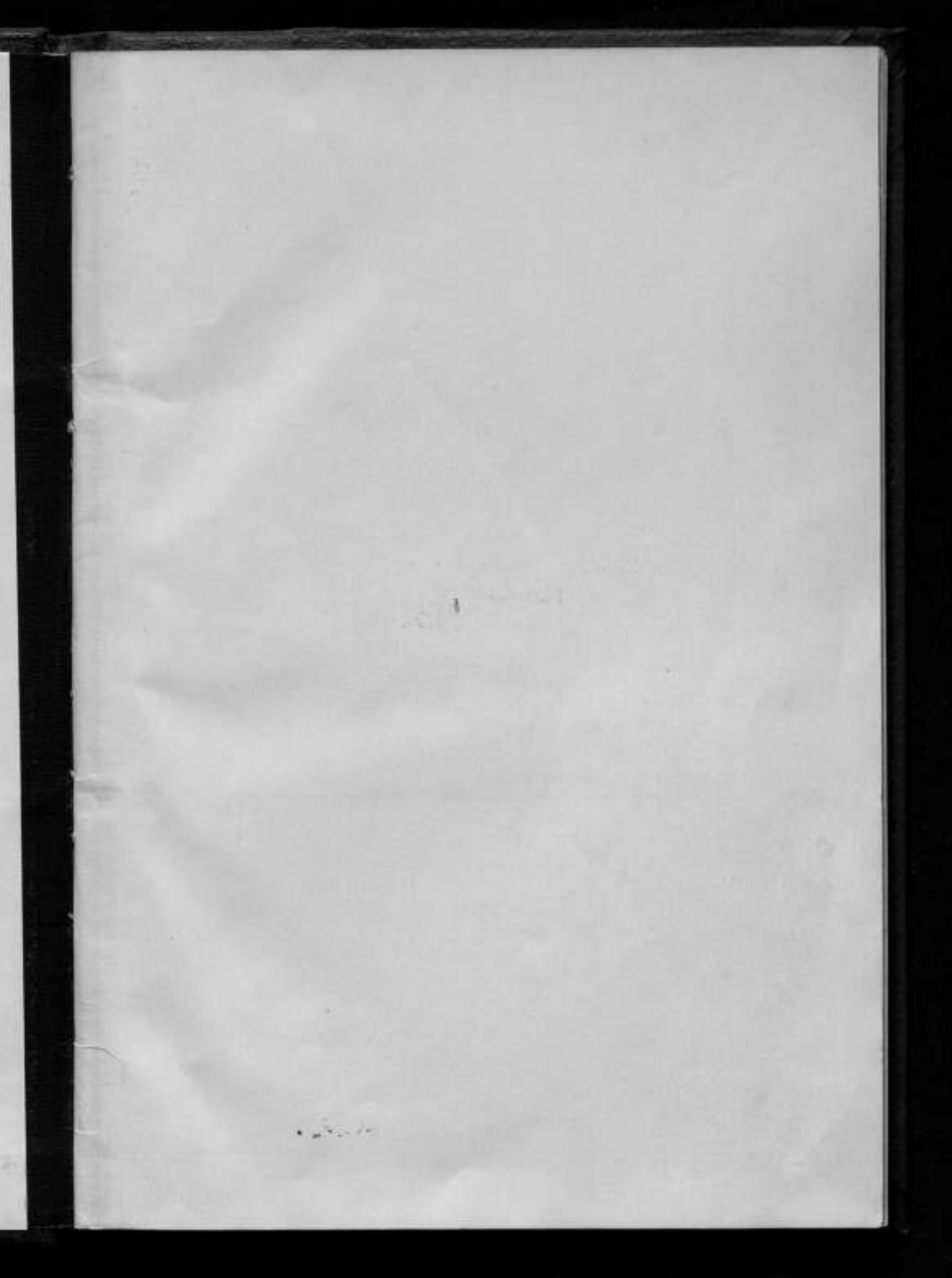
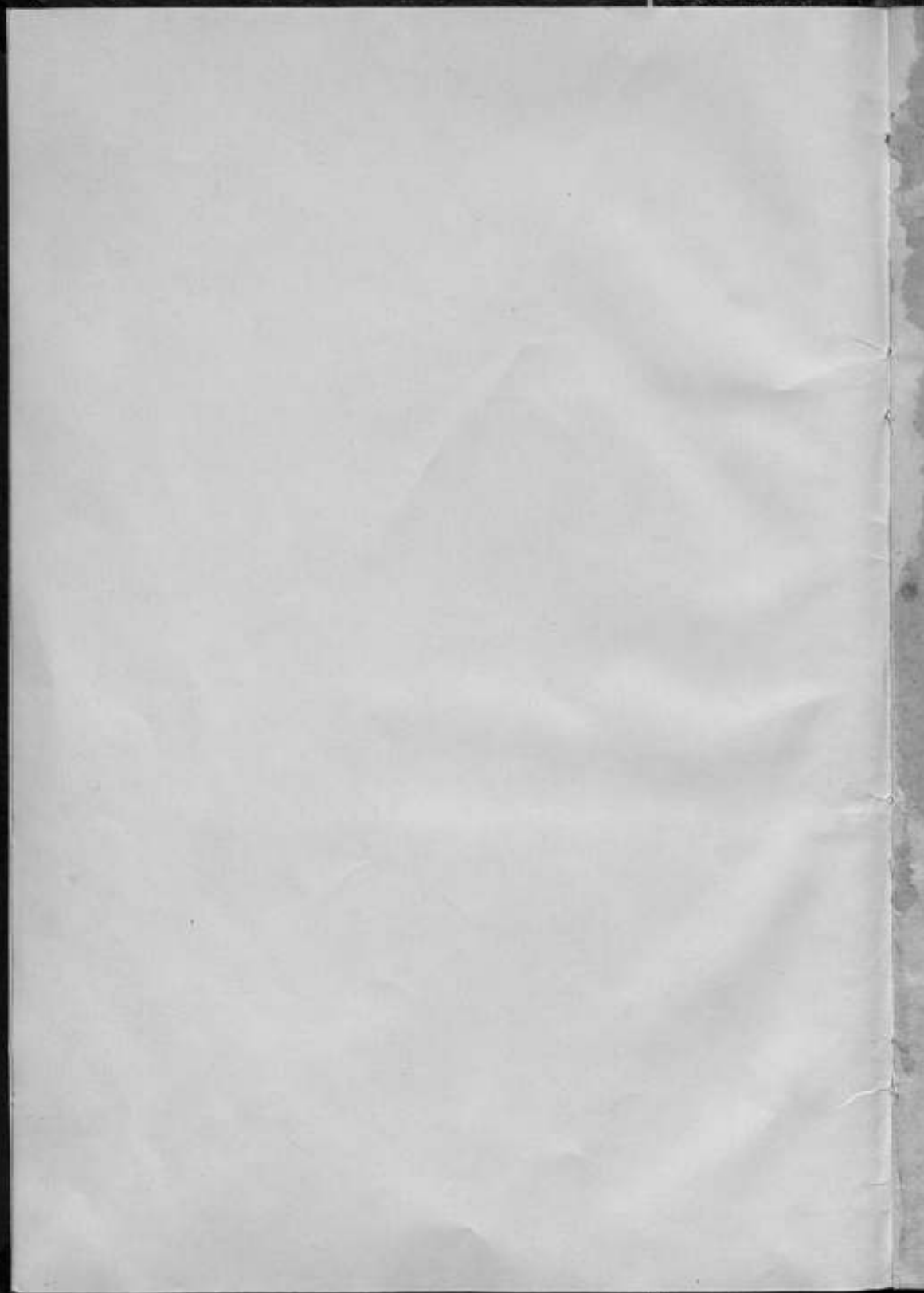


Тепловые исследования  
и измерения  
1936г.

Знаме.









TRAVAUX DE L'INSTITUT DE MÉTROLOGIE  
ET DE STANDARDISATION DE L'URSS

---

LIVRAISON 10 (26)

RECHERCHES  
ET  
MESURES THERMIQUES

Redacteur S. LIPINE

---

ÉDITION DE L'ÉTAT POUR LA STANDARDISATION  
„STANDARTGUIS“

LENINGRAD

1936

MOSCOU

РУДЫ ВСЕСОЮЗНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬНОГО  
ИНСТИТУТА МЕТРОЛОГИИ И СТАНДАРТИЗАЦИИ

---

ВЫПУСК 10 (26)

# ТЕПЛОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ

СБОРНИК СТАТЕЙ

под редакцией  
С. В. ЛИПИНА

БИБЛИОТЕКА  
Всесоюзного научно-исследовательского  
государственного института метрологии  
имени Д. И. Менделеева

1575

---

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ  
„СТАНДАРТГИЗ“

ЛЕНИНГРАД

1936

МОСКВА

Главный редактор *М. И. Гиттерман*.  
Ответств. редактор *С. З. Снарский*.  
Технический редактор *Р. Н. Мосевич*.  
Слано в производство 9/VIII-35 г.  
Подписано к печати 4/XII-1935 г.  
Печати. лист. 6 $\frac{1}{2}$ . Форм. 62 × 88 см.  
В печ. л. 44545 зв. Ленгорлит № 33225.  
Тираж 1300. Заказ № 1839.

---

Типогр. „Коминтерн“ и школа ФЗУ  
им. КИМ А, Ленинград, Красная, 1.

## ОТ РЕДАКТОРА

Задачи социалистического строительства народного хозяйства требуют от нас рационального использования материальных ресурсов нашего Союза. В области теплосилового хозяйства это требование связано, прежде всего, с рациональным расходованием топлива и максимальным использованием полученной тепловой энергии. В балансе теплосиловых установок основными факторами являются техно-экономическая оценка топлива и правильное измерение температур при различного рода тепловых процессах, с целью правильного их ведения и уменьшения тепловых потерь.

В оценке энергетического топлива особое значение приобретает определение его теплотворной способности, и это обстоятельство выдвигает перед метрологическими учреждениями и перед техническим руководством отечественного приборостроения ряд вопросов, связанных с усовершенствованием методов и приборов, применяемых при определении теплотворной способности различных видов топлива. К числу этих вопросов относится выбор наиболее совершенной конструкции калориметров и калориметрических бомб в связи с возникновением в Союзе этой области приборостроения.

Среди вопросов, связанных с измерением температур, как в лабораториях, так и в цеховых условиях, особый интерес представляют вопросы измерения нестационарных температур, измерения температуры поверхностей, более широкое применение при технических измерениях термометров сопротивления, повышение точности температурных измерений и ряд других вопросов. С другой стороны, развитие контрольно-измерительного хозяйства, как одного из факторов техно-экономического регулирования производственных процессов, и возрастающая вследствие этого потребность в измерительных приборах — ставят перед