениях, может быть поставлено в зависимость от показаний самого анемометра.

Для удобства расшифровки записей колебаний системы термоэлектрический анемометр — гальванометр мы применили систему, представленную в табл. 1.

С изменением скорости кривошипа изменяется период (частота) колебаний столика, меняются линейные скорости и амплитуды точек предметов, связанных со столиком.

В табл. 1 2-й столбец содержит значения n_0 , т. е. начальные показания системы анемометр — гальванометр, соответствующие скорости движения анемометра при $v=0$; 3-й столбец заключает $n_{ср}$, т. е. отклонения системы, соответствующие средней скорости движения анемометра (определяемой прямой, проведенной, как ось симметрии кривой записи); в 4-м столбце n_{max} , т. е. показания гальванометра, соответствующие максимальным скоростям движения анемометра. Все три величины n_0 , $n_{ср}$, n_{max} снимаются непосредственно с ленты и измеряются в мм. 5-й и 6-й столбцы дают соответственно отношения $\frac{n_{ср}}{n_0}$ и $\frac{n_{max}}{n_0}$. Определив эти отношения и пользуясь графиком зависимости $\frac{n}{n_0}$ от v (рис. 3), получаем значения средней и макси-

Таблица 1

Определение скоростей, амплитуд и периодов колебаний столбика по зависн колебаний системы термоэлектрический анемометр — гальванометр

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Примечание
№ записи	n_0 мм	$n_{ср}$ мм	n_{max} мм	$\frac{n_{ср}}{n_0}$	$\frac{n_{max}}{n_0}$	$v_{ср}$ см/сек	v_{max} см/сек	Δv см/сек	T_{max} сек.	$T_{3/4}$ сек.	$\frac{T_{max}}{T_{3/4}}$	
1	96,0	89,0	74,5	0,927	0,776	4,5	16,0	11,5	3,82	4,64*	0,82	* Каждое из значений $T_{3/4}$ представляет среднее из 10 измерений, взятых по всей длине записи. Масштаб времени был также определен как среднее из 10 измерений.
2	96,0	68,5	65,0	0,714	0,677	22,5	27,5	5,0	1,74	1,72*	1,01	
3	96,0	62,0	60,5	0,646	0,630	32,5	35,0	2,5	1,02	1,23*	0,83	
4	97,5	91,0	74,0	0,933	0,759	4,3	17,5	13,2	4,00	4,19*	0,96	
5	97,5	73,5	68,0	0,754	0,697	18,0	24,5	6,5	2,22	2,21*	1,00	
6	97,5	69,0	66,0	0,708	0,677	25,7	27,5	1,8	1,54	1,60*	0,96	
7	97,5	61,3	60,0	0,629	0,615	35,0	37,0	2,0	0,88	0,92*	0,96	
8	92,0	80,0	70,0	0,870	0,761	8,5	17,5	9,0	3,33	3,04**	1,10	** Масштаб времени определен как среднее из 5 измерений (6,9 сек.); единичное дадо 0,6 сек.
9	92,0	72,0	68,0	0,783	0,739	15,2	19,5	4,3	2,40	2,28**	1,05	*** Определены по единичному измерению масштаба времени. Среднее значение относительных периодов из 9 наблюдений, отмеченных **, равно 0,96.

мальной скорости движения анемометра, которые и записываются в столбцы 7 и 8. Столбец 9-й дает амплитуду колебаний скорости (полуразмах), получаемую как разность максимальной и средней скорости. В столбце 10, обозначенном $T_{\text{мех}}$, приведены периоды колебаний столика, определяемые с помощью секундомера. В столбце 11 $T_{\text{эл}}$ — периоды колебаний системы анемометр—гальванометр, снимаемые с ленты с помощью масштаба времени, показываемого на записи. Столбец 12-й дает отношения периодов $\frac{T_{\text{мех}}}{T_{\text{эл}}}$.

В табл. 1 собраны данные расшифровки 9 записей колебаний системы анемометр—гальванометр, соответствующих 9 периодам колебаний столика в пределах от $T_{\text{мех}}=4,00$ сек. до $T_{\text{мех}}=0,88$ сек. Как следует из столбцов 7 и 8, средние и максимальные скорости, определенные анемометром, изменяются в пределах от 4,0 до 35,0 и от 16,0 до 37,0 см/сек. Соответственно амплитуды $v_{\text{max}} - v_{\text{cp}}$ скоростей изменялись от 1,8 до 13,2 см/сек.

При определении масштаба времени мы пользовались средним значением его, определяя это значение из 10 наблюдений в одном случае и из 5 наблюдений в другом случае. Для суждения о погрешности, возникающей при пользовании масштабом времени, в двух случаях периоды определены по единичному измерению масштаба времени.

Периоды колебаний системы определены во всех случаях как среднее значение из 10 наблюдений.

Из столбца 10 видно, что периоды, определенные расшифровкой записи, изменяются в пределах от $T_{\text{эл}}=4,19$ сек. до $T_{\text{эл}}=0,92$ сек.

Отношения периодов $\frac{T_{\text{мех}}}{T_{\text{эл}}}$ изменяются в пределах от 0,82 до 1,10, в среднем составляя 0,96 (см. примечание к табл. 1). Таким образом мы видим, что периоды, регистрируемые системой анемометр—гальванометр, в среднем с точностью до 4%, совпадают с периодами механических колебаний, хотя отдельные значения периодов разнятся до 18%. Периоды колебаний в двух случаях были определены по единичному измерению масштаба времени и по среднему из 5 наблюдений. Различие между ними составляет 4—5% (см. в табл. 1 значения, отмеченные ** и ***).

Если принять во внимание крайнее несовершенство нанесения масштаба времени на ленту, а также и то, что период колебаний столика, строго говоря, не оставался постоянным в течение всей записи, которая длилась в среднем около 65 секунд, мы можем заключить, что система анемометр—гальванометр регистрирует периоды достаточно точно.

Что же касается сравнения изменений скорости движения анемометра и изменений скорости, регистрируемых системой ане-

мометр—гальванометр, прежде всего необходимо отметить, что амплитуды скоростей уменьшаются с увеличением скорости, как видно из образцов записей на рис. 4 и 5. Это явление находится в полном соответствии с характеристикой анемометра: чувствительность анемометра очень велика на малых скоростях, затем уменьшается и при скоростях порядка 150—180 см/сек становится очень малой.

Была предпринята попытка определить отношения скоростей в пределах одного цикла колебаний. Для этого на двух записях показаний системы анемометр—гальванометр цикл колебаний был разбит на 8 частей и были определены соответствующие значения скоростей (для каждого значения $\pi/4$) по методу, который указан выше; результаты представлены в табл. 2.

В табл. 3 представлены те же значения скоростей (иногда несколько исправленные в соответствии с графиком рис. 6) и значения скоростей приемной части анемометра, определенные на основании кинематических данных колебательного столика; даны также отношения соответствующих скоростей.

Графически изменения скоростей представлены на рис. 6, где сплошными линиями обозначены изменения скоростей в пределах цикла по показаниям системы анемометр—гальванометр, а пунктирными линиями—соответствующие изменения, вычисленные на ос-

Таблица 2
Определение значений скоростей в пределах одного периода колебаний системы анемометр—гальванометр

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n_0	70,0	78,0	89,0	85,0	82,0	88,5	83,0	72,0	70,0	0,741	0,825	0,942	0,910	0,868	0,936	0,878	0,772	0,741
	Значения соответствующих скоростей в см/сек																	
	94,5	70,0	78,0	89,0	85,0	82,0	88,5	83,0	72,0	70,0	0,825	0,942	0,910	0,868	0,936	0,878	0,772	0,741
	Значения соответствующих скоростей в см/сек																	
	94,0	68,0	72,5	76,5	73,5	68,0	68,0	76,0	73,0	70,0	0,723	0,771	0,814	0,723	0,723	0,809	0,777	0,741
	Значения соответствующих скоростей в см/сек																	
										21,2	16,5	12,5	15,2	21,2	21,2	13,0	15,7	19,5

новании кинематических данных колебаний столика. Колебания столика представлены графиками двух полупериодов, один из которых для удобства сравнений повернут на 180° , так как анемометр направления не чувствует и период колебаний для него графически изображается двумя полупериодами.

Таблица 3

Сравнение скоростей колебательного столика (термопара анемометра) и скоростей, регистрируемых системой анемометр—гальванометр, в пределах одного периода колебаний

№	V_1	V_2	$\xi = \frac{V_1}{V_2}$	Примечание	
1	18,2	21,2	0,86	V_1 —скорость движения термопары анемометра, определенная на основании кинематических данных колебательного столика.	
2	12,4	16,5	0,75		
3	0	12,5	—		
4	12,9	15,2	0,85		
5	18,2	22,2	0,83		
6	12,7	21,2	0,60		
7	0	13,0	—		
8	13,5	15,7	0,86		V_2 —та же скорость, определенная с помощью самого анемометра.
9	18,2	19,5	0,93		
10	13,1	19,5	0,67		
11	8,9	11,5	0,77		Значения скорости 1—9 соответствуют одному периоду столика ($T_{\text{мех}} = 2,4$ сек.); значения 10—18 соответствуют другому периоду ($T_{\text{мех}} = 2,4$ сек.).
12	0	2,7	—		
13	9,3	5,7	1,63		
14	13,1	8,8	1,49		
15	9,2	2,7	3,40		
16	0	8,0	—		
17	9,7	17,3	0,56		
18	13,1	19,5	0,67		

На рис. 6 ясно видно смещение фаз колебаний столика и системы анемометр—гальванометр на 90° . На графике в одном случае совершенно отчетливо видно различие двух максимальных скоростей, определяемых системой анемометр—гальванометр при прохождении одной и той же точки пути в двух взаимно противоположных направлениях движения анемометра. На графике второго полупериода этот момент затушеван благодаря условиям записи показаний системы анемометр—гальванометр и обработки этой записи хотя он также имеет место.

Таким образом, на основании только имеющихся материалов трудно установить изменения скорости по показаниям системы анемометр—гальванометр в зависимости от скорости движения приемной части анемометра.

Сдвиг фаз определенно имеет место, но проследить за его изменением с изменением периода колебаний столика на основании имеющихся материалов не представляется возможным.

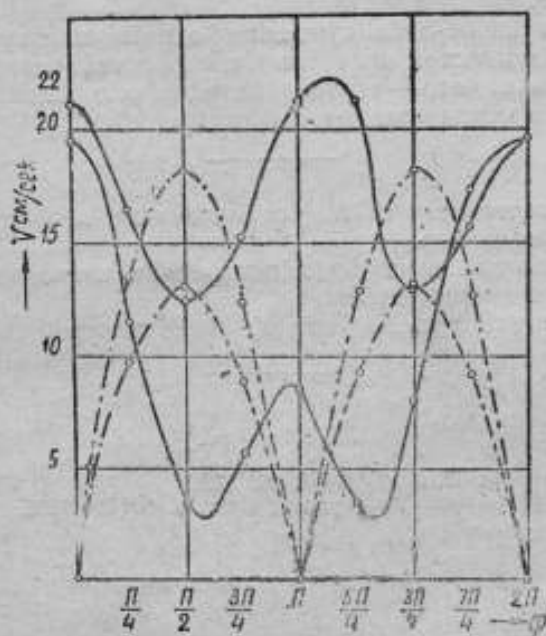


Рис. 6. Графики изменения скорости в пределах одного цикла по наблюдаемым и вычисленным данным.

————— наблюдаемые данные.
 - - - - - вычисленные данные.

Следует отметить также, что система анемометр — гальванометр не дает показаний скоростей, равных нулю (см. хотя бы образец записи на рис. 4). Это можно объяснить наличием возмущений потока, создаваемых движением самой приемной части анемометра, которая колебалась в прорези ящика, хотя она и представляла легкую систему длинных и тонких поддерживающих проволоч, могущую внести лишь незначительные возмущения.

Выводы

На основании проведенного эксперимента можно утверждать, что система термоэлектрический анемометр с горизонтальной нитью и гальванометр может с достаточной для практических нужд точностью измерять периоды колебаний.

Система анемометр—гальванометр дает определенный сдвиг фаз по сравнению с колебанием столика. Амплитуды колебаний скоростей уменьшаются с увеличением скорости движения анемометра.

Вынести какое-либо суждение о взаимозависимости скоростей механических колебаний и скоростей, регистрируемых системой анемометр—гальванометр, на основании имеющихся данных не представляется возможным.

Статья составлена А. А. Часовниковым, непосредственным исполнителем работы.

Е. А. Волкова выполнила построение плана скоростей и ею составлено приложение.

Работа поставлена по идее К. Н. Васильева.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Бюргерс. ЖПФ, IV, № 1, 16, 1927.
2. Э. Оуэр. Измерение воздушных потоков. ОНТИ, 1935.

ПРИЛОЖЕНИЕ

МЕХАНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ УСТАНОВКИ

После ряда опытов остановились на так называемом „колеблющемся столике“. Для приведения его в движение следовало бы воспользоваться кривошипным механизмом с шатуном бесконечной длины, однако желание избежать затрат и воспользоваться имеющимися деталями привело к установке, изображенной на рис. 1, представляющей собой шарнирный четырехсторонник с чрезвычайно малым кривошипом.

Размеры четырехсторонника следующие: $AB = 1200$ мм, $OA = 30$ мм, $BO_1 = 200$ мм, $O_1C = 695$ мм, $OO_1 = 1240$ мм.

На вал O (рис. 1) посажен кривошип OA , соединенный с шатуном AB . К шатуну в точке B шарнирно прикреплена доска BC , вращающаяся вокруг неподвижной оси O_1 . Механизм приводится в действие электромотором постоянного тока, от которого, посредством ремешной и червячной передач, движение передается валу кривошипа. В точке C помещена горизонтально расположенная нить термоэлектрического анемометра, державка которого прикреплена к доске.

Приемная часть анемометра изолирована от окружающего пространства специальным фанерным кожухом (для предохранения от токов воздуха).

При различных угловых скоростях мотора будем иметь различные верхние пределы скорости приемной части анемометра и соответственно различные диаграммы, записываемые кимографом.

Для определения скоростей точки C_1 был применен общезвестный графический метод построения плана скоростей.

План скоростей построен для условной $\omega_0 = 1 \frac{1}{\text{сек}}$. График изменения скорости точки C_1 для $\omega_0 = 1$ приведен на рис. 7.

Действительные скорости для каждого случая получаются умножением величин, взятых по данным рис. 3, на величину

$$i = \frac{\omega}{\omega_0},$$

где ω — действительная угловая скорость кривошипа; ввиду сравнительно небольших угловых скоростей кривошипа последние определялись непосредственно с помощью секундомера.

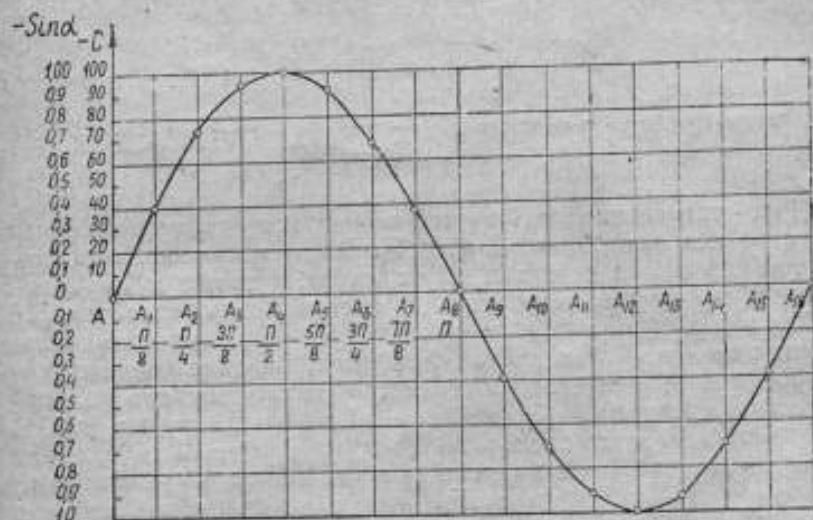


Рис. 7. График изменения скорости в точке C_1 установки.

Исследование проведено при следующих угловых скоростях кривошипа и соответственно максимальных скоростях точки C :

ω об/мин	16	25	27	40	59	68
V_{\max} см/сек	16,0	19,5	24,5	27,5	35,0	37,0

Возможная погрешность при пользовании графиком рис. 7 составляет 1—3 см/сек.

Средняя погрешность по отношению к максимальной скорости 8%; отдельные колебания, в зависимости от скорости, могут достигнуть 6—11%.

К ВОПРОСУ О ТАРИРОВКЕ ПИТО-СТАТИЧЕСКИХ ТРУБОК

Пито-статические трубки нашли широкое применение как средство для измерения скоростей газовых потоков. Ими пользуются при решении технических задач, а также и при проведении научных исследований движений воздушных масс [1].

Характерной особенностью этих приборов, выгодно отличающих их от многих других приборов, предназначенных для тех же целей, является постоянство тарировочного коэффициента по обширной области чисел Рейнольдса и во времени.

Коэффициент пито-статической трубки может быть изменен только механическими повреждениями такого рода, которые легко могут быть обнаружены при поверхностном осмотре. Поэтому пито-статические трубки тарируются только один раз, если они не подвергаются механическим повреждениям.

Комбинированные пито-статические трубки могут быть освобождены от тарировки, если при изготовлении их строго выдерживаются размеры образцового прибора, в особенности в отношении формы наконечника и расстояния от входного отверстия до статических отверстий и державки.

Благодаря этому свойству комбинированные пито-статические трубки приняты в качестве образцовых приборов при тарировке почти всех других приборов для измерения скоростей газовых потоков. Следует, однако, отметить, что при решении задач по измерению газовых потоков при многих обстоятельствах более удобно могут быть использованы другие приборы, но, как правило, тарировка этих приборов всегда производится при помощи пито-статических трубок.

В Советском Союзе до последнего времени было мало заводов, которые выпускали бы стандартные пито-статические трубки. В связи с этим промышленные предприятия и научно-исследовательские учреждения вынуждены изготавливать их своими силами.

Ясно, что при таких условиях строгое выдерживание размеров образцового прибора при изготовлении пито-статических

трубок затруднительно и потому тарировка трубок необходима, тем более, если прибор предназначается для ответственных измерений.

Опыт работы Аэрогидрометрической лаборатории ВНИИМ показывает большую потребность в тарировке трубок. Лишь за один месяц (с 20.IV по 20.V 1941 г.) в лабораторию было представлено на тарировку 19 трубок и почти все различных типов.

Последнее обстоятельство заставило Лабораторию пересмотреть методы испытаний пито-статических трубок, рационализировать их, сделать их менее трудоемкими и более удобными, но без снижения точности тарировки. Результатам работы, проделанной в этом направлении, и посвящена эта статья.

1. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ТАРИРОВКИ ПИТО-СТАТИЧЕСКИХ ТРУБОК

Существует два принципиально отличных способа тарировки пито-статических трубок.

Первый из них называется „абсолютным“ и позволяет получить значение коэффициента пито-статической трубки независимо от какой бы то ни было другой образцовой трубки. При этом коэффициент трубки определяется на особой установке, получившей название „ротативной машины“. Абсолютный способ — сложный, требует целого ряда точных приборов, квалифицированных наблюдателей и много времени. Применяется этот способ, как правило, лишь при исследовании образцовых трубок и при испытании типов.

Второй способ называется „относительным“; он более прост. Испытание трубок по этому способу проводится в аэродинамической трубе, причем коэффициент тарированной трубки определяется по образцовой комбинированной пито-статической трубке.

„Относительным“ способом практически пользуются в аэродинамических лабораториях для тарировки пито-статических трубок.

Рассмотрим этот способ более подробно.

Как известно, уравнение для определения скорости газового потока с помощью комбинированной пито-статической трубки и микроманометра в обычной форме записывается так:

$$v = \xi \sqrt{\frac{2h}{\rho}}, \quad (1)$$

где v — измеряемая скорость,

h — скоростной напор (разность показаний трубки полного напора и статического давления),

ρ — плотность газа,

ξ — коэффициент трубки.

Напишем это уравнение соответственно для образцовой и тарируемой трубок:

$$v_1 = \xi_1 \sqrt{\frac{2h_1}{\rho_1}}, \quad (2)$$

$$v_2 = \xi_2 \sqrt{\frac{2h_2}{\rho_2}}. \quad (3)$$

При испытании образцовая и тарируемая трубки устанавливаются в „точках“ равных скоростей, т. е. $v_1 = v_2$; коэффициент образцовой трубки принимается равным 1, т. е. $\xi_1 = 1$; обе трубки находятся в одной и той же газовой среде, т. е. $\rho_1 = \rho_2$.

Принимая это во внимание, мы найдем коэффициент тарируемой трубки

$$\xi_2 = \sqrt{\frac{h_1}{h_2}}. \quad (4)$$

Тарировка выполняется следующим образом.

В аэродинамической трубе в „точках“ равных скоростей, обычно симметричных относительно оси трубы, устанавливаются тарируемая и образцовая трубки. Желательно, чтобы входные отверстия и отверстия статических давлений трубок лежали соответственно в одном и том же течении, перпендикулярном оси трубы.

Вследствие многообразия типов пито-статических трубок и потому, что за образцовые трубки принимаются, как правило, комбинированные пито-статические трубки какого-нибудь одного типа, то выполнить это условие практически не представляется возможным. Здесь могут быть два компромиссных решения. Если аэродинамическая труба незамкнутого типа, где полное (суммарное) давление обычно мало, статическое давление немногим больше скоростного и лучше принимать мерой скорости статическое давление, то при тарировке необходимо стремиться к тому, чтобы отверстия статических давлений образцовой и тарируемой трубок находились в одном и том же сечении трубы. Другую картину мы имеем в замкнутых трубах с открытой рабочей частью. Там полное давление выше статического и, следовательно, должно служить мерой скорости. В этом случае необходимо стремиться к тому, чтобы входные отверстия образцовой и тарируемой трубок лежали в одном и том же сечении. Понятно, что расположение тех или других отверстий в разных сечениях трубы приводит к ошибкам, величина которых невелика и может быть определена экспериментально, но при указанном расположении трубок она будет минимальной.

Образцовая и тарируемая трубка с помощью резиновых шлангов присоединяется каждая к своему микроманометру (см. рис. 1).

Для определения коэффициента тарированной трубки необходимо установить тот или иной поток в трубе и отсчитать по микроманометрам скоростные напоры, развиваемые образцовой и тарированной трубками; корень квадратный из отношения этих напоров в соответствии с уравнением (4) и даст искомый коэффициент трубки, при оговоренных выше условиях.

С внешней стороны дело обстоит чрезвычайно просто: достаточно на одной скорости отсчитать скоростные напоры по двум микроманометрам и произвести несложное вычисление искомого коэффициента тарированной трубки.

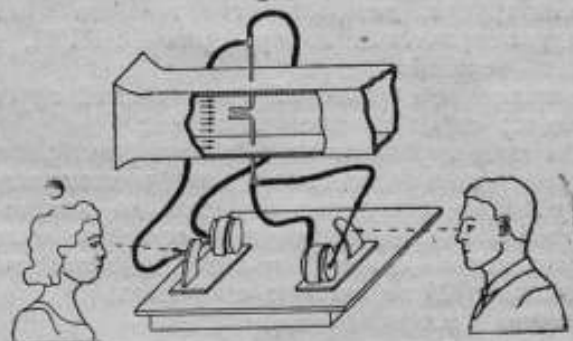


Рис. 1. Схема установки при старом методе тарировки трубок.

На практике дело значительно усложняется. Опыт показывает, что скорость потока в аэродинамической трубе не является постоянной, она изменяется с течением времени в большей или меньшей степени в зависимости от степени совершенства устройства самой трубы, мотора, винта или вентилятора, постоянства напряжения в сети, питающей электромотор, скорости, на которой происходит испытание, и других условий, обуславливающих собой процесс вихреобразования. Указанными причинами определяются величина и частота пульсаций воздушного потока.

Таким образом скорости в „точках“ расположения трубок могут оказаться в определенный момент не равными, независимо от того, что поле скоростей аэродинамической трубы тщательно изучено и что трубки устанавливаются в „точках“ равных скоростей.

Кроме того, резиновые шланги, соединяющие образцовую и тарированную трубки с микроманометрами, равно как и сами трубки, могут иметь различные сопротивления, что также может оказывать влияние на характер пульсаций.

Наконец, микроманометры могут работать не в одной фазе. В то время, когда один микроманометр показывает на-

растание давления (скачок вверх), в другом может происходить уменьшение давления (скачок вниз).

Принимаются, конечно, все меры к тому, чтобы уменьшить пульсации потока, но все же они имеют место в большей или меньшей степени. Это вынуждает брать серии по 10—15 отсчетов показаний микроманометров и производить испытание на ряде скоростей.

2. НЕДОСТАТКИ СТАРОГО МЕТОДА ТАРИРОВКИ ТРУБОК

„Относительный“ метод тарировки комбинированных пито-статических трубок, до последнего времени применявшийся в Аэрогидрометрической лаборатории ВНИИМ, состоял из следующих операций:

- 1) установление образцовой и испытуемой трубок в надлежащих местах аэродинамической трубы;
- 2) соединение трубок резиновыми шлангами с соответствующими, заранее подготовленными микроманометрами;
- 3) определение начальных отсчетов по микроманометрам, если показания последних не установлены на нуль;
- 4) производство последних испытаний (снимаются серии по 10—15 наблюдений) на четырех скоростях;
- 5) перемена мест микроманометров;
- 6) повторение испытаний на тех же скоростях;
- 7) обработка результатов.

Этот метод тарировки пито-статических трубок достаточно трудоемкий, требует двух наблюдателей, „ручной“ перемены мест микроманометров, производства одновременных отсчетов по микроманометрам с колеблющимися жидкостями. Для исключения влияния на результат эксперимента различия микроманометров проводится повторное испытание трубок на тех же скоростях, но при этом микроманометры меняются местами.

Нами были разработаны мероприятия, значительно упрощающие процесс производства испытаний пито-статических трубок, сущность которых излагается ниже.

3. МЕТОД ТАРИРОВКИ ПИТО-СТАТИЧЕСКИХ ТРУБОК ОДНИМ НАБЛЮДАТЕЛЕМ С ПОМОЩЬЮ ДВУХ МИКРОМАНОМЕТРОВ

В этом случае образцовая и тарируемая трубки устанавливаются в аэродинамической трубе, как и в предыдущем испытании, но они присоединяются к микроманометрам через специально сконструированный переключатель давления (см. рис. 2). Последний дает возможность одновременно отсекать давления, развиваемые в трубках и показываемые микроманометрами, так что один наблюдатель может производить отсчеты по обоим микроманометрам (рис. 3). Это обстоятельство делает излишним присутствие второго наблю-

дателя и, больше того, делает показания более достоверными так как отсекаются давления, одновременно действительно существующие в некоторый момент времени, и отсчет показаний прибора производится при мениске, находящемся в по-

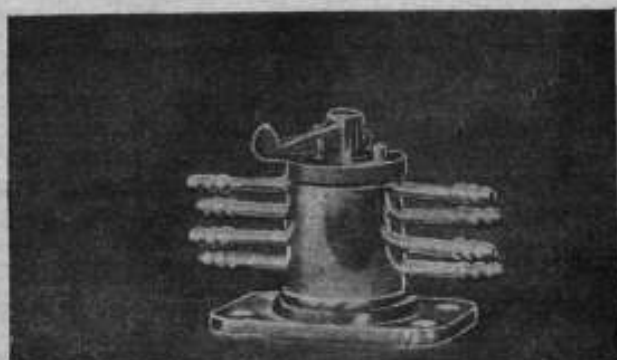


Рис. 2. Переключатель давления.

кое, что исключает субъективность отсчета показаний микроманометра наблюдателем, когда мениск колеблется и правильный отсчет является делом искусства наблюдателя.

В применявшемся ранее в лаборатории методе тарировки трубок с использованием двух наблюдателей принцип одновременности отсчетов показаний микроманометров нарушается с одной стороны, и отсчет показаний производится по колеблющимся менискам манометрической жидкости, что значительно утомляет наблюдателя и понижает точность отсчетов показаний прибора.

Переключатель давления дает возможность производить смену микроманометров простым передвижением ручки переключателя из одного положения в другое, без какого бы то ни было снятия и последующего надевания резиновых шлангов.

Рассматриваемый метод тарировки пито-статических трубок включает снятие 8 серий наблюдений на четырех скоростях, но процесс упрощен: сняв серию наблюдений на одной

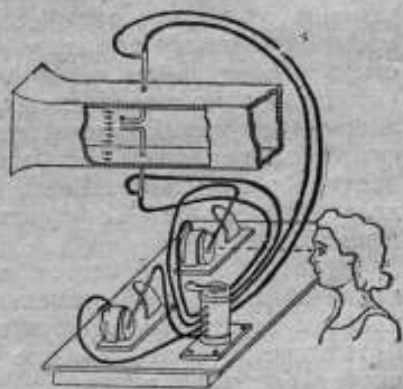


Рис. 3. Схема установки при тарировке трубок одним наблюдателем с помощью одного микроманометра.

скорости, поворотом рукоятки переключателя производят перемену мест микроманометров и на этой же скорости снимают вторую серию наблюдений; так поступают на всех четырех скоростях. Другими словами, скорости воздушного потока в аэродинамической трубе устанавливаются лишь 4 раза, а не 8, как это делалось ранее. Коэффициент трубки определяется как среднее арифметическое из 8 серий наблюдений.

Применение переключателя давления дает возможность производить тарировку трубок одному наблюдателю; наблюдатель значительно меньше утомляется. Точность же результатов тарировки при этом не только не уменьшается, а даже несколько увеличивается. Выигрыш во времени очевиден.

4. МЕТОД ТАРИРОВКИ ПИТО-СТАТИЧЕСКИХ ТРУБОК ОДНИМ НАБЛЮДАТЕЛЕМ С ПОМОЩЬЮ ОДНОГО МИКРОМАНОМЕТРА

Этот метод отличается от предыдущего тем, что здесь обе трубки — и образцовая и тарируемая — через переключатель попеременно присоединяются к одному и тому же микроманометру. Наблюдатель один. Он последовательно производит отсчеты показаний микроманометра, присоединяемого поворотом рукоятки переключателя то к одной, то к другой трубке, причем и здесь отсчет показаний микроманометра производится при манометрической жидкости, находящейся в покое, после того как произведена отсечка давления. Применение этого метода обеспечивает 50%-ную экономию во времени по всему процессу испытания трубки (производство самих наблюдений и обработка их результатов), так как при испытании пито-статических трубок по этому методу снимается лишь 4 серии наблюдений на четырех скоростях. Здесь отсутствует перемена мест микроманометров и последующее повторное испытание. Коэффициент тарируемой трубки определяется как среднее арифметическое из четырех серий наблюдений.

Некоторым недостатком этого метода является невыполнение принципа одновременности отсчетов показаний образцовой и тарируемой трубок по манометрам. Кроме того, этот метод дает несколько менее точные результаты, но обеспечивает большую экономию во времени, меньшую утомляемость наблюдателя, делает излишним второй микроманометр и вполне может быть использован при тарировке трубок для промышленного использования.

5. ЗАПИСЬ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Многолетний опыт Аэрогидрометрической лаборатории в области исследований различных типов приборов для измерений скоростей воздушного потока привел к установлению

определенной системы записи наблюдений и их последующей обработки. При тарировке вито-статических трубок лаборатория останавливалась на системе записи, представленной в табл. 1, 2 и 3.

Обычная таблица содержит 13 колонок (см. табл. 1). 12-я колонка содержит среднее арифметическое значение скоростного напора из 10 наблюдений, а 13-я дает значение тарировочного коэффициента трубки.

Как отмечалось выше, испытание трубок происходит на 4 скоростях с переменной мест микроманометров. Запись показаний при этом занимает 16 строк. Последняя, 17-я строка содержит среднее арифметическое значение коэффициента тарируемой трубки из 8 серий наблюдений. При специальных исследованиях здесь же указывается и вероятная погрешность этого коэффициента.

Указанный выше порядок записи наблюдений применялся и при старом методе тарировки трубок с той лишь разницей, что первые 8 строк содержали записи показаний приборов на 4 различных скоростях, после чего производилась смена микроманометров и повторялось испытание на тех же скоростях.

При тарировке трубок одним наблюдателем с помощью двух микроманометров, как видно из табл. 2, снимают серию наблюдений; затем, произведя смену микроманометров поворотом ручки переключателя, снимают вторую серию наблюдений и только после этого изменяют скорость и переходят к следующим наблюдениям. Эта операция повторяется 4 раза на 4 скоростях.

При тарировке одним наблюдателем с помощью одного микроманометра испытание проводится также на 4 скоростях, но так как перемена мест микроманометров отсутствует, то будет лишь 4 серии наблюдений и всего 9 строк (см. табл. 3).

Обработка результатов наблюдений происходит в следующем порядке: определяют среднее арифметическое значение скоростных напоров по строкам, затем значение коэффициента тарируемой трубки по каждой серии наблюдений и, наконец, среднее арифметическое значение коэффициента из 8 серий наблюдений. Это и будет искомым коэффициент тарируемой трубки.

Когда испытываются образцовые трубки или новый тип трубок, то обработка результатов усложняется. В этом случае дополнительно вычисляются вероятные погрешности среднего арифметического значения скоростных напоров и вероятная погрешность среднего арифметического значения коэффициента трубки из 8 серий наблюдений.

Вычисление вероятных погрешностей проводится по формулам теории погрешностей и приближенных вычислений [2].

Запись наблюдений при тарировке пита-

№ трубки и микрома- нометра	Мгновенные значения скоростного					
	1	2	3	4	5	6
№ 1						
140	25,5	4,5	4,5	4,5	5,0	5,0
№ 3						
863	23,5	3,0	3,3	3,5	4,0	4,0
№ 1						
863	23,5	3,0	4,2	2,5	3,0	3,5
№ 3						
140	24,5	4,5	4,2	4,0	4,5	5,5
№ 1						
140	53,0	3,0	4,0	3,0	3,5	6,0
№ 3						
863	52,5	2,0	2,5	2,5	2,3	4,0
№ 1						
863	51,5	1,0	1,0	2,5	3,3	2,0
№ 1						
140	55,0	4,5	4,0	4,5	4,5	4,5
№ 1						
140	93,0	1,0	0,0	2,5	2,5	0,0
№ 3						
863	93,0	0,5	80,0	0,5	1,0	0,5
№ 1						
863	93,0	3,0	2,0	1,0	0,0	2,5
№ 3						
140	97,0	6,0	6,5	5,0	5,0	6,0
№ 1						
140	128,0	5,0	2,0	5,0	3,5	3,5
№ 3						
863	125,0	3,0	1,0	2,5	2,0	1,5
№ 1						
863	121,0	20,0	19,5	19,5	18,0	20,0
№ 3						
140	125,0	6,0	5,5	5,5	6,5	6,5

 $\varepsilon = 0,994$ 6. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТАРИРОВКИ ТРУБОК
СТАРЫМ И НОВЫМ МЕТОДАМИ

Для того, чтобы апробировать новые методы тарировки пита-статических трубок и ввести их в практику, были проведены испытания 12 трубок различными методами: 10 трубок подвергались испытанию тремя способами, старым и обоими новыми, и 2 трубки двумя способами — старым и одним из новых. Результаты сравнительных испытаний приведены в табл. 4.

Характерной особенностью этих испытаний является следующее: 1) испытание проводилось различными наблюдателями и в разное время, чтобы получить результаты более объек-

статических трубок старым способом

напора				$h_{ср}$	E_h	ε	E_{ε}	
7	8	9	10					
	4,5	5,0	5,0	5,0	24,85	$\pm 0,130$	1,025	$\pm 0,004$
	4,2	4,0	3,8	3,3	23,66	$\pm 0,084$		
	2,4	2,5	3,0	2,0	22,95	$\pm 0,138$	0,970	$\pm 0,003$
	4,5	4,0	4,5	4,2	24,44	$\pm 0,091$		
	3,0	3,0	3,5	2,5	53,45	$\pm 0,066$	1,011	$\pm 0,002$
	1,5	1,5	1,4	2,0	52,22	$\pm 0,162$		
	2,0	2,0	3,5	1,5	52,03	$\pm 0,184$	0,975	$\pm 0,002$
	5,0	4,5	6,5	5,0	54,80	$\pm 0,144$		
	1,5	0,5	3,0	1,5	91,55	$\pm 0,259$	1,007	$\pm 0,002$
	89,0	88,0	1,0	0,0	90,25	$\pm 0,294$		
	1,0	2,0	0,5	5,5	92,05	$\pm 0,338$	0,978	$\pm 0,002$
	6,0	7,5	5,5	7,5	92,20	$\pm 0,196$		
	5,0	2,0	2,5	3,0	123,95	$\pm 0,393$	1,008	$\pm 0,002$
	3,0	0,5	0,0	1,0	121,95	$\pm 0,315$		
	16,5	18,0	22,0	19,0	119,35	$\pm 0,337$	0,976	$\pm 0,002$
	3,0	4,5	6,0	5,0	125,35	$\pm 0,225$		

 $\pm 0,001$

тивные, менее зависящие от опытности и тренировки наблюдателя; 2) никаких особых мер предосторожности как при установке трубок, так и при самом испытании не принималось; так, например, если при производстве отсчета по старому методу выжидали, когда мениск жидкости хоть на мгновение придет в покой или когда заметят его среднее положение, то при испытании трубок по новым методам производили отсчетку давления, совершенно не глядя на микроманометры, и после этого лишь производили отсчет показаний, — очевидно последнее обстоятельство изменяло условия наблюдений в пользу старого метода.

Запись наблюдений при тарировке трубок одним

№ трубки и микрома- нометра	Мгновенные значения скоростного					
	1	2	3	4	5	6
№ 1 140	26,5	6,5	6,8	7,0	7,0	6,5
№ 3 863	26,0	6,0	6,5	6,5	6,0	6,0
№ 1 863	27,0	6,0	7,0	7,0	6,0	6,0
№ 3 140	27,0	7,0	7,5	7,5	7,0	7,2
№ 1 140	52,0	3,0	3,5	2,5	2,2	3,5
№ 3 863	51,5	2,0	2,8	2,0	1,2	4,5
№ 1 863	53,0	2,0	3,5	4,0	2,5	3,0
№ 3 140	54,0	4,0	5,0	5,0	4,0	5,0
№ 1 140	94,0	8,5	2,5	6,0	3,0	3,5
№ 3 863	93,5	7,0	1,5	5,0	3,0	3,0
№ 1 863	93,5	2,5	1,8	2,0	1,0	1,0
№ 3 140	97,0	5,5	6,5	5,0	5,0	5,2
№ 1 140	124,5	7,0	4,5	4,5	4,5	6,0
№ 3 863	124,5	5,5	3,0	3,0	2,5	4,0
№ 1 863	120,5	2,5	1,5	0,0	3,5	1,0
№ 3 140	125,0	6,0	6,0	6,5	7,5	6,0

$\xi = 0,996$

С целью определения точности коэффициентов испытываемых трубок, получаемых разными методами испытаний, были вычислены вероятные погрешности коэффициентов, как указано выше для одной трубки, испытанной всеми тремя способами (см. табл. 1, 2 и 3). Для обработки были взяты данные наблюдений тарировки одной из трубок (без предварительного отбора). Провести эти вычисления для всех трубок мы не могли, — потребовалось бы очень много времени и затрата этого времени вряд ли бы оправдалась, так как результаты обработки испытаний одной трубки, произведенных при про-

Таблица 2

наблюдателем с помощью двух микроманометров

напора				h_{cp}	E_h	ξ	E_ξ
7	8	9	10				
6,5	7,8	8,5	7,5	27,06	$\pm 0,145$	1,009	$\pm 0,004$
6,8	6,8	8,0	7,0	26,56	$\pm 0,136$		
6,2	6,0	6,5	6,0	26,37	$\pm 0,098$	0,984	$\pm 0,002$
7,0	7,8	7,0	7,5	27,25	$\pm 0,071$		
2,0	2,0	2,5	4,0	52,92	$\pm 0,242$	1,007	$\pm 0,003$
2,0	1,8	2,0	2,5	52,23	$\pm 0,195$		
3,5	2,5	3,0	3,0	53,00	$\pm 0,135$	0,984	$\pm 0,002$
5,0	5,0	5,5	4,5	54,80	$\pm 0,117$		
3,5	2,5	3,5	6,5	94,40	$\pm 0,423$	1,005	$\pm 0,003$
2,8	2,0	3,5	3,0	93,43	$\pm 0,362$		
2,0	0,0	0,5	0,0	91,43	$\pm 0,191$	0,980	$\pm 0,002$
5,0	4,8	4,2	3,5	95,17	$\pm 0,215$		
4,0	5,5	2,0	4,5	124,70	$\pm 0,271$	1,005	$\pm 0,002$
3,0	4,5	1,5	3,5	123,50	$\pm 0,265$		
0,0	0,5	0,5	0,5	121,05	$\pm 0,243$	0,982	$\pm 0,001$
5,5	3,5	5,5	5,0	125,65	$\pm 0,220$		

$\pm 0,001$

чих равных условиях, достаточно показательно характеризуют порядок величины погрешности.

Кроме того, приведенные в табл. 4 значения коэффициентов мало отличаются друг от друга, чтобы заподозрить большое расхождение в порядке точности.

Следует отметить, что имевшаяся в нашем распоряжении малая аэродинамическая труба далека от совершенства, пульсации воздушного потока весьма значительны. Очевидно, при испытании трубок в аэродинамической трубе лучшего качества точность результатов может быть значительно повышена.

Запись наблюдений при тарировке трубок одним наблюдателем с помощью одного микроманометра

№ трубки и № микрома- нометра	Мгновенные значения скоростного напора										h_{cp}	E_h	ξ	E_ξ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
№ 1 863	26,0	7,0	7,0	8,5	8,0	7,0	8,0	7,5	8,0	7,5	27,45	$\pm 0,154$	0,988	$\pm 0,004$
№ 3 863	27,5	7,2	7,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	28,17	$\pm 0,115$			
№ 1 863	53,0	2,8	1,5	3,0	2,0	1,5	1,5	2,0	2,8	1,5	52,16	$\pm 0,142$	0,992	$\pm 0,002$
№ 3 863	52,5	3,2	3,5	3,5	3,0	2,5	3,0	3,5	3,0	3,0	53,07	$\pm 0,079$		
№ 1 863	92,5	5,5	6,0	4,0	3,5	5,5	3,5	6,5	5,0	4,5	94,65	$\pm 0,271$	0,992	$\pm 0,002$
№ 3 863	94,0	5,5	6,5	7,0	4,5	6,0	7,5	8,5	6,0	7,5	96,30	$\pm 0,298$		
№ 1 863	123,0	5,0	7,0	5,0	5,0	3,5	1,5	4,0	3,2	3,5	124,67	$\pm 0,320$	0,991	$\pm 0,002$
№ 3 863	126,5	7,2	7,5	6,8	7,5	6,0	6,5	6,5	4,0	5,5	126,40	$\pm 0,224$		

$$\xi = 0,991 \pm 0,001$$

Данные табл. 4 с достаточной убедительностью показывают, что тарировка пито-статических трубок одним наблюдателем с помощью двух микроманометров вполне заменяет старый метод, так как, во-первых, не дает сколько-нибудь значительного расхождения результатов испытаний по сравнению с результатами, полученными обычным способом (если и имеют место небольшие различия в коэффициентах, то, как правило, новый метод дает лучшие результаты), во-вторых, требует лишь одного наблюдателя, а не двух, как ранее, и, в-третьих, создает менее напряженную обстановку при испытании, что не так утомляет наблюдателя при производстве отсчетов показаний приборов.

Из данных табл. 4 следует, что тарировка трубок одним наблюдателем с помощью одного микроманометра также с успехом может применяться в лабораторной практике при испытании трубок промышленного назначения, так как результаты испытания трубок по этому методу не отличаются больше чем на 0,3% от полученных обычным способом. При этом достигается экономия во времени до 50%, как на самом испытании, так на последующей обработке наблюдений. Этот метод требует тоже лишь одного наблюдателя и менее утомителен, а кроме того освобождает еще и один микроманометр.

Результаты испытаний пито-статических трубок различными методами

№ п.п.	№ трубки	Метод испытания			Примечание
		двумя наблюдателями с помощью 2 микроанометров	одним наблюдателем		
			с помощью 2 микроанометров	с помощью 1 микроанометра	
1	Англ. модель	0,99 ₇	0,99 ₇	1,00 ₀	* Было установлено, что во время испытания трубка отклонилась от первоначального положения, чем и вызвано такое значение коэффициента. Последующие испытания полностью подтвердили это заключение. ** Теоретический коэффициент для трубок № 3 равен 0,997. Таким образом испытание по второму методу здесь дало лучшие результаты.
2	2	1,00 ₄	1,00 ₅	1,00 ₁	
3	8	1,00 ₆	1,00 ₅	1,00 ₀	
4	7	0,99 ₉	0,99 ₉	1,00 ₀	
5	39	1,00 ₈	1,00 ₂	1,00 ₄	
6	3 (образц.)	1,00 ₈ *	0,99 ₇	1,00 ₂	
		1,00 ₀	1,00 ₀	1,00 ₀	
7	9 (образц.)	0,99 ₅	0,99 ₆	0,99 ₉	
8	3 (не образц.)	0,99 ₄	0,99 ₆ **	0,99 ₁	
9	4	1,00 ₁	1,00 ₆	1,00 ₄	
10	6937	1,00 ₅	—	1,00 ₇	
11	6	0,99 ₉	—	1,00 ₀	
12	6942	1,01 ₉	1,01 ₈	1,01 ₆	

7. ПРИНЦИП УСТРОЙСТВА И ДЕЙСТВИЯ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ

Переключатель давления (рис. 2) представляет собою небольшой прибор, по существу кран с четырьмя каналами, снабженный 8 штуцерами для резиновых шлангов, но осуществленный так, что при вращении внутреннего тела крана каналы могут быть открыты на-прямую, перекрестно и закрыты, как это видно из рис. 4.

Этот прибор позволяет осуществлять: 1) прямое соединение резиновых шлангов, присоединенных к штуцерам (положение I на рис. 4); 2) перекрестное их соединение, — штуцера (1 и 3) верхние слева соединяются соответственно с нижними (6, 8) справа и наоборот — верхние (2 и 4) справа с нижними (5 и 7) слева (положение II на рис. 4) и 3) одновременное их закрытие (отсечка, положение III).

Благодаря конструкции переключателя и его свойствам представляется возможным производить соединение образцовой и тарируемой трубок с манометрами через посредство переключателя, по желанию производить отсечку давления, менять микроманометры местами и вновь производить отсечку давлений.

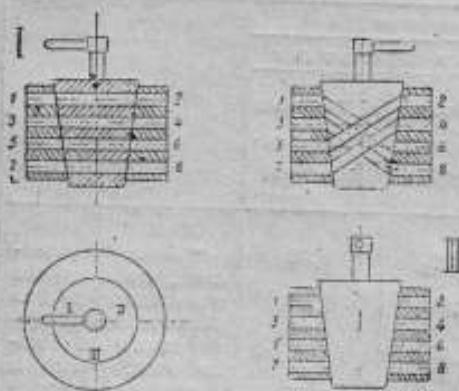


Рис. 4. Схема переключателя давления.

Соединение трубок с микроманометрами посредством резиновых шлангов производится лишь один раз на все испытание. Если при прямом соединении каналов штуцеров образцовая трубка соединялась с микроманометром № 1, а тарируемая — с микроманометром № 2, то при перекрестном соединении каналов штуцеров образцовая трубка будет соединена с микроманометром № 2, а испы-

туемая — соответственно с микроманометром № 1, при чем эта перемена мест микроманометров осуществляется простым перемещением рукоятки переключателя из положения I в положение II.

Выводы

Пересмотр методов тарировки пито-статических трубок привел к разработке двух новых методов: метода „двух микроманометров с одним наблюдателем“ и метода „одного микроманометра с одним наблюдателем“. Экспериментальное исследование показало, что эти методы имеют ряд преимуществ по сравнению с ранее принятым методом, а именно: 1) требуют одного наблюдателя, а не двух; 2) экономят время при тарировке до 50% по сравнению с прежним методом; 3) создают менее напряженную, менее утомительную обстановку во время наблюдений, так как отсчет показаний приборов производится по мениску, находящемуся в покое, а не при непрерывно движущемся, как это было ранее; 4) второй метод требует лишь наличия одного микроманометра; 5) точность показаний при испытании трубки по первому методу несколько выше, чем при старом методе.

Указанные методы приняты Аэрогидрометрической лабораторией ВНИИМ, и ими пользуются при тарировке пито-статических трубок в настоящее время.

В заключение следует добавить, что переключатель давле-

ния может быть с успехом использован, например, при исследовании влияния угла, образованного осью наконечника пито-статической трубки с направлением потока воздуха, на показание этой трубки. Это работа очень трудоемкая и потому применение переключателя дает большую экономию во времени, освобождая одного наблюдателя. Не останавливаясь подробно на деталях, укажем лишь, что эта работа в основном представляет многократное испытание пито-статической трубки на одной и той же скорости, но при различных углах поворота трубки по отношению к направлению потока. Подобного рода исследование было выполнено в лаборатории, и применение переключателя полностью себя оправдало.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Оуэр. Измерения воздушных потоков. ОНТИ, 1935.
2. Проф. М. Ф. Маликов. Точные измерения. Станларгиз, 1935.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ МЕТОДОМ ПРИВИВКИ

(Оборудование и экспериментальная работа лаборатории
по исследованию метода прививки)

1. ОПИСАНИЕ НОВОЙ ВОДОПРОВОДНОЙ УСТАНОВКИ

После теоретического анализа значительного количества материалов по определению расходов воды методом прививки раствора NaCl и производства предварительных опытов для установления точности титрования посредством определения емкости сосуда [1] лаборатория перешла к испытанию этого метода. Пришлось значительно переделать существовавшие ранее в лаборатории водопроводные установки, чтобы иметь возможность производить прививку в тех условиях, в которых погрешность метода была бы, во-первых, наименьшей и, во-вторых, характеризовала бы только самый метод.

Известно, что получаемый по методу прививки расход воды выражается формулой:

$$Q = q \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} \quad (1)$$

Погрешность расхода в измеренном потоке:

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

Величина второго члена правой части выражения (2) представляет собой учетверенную погрешность одного титрования. Она была ранее исследована и выражается примерно в $\pm 0,5\%$.

Что касается величины первого члена, то, как показывает выражение (2), она будет иметь существенное значение при определении расхода потока.

Чтобы получить величину q с наибольшей достоверностью и избежать вредных колебаний в ее значении, пришлось выполнить ряд переделок в устройстве, сводившихся в основном к тому, чтобы создать такие условия, при которых колебания расхода прививаемого раствора были бы наименьшими. Для

обеспечения постоянства расхода прививаемого раствора лаборатория применила устройство по типу проф. Унвина—сосуд с водосливом.

Колебания напора основного потока будут отзываться на расходе прививаемого раствора.

Разберем два варианта: 1) переменный расход прививаемого раствора и 2) переменный расход основного потока.

Общая постановка задачи для 1-го случая представляет большие трудности. Целесообразнее поэтому ввести ряд упрощающих предположений. После решения задачи в частном виде можно оценить влияние сделанных допущений.

Положим, что вся прививаемая жидкость перемещается со скоростью, равной средней скорости потока, и что на достаточном удалении от места прививки концентрация по сечению потока одинакова.

Тогда, при постоянном Q и $q=f(t)$, мы имеем:

$$Q=f(t) \frac{C_1-C_2}{C_3-C_0}$$

Уравнение указывает, что при монотонном изменении $f(t)$ правильное определение Q достигается соответствующей обработкой наблюдений.

Пусть изменение $f(t)$ представляется в виде графика, изображенного на рис. 1. Тогда, если последовательно брать пробы и нанести график величины C_2 , это будет кривая примерно того же типа, что и график $f(t)$, но по времени сдвинутая на величину $a=\frac{S}{v}$, S —расстояние между местами прививки и взятия пробы и v —средняя скорость потока. Из рис. 1 следует, что если для некоторого момента времени t_2 значение $C_2=C_2$, то соответствующий этому моменту расход q следует искать для момента времени: $t_1=t_2-a$.

Это рассуждение в известной мере справедливо и для периодического изменения q , однако лишь при больших периодах. Легко видеть, что при обработке наблюдений в рассматриваемом случае погрешность Q в значительной мере увеличится за счет увеличения погрешности величины q . Последняя, в свою очередь, зависит как от ошибки в определении величины a , так и от ошибки определения мгновенного значения q . Ошибка в значении a может быть уменьшена путем расчета по методу последовательных приближений. Ошибка в значении q определится степенью совершенства измерительной аппаратуры.

Определение величины a при периодическом изменении q и при больших частотах нецелесообразно. Лучший результат получится, если, взяв достаточное количество проб, определить максимумы и минимумы C_2 и построить для C_2 график,

подобный графику изменения q . Соответственные точки обоих графиков дадут возможность найти Q .

Переменный расход прививаемого вещества влечет за собой значительное усложнение обработки наблюдений; окончательная погрешность при этом

в несколько раз превзойдет погрешность метода при постоянном q .

Одним из наиболее необходимых условий при измерениях по методу прививки является, таким образом, постоянство величины q . Следует заметить, что особых технических трудностей это условие не вызывает.

Рассмотрим теперь случай переменного Q . Для получения закона изменения Q необходимо возможно большее количество проб. Значение

Рис. 1. Зависимость между мгновенным значением расхода и временем.

погрешности определяемого мгновенного значения Q не превышает погрешности при постоянном Q при условии постоянства C_0 . Переменное C_0 (например, после слияния двух потоков

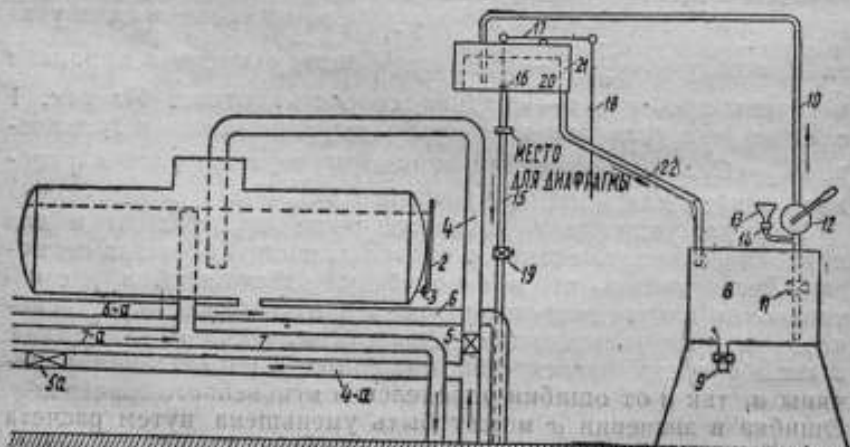


Рис. 2. Установка для прививки.

с переменным Q) увеличивает погрешность измерения в той мере, в какой вообще погрешность ΔC_0 влияет на погрешность ΔQ .

Вследствие всех указанных обстоятельств были произведены изменения в лабораторном водопроводе, после которых он приобрел нижеописанный вид.

Вся установка лаборатории расположена в двух помещениях: 1) на чердаке (см. рис. 2) и 2) в первом этаже того же здания (см. рис. 3).

В полу одной из комнат первого этажа устроено водохранилище 26 емкостью около 22 м³. Насос 23 по нагнетательной трубе 4 подает воду наверх. Посредством задвижек 5 и 5а, установленных на нагнетательной трубе, вода может быть переключена или на старый бак емкостью около 5 м³, расположенный в башне этого здания (на схеме не показан) или

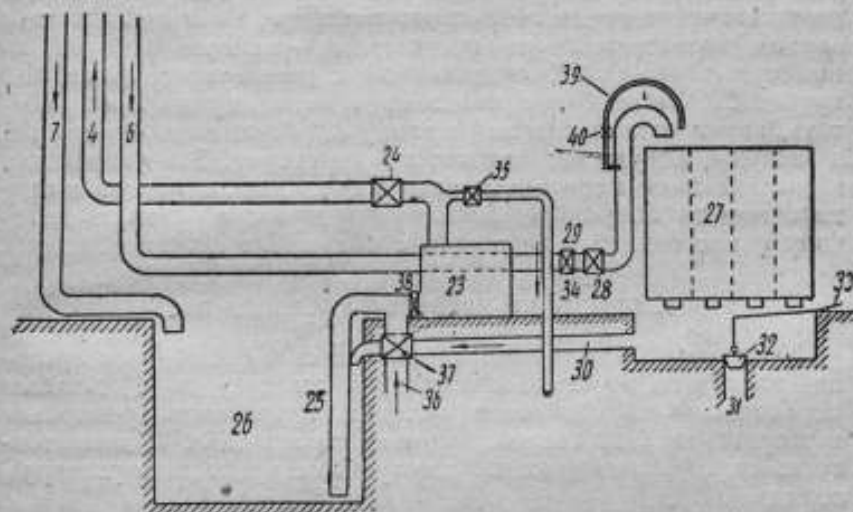


Рис. 3. Установка для прививки — сеть мерного бака и водохранилища.

на новый бак 1 емкостью около 22 м³, расположенный на чердаке. Благодаря наличию сливной трубы 7 в заранее наполненном баке, при непрерывной работе насоса, поддерживается постоянный уровень воды. Для наблюдения за постоянством уровня на торцевой стороне бака установлено водоуказательное стекло. Излишек воды по трубе 7 сливается в водохранилище 26. Напорный бак соединен с мерным баком 27 расходной трубой 6.

Описанное устройство позволяет с некоторым приближением считать уровень воды в баке, а следовательно, и напор основного потока постоянным во все время работы.

Устройство для прививки солевого раствора осуществлено на чердаке вблизи напорного бака 1. Оно состоит из небольшого напорного бачка 20, в который по трубе 10 из резер-

вуара 8 поступает раствор, накачиваемый ручным насосом 12. Для заливки насоса имеется воронка 13 с клапаном 14. Раствор из бачка 20 через клапан 16 поступает в трубу 15, входящую в расходную трубу 6, и по последней, совместно с основным измеряемым потоком воды, идет в мерный бак 27. Для регулировки расхода прививаемого раствора служат диафрагмы и кран 19. Чтобы избежать перетекания раствора из бачка 20 в резервуар 8, на нижней части подающей трубы 10 установлен запорный кран 11.

Это устройство позволяет с большой степенью точности учитывать объем поданного в мерный бак раствора.

Так как при проведении прививки весьма желательно, для повышения точности результата, не только возможно точнее знать значение среднего расхода раствора, но и сделать этот расход возможно более постоянным, — напорный бачок 20 помещен в кожух 21, соединенный с резервуаром 8 сливной трубой 22. Когда бачок наполнен, а насос продолжает работать, излишки поступающей в напорный бачок воды сливаются в кожух и оттуда возвращаются в резервуар. Это устройство в значительной мере обеспечивает постоянство напора в прививочном трубопроводе, благодаря чему можно считать величину q постоянной и известной с большой степенью точности.

2. ОПЫТЫ ПО ПРИВИВКЕ РАСТВОРА NaCl

Как указывало выше, лабораторией в свое время были произведены опыты по определению емкости сосудов [1] с целью первоначального овладения методом прививки и тренировки в титровании. Эти опыты, как показывает табл. 1, дали точность определения (исключая погрешность в расходе раствора) порядка 0,5%.

Таблица 1

№ опыта	Количество AgNO_3 для C_0 см^3	Количество AgNO_3 для C_1 см^3	Количество AgNO_3 для C_2 см^3	Полученный объем сосуда см^3	Абсолютная погрешность см^3	Относительная погрешность %
1	—	1162,0	11,67	12320	129	1,03
2	—	1171,0	11,64	12450	2	0,01
3	1,5	910,0	10,50	12492,5	42,5	0,30
4	1,5	905,1	10,52	12384	65	0,52
5	1,49	910,0	10,53	12437,5	11,5	0,10

В опытах №№ 1 и 2 составление основного раствора производилось дистиллированной водой, а в остальных — водопро-

водной водой, причем в опытах №№ 3 и 4 разбавление основного раствора до концентрации проб производилось также водопроводной водой. В опыте № 5 раствор был составлен из водопроводной воды, и разбавление его произведено дистиллированной водой.

После указанных опытов и произведенных переделок в системе трубопровода лаборатории перешла к определению расхода воды с проверкой полученных результатов объемным методом. Опыты производились по инструкции, составленной применительно к установке ВНИИМ.

Как показывают данные испытания метода прививки по сравнению с объемным методом, приведенные в табл. 2, результаты первого определения были неудачны. Это объясняется тем, что на трубопроводе, подающем воду в мерный бак, стоял вентиль 28 (рис. 3), время открывания и закрывания которого было довольно значительно, около 12—15 сек. После первого опыта на трубопровод был установлен кран мгновенного действия 29, после чего погрешности в определении расхода не превосходили 1,3%, а большинство было менее 1%.

Следующим этапом по исследованию метода прививки должны были быть испытания прививки в полевых условиях. С этой целью было решено произвести определение расхода воды в одной из рек, протекающих вблизи Ленинграда.

Таблица 2

№ опыта	Количество AgNO_3			V_1 дм ³	V_2 дм ³	t сек	q дм ³ /сек	$Q_{\text{теор.}}$ дм ³ /сек	V дм ³	T сек	Q действ. дм ³ /сек	Погрешность абсолютная дм ³ /сек	относительная %,
	для C_0 см ³	для C_1 см ³	для C_2 (средн.) см ³										
1	1,37	223,2	8,60	45,68	11,124	129,1	0,2677	7,95	2284,5	271,0	8,45	0,50	5,9
2	1,39	223,7	8,64	45,32	10,86	128,4	0,2684	7,96	2249,0	280,0	8,03	0,07	0,87
3	1,49	281,8	10,52	46,24	11,70	129,4	0,2670	8,02	2341,9	291,8	8,05	0,03	0,37
4	1,43	246,9	9,39	46,00	10,67	130,6	0,2705	8,07	2382,8	298,7	8,00	0,07	0,88
5	1,40	241,7	9,19	46,44	10,80	131,0	0,2721	8,12	2339,4	285,0	8,23	0,11	1,34

Таких рек, испытания на которых могли бы дать удовлетворительные результаты, в окрестностях Ленинграда две: Ижора и Оредеж. Другие реки, как то: Славянка, Суйда и пр., имеют слишком незначительную глубину и ничтожную скорость. С целью выбора наиболее подходящего места для проведения испытания были предприняты рекогносцировочные экскурсии на обе указанные реки.

Река Ижора для проведения на ней опыта по определению расхода методом прививки оказалась непригодной по следующим соображениям: крайняя заболоченность берегов и уход воды в соседние трясины не дадут возможности в сечении, где должны быть взяты пробы, уловить всю привитую соль, т. е. не будут соблюдены условия, при которых справедливо уравнение:

$$QC_0 + qC_1 = (Q+q)C_2$$

Сильная засоренность реки водорослями создает большую разность скоростей течения у поверхности и в придонных слоях, а кроме того образует так называемые застойные области, препятствующие правильному перемешиванию прививаемого раствора с основным потоком реки.

Река Оредеж была обследована в двух местах:

1) в районе ст. Сиверская Варшавской линии Октябрьской ж. д. и

2) в районе ст. Вырица Витебской линии Октябрьской ж. д.

Обследование реки Оредеж в районе ст. Сиверская показало, что хотя наличие плотины весьма удобно для перемешивания прививаемого раствора с основным потоком реки, прочие условия не могут обеспечить хороших результатов опытов.

Обследование реки Оредеж в районе ст. Вырица (на расстоянии около 4 км к западу от полотна железной дороги) показало пригодность этого места для проведения опытов. Были произведены измерения, позволяющие определить примерное значение расхода. Данные этих измерений приведены в табл. 3.

Таблица 3

№ измерения	Ширина м	Глубина м	Скорость м/сек	Расход м ³ /сек	Примечание
1	21	0,6	0,21	2,65	Ширина реки известна довольно приблизительно
2	15	0,7	0,28	2,94	
3	15	0,6	0,29	2,61	
4	11	1,1	0,24	2,90	

Среднее значение расхода на обследованном участке реки

$$Q_{\text{ср}} = 2,78 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Однако опыты на реке Ордеж в районе ст. Вырица не были проведены, так как лаборатория не получила прививочного материала и до наступления холодов не были выполнены некоторые работы по оборудованию прививочного устройства.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ТИТРОВАНИЯ

Определение концентрации растворов NaCl сводится в конечном итоге к определению количества ионов хлора в данном объеме раствора. Кроме чисто химических методов эта операция может быть выполнена электрическими методами, сводящимися к двум основным — кондуктометрическому и потенциометрическому. Оба метода имеют различные видоизменения.

Кондуктометрическое титрование основано на измерении электропроводности растворов, которое находится в определенной зависимости от концентрации.

Известно, что электропроводность выражается формулой

$$\frac{1}{R} = x \frac{q}{l},$$

где x — удельная проводимость исследуемого вещества.

Удельную проводимость исследуемого раствора можно выразить формулой

$$x = \frac{1}{R} C,$$

где C — емкость сопротивления сосуда, зависящая от размеров электродов и от расстояния их друг от друга, а также от высоты уровня раствора над электродами.

Сравнение различных электролитов производится обычно по методу Кольрауша на основании эквивалентной проводимости λ , зависящей от величины γ , представляющей количество литров раствора, содержащих 1 грамм-эквивалент электролита:

$$\lambda = 1000 \gamma.$$

Если электролит полностью диссоциирован, то λ определяется как сумма эквивалентных проводимостей аниона и катиона:

$$\lambda = \lambda_a + \lambda_k.$$

Если же степень диссоциации данного электролита α , то

$$\lambda = \alpha (\lambda_a + \lambda_k).$$

Величины λ_x и λ_y даются в таблице для температуры 18°, а изменение их равно около 2% на каждый градус температуры.

Аппаратура, применяемая при кондуктометрическом титровании, изображена на рис. 4. Она представляет собой мостик Уитстона переменного тока, в котором плечами являются сосуд с исследуемым раствором 2, магазин сопротивлений 3 и части проволоки $A4$ и $4B=a$. Источником тока служит индукционная спираль 1, в качестве прерывателя которой часто применяют пицки.

Контакт 4 передвигается, пока включенный в нулевую ветвь моста телефон 5 не покажет минимум звука. Тогда $\frac{1}{R} = \frac{1}{W} \cdot \frac{n-a}{a}$, где n — число делений, на которые разделена шкала проволоки, и W — сопротивление магазина.

В качестве реохорда применяют обычно барабанный мостик Кольрауша.

В качестве сосуда для электролита часто применяется сосуд типа Jander и Pfundt, изображенный на рис. 5. Платиновые электроды соединены с цепью моста

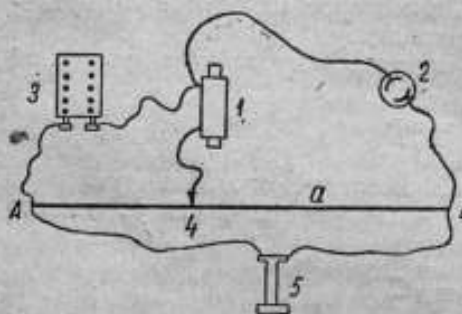


Рис. 4. Схема установки для кондуктометрического титрования.

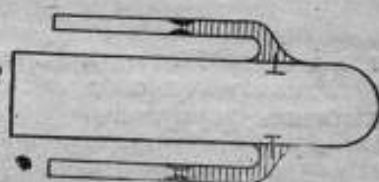


Рис. 5. Сосуд для электролита Jander и Pfundt.

ртутными контактами, в которые погружаются медные амальгамированные концы медных проволок.

В настоящее время вместо телефона в качестве гальванометра иногда включается катодный вольтметр, благодаря применению которого можно не пользоваться методом нулевого отсчета, а применять метод отклонения, как требующий меньшей затраты времени.

Кондуктометрический метод с большим успехом применяется там, где требуется титровать растворы значительных концентраций. Так как получаемые при методе прививки концентрации раствора NaCl весьма малы, порядка $\frac{n}{1000}$ и меньше, то кондуктометрический метод титрования при определении рас-

ходов воды прививкой должен уступить место потенциометрическому способу.

Потенциометрическое титрование, широко применяемое в настоящее время, основывается на следующих положениях.

Основная задача потенциометрического титрования — определение эквивалентной точки, т. е. теоретического конечного пункта титрования.¹ Это определение может быть произведено: а) способом определения скачка потенциала или б) титрованием до определенного потенциала. Оба указанных способа различными исследователями осуществляются разнообразными способами.

Известно, что между электродным потенциалом и показателем ионов существует линейная зависимость. Если при реакции замещения (с каковыми и приходится иметь дело в методе прививки) образуется осадок состава типа АВ, то изменение потенциала при прибавлении некоторого количества реагента (скачок потенциала) будет наибольшим именно в эквивалентной точке, а кривая титрования будет иметь симметричную форму по отношению эквивалентной точки.

На рис. 6 изображено отношение $\frac{\Delta E}{\Delta C}$ вблизи эквивалентной точки при титровании галондов. Кривая I показывает скачок потенциала при титровании хлора, II — для брома и III — для иода.

Кривые, изображенные на рис. 7, показывают, что при уменьшении концентрации раствора скачок потенциала уменьшается.

Из многочисленных потенциометрических схем лаборатория остановилась на схеме, предложенной Эстерле [2], так как она применялась при титровании солевых растворов в речных водах. Строго говоря, эта схема не является в полном смысле слова потенциометрической, так как в ней нет внешнего источника тока.

Общее устройство титровальной установки изображено на рис. 8.

В сосудах 1 и 2 налит титруемый раствор с примесью 0,1 п

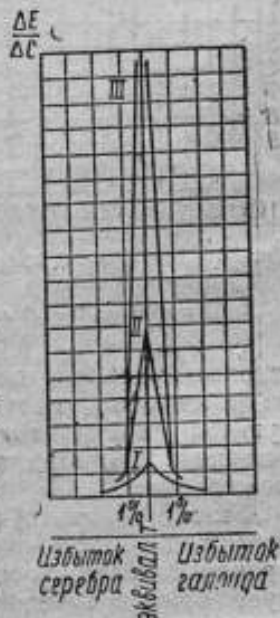


Рис. 6. Отношение $\frac{\Delta E}{\Delta C}$ вблизи эквивалентной точки при титровании галондов.

¹ Теоретический конечный пункт титрования отличается от практического конечного пункта тем, что последний включает в себя погрешность титрования.

раствора H_2SO_4 ¹ и погружены две пары серебряных электродов 3 и 4. Сосуды соединены жидкостным контактом.² Из бюретки 10 в сосуд 1 приливается раствор $AgNO_3$. Для лучшего перемешивания приливаемого раствора с раствором $NaCl$ служит трубка 7, через которую проходят пузырьки воздуха из сосуда 8, вытесняемого водой из сосуда 9. Электроды соединены через переключатель 11 и реостат 12 с гальванометром 13.

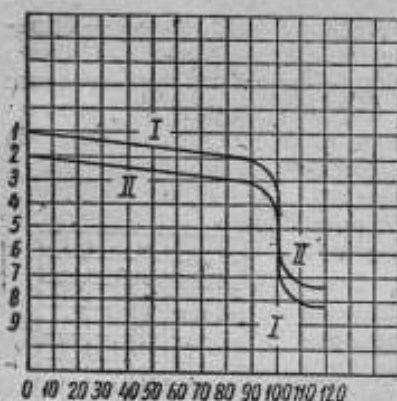


Рис. 7. Титрование хлористого серебра.

I—0,1 н раствор, II—0,01 н раствор.

Описанная схема действует следующим образом: после приливания из бюретки некоторого количества раствора $AgNO_3$ замыкают цепь размыкателем 14 с включенными контактами 3. Так как в обоих сосудах электроды погружены в различные жидкости, то в цепи появляется электродвижущая сила. При прохождении тока по цепи электроды поляризуются, и потому на время взятия отсчета делается переключение на другую пару электродов. Сам отсчет следует, по тем же соображениям, производить возможно быстро.

Указанным способом берется ряд точек (около 10), причем половину точек следует брать в заведомо перетитрованном растворе.

Как уже указывалось, титрование ионов хлора ионами серебра дает совершенно симметричную кривую, вследствие чего можно считать, что эквивалентная точка совпадает с наибольшим скачком потенциала.

На билогарифмической бумаге по оси абсцисс откладываются логарифмы измене-

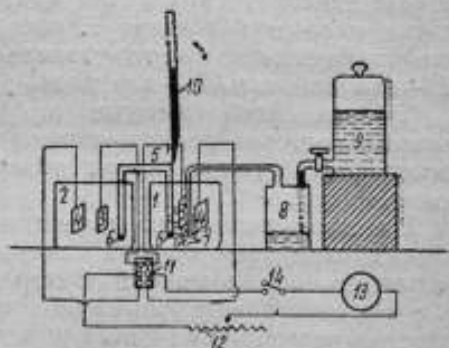


Рис. 8. Схема установки для потенциометрического титрования.

¹ В сосуд 2 также налит 0,1 н раствор H_2SO_4 и $AgCl$, во взвешенном состоянии примерно в том же количестве, как должно быть в сосуде 1 в конце титрования.

² Концы 6 трубки 5 плотно затянуты смоченной фильтровальной бумагой.

ния потенциала, а по оси ординат логарифмы, соответствующие этому изменению концентрации. Через полученные точки проводят кривые, которые с достаточной для данной задачи степенью точности можно считать прямыми. Точка пересечения этих прямых дает концентрацию, соответствующую концу титрования, т. е. укажет эквивалентную точку.

В лаборатории была создана установка описанного типа и проведен ряд опытов, которые дали вполне удовлетворительные результаты.¹

Несмотря на то, что опыты по потенциометрическому титрованию доведены до успешного конца, все же можно считать, что в полевых условиях этот метод вряд ли сможет завоевать себе прочное место как вследствие сложности применяемой аппаратуры, так и из-за необходимости иметь дополнительный квалифицированный обслуживающий состав.

4. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ

Помимо уже указанных методов определения концентрации привито в поток раствора NaCl, а именно чисто химического и электро-химического, можно для этой цели воспользоваться и оптическими методами—рефрактометрическим и интерференционным.

Оба эти метода сводятся в конечном счете к определению показателя преломления испытуемого раствора по отношению к некоторому другому раствору, принимаемому за стандартный.

В настоящее время как рефрактометрический, так и интерференционный методы имеют широкое применение в практике лабораторных и производственных измерений, но к определению расхода воды (метод прививки), насколько можно судить по имеющейся литературе, до сих пор ни тот, ни другой не применялись.

Рефрактометрический метод заключается в наблюдении отклонения светового луча при его прохождении через раствор, показатель преломления которого необходимо определить. Хотя точность рефрактометрического метода весьма высока (погружной рефрактометр дает $\pm 3 \cdot 10^{-5}$), но для измерений весьма малых концентраций он мало пригоден.

В частности для определения концентрации растворов NaCl, с которыми приходится иметь дело в методе прививки, он едва ли сможет иметь применение. В самом деле, наименьшая концентрация C_0 , с которой приходится иметь дело в методе прививки, выражается количеством около 5 мг/л (концентрация речных вод), а иногда и меньше. Этой концентрации соответствует изменение показателя преломления относительно дистиллированной воды порядка при-

¹ См. в настоящем сборнике статью „Определение расходов воды методом прививки (потенциометрическое титрование)“.

мерно $35 \cdot 10^{-3}$ (по Вагнеру), тогда как погружной рефрактометр дает возможность производить измерения с точностью до $3 \cdot 10^{-5}$. Принимая концентрацию пробы C_2 равной примерно 50 мг/л , имеем разность показателя преломления пробного раствора с дистиллированной водой около $9 \cdot 10^{-5}$, что также лежит за пределами возможности измерения рефрактометром.

Интерференционный метод заключается в том, что в приборе наблюдается смещение интерференционных полос, получаемых от лучей, проходящих через стандартный и испытуемый растворы.

При благоприятных условиях точность этого метода достигает $2 \cdot 10^{-8}$, т. е. пробный раствор концентрации C_2 может быть определен с точностью до $0,2\%$, а натуральная промышленная вода концентрации C_0 — с точностью до 2% .

Если мы имеем дело с чистой водой, в которую прививается соответствующий раствор, то измерения могут быть произведены довольно просто. В этом случае измерения распадается на два этапа: 1) измерение концентрации NaCl в полученных пробах и 2) измерение концентрации NaCl в прививаемом растворе.

1. В качестве стандартного раствора берется дистиллированная вода и с ней сравнивается проба, имеющая примерно концентрацию $C_2 = 0,05 \frac{\text{г}}{\text{л}} \text{ NaCl}$.

2. В качестве стандартного раствора берется та же дистиллированная вода и с ней сравнивается разбавленный в соответствующее число раз прививаемый раствор. Так как прививаемый раствор имеет примерную концентрацию $C_1 = 250 \frac{\text{г}}{\text{л}} \text{ NaCl}$, то в идеальном случае разбавление должно быть в 5000 раз.

В обоих случаях посредством интерферометра определяется показатель преломления испытуемого раствора и по таблицам по соответствию между концентрацией раствора NaCl и показателем преломления данного раствора выбирается значение концентрации. Необходимо при этом вводить поправку на температуру, так как раствор одной и той же концентрации имеет значительно различающиеся друг от друга показатели преломления при сравнительно мало отличающейся температуре.

Общий принцип метода прививки — возможность применения нечистой соли — остается попрежнему в силе, так как в числителе и знаменателе основной формулы расчета расхода получаются почти равные концентрации и количество постороннего вещества в обоих случаях окажется пропорциональным самой концентрации, т. е. не будет влиять на величину отношения $\frac{C_1}{C_2}$. Чтобы эта пропорциональность соблюдалась

более строго, необходимо подбирать фактор разбавления F так, чтобы величина $\frac{C_1}{F}$ была как можно ближе к величине C_2 .

Если, как бывает в большинстве случаев, мы имеем дело с речной или водопроводной водой, в которой находятся разнообразные примеси, ее нельзя принимать в качестве стандартного раствора для последующего определения концентрации по таблицам, так как в знаменателе формулы будет стоять величина $C_2 - C_0$, где в ряде случаев величина C_0 будет сравнительно мало отличаться от C_2 , и применяя предыдущий метод, мы получили бы несравнимые значения концентрации.

Чтобы иметь возможность применить принцип прививки, т. е. получать не абсолютные значения концентраций прививаемого раствора и пробы, а относительные значения тех же величин, рекомендуется следующий метод.

Берется проба из испытуемого потока до прививки и путем навески NaCl составляются несколько растворов желаемой концентрации, близкой к концентрации пробы (взятой из потока после прививки) C_2 .

Пусть полученные концентрации будут C' , C'' , C''' и т. д. Строго говоря, эти величины не являются действительными концентрациями, так как неизвестно природное содержание NaCl в воде испытуемого потока, но, как будет следовать из дальнейшего, это при излагаемом методе не имеет значения.

Определяем интерферометром (учитывая температуру) показатели преломления полученных растворов n' , n'' , n''' и т. д. по сравнению с водой испытуемого потока и строим график зависимости между условными концентрациями изготовленных растворов и соответствующими показателями преломления. Получаем некоторую кривую, выражающую указанную зависимость (см. рис. 9).

Берем пробу воды испытуемого потока после прививки и интерферометром определяем показатель преломления воды в пробе, опять принимая за стандартный раствор воду испытуемого потока до прививки. По определенному показателю преломления при помощи графика рис. 9 находим условную концентрацию воды в пробе C_2 .

В соответствии с полученным значением концентрации C_2 прививаемый раствор концентрация C_1 разбавляется водой



Рис. 9. Зависимость между показателем преломления и условной концентрацией раствора.

испытываемого потока, причем величина фактора разбавления подбирается так, чтобы $\frac{C_1}{F}$ было по возможности равно концентрации пробы C_2 .

Разбавленный таким образом прививаемый раствор сравнивается посредством интерферометра с водой основного потока, принимаемой за стандартный раствор; после введения соответствующих температурных поправок находится его концентрация $K = \frac{C_1}{F}$ и далее, по фактору разбавления, определяется C_2 .

Указанный метод позволяет пользоваться введенными нами условными концентрациями, что весьма удобно, так как вода в реке или в трубопроводе может содержать примеси не только NaCl, но и различных других веществ, которые будут влиять на показатель преломления.

Так как при промышленных определениях расхода воды в реках или крупных водопроводах потребное количество соли весьма велико, что может создать значительные издержки; обычно для такого рода работ применяется кормовая соль, так называемый бузун. Бузун сам по себе содержит различные примеси, причем засоренность его этими примесями не везде одинакова. Чтобы получить правильные (однородные) значения величины условных концентраций, следует составлять растворы для получения графика посредством того же раствора, который идет для прививки, разбавив его в соответствующее число раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Рубец. Измерение больших расходов воды методом прививки. ВНИИМ, Механические измерения, № 2 (44), 1940.
2. К. М. Oesterle. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, S. 145, 1934.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ МЕТОДОМ ПРИВИВКИ (потенциометрическое титрование)

ВВЕДЕНИЕ

В 1939 г. Аэрогидрометрическая лаборатория произвела подробное исследование метода измерения расходов воды в трубопроводах посредством прививки раствора NaCl [1, 2]. Измерения происходили на лабораторной установке с трубопроводом диаметром 100 мм, наибольший расход воды был 45 м³/час. Обработка наблюдений производилась химическим методом, — применялось титрование по способу Мора. Результаты были получены [1] с погрешностями от 0,01 до 1,03%.

Ничтожные значения концентраций раствора NaCl, с которыми приходится иметь дело в гидрометрии вследствие недопустимости „засаливания“ реки или трубопровода, создают весьма неблагоприятные условия для титрования вообще и особенно для химических способов титрования, где о достижении эквивалентной точки приходится судить на глаз, по изменению цвета индикатора. Эта причина заставляет прибегать к другим, объективным способам титрования, где эквивалентная точка фиксируется каким-либо прибором.

Как указывалось в наших работах по исследованию метода прививки, таких способов, кроме химических, имеется два: электрометрическое титрование и оптический метод. Предметом настоящей статьи является электрометрическое титрование, точнее, его разновидность — титрование потенциометрическое.

Уже в 1913 г. на Верхневолжской гидрометрической станции инженером Н. М. Бернадским и лаборантом А. О. Юрковым было произведено, повидимому, впервые в гидрометрической практике определение концентрации NaCl в пробах воды электрическим методом.

Современное состояние электрохимического анализа позволяет применять электротитрование и в гидрометрии, несмотря

на то, несомненно, ухудшающее условие, что в этой области приходится иметь дело с весьма малыми концентрациями (меньше миллинормального) раствора Cl' .

Существует два основных вида электрохимического анализа — кондуктометрическое и потенциометрическое титрование. Первое, основанное на измерении электропроводности растворов, неприменимо для гидрометрических целей, так как хорошие результаты кондуктометрический метод дает при титровании растворов значительных концентраций, которых, как уже указывалось, в гидрометрии не встречается.

Потенциометрический метод определения концентрации того или иного вещества в растворе может иметь широкое применение в гидрометрии как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Поскольку прививка для определения расхода воды должна применяться главным образом в полевых условиях, лаборатория оказалась перед необходимостью найти наиболее простой способ, погрешность которого была бы не более 1%, а также создать такой прибор, который позволял бы осуществлять измерения выбранным методом, не требуя для этого специально оборудованного помещения. Кроме того, такой прибор должен быть легко перевозим даже в трудных условиях, например, по горным дорогам.

Эти соображения заставили отказаться от применения в полевых условиях потенциометра, как весьма нежного прибора, и пользоваться для измерения так называемым концентрационным элементом.

1. ТИТРОВАНИЕ Cl' ПРИ ПОМОЩИ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА

Теория концентрационного элемента или концентрационной цепи, как известно, основана на положении Нернста, что электроды из одинакового вещества, погруженные в растворы различной концентрации ионов того же вещества, электрически между собой соприкасающиеся, заряжаются до различных потенциалов. Такая совокупность двух соприкасающихся растворов с погруженными в них однородными электродами является источником тока.

Обычно концентрационные цепи не применяются в качестве источников тока, а служат для других целей. Так, например, измеряя э. д. с. цепи, составленной из гальванических пар $Ag/0,1n AgNO_3/AgCl$ насыщ./ Ag , можно вычислить растворимость хлористого серебра в воде.

В целях определения концентрации ионов хлора в пробах воды при прививке также применена концентрационная цепь. Из кинетической теории газов известно, что работа при

изотермическом расширении газов выражается следующим уравнением:

$$A = RT \ln \frac{p_1}{p_2}, \quad (1)$$

где R — газовая постоянная,
 T — абсолютная температура,
 p_1 — первоначальное давление,
 p_2 — конечное давление.

Согласно работам Вант-Гоффа, явления диффузии в растворах аналогичны процессам в газах.

Процесс диффузии — перехода растворенного вещества от большей концентрации к меньшей — соответствует также осмотическому процессу перехода металла в раствор, поэтому уравнение (1) может быть применено также для вычисления разности потенциалов между металлом и раствором.

В последнем случае под величиной p_1 следует понимать — упругость растворения P , характеризующую начальное состояние вещества в металле, а под p_2 — осмотическое давление катионов данного металла в растворе.

Выражая работу в электрических единицах, получаем:

$$A = EnF, \quad (2)$$

где E — соответствующая разность потенциалов,
 F — число Фарадея,
 n — число грамм-эквивалентов, принимающих участие в процессе.

Решая уравнения (1) и (2) совместно, получаем

$$EnF = RT \ln \frac{P}{p} \quad \text{или} \quad E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{P}{p}; \quad (3)$$

так как осмотическое давление p пропорционально концентрации C , то

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{P}{KC}. \quad (4)$$

Таким образом, э. д. с. любого гальванического элемента выразится разностью потенциалов E_1 и E_2 :

$$E = E_1 - E_2 = \frac{RT}{nF} \ln \frac{P_1}{KC_1} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{P_2}{KC_2}$$

или

$$E = \frac{RT}{nF} \left(\ln \frac{P_1}{KC_1} - \ln \frac{P_2}{KC_2} \right). \quad (5)$$

Переходя к концентрационным элементам, т. е. имея в виду, что оба электрода состоят из одинакового вещества и, следовательно, $P_1 = P_2$, получаем:

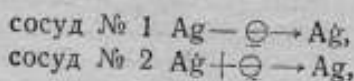
$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_2}{C_1}. \quad (6)$$

Выбранный нами концентрационный элемент состоит из двух серебряных электродов, покрытых слоем электролитического серебра. Электроды погружены в сосуды, в одном из которых (сосуд № 1) находится 0,1 н раствор H_2SO_4 и суспензия $AgCl$. В другом сосуде (№ 2) налит также 0,1 н раствор H_2SO_4 и некоторое количество (100—200 $см^3$) титруемого раствора $NaCl$. Оба сосуда соединены электролитическим мостом, состоящим также из 0,1 н раствора H_2SO_4 .

Концентрация Ag в сосуде № 2 и осмотическое давление в нем меньше, чем в сосуде № 1, поэтому переход ионов серебра в раствор в сосуде № 2 будет более интенсивный, чем в сосуде № 1.

Следовательно, электрод сосуда № 2 является отрицательным полюсом элемента, а электрод сосуда № 1 — его положительным полюсом. Элемент замкнут гальванометром с большим внутренним сопротивлением.

Электрохимический процесс концентрационного элемента может быть схематически представлен в следующем виде:



Иначе говоря, освободившиеся на электроде № 2 электроны пройдут по внешней цепи на электрод № 1, где будут нейтрализовать катионы серебра, т. е. на электроде № 1 будет оседать серебро.

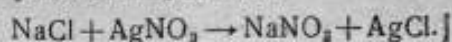
На обоих полюсах концентрационного элемента происходит обратная реакция, причем в противоположных направлениях, т. е. энергия электрического тока получается здесь не за счет химической, а за счет тепловой энергии, что согласуется с многочисленными опытами, в которых такие элементы работают с охлаждением.

В начальный момент работы концентрационный элемент обладает некоторой электродвижущей силой, которая вследствие поляризации начинает падать. Механизм поляризации происходит следующим образом: по мере скопления ионов серебра в сосуде № 2 абсолютная величина отрицательного потенциала его электрода будет уменьшаться, тогда как на электроде в сосуде № 1 будет происходить уменьшение положительного потенциала вследствие нейтрализации находящихся в растворе этого сосуда ионов серебра и осаждения их на электроде.

Титрование посредством концентрационного элемента основано на том, что с увеличением концентрации ионов металла в растворе, прилегающем к металлу, потенциал металла становится положительным, а с уменьшением концентрации — отрицательным [3].

В сосуд № 2, в котором находится титруемый раствор $NaCl$,

вливаются небольшими одинаковыми порциями 0,01 н раствора AgNO_3 — происходит реакция:



Концентрация ионов серебра в сосуде № 2 увеличивается; следовательно, потенциал электрода в этом сосуде будет уменьшаться (по абсолютной величине) и э. д. с. элемента будет падать. Теоретически, если не принимать во внимание поляризации и иметь чистые реактивы, то в тот момент, когда весь находящийся в сосуде № 2 NaCl вступит в указанное соединение, э. д. с. элемента равна нулю. Тогда по количеству

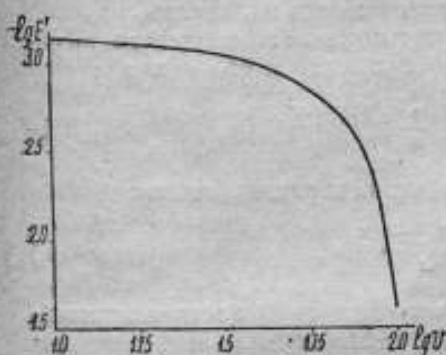


Рис. 1. Зависимость между $-\lg E'$ и $\lg v$ при значениях $\lg v$ от 1,0 до 2
титруемый раствор NaCl 0,001 N;
титрующий раствор AgNO_3 0,01 N.

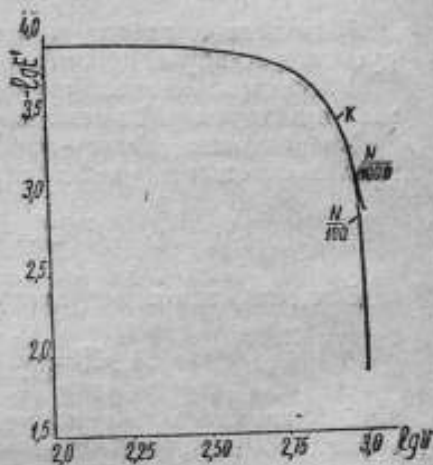


Рис. 2. Зависимость между $-\lg E'$ и $\lg v$ при значениях $\lg v$ от 2,0 до 3,0
титруемый раствор NaCl 0,001 N;
титрующий раствор AgNO_3 0,01 N.

прилитого AgNO_3 можно судить о концентрации Cl' в титруемом растворе. Так как, в действительности, в момент достижения эквивалентной точки разность потенциалов концентрационного элемента не будет равна нулю, то для нахождения количества прилитого раствора AgNO_3 , необходимого для достижения эквивалентной точки, нами был принят метод Эстерле (см. стр. 86).

Суть этого метода заключается в том, что при каждом приливании равных порций реагента замечается отсчет по гальванометру. Берется разность двух соседних отсчетов, соответствующих одной порции прилитого реагента. По осям координат откладывается $\lg v$ и $\lg \frac{\Delta E}{\Delta v}$, причем получается кривая, которая при небольшой разности начального и конечного значений v может быть принята за прямую. Так как $\frac{\Delta E}{\Delta v}$ до эквива-

лентной точки увеличивается, а после нее (процесс перетитрования) уменьшается, то получают две прямые, пересекающиеся в точке K (см. рис. 1 и 2).

По ординате точки пересечения этих прямых судят о количестве реагента, необходимого для достижения эквивалентной точки.

2. ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ТИТРУЕМОГО РАСТВОРА НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ТОЧКИ

В настоящей работе разбирается только случай, когда титруемый раствор и приливаемый реагент одновалентны.

Рассмотрим сначала случай, когда оба раствора (исследуемый и титрующий) имеют одинаковую нормальность.

Концентрация какого-либо растворенного вещества выражается отношением массы этого вещества к его объему:

$$C = \frac{M}{V} \frac{g}{l}. \quad (7)$$

Рассматривая молекулярную концентрацию, имеем:

$$[C] = \frac{M}{mV} \frac{\text{Моле}}{l} \quad (8)$$

или, принимая во внимание, что для одновалентных ионов нормальность представляет собой величину, численно равную их молекулярной концентрации:

$$C = \frac{V}{V} N. \quad (9)$$

Если выразить концентрацию титруемого раствора в зависимости от объема приливаемого титрующего реагента, то, считая, что каждый приливаемый объем v соединяется с равным ему объемом исследуемого раствора, а общий объем увеличивается на величину v , получаем:¹

$$[C] = \frac{V-v}{V+v} \cdot N. \quad (10)$$

Это выражение для концентрации не совсем точно, так как мы делаем допущение, что все количество приливаемого реагента полностью соединяется с титруемым раствором, т. е. иначе говоря, что, когда объем приливаемого реагента становится равным объему исследуемого раствора, концентрация ионов последнего равна нулю. В действительности же при

¹ При условии, что пренебрегаем изменением степени ионизации в ходе титрования.

соединении равных количеств обоих растворов концентрация их равна не нулю, а некоторой величине, известной под названием произведения растворимости и обозначаемой буквой S .

Так, в данном случае, при титровании раствора NaCl раствором AgNO_3 одинаковой с первым нормальности, получается хлористое серебро, и когда количество AgNO_3 делается равным количеству NaCl , не вся полученная соль будет в осадке, а некоторая ее часть окажется в растворенном состоянии, причем концентрации обоих компонентов будут равны $[\text{Ag}^+] = [\text{Cl}^-]$.

Произведение молекулярных концентраций этих ионов равно

$$[\text{Ag}^+] \cdot [\text{Cl}^-] = 10^{-10} \quad (11)$$

или

$$[\text{Ag}^*] = [\text{Cl}^-] = 10^{-5}.$$

Так как уравнение (11) не согласуется с уравнением (10), то приходится делать вывод, что выражение (10) не точно.

Действительно, прибавляя к насыщенному раствору AgCl некоторый избыток одного из ионов, мы должны учитывать ту часть, которая относится к растворяемому хлористому серебру, и, следовательно, общая концентрация иона будет больше, чем та, которая соответствует этому избытку. Пусть избыток ее равен некоторой концентрации C . Тогда общая его концентрация будет $C+x$, а концентрация Ag будет x , т. е.

$$[x_{\text{Ag}^+}] \cdot [C+x_{\text{Cl}^-}] = S, \text{ т. к. } [C_{\text{Ag}^+}] = [C_{\text{Cl}^-}]; \text{ то} \quad (12)$$

$$x^2 + Cx = S$$

или

$$x = -\frac{C}{2} \pm \sqrt{\frac{C^2}{4} + S}.$$

Следовательно, x уменьшается с увеличением концентрации C .

Знак $(-)$ в последнем равенстве не имеет физического смысла, так как величина x не может быть отрицательной. Поэтому в окончательном виде:

$$x = -\frac{C}{2} + \sqrt{\frac{C^2}{4} + S}. \quad (13)$$

Обозначив величину $C+x$ (действительная концентрация раствора) через C_1 , получаем

$$C_1 = \frac{C}{2} + \sqrt{\frac{C^2}{4} + S} \quad (14)$$

или, принимая во внимание равенство (10):

$$C_1 = \frac{V-v}{V+v} \cdot \frac{N}{2} + \sqrt{\frac{(V-v)^2}{(V+v)^2} \cdot \frac{N^2}{4} + S}. \quad (15)$$

Для эквивалентной точки, когда $V = v$ и $C = 0$, получаем, что действительная концентрация C_1 равна корню из произведения растворимости:

$$C_1 = \sqrt{S}. \quad (15a)$$

Как известно, для графического изображения процесса

титрования удобнее брать не величину концентрации C_1 , а показатель ионов P_{Ag} или P_{Cl} , который равен отрицательному логарифму концентрации:

$$P = -\lg C_1.$$

Откладывая (рис. 3 и 4) по оси абсцисс v — объем приливаемого реагента, а по оси ординат — $-\lg C_{1Cl}$, получаем некоторую кривую, пересекающую ось абсцисс при значении $v = V$, т. е. тогда объем прилитого реагента равен объему титруемого раствора. Пунктиром изображена линия, соответствующая значению $-\lg C$, т. е. тому случаю, когда величиной x пренебрегают.

Приведенные на рис. 3 и 4

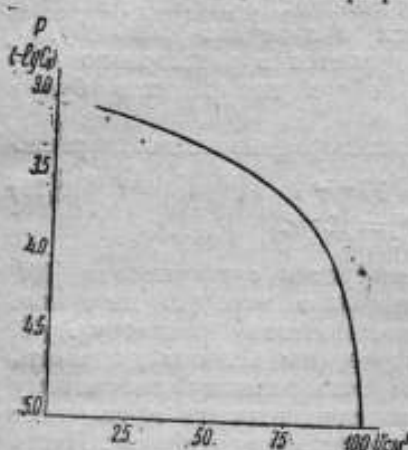


Рис. 3. Зависимость показателя ионов хлора от количества приливаемого реагента
титруемый раствор $NaCl$ 0,001 N;
титрующий раствор $AgNO_3$ 0,01 N.

графики показывают, что при значительных концентрациях величина x не играет существенной роли, тогда как при титровании растворов типа 0,01 N и тем более 0,001 N (а именно с последними и приходится иметь дело в гидрометрии) пренебрежение величиной x может повести к значительным погрешностям.

При титровании имеет значение не величина x д. с., а ее изменение в зависимости от прибавляемого количества титрую-

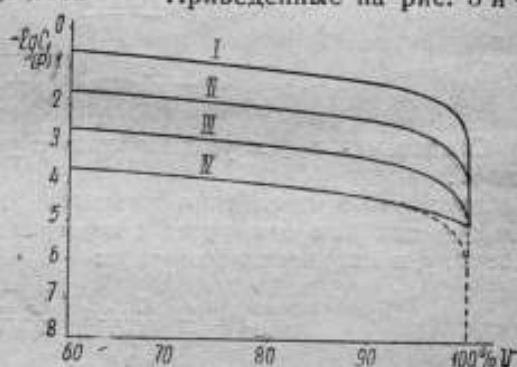


Рис. 4. Зависимость показателя ионов от количества прилитого реагента.

Оба раствора:

- I — однонормальный,
- II — децинормальный,
- III — сантинормальный,
- IV — миллинормальный.

Пунктирные линии показывают зависимость величины $-\lg C_1$ от количества прилитого реагента.

шего реагента. Поэтому необходимо определить производную от величины э. д. с.

По формуле (6) мы имеем:

$$E = \frac{RT}{nF} (\ln C_2 - \ln C_1).$$

Так как при титровании в одном из сосудов концентрация держится все время неизменной, то производная:

$$E' = -K [\ln C_1]', \text{ где } K = \frac{RT}{nF}.$$

Подставляя вместо C_1 его значение из выражения (15), получаем:

$$E' = \frac{KNV}{(V+v)^2} \cdot \frac{11}{\sqrt{\frac{N^2}{4} \frac{(V-v)^2}{(V+v)^2} + S}}. \quad (16)$$

Для удобства были вычислены производные E' по приближенным формулам для двух случаев: 1) когда C велико по сравнению с S ; 2) когда C мало по сравнению с S .

В первом случае:

$$C_1 = C + \frac{S}{C}. \quad (14a)$$

и

$$E' = \frac{2KV}{V^2 - v^2} \cdot \frac{N^2(V-v)^2 - S(V+v)^2}{N^2(V-v)^2 + S(V+v)^2}. \quad (16a)$$

во втором случае:

$$C_1 = \frac{C}{2} + \sqrt{S}. \quad (14b)$$

и

$$E' = \frac{2KNV}{N(V^2 - v^2) + 2\sqrt{S}(V+v)^2}. \quad (16b)$$

Сравнивая выражения для P и E' , видим, что E' пропорциональна показателю ионов P , т. е. может быть представлена графиком, аналогичным с P , достаточно лишь величины ординат умножить на $\frac{RT}{nF}$ и на модуль перехода от натуральных логарифмов к десятичным.

Переходя к титрованию раствора одной нормальности N раствором другой нормальности n , получаем формулу приближенной концентрации в следующем виде:

$$[C] = \frac{VN - vn}{V + v}. \quad (17)$$

Точная концентрация C_1 с учетом влияния произведения растворимости определится по формуле:

$$[C_1] = \frac{1}{2} \cdot \frac{VN - vn}{V + v} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{VN - vn}{V + v} \right)^2 + S}, \quad (18)$$

а производная э. д. с.:

$$E' = \frac{KV}{(V + v)^2} \cdot \frac{N + n}{\sqrt{\left(\frac{VN - vn}{V + v} \right)^2 + 4S}}. \quad (19)$$

График, представляющий зависимость E' от v , как видно, аналогичен предыдущему.

Рассмотрение формул (16) и (19) показывает, что изменение э. д. с. почти на всем протяжении очень мало зависит от концентрации раствора и лишь вблизи эквивалентной точки значительно уменьшается с уменьшением концентрации.

Отсюда следует, что гальванометр, который придется применять при титровании для гидрометрических целей, должен обладать высокой чувствительностью; однако высокая чувствительность также неудобна, так как в этом случае придется учитывать ряд дополнительных влияний, главным образом непостоянство температуры во время эксперимента и поляризацию электродов.

Как уже указывалось, концентрационный элемент работает за счет тепловой энергии, вследствие чего изменение температуры окружающей среды будет вредно влиять на его э. д. с., а, следовательно, на результаты титрования. Конечно, в полевых условиях нельзя иметь термостаты, а поэтому приходится идти на уменьшение чувствительности гальванометра.

Уменьшение влияния поляризации ведется двумя способами: 1) увеличением площади серебряных электродов и 2) возможно более тщательной очисткой хлористого серебра.

Необходимость совместить противоречивые требования — увеличение и уменьшение чувствительности гальванометра — приводит к некоторой оптимальной чувствительности последнего. Однако можно идти и другим путем, а именно: искусственно повышать концентрацию исследуемого раствора, применяя для этой цели соль, которой пользовались для прививки, и воду из исследуемого потока.

3. МЕТОД ЭСТЕРЛЕ

Эстерле в своем исследовании титрования ионов Cl для целей прививки [4] выражает искомую концентрацию ионов Cl через количество M_0 затрачиваемого $AgNO_3$:

$$C_0 = K \cdot \frac{fnM_0}{V_0},$$

где f — фактор нормальности;
 n — нормальность раствора AgNO_3 ;
 M_0 — количество (объем) раствора AgNO_3 , требуемого для достижения эквивалентной точки;
 φ_0 — величина, зависящая от степени ионизации;
 V_0 — объем титруемого раствора;
 K — коэффициент, зависящий от выбора единиц.
 К некоторому моменту в ходе титрования, когда было при-
 лито $M \text{ см}^3$ раствора AgNO_3 , концентрация Cl' , соответствующая этому моменту, может быть выражена так:

$$C = K \cdot \frac{fn(M_0 - M) \varphi}{V}$$

Подставляя полученные значения для C_0 и C в уравнение (6), получим:

$$E = \frac{RT}{nF} \left[\ln K \cdot \frac{fnM_0\varphi_0}{V_0} - \ln K \cdot \frac{fn(M_0 - M) \varphi}{V} \right]$$

Эстерле делает допущение, что $V = V_0$ и $\varphi = \varphi_0$, иначе говоря, что объем раствора и степень активности не меняются за время титрования. Тогда последнее равенство изобразится так:

$$E = \frac{RT}{nF} [\ln M_0 - \ln(M_0 - M)] \quad (20)$$

Беря производную от E , найдем:

$$E' M = \frac{RT}{nF} \cdot \frac{1}{\frac{M_0}{M} - 1} \quad (21)$$

т. е. получается уравнение типа гиперболы с возмущающим членом.

Логарифмируя последнее равенство, имеем:

$$\lg E' + \lg M = \lg \frac{RT}{nF} - \lg \left(\frac{M_0}{M} - 1 \right) \quad (22)$$

что представляет собой уравнение прямой с возмущающим членом.

Когда мы переходим за эквивалентную точку, т. е. перетитровываем, то получается

$$\lg E' - \lg M = \lg \frac{RT}{nF} - \lg \left(\frac{M_0}{M} - 1 \right) \quad (22a)$$

Величина M в первый период изменяется от 0 до M_0 , а во второй — от M_0 до ∞ , в эквивалентной точке при $M = M_0$ обе прямые пересекаются. В действительности это не так. Если брать значение M чрезвычайно близким к M_0 , то оба последние равенства теряют свой смысл, так как в этом случае воз-

мушающие члены стремятся к бесконечности и ни о каких прямых говорить не приходится. Но известно, что и с чисто химической точки зрения нельзя пользоваться значениями M , весьма близкими к M_0 , так как в этой области влияние величины произведения растворимости приводит к тому, что не удовлетворяется основное условие:

$$C^2 > S.$$

Вообще влияние члена $\lg\left(\frac{M_0}{M} - 1\right)$ на характер всей прямой (22) будет незначительно, так как изменение значения этого члена не велико по сравнению с другими величинами, входящими в уравнение.

Выше было указано, что Эстерле предполагает как объем, так и степень активности ионов не меняющимися в течение эксперимента. Это, однако, неверно.

Если же такого допущения не делать, то уравнение (20) примет вид

$$E = \frac{RT}{nF} \left[\ln \frac{M_0 \varphi_0}{V_0} - \ln \frac{(M_0 - M) \varphi}{V} \right], \quad (20a)$$

и все дальнейшие рассуждения будут иными, т. е. прямых мы не получим, а будут некоторые кривые, которые на небольших участках можно принимать за прямые.

Как показывают приводимые ниже данные, обработка результатов по методу Эстерле все же возможна с достаточной для гидрометрической практики точностью, а получение результатов имеет преимущество, заключающееся в простоте установки, что весьма ценно в полевых условиях.

4. ОПЫТЫ ЛАБОРАТОРИИ

Для исследования потенциометрического титрования лабораторией была проведена работа на уже испытанной установке [1].

Опыты велись следующим образом: титровали 200 см³ раствора NaCl, концентрацией 60 $\frac{M^2}{L}$ сантинормальным раствором AgNO₃. Для достижения эквивалентной точки на указание количество раствора NaCl должно было быть израсходовано 20,52 см³ раствора азотнокислого серебра.

Как видно из табл. 1, средняя погрешность из 9 титрований примерно равна 0,44%.

Качество отдельных значений величины V следует признать неодинаковым, как это видно из прилагаемой табл. 2 и соответствующих графиков.

Колебание значения величины V происходит из-за разброса точек на графике, с которого снимают это значение.

Таблица 1

№ опыта	Количество V прилитого AgNO_3 в эквивалентной точке см^3	Погрешность титрования	
		абсолютная см^3	относительная %
1	20,53	0,01	0,05
2	20,69	0,17	0,82
3	20,63	0,11	0,54
4	20,62	0,10	0,49
5	20,64	0,12	0,59
6	20,84	0,12	0,59
7	20,61	0,09	0,44
8	20,53	0,01	0,05
9	20,60	0,08	0,40
Средние значения 20,61		0,09	0,44

Таблица 2

№ опыта	Пределы значений V см^3	Погрешность титрования	
		абсолютная см^3	относительная %
1	20,49—20,56	$\pm 0,035$	$\pm 0,17$
2	20,60—20,78	$\pm 0,070$	$\pm 0,34$
3	20,60	0,0	0,0
4	20,62	0,0	0,0
5	20,59—20,69	$\pm 0,050$	$\pm 0,24$
6	20,64	0,0	0,0
7	20,50—20,61	$\pm 0,055$	$\pm 0,27$
8	20,53—20,62	$\pm 0,045$	$\pm 0,22$
9	20,60	0,0	0,0

Как показывают результаты проведенных опытов, задача, поставленная перед лабораторией, — осуществление потенциометрического титрования методом, пригодным в полевых условиях, с тем, чтобы погрешность не превышала 1%, — выполнена.

В действительности погрешность следует считать меньше указанной в табл. 1.

В нашем случае результаты, полученные при титровании, больше действительного значения концентрации. Это наводит

на мысль, что в основном мы имеем дело с систематической погрешностью, происходящей, по всей вероятности, от неправильно принимаемого титра раствора AgNO_3 . Однако конечной целью титрования в нашем случае является не сама концентрация, но расход воды, а тогда, как известно, в методе прививки чистота применяемых реактивов не имеет значения, равно как и точный титр реагента.

При расчете расхода воды мы имеем отношение получаемых количеств приливаемого раствора AgNO_3 .

Следовательно, при условии, что все титрования производятся одним и тем же раствором AgNO_3 и что количество титруемого раствора одинаково, все систематические погрешности войдут как в числитель, так и в знаменатель формулы расхода и в итоге сократятся.

Действительно, предположим, что все титрования произведены без случайных погрешностей; тогда из уравнения

$$Q = q \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}$$

видно, что систематические погрешности в концентрациях не будут влиять на точность определяемого по этой формуле расхода.

Выводы

1. Титрование потенциометрическим методом (способ Эстерле) дает погрешность меньше 1%.
2. Применение чистых реактивов при титровании не является необходимым (за исключением AgCl).
3. Необходимую аппаратуру составляют: два сосуда для растворов, микробюретка на 5 см³, гальванометр стрелочный, балластное сопротивление, 4 серебряных электрода, шести-полюсный переключатель, ключ.

Наиболее трудоемкими операциями являются приготовление чистого хлористого серебра и серебряных электродов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Рубец. Измерение больших расходов воды методом прививки. ВНИИМ, Механические измерения, № 2 (14), 1940.
2. Л. А. Рубец. Определение расходов воды методом прививки. См. предыдущую статью.
3. Г. Груббе. Введение в электрохимию. НКТ, 1934, стр. 79.
4. R. M. Oesterle. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1934, стр. 145 и 159.

К ВОПРОСУ О СРАВНИМОСТИ ПОКАЗАНИЙ МАЯТНИКОВЫХ КОПРОВ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Как известно, во многих случаях копры, служащие для определения ударной вязкости, не дают одинаковых показателей при испытании тождественных образцов. С введением в технические условия на приемку сталей обязательных испытаний на ударную вязкость, вопрос о сравнимости показаний копров приобрел особую важность.

Сравнением результатов показаний, получаемых на различных копрах, занимались в разное время: Шарпи и Корню-Тенар [1], Фарфурин [2], Г. П. Зайцев [3] и др.

Исследования Шарпи и Корню-Тенара, показывающие, что сравнительные испытания тождественных образцов на различных копрах дают расхождение результатов до 8,5%, последующие работы Н. Н. Давиденкова и Е. М. Шведовой [4], в которых также найдено расхождение показаний, исследования А. Фарфурина и, особенно, сравнительные испытания, произведенные Г. П. Зайцевым и подтвержденные опытами Укр. Института Металлов [5], дававшие расхождение до 30%, заставляют более внимательно относиться к показаниям копров различных конструкций.

Наиболее обширные эксперименты были поставлены Шарпи и Корню-Тенаром. Сравнительные испытания величин ударной вязкости были ими произведены на трех парах различных копров, а именно:

а) маятниковый копер Шарпи — 307 кгМ и вертикальный копер с весом бабы 18,28 кг;

б) маятниковый копер Шарпи — 30 кгМ и ротативный копер Гильери — 60 кгМ;

в) маятниковый копер Шарпи — 300 кгМ и ротативный копер Гильери — 275 кгМ.

Материал образцов при испытании копров: пары а) — хромоникелевая сталь, пар б) и в) — никелевая сталь (Ni—1%).

Результаты этих испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные данные	Копры		Шарпи 30 кгМ	Гильери 60 кгМ	Шарпи 300 кгМ	Гильери 275 кгМ
	Шарпи 307 кгМ	Вертик. копра				
Вес массы, кг	96,25	18,28	—	—	—	—
Высота падения, м	3,87	3,05	—	—	—	—
Скорость удара, м/сек	—	—	5,519	8,858	9,637	8,858
Тип образца	Шарпи 30×30×160		Надрез глуб. 3 мм 10×10×53,3		Шарпи 30×30×160	
Пролет, мм	120	120	40	40	120	120
Количество образцов	5	5	5	5	5	5
Среднее a_k , $\frac{кгМ}{см^2}$	10,39	9,65	18,55	18,40	18,78	20,45
Предельные значения a_k , $\frac{кгМ}{см^2}$	10,44—	9,95—	19,01—	18,9—	19,64—	20,78—
Среднее отклонение, %	0,7	2,4	1,3	1,9	2,4	3,5
Расхождение, %	7,4%		0,8%		8,5%	

Как видно из табл. 1, расхождение в показаниях различных копров достигает 8,5%.

Отметим, что авторы исследований имели дело с исключительно однородными образцами, и, однако, рассеяние частных значений a_k на одном копре превышает относительное расхождение показаний между двумя копрами. Видимо, это обстоятельство и позволило авторам считать такое расхождение несущественным, а показания копров вполне сравнимыми.

В работах Фарфуринна сравнение показаний было произведено на вертикальном копре и маятниковом копре Шарпи (большая модель), а также на копре Гильери и маятниковом копре Шарпи (большая модель). По данным Фарфуринна, расхождение в показаниях разных копров не превышает 10—11%. Автор объясняет это отчасти недостаточной однородностью материала, отчасти недостаточной тщательностью изготовления надреза.

Следует заметить, что все указанные выше авторы сравнивали работу копров, принципиально отличающихся друг от друга как по устройству, так и по регистрирующему механизму, и потому трудно с уверенностью сказать, что расхождение в результатах испытаний относится только за счет образцов.

В конце 1938 г. была опубликована статья Г. П. Зайцева о сравнимости показаний маятниковых копров. Автор, анализируя удар с точки зрения механики твердого тела, приходит к следующим утверждениям:

1. Удар, проходящийся не по центру удара, замедляет не

только поступательное движение, но, создавая момент относительно центра тяжести, приводит также и к замедлению вращательного движения.

2. Реальные копры отличаются от теоретических наличием штока или растяжек, способных воспринимать упругую деформацию. Приложение внешнего удара в точке, лежащей ниже или выше центра качания, вызовет непропорционально сильное изменение угловой скорости по сравнению с поступательной, которое неминуемо приведет к упругому изгибу штока. Даже если удар будет приложен в центре качания, то, так как моменты инерции диска маятника без штока и диска со штоком различны, реакция оси при ударе должна иметь место, и шток маятника окажется упруго изогнутым.

3. Энергия, накопленная штоком, должна рассеяться в процессе неизбежных колебаний системы, в силу чего маятник взлетит на меньшую высоту, а указатель покажет большую работу. Потенциальная энергия изгиба штока образуется за счет частичного уменьшения кинетической энергии вращения маятника относительно центра тяжести.

4. Полная кинетическая энергия T между энергиями вращательного движения маятника во время полета распределяется между энергией поступательного (T_0) и вращательного движения (T_{ω}). Отношение их автор находит из теории маятника и доказывает, что энергия вращательного движения может составлять до 15% полной кинетической энергии и что она тем больше, чем больше момент инерции относительно центра тяжести, и тем меньше, чем длиннее маятник.

Автор приводит данные поверки копров, а затем результаты сравнения работы копров испытанием на них тождественных образцов. К сожалению, полные материалы испытания не даются, а обработка результатов, по нашему мнению, не совсем правильна, главным образом потому, что принятие копра ГЗИП в качестве эталонного и сравнение показаний остальных копров с ним недостаточно обосновано.

Необходимо отметить, что статья Г. П. Зайцева вызвала среди работников научно-исследовательских и заводских лабораторий достаточно серьезные сомнения; в самом деле, автор ставит вопрос об изъятии почти всех типов копров с оставлением только одного, и именно — копра ГЗИП, как наиболее, по его мнению, надежного. Надежность эксплуатируемых копров поставлена под вопрос, доверие к показываемой этими копрами величине ударной вязкости подорвано, отсюда — естественное недоверие и к самому ударному испытанию, как определенной качественной пробе, выявляющей склонность металла к хрупкому разрушению.

В свете изложенного, автор настоящей работы поставил перед собой задачу, сводящуюся главным образом к расши-

ренным сравнительным испытаниям тождественных образцов с различными надрезами на маятниковых копрах самых разнообразных конструкций.

Ниже приводятся описание и результаты произведенных нами экспериментальных исследований.

ВЫБОР ТИПОВ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ударные испытания автотракторной стали, проведенные в 1935 г. Н. Н. Давиденковым и Е. М. Швецовою [4], выявили два типа надрезанных образцов, могущих быть выбранными как обязательные при стандартизации испытания на ударную

вязкость, а именно: образец типа Менаже, с глубиной надреза 3 мм, и второй, с острым надрезом, рекомендованным обществом DVM (рис. 1, а, б).

Основные условия для выбора типа надреза следующие:

1. Верхняя граница перелома кривой критического интервала хрупкости должна совпадать с комнатной температурой или быть выше ее;
2. Комнатная температура не должна попадать на нижнюю границу переходного участка, дающего большое рассеяние точек.

Указанным условиям отвечают оба вышеупомянутые типа надреза, и исследования Н. Н. Давиденкова и Е. М. Швецовою подтвердили правильность предложений Мозера (Германия) на Цюрихском

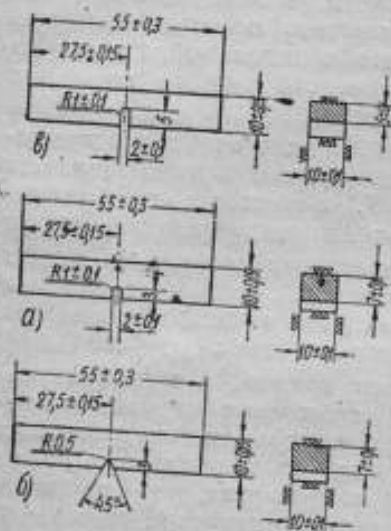


Рис. 1. Типы образцов: а — образец типа Менаже, глубиной 3 мм; б — образец DVM, в — образец ISA.

Конгрессе 1931 г. [6]. Как известно, оба типа были приняты как факультативные и в нормы DIN включены в качестве рекомендованных, предварительных.

В 1938 г. Международная ассоциация по стандартизации (ISA) предложила в качестве единого, рекомендованного для применения во всех странах, французский образец UF, в дальнейшем именуемый нами ISA, представляющий собой образец Менаже с глубиной надреза 5 мм (рис. 1, в).

В наших исследованиях было решено применить все три вышеупомянутые типа надрезов и, таким образом, дополни-

тельно выявить, какой из трех типов имеет наибольшие преимущества для включения его, как единого, в общесоюзный стандарт (рис. 1, а, б, в).

МАТЕРИАЛ

В целях охвата сталей, обладающих при комнатной температуре более вязким и менее вязким состоянием, были выбраны стали двух марок № 10 и № 40, неоднократно проверенные при самых разнообразных исследованиях. Материал был получен в виде прутков квадратного сечения размерами: сталь 10—14 мм×14 мм и сталь 40—16 мм×16 мм.

Результаты химического и микроструктурного анализа, отпечатков на серу, по Бауману, и механических испытаний на растяжение и на твердость, по Роквеллу, позволили признать выбранный материал достаточно однородным для сравнительных ударных испытаний, а метод отбора образцов, описанный ниже, еще больше обеспечил единообразие условий испытания.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

На основании изучения опыта заводских и исследовательских лабораторий технологический процесс был запроектирован в следующем общем виде:

№ операции	Содержание операции	Оборудование и инструмент
1	Разметить и нарезать прутки на заготовки длиной $55 \pm 0,3$ мм	Отрезной или фрезерный станок
2	Маркировать № стали и прутка на торце заготовки по указанию мастера	
3	Нормализовать по предписанному режиму	Поперечно-строгальный станок
4	Строгать заготовки с припуском на шлифовку 0,3 мм, снимая одинаковый слой со всех четырех сторон	
5	Шлифовать четыре стороны образца	Плоско-шлифовальный станок. Магнитный стол
6	Профрезеровать надрез согласно заданному профилю	
7	Зачистить заусенцы	Быстроходный токарный станок
8	Притереть надрез притиром с применением пасты ГОИ	
9	Промыть образец и насухо протереть	
10	Замаркировать образец порядковым номером на поверхности у конца	

Нормализация производилась по следующему режиму:
Сталь № 10 — нагрев до 940°, охлаждение на спокойном воздухе.
Сталь № 40 — " " 900°, " " " " " "

После строгания, шлифовки и фрезерования образцы промерялись предельными скобами, специально изготовленными для этой цели.

После фрезерования надреза у 20—25 шт. образцов, профиль фрезы проверялся специальными шаблонами. Форма и профиль надреза также проверялись по шаблону.

Притирка была введена автором главным образом для уничтожения продольных рисок, образованных фрезой в процессе резания, и производилась на быстроходном токарном станочке (впоследствии применялся и сверлильный станок) с помощью медного притира, установленного на центры и обильно смазываемого пастой ГОИ. В результате применения этой операции удалось уничтожить продольные риски, и дно надреза получило ровную матовую поверхность.

Ослабленное сечение образца промерялось предельной скобой с обеих сторон.

Выборочное количество образцов в целях проверки качества сопряжения было просмотрено под микроскопом Цейса с 10-кратным увеличением. Результаты оказались удовлетворительными.

Маркировка производилась по следующему принципу. Торец маркировался цифрой 1 — для стали № 10 и цифрой 4 — для стали № 40. Рядом набивался № прутка. На поверхности образца, у конца его, маркировался порядковый номер. Таким образом, например № 162 обозначал сталь № 10, пруток № 6, образец № 2; или № 4312 — сталь № 40, пруток № 3, образец № 12.

ДОПУСКИ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

При назначении допусков на изготовление образцов нами были учтены многочисленные материалы иностранных и отечественных стандартов. Кроме того, были использованы работы ряда исследователей, занимавшихся проблемой ударного испытания. (см. „Литература“ №№ 4, 5, 6, 7, 8 и 9).

Наиболее интересной из них является исследование Ф. П. Недорезова [7], дающего теоретический разбор влияния неточности изготовления надрезанных образцов для испытания ударной вязкости и тем самым определяющего величину допуска.

В нашем случае, допуски, определенные Ф. П. Недорезовым, ужесточены, что гарантировало от погрешностей, вызываемых недостаточной точностью изготовления, и подтвер-

ждено практикой в уже упоминавшейся ранее работе Н. Н. Давиденкова и Е. М. Швецово́й.

Принятые нами допуски на изготовление образцов показаны на рис. 1.

УДАРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Все образцы, предназначенные для ударных испытаний, были разбиты на группы таким образом, чтобы в каждую группу попали образцы, вырезанные из одних и тех же прутков. Такой отбор образцов обеспечивал одинаковые условия для сравнения показаний ударной вязкости на различных копрах.

Ударные испытания производились при комнатной температуре в пределах от $17,5^{\circ}$ до $21,5^{\circ}$. На каждом копре испытывались одновременно все три типа образцов по обоим маркам стали и при одинаковом пролете между опорами (40 мм).

Для сравнительных испытаний были выбраны маятниковые копры, приведенные в табл. 2.

Как видно из табл. 2, выбор копров предусматривал:

1. Наличие разных систем подвесок: шток круглого сечения, труба, ферма, двутавровое сечение.
 2. Для сравнения введен также копер с дефектным погну́тым штоком.
 3. Представлены типы копров двух мощностей.
 4. Представлены копры с двумя формами ножей, но с одинаковым углом (45°).
 5. Представлены копры с опорами на вертикали и с опорами, вынесенными вперед.
 6. Представлен копер с вынесенными опорами (старый тип Амслера), но с подвеской в виде трубчатого штока (у нового типа Амслера — подвеска в виде фермы).
- Все маятниковые копры, предназначенные для сравнительных испытаний, были предварительно проверены согласно инструкции, составленной автором.
- Обнаруженные неисправности были устранены на месте.

КОЛИЧЕСТВО ИСПЫТАННЫХ ОБРАЗЦОВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ

В табл. 3 даны сведения о количестве испытанных образцов и распределении их для сравнительных испытаний на различных копрах. Образцы из стали № 10, как требующие для своего разрушения работы больше 10 и 15 кгм, были испытаны на копрах с большим запасом энергии (30 кгм). Образцы из стали № 40 были испытаны на всех копрах.

Результаты измерений записывались в протоколы испытаний, а затем обрабатывались по методам, изложенным в книге проф. М. Ф. Маликова [10].

Таблица 2

№ по пор.	Фирма, мощность, год выпуска, заводский №	Место установки	Краткая характеристика	Уларный нож		
				форма	угол	толщина мм
1	Мор и Федергаф — 30 кгм. 1931 г. № 464	Завод	Копер с переменным запасом энергии. Шток маятника круглого сечения, сплошной. Шкала — градусная	Прямой	45°	16
2	Мутон — 30 кгм. 1911 г. № 58	Завод „Большевик“	Копер с переменным запасом энергии. Шток, представляющий в сечении двутавровую балку, составляет одно целое с диском маятника. Шкала — градусная	Прямой	45°	18
3	Ловенгаузен — 30 кгм. 1931 г. № 2762	Завод „Большевик“	Копер с постоянным запасом энергии. Шток пустотелый — погнут. Шкала — градусная.	Прямой	45°	19
4	Амслер — 30 кгм. 1928 г. № 6244	Кировский завод	Копер с переменным запасом энергии. Опоры вынесены вперед. Маятник подвешен жестко на четырех стержнях. При способление для отсчета в виде кинематического механизма, показывающего работу в кгм	Выпуклый	45°	16
5	ГЗИП — 30 кгм. 1938 г. № 215	Институт строительной механики Ака. Наук СССР	То же	Выпуклый	45°	16
6	Амслер — 30 кгм (старый тип)	ВИАМ	Отличается от нового конструкцией подвески и формой ножа. Маятник подвешен на штоке.	Прямой	30°	16
7	Мор и Федергаф — 10 кгм. 1910 г. № 65	Кировский завод	Копер с постоянным запасом энергии. Шток круглого сечения. Шкала градусная.	Прямой	45°	16

№ по пор.	Фирма, мощность, год выпуска, заводский №	Место установки	Краткая характеристика	Ударный нож		
				форма	угол	толщина мм
8	Шоппер — 10 кг/м. № 269В	Завод „Большевик“	Копер с постоянным запасом энергии. Шток — трубчатый. Шкала — градусная. Имеется поправочная шкала	Прямой	45°	16
9	Амслер — 15 кг/м. 1928 г. № 6250	Кировский завод	Копер с переменным запасом энергии. Копия Амслер—30кг/м	Выпуклый	45°	16
10	ГЗИП — 15 кг/м. 1936 г. № 12	ВНИИМ	То же	Выпуклый	45°	16

На основании ряда отдельных измерений ударной вязкости, произведенных нами на каждом копере, для каждого типа образца, по двум маркам стали, находилось средне-арифметическое, как наиболее достоверное значение для данного ряда. Найдя разность между полученным средне-арифметическим и отдельными измерениями, мы получили остаточные погрешности, а затем и сумму квадратов остаточных погрешностей.

Средняя квадратичная погрешность, оценивающая точность процесса, находилась по формуле:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum p^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где n — число измерений; p — остаточная погрешность.

Для нахождения вероятной погрешности результата вычисление велось по формуле:

$$E = \pm \frac{0,6745 \sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

а для относительной вероятной погрешности:

$$E_0 = \frac{E \cdot 100}{M} \%, \quad (3)$$

где M — средне-арифметическое ряда измерений.

Ниже приводится пример обработки одного ряда измерений.

Таблица 3

Место проведения испытаний	Копер фирмы	Мощность к/м	Статья № 10						Статья № 40						Итого
			запас энер- гии—30 кГ/м		запас энер- гии—15 кГ/м		запас энер- гии—30 кГ/м		запас энер- гии—15 кГ/м		запас энер- гии—30 кГ/м		запас энер- гии—15 кГ/м		
			Меняе 3 м	надрез	Меняе 3 м	надрез	Меняе 3 м	надрез	Меняе 3 м	надрез	Меняе 3 м	надрез	Меняе 3 м	надрез	
Завод	Мор и Федерграф	30	30	15	15	10	10	10	10	10	10	10	10	10	150
Кировский завод	Амслер	30	30	30	15	10	10	10	10	10	10	10	10	10	165
Завод „Большевик“	Мутон	30	30	30	17	14	14	14	20	14	14	20	—	—	125
„	Дозенгаузен	30	30	30	17	14	14	14	20	14	14	20	—	—	125
Инст. стр. мех. УАН	ГЗИП	30	30	30	18	15	15	14	19	14	14	19	—	—	125
ВНИИМ	ГЗИП	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20	20	75
Кировский завод	Амслер	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20	20	75
„	Мор и Федерграф	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14	14	48
Завод „Большевик“	Шоппер	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14	14	48
ВИАМ	Амслер (ст. тип)	30	—	—	—	—	—	—	—	20	20	20	—	—	60
Инст. стр. мех. УАН	типа Слутсвэл	18	5	7	—	—	—	—	—	15	—	—	—	—	27
Итого		155	157	97	—	—	—	60	97	82	99	88	88	100	1023

Полученные средне-арифметические рядов измерений, произведенных на разных копрах, как это видно из табл. 5 (см. ниже), имеют различные абсолютные вероятные погрешности. Для нахождения наиболее достоверного значения ударной вязкости на основании измерений, произведенных на разных маятниковых копрах с различной точностью, вводится понятие о весе, как числе, служащем мерой степени доверия к результату измерения.

Установление весов по погрешностям результата было нами произведено согласно основному правилу, по которому „веса обратно пропорциональны квадратам погрешностей результата“, т. е.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{E_2^2}{E_1^2}, \quad (4)$$

где P_1 и P_2 — веса измерений и E_1 и E_2 — вероятные погрешности результата.

Для нашего случая приводим пример установления весов для средне-арифметических, полученных из показаний на 5 копрах для образцов из стали № 10 с надрезом Менаже глубиной 3 мм.

1. Копер Мор и Федерграф:	$A_1 = 15,57 \pm 0,07$	кГм;
2. „ Мутон — Шарпи:	$A_2 = 15,92 \pm 0,07$	„
3. „ Лозенгаузен:	$A_3 = 17,28 \pm 0,09$	„
4. „ Амслер, нов. тип:	$A_4 = 15,73 \pm 0,09$	„
5. „ ГЗИП:	$A_5 = 17,75 \pm 0,10$	„
	$\Sigma P = 30.$	

Согласно формуле (4):

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{E_2^2}{E_1^2} = \frac{49}{49} = \frac{1}{1}, \quad \frac{P_3}{P_4} = \frac{E_4^2}{E_3^2} = \frac{81}{81} = \frac{1}{1}$$

$$\frac{P_2}{P_5} = \frac{E_5^2}{E_2^2} = \frac{81}{49} = \frac{8}{5}, \quad \frac{P_4}{P_5} = \frac{E_5^2}{E_4^2} = \frac{100}{81} = \frac{5}{4}$$

Отсюда: $P_1 = 8$; $P_2 = 8$; $P_3 = 5$; $P_4 = 5$; $P_5 = 4$.

Наименее заслуживающим доверия будет результат измерения с наибольшей вероятной погрешностью $E_5 = \pm 0,10$ (копер ГЗИП), оцененный нами наименьшим весом $P_5 = 4$.

Установив веса, мы можем рассматривать все измерения, как ряд, состоящий из 30 ($\Sigma P = 30$) отдельных измерений, заслуживающих одинакового доверия, в котором 8 раз встречается средне-арифметическое A_1 , 8 раз — A_2 , 5 раз — A_3 , 5 раз — A_4 и 4 раза — A_5 .

Взяв для этого ряда (30 измерений) средне-арифметическое, мы получим так называемое средне-взвешенное (в наших вычислениях, из показаний 5 или 10 копров), являющееся

наиболее достоверным значением ударной вязкости данного образца.

$$A_{\text{ср.-взвеш.}} = \frac{P_1 A_1 + P_2 A_2 + P_3 A_3 + P_4 A_4 + P_5 A_5}{\sum P} =$$

$$= \frac{8 \cdot 15,57 + 8 \cdot 15,92 + 5 \cdot 17,28 + 5 \cdot 15,73 + 4 \cdot 17,75}{30} = 16,26 \text{ кгМ.}$$

Точность средне-взвешенного находится по формуле:

$$E_p = E_i \sqrt{\frac{P_i}{\sum P}} \quad (5)$$

(для определения E_p можно взять любое значение E_i или P_i из данного ряда).

Тогда
$$E_p = 0,07 \sqrt{\frac{8}{30}} \approx 0,04 \text{ кгМ}$$

и окончательный результат будет:

$$A_{\text{ср.-взвеш.}} = 16,26 \pm 0,04 \text{ кгМ.}$$

Аналогично были подсчитаны средне-взвешенные для всех типов образцов, являющиеся наиболее достоверными значениями ударной вязкости для всех копров.

В табл. 4 дана сводка средне-взвешенных значений из показаний 5 и 10 копров для двух марок сталей и трех типов надреза.

Таблица 4

Марка стали	Ст. 10			Ст. 40		
	Надрез			Надрез		
	Менаже, глубина 3 мм	DVM	ISA	Менаже, глубина 3 мм	DVM	ISA
Средне-взвешенное, кгМ.	16,26	13,98	7,49	6,53	4,80	3,72
Погрешность ср.-взвеш., кгМ	±0,04	±0,03	±0,02	±0,02	±0,03	±0,01

Приняв, как мы уже упоминали, средне-взвешенное в качестве наиболее достоверного значения ударной вязкости, мы сравнили показания различных копров с этим наиболее достоверным значением. Для этого была взята разность между средне-взвешенным $A_{\text{ср.-взвеш.}}$ и средне-арифметическим A для каждого копра. Эта разность, умноженная на 100 и отнесен-

ния к средне-взвешенному, дала погрешность показаний копра в процентах. Таким образом была найдена относительная погрешность каждого копра. Все полученные результаты обработки помещены в сводную табл. 5.

В 5-й графе даны предельные значения A , характеризующие абсолютную величину рассеяния.

В 6-й графе дано средне-арифметическое значение затраченной на излом образца работы A в кг.м.

В 7-й графе даны вероятные погрешности результата E средне-арифметического по формуле (2).

В 8-й графе дана относительная вероятная погрешность результата E_0 , в процентах, по формуле (3).

В 9-й графе даны значения средне-взвешенных, принимаемых нами за наиболее достоверные значения ударной вязкости.

В 10-й графе даны отклонения показаний копров от наиболее достоверного значения в процентах.

В 11-й графе дана величина рассеяния, отрицательная и положительная, найденная, как разность между средне-арифметическим и минимальным или максимальным значением ударной вязкости в пределах данного ряда показаний, отнесенная к средне-арифметическому для данного копра и выбранного образца.

Сопоставляя данные сводной табл. 5, можно отметить следующее:

1. Испытанием охвачены образцы, обнаружившие как вязкое, так и хрупкое состояние, с показаниями полной работы на разрушение в широком диапазоне: 16,26; 13,98; 6,53; 4,80; 3,72.

2. Отклонение показаний различных копров в процентах от наиболее достоверного значения ударной вязкости не является постоянной погрешностью, характеризующей копер, а зависит от механических свойств металла и выбранного типа надреза и всего менее, повидимому, от конструкции копра.

3. Ряд копров (7 из 10) дал показания, отклоняющиеся от наиболее достоверного как в положительную, так и в отрицательную сторону, что еще больше подтверждает зависимость отклонений от типа образца.

4. Сопоставим отклонения (в %) по типам надрезов:

ст. 10	образец Менаже, глубина 3 мм	— наибольшее отклонение +9,17 и —4,21, абс. отклонение 13,41;
.. 10	.. DVM	.. отклонение +7,94 и —2,22, абс. отклонение 10,16;
.. 10	.. ISA	.. отклонение +3,38 и —2,13, абс. отклонение 5,51;
.. 40	.. Менаже, глубина 3 мм	.. отклонение +9,60 и —3,52, абс. отклонение 13,32;
.. 40	.. DVM	.. отклонение +4,17 и — 8,75, абс. отклонение 12,92;
.. 40	.. ISA	.. отклонение +3,76 и — 8,06, абс. отклонение 11,82.

Магнитковые концы	Сталь №	Тип надреза	Количество образцов	Предельные значения $A_{сГж}$	Плотная средняя работа $A_{сГж}$	Деформация при растяжении $E_{сГж}$	Одност. поршневая пористость E_p в %	Средне-взвешенное из показаний 10 концев	Отклонение от номинал. в %	Расширение, %
Мор и Федерграф 30 кгж	10	M-3	30	13,1 — 16,6	15,57	$\pm 0,07$	0,45	16,26	-4,24	-15,86 + 6,62
	10	DVM	30	12,2 — 14,4	13,80	$\pm 0,05$	0,36	13,98	-1,29	-11,59 + 4,34
	16	ISA	15	7,6 — 8,1	7,86	$\pm 0,03$	0,35	7,99	-1,63	-3,31 + 3,05
	40	M-3	15	5,2 — 7,5	6,43	$\pm 0,04$	0,56	6,53	-1,53	-19,12 + 16,64
	40	DVM	10	3,5 — 5,4	4,60	$\pm 0,13$	2,74	4,80	-4,17	-21,73 + 17,40
	40	ISA	10	3,4 — 3,5	3,54	$\pm 0,02$	0,50	3,72	-4,84	-3,95 + 1,70
Мугол—Шарп 30 кгж	10	M-3	30	13,98 — 16,86	15,92	$\pm 0,07$	0,43	16,26	-2,09	-12,18 + 5,92
	10	DVM	30	12,74 — 15,22	14,39	$\pm 0,08$	0,54	13,98	+2,93	-11,46 + 5,77
	10	ISA	17	7,73 — 8,48	8,15	$\pm 0,03$	0,42	7,99	+2,0	-5,15 + 4,05
	40	M-3	14	6,05 — 7,73	6,71	$\pm 0,11$	1,92	6,53	+2,76	-9,84 + 15,19
	40	DVM	14	3,67 — 5,81	4,68	$\pm 0,10$	2,12	4,80	-2,50	-21,58 + 24,14
	40	ISA	20	3,48 — 4,28	3,86	$\pm 0,03$	0,83	3,72	+3,76	-9,84 + 10,88
Лосенгаузен 30 кгж	10	M-3	30	15,69 — 18,86	17,28	$\pm 0,09$	0,54	16,26	+6,27	-9,20 + 9,14
	10	DVM	30	13,26 — 16,69	14,75	$\pm 0,07$	0,47	13,98	+5,51	-10,10 + 6,37
	10	ISA	17	7,56 — 8,54	8,21	$\pm 0,05$	0,64	7,99	+2,75	-7,92 + 4,01
	40	M-3	14	5,69 — 7,55	6,85	$\pm 0,09$	1,34	6,53	+4,50	-16,93 + 10,36
	40	DVM	14	4,19 — 5,69	4,92	$\pm 0,09$	1,87	4,80	+2,50	-14,84 + 15,64
	40	ISA	20	3,21 — 4,10	3,64	$\pm 0,04$	1,07	3,72	-2,15	-11,81 + 12,64

Акслер (новый тип) 30 кгж	10	M-3	30	14,2 — 17,2	15,73	$\pm 0,09$	0,55	16,26	-3,96	-9,73 + 9,34
	10	DVM	30	12,5 — 14,5	13,67	$\pm 0,04$	0,33	13,98	-2,22	-8,56 + 6,07
	10	ISA	30	7,3 — 8,3	7,82	$\pm 0,03$	0,42	7,99	-2,13	-6,65 + 6,13
	40	M-3	13	4,8 — 7,6	6,30	$\pm 0,14$	2,30	6,53	-3,52	-23,80 + 20,64
	40	DVM	10	3,7 — 5,8	4,66	$\pm 0,13$	2,75	4,80	-2,92	-20,60 + 24,46
	40	ISA	10	3,5 — 4,0	3,71	$\pm 0,03$	0,86	3,72	-0,27	-5,66 + 7,81
ГЗИП 30 кгж	10	M-3	30	16,4 — 19,5	17,75	$\pm 0,10$	0,54	16,26	+9,17	-7,60 + 9,86
	10	DVM	30	11,6 — 16,4	15,09	$\pm 0,14$	0,90	13,98	+7,94	-23,13 + 8,67
	10	ISA	18	7,4 — 8,8	8,20	$\pm 0,06$	0,66	7,99	-3,38	-10,41 + 6,53
	40	M-3	14	6,7 — 7,8	6,88	$\pm 0,10$	1,45	6,53	+5,36	-17,15 + 13,37
	40	DVM	14	3,6 — 5,6	4,54	$\pm 0,12$	2,62	4,80	-5,42	-20,70 + 23,85
	40	ISA	19	3,3 — 4,1	3,67	$\pm 0,03$	0,87	3,72	-1,34	-10,10 + 11,70
Акслер (старый тип) 30 кгж	40	M-3	20	5,7 — 6,7	6,31	$\pm 0,04$	0,70	6,53	-3,37	-9,67 + 6,17
	40	DVM	20	4,3 — 5,9	4,88	$\pm 0,05$	1,10	4,80	+1,67	-11,88 + 20,90
	40	ISA	20	3,5 — 4,6	3,77	$\pm 0,04$	1,10	3,72	+1,34	-7,16 + 22,01
	40	M-3	14	5,5 — 8,0	6,70	$\pm 0,12$	1,84	6,53	+2,60	-15,22 + 22,09
	40	DVM	14	3,0 — 5,9	4,89	$\pm 0,14$	2,90	4,80	+1,88	-38,65 + 20,65
	40	ISA	20	3,3 — 4,2	3,75	$\pm 0,03$	0,83	3,72	-0,81	-12,00 + 12,00
Мор и Федерграф 10 кгж	40	M-3	14	5,77 — 7,18	6,47	$\pm 0,08$	1,25	6,53	-0,92	-10,81 + 10,89
	40	DVM	14	3,34 — 5,74	4,38	$\pm 0,11$	2,58	4,80	-8,75	-23,74 + 31,06
	40	ISA	20	3,00 — 3,68	3,42	$\pm 0,03$	0,85	3,72	-8,66	-12,28 + 7,62
	40	M-3	20	4,8 — 7,8	6,78	$\pm 0,10$	1,44	6,53	+3,83	-23,20 + 15,04
	40	DVM	20	4,2 — 5,9	5,00	$\pm 0,07$	1,48	4,80	+4,17	-16,10 + 18,00
	40	ISA	20	3,6 — 4,2	3,80	$\pm 0,01$	0,10	3,72	-2,15	-5,26 + 10,54
Акслер (новый тип) 15 кгж	40	M-3	20	6,0 — 8,4	7,17	$\pm 0,08$	1,16	6,53	+9,80	-16,31 + 17,16
	40	DVM	20	4,0 — 5,9	4,78	$\pm 0,07$	1,50	4,80	-0,42	-16,31 + 19,25
	40	ISA	21	3,2 — 3,9	3,64	$\pm 0,03$	0,82	3,72	-2,15	-12,09 + 7,14

Анализируя полученные числа отклонений по типам над-
реза, мы можем констатировать следующую характерную осо-
бенность: отклонения показаний копров при образцах Менаже
3 мм — наибольшее, при образцах DVM — меньшее и при об-
разцах ISA — наименьшее. Интересно, что эта особенность
характерна как для стали № 10 при испытаниях на 5 копрах,
так и для стали № 40 при испытании на 10 копрах.

Это обстоятельство лишний раз подтверждает, что откло-

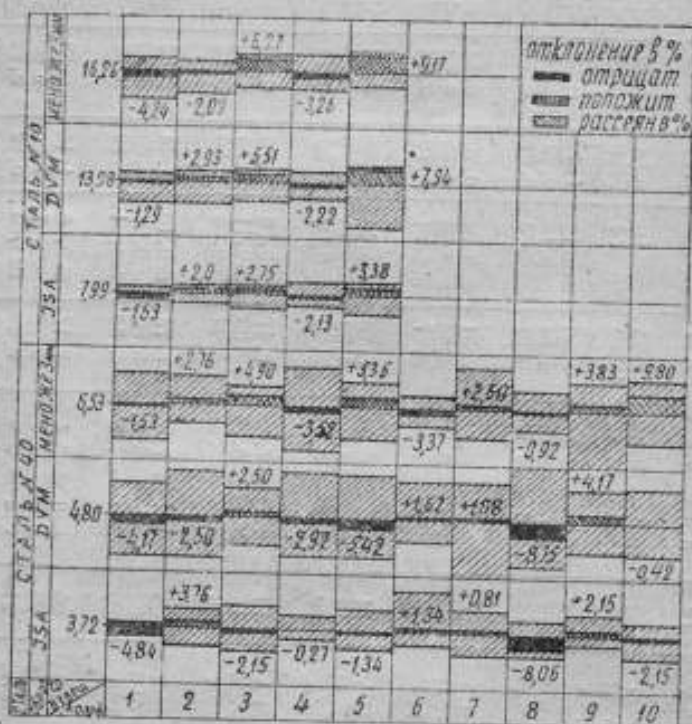


Рис. 2. Зависимость рассеяния от типа образца и марки стали (номера копров соответствуют табл. 2).

нение больше всего зависит от типа образца и свойств ме-
талла и в меньшей мере от копра.

5. Сравнивая показания двух копров фирмы Амслер, нового
и старого типа, в основном почти подобных и отличающихся
друг от друга системой подвески (у нового типа — подвеска
маятника на 4 штоках в виде жесткой фермы, у старого типа —
подвеска маятника осуществлена в виде трубчатого штока),
мы можем отметить, что показания обоих копров почти совпа-
дают:

Амслер, новый тип, ст. 40, образец Менаже, глубина 3 м.м., —
 $A = 6,30$ кгм; DVM — $A = 4,66$ кгм; ISA — $A = 3,71$ кгм;

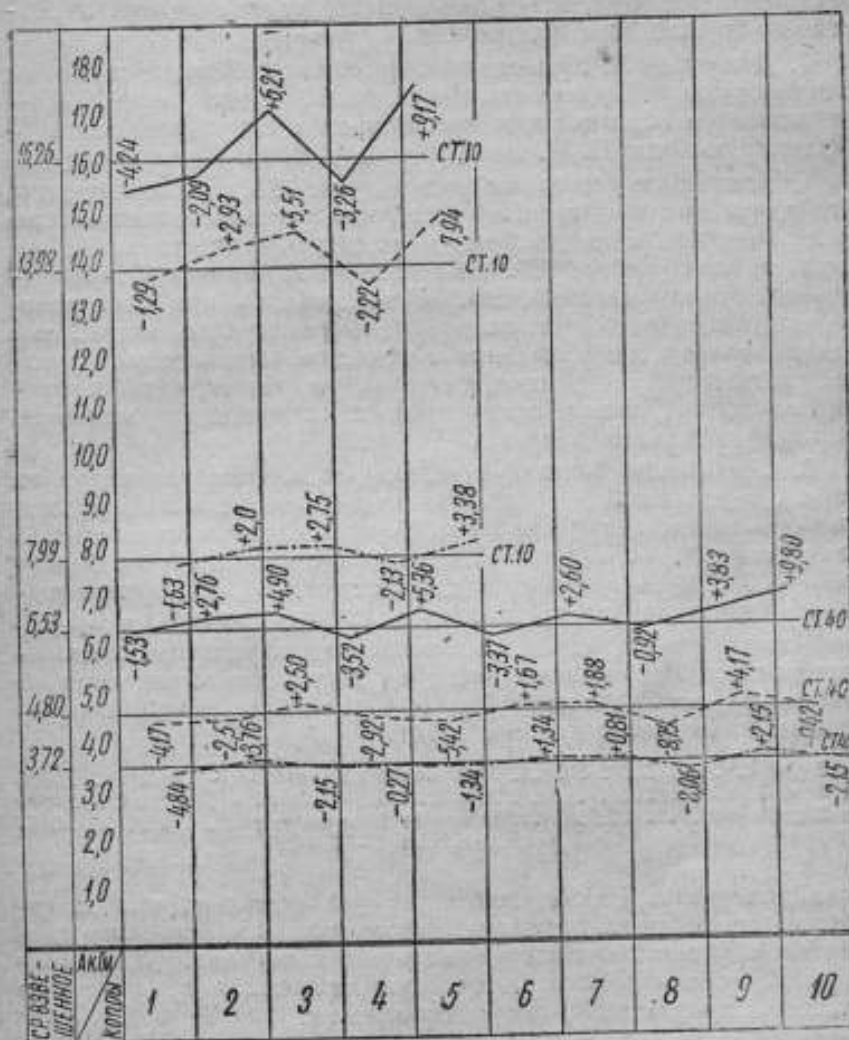


Рис. 3. Отклонения показаний копров от наиболее достоверного значения (помера копров соответствуют табл. 2).

— образец Менаже глубиной 3 м.м.,
 - - - - - DVM,
 - · - · - ISA.

Амслер, старый тип., ст. 40, образец Менаже, глубина 3 м.м., —
 $A = 6,31$ кгм; DVM — $A = 4,88$ кгм; ISA — $A = 3,77$ кгм, т. е.
 системы подвесок практически влияния не оказывают.

6. Сопоставляя числа рассеяния для стали № 10 и № 40, замечаем, что наши опыты подтверждают в полной мере известное положение, что при хрупком изломе величина рассеяния больше, чем при вязком.

7. Для стали № 10 рассеяние при надрезах Менаже глубиной 3 мм несколько больше, чем при надрезах DVM; для стали № 40 — наблюдается обратное явление. В последнем случае подтверждаются выводы Н. Н. Давиденкова и Е. М. Швецовоу [4].

Обращаясь к рассеянию при надрезах ISA, можно заметить, что для обеих марок сталей величина рассеяния значительно ниже, чем при остальных надрезах. „Кучность“ отдельных измерений при надрезах ISA, по сравнению с двумя другими надрезами, резко выражена. Это обстоятельство при исследовательских и приемочных испытаниях чрезвычайно важно, так как позволяет, для суждения о качестве, ограничиться меньшим количеством образцов, иначе говоря, вероятность появления измерений, резко отличающихся от среднего, меньшая, чем при остальных надрезах.

8. Отклонение показаний различных копров, как видно из табл. 5 и рис. 2 и 3, во всех случаях меньше величины рассеяния для каждого типа надреза. Только в одном случае из 45 (для стали № 40, надреза ISA, из копре фирмы Мор и Федергаф — 30 кгм) отклонение от наиболее достоверного значения — 4,84% незначительно превышает величину рассеяния — 3,95%.

Превышение процента рассеяния над процентом отклонения показаний копров от наиболее достоверного значения во многих случаях достигает большой величины. В наших измерениях это превышение достигает:

до 2 раз	18%	от 4 до 6 раз	15%
от 2 до 3 раз	20%	от 6 до 10 раз	15%
от 3 до 4 раз	12%	от 10 и более раз	18%
(45 рядов измерений — 100%)			

Приведенные данные позволяют утверждать, что полученные отклонения показаний не превышают величины рассеяния частных значений в отдельных измерениях, а потому и расхождения в показаниях исследованных копров можно считать практически несущественными.

Выводы

1. Наиболее существенное значение при ударных испытаниях имеют:

а) молот маятника, как движущаяся масса, обладающая известной кинетической энергией, вполне достаточной для разрушения образца одним ударом;

б) опоры, на которых помещается образец и где происходит самый процесс разрушения;

в) отсчетный механизм для измерения остаточной энергии маятника после разрушения образца;

г) тип образца, форма и размеры надреза, расположение его, допуски при изготовлении и тщательность изготовления.

Первые три пункта целиком относятся к конструкции копра, четвертый — к типу образца, который, как это выяснилось из сравнительных испытаний, играет весьма существенную роль в показаниях копра.

2. Маятниковые копры должны обладать жесткой конструкцией, причем мощность их должна быть достаточной для разрушения образца одним ударом. Последнему требованию вполне удовлетворяет запас энергии, равный 30 кГм , однако в случае применения образца $10 \times 10 \times 55$ с надрезом ISA и проверки путем многочисленных ударных испытаний металлов в наиболее вязком состоянии (до отожженной меди включительно) при этом надрезе можно ограничиться мощностью маятника в 15 кГм .

К ограничению мощности величиной в 15 кГм следует стремиться по двум основным причинам:

а) точность измерения остающейся кинетической энергии не есть величина постоянная, а изменяется в зависимости от угла взлета; относительная погрешность возрастает пропорционально тангенсу половины угла взлета; поэтому, в интересах точности результата, не следует работать на маятниковых копрах, мощность которых значительно превышает работу разрушения [11].

б) при установлении, в качестве стандартного, копра мощностью 15 кГм , затраты на материал, производственные процессы и оборудование будут значительно меньшими, чем для изготовления копров мощностью 30 кГм ;

3. Конструкция и размеры копра должны удовлетворять основному условию, чтобы центр удара маятника находился на середине ударного ножа и одновременно против середины образца, расположенного на опорах.

4. Применение, для испытания ударной вязкости металлов, конструкции копра с переменным запасом энергии, а следовательно, и переменной скоростью, не обязательно, особенно при принятии в качестве стандартного копра мощностью 15 кГм , ибо, как известно, изменение скорости в пределах $3-5 \text{ м/сек}$ на величине ударной вязкости практически не отражается.

5. Крепление маятника с помощью защелки в исходном, для нанесения удара, положении должно быть устроено таким образом, чтобы захват маятника осуществлялся на конце рычага или на самом молоте. С этой точки зрения, захват, осуществленный фирмой Мор и Федергаф для модели в 30 кГм и фирмой Амслер, а также ГЗИП, можно считать вполне прием-

лемым. Следует только пожелать, чтобы рама, поддерживающая маятник (копры типа Амслер), была более массивной и жесткой.

6. Подшипники, на которых качается маятник, должны обеспечивать наименьшее трение. Подтяжка и регулировка крепления маятника в подшипниках должна производиться поставщиком.

7. Для предохранения оси качания от деформаций необходимо, кроме совмещения центра удара с серединой ножа, обратить серьезное внимание на соблюдение вертикальности плоскости качания, а также на отсутствие боковых люфтов маятника.

8. Торможение должно осуществляться при помощи веревочного тормоза типа Амслер, действующего достаточно эффективно и без резких толчков; необходимо лишь обеспечить отсутствие натяга тормозной веревки при взведенном для удара маятнике.

9. Для удобства проверки вертикальности установки следует снабдить копры типа Шарля установочными рисками на станине и маятнике, а копры типа Амслер — ушком для крепления нити отвеса на середине нижней плоскости квадратной части оси качания, и установочным острием к отвесу, ввинчиваемым во время проверки в гайку, соединяющую площадку подвески с молотом маятника.

10. Станину необходимо снабдить жестко смонтированными опорами, крепление которых должно быть весьма солидным, так как практика показывает, что при многочисленных испытаниях крепление ослабевает и опоры раздвигаются на недопустимую величину.

Расстояние между опорами в месте расположения образца должно быть равно 40 мм, что обеспечивает проходимость деформированного образца между опорами, согласно критериям, сформулированным Ю. Н. Морозовым [12] для стандартного образца $10 \times 10 \times 55$ мм.

Пролет между опорами, в обеспечение уменьшения трений концов образца о боковые стенки опор, должен к вылету расширяться.

11. Конструкция опор должна обеспечивать правильное, симметричное расположение образца, при котором центр тяжести последнего находится на линии, касательной к дуге, описываемой центром удара маятника. В то же время нож маятника должен приходиться против надреза образца.

12. Форма ножа и расположение его должны быть таковы, чтобы соприкосновение с образцом происходило посредине стороны последнего. Толщина ножа определяется условием проходимости образца между опорами и должна быть равна или меньше 18 мм.

Крепление ножа должно обеспечивать смену его при из-

носе, а сам нож должен быть взаимозаменяем (в частности, ГЗИП этой взаимозаменяемости не обеспечивает).

13. Чрезвычайно полезными оказываются угольники, регулирующие высоту расположения образца. В конструкции ГЗИП эти угольники крепятся к опорам с помощью гаек с накатанной цилиндрической частью, которые не обеспечивают жесткого крепления и потому должны быть заменены барашками по ОСТу 2070.

14. Отсчетное приспособление должно быть выполнено по типу копров ГЗИП, но существующее конструктивное оформление, вызывающее частые повреждения его, в целях увеличения надежности в работе, требует переделки.

При принятии в качестве стандартного стрелочного указателя, шкалу приспособления следует градуировать в *кГм*.

15. Из сравнения трех образцов с надрезами Менаже глубиной 3 мм, DVM и ISA выявилось с достаточной очевидностью, что наименьшее рассеяние дает образец с надрезом ISA. После исследования этого надреза при различных температурных условиях образец с надрезом ISA должен, по нашему мнению, получить наиболее широкое распространение в практике ударных испытаний.

16. Допуски на изготовление образцов, принятые нами, как уже упоминалось ранее, на основании работы Ф. П. Недорезова [7], ужесточены по сравнению с установленными по ГОСТ 1524-42. Это ужесточение обеспечило большую тождественность испытываемых образцов и не вызвало особых производственных затруднений.

17. Как известно, продольные риски и царапины в дне надреза образца недопустимы. С этой точки зрения, принятый нами метод притирки надреза обеспечивает уничтожение этих рисков или перевод их на поперечные и, по нашему мнению, является более эффективным, чем шлифовка надреза, все же оставляющая продольные риски.

Отклонения показаний отдельных копров, как уже упоминалось ранее, в большей степени зависит от свойств материала и типа надреза и в меньшей степени от конструкции копра, а потому трудно, на основании этих отклонений, отдать предпочтение тому или иному типу копра.

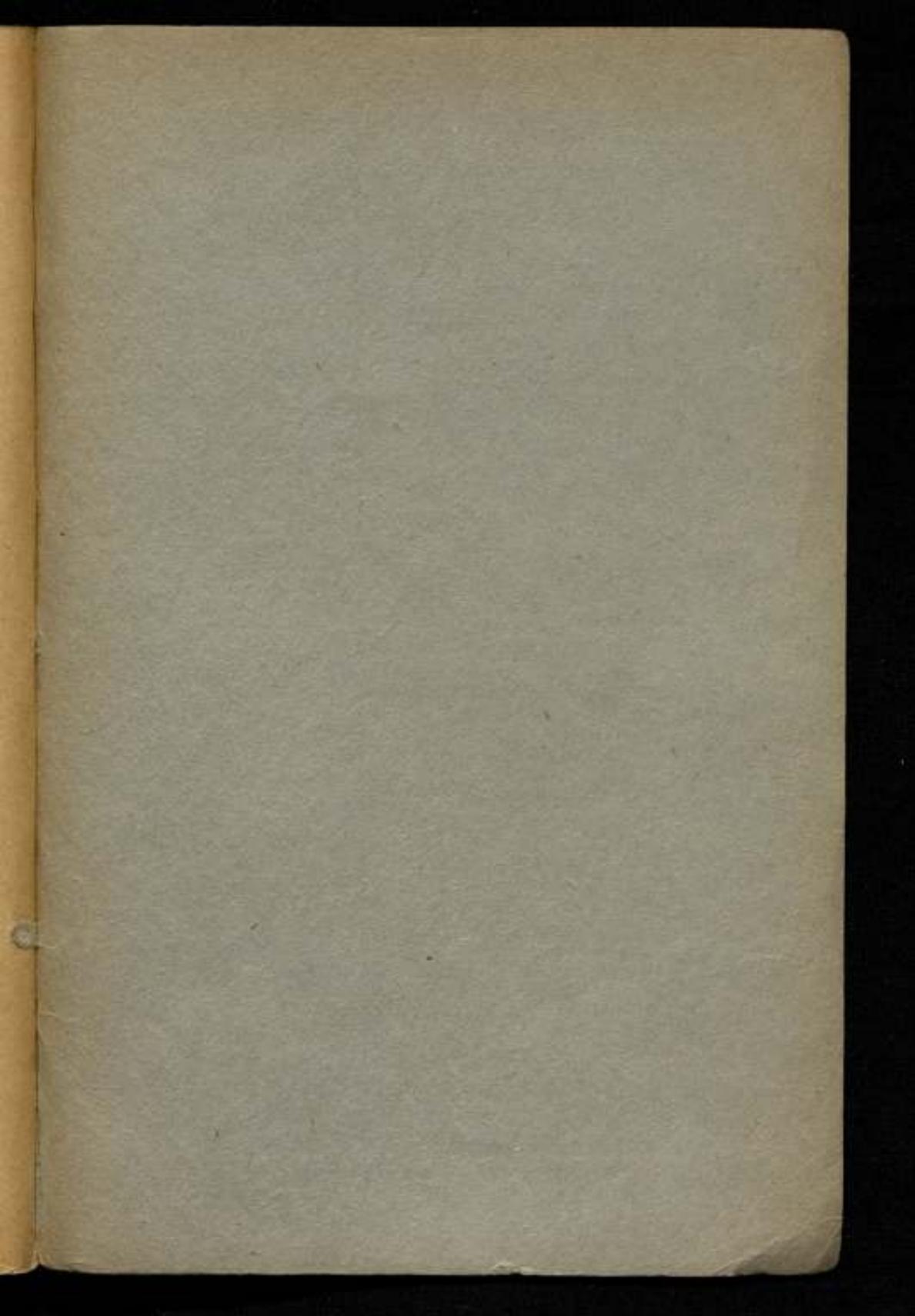
Это не означает, что нет необходимости стандартизовать тип маятникового копра; наоборот, стандартизация принесла бы большую пользу, но критерием для этого должны служить, пожалуй, не столько сравнительные испытания, сколько те основные параметры технического и конструктивного порядка, которые здесь изложены.

Почти любой тип копра, как это видно из настоящей работы, может быть принят в качестве стандартного. Замеченное отклонение показаний отдельных копров от наиболее

достоверного значения ударной вязкости, как правило, не превышает величины рассеяния частных значений показаний ударной вязкости и потому не является существенным. Важно лишь, чтобы копел был исправен и надлежащим образом поверен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Шарпи и А. Корью-Тенар. New experiments on shock tests and the determination of Resilience. Journ. Iron and Steel Inst. 96—11, стр. 61, 1917.
2. А. Фарфурин. Излом стали и ударная проба. Журнал Русского Металлургического Общества, 2, стр. 141, 1925.
3. Г. П. Заицеа. О сравнительности показаний маятниковых копров, Заводская лаборатория, 11, 1938.
4. Н. Н. Давиденков и Е. М. Швецова. Ударные испытания авто-тракторной стали НАТИ. ОНТИ—НКГП, 1935, также Заводская лаборатория, 2, 1935.
5. М. И. Курманов. Испытания металлов на ударную вязкость. Вестник стандартизации, 2, стр. 11, 1940.
6. Цюрихский конгресс 1931 г. Издание Международного общества испытания материалов, 1932.
7. Ф. П. Недорезов. Допуски в образцах при ударной пробе. Диссертация, 1936.
8. В. В. Смирнов. О влиянии уменьшенной высоты образцов Шарпи на величину ударной вязкости. Заводская лаборатория, 3, стр. 331, 1936.
9. Б. А. Авдеев. Стандартные методы испытания металлов. Каталогизат, 1940.
10. М. Ф. Маликов. Точные измерения. Стандартиз, 1935.
11. Н. Н. Давиденков. Динамические испытания металлов. ОНТИ, 1936.
12. Ю. Н. Морозов. Размеры образцов для ударной пробы Шарпи. Сообщения Всесоюзного института металлов, 1—2, стр. 49, 1931.



Цена 7 руб.

Склад изданий:
Ленинград. Международный пр., д. 19, ВНИИМ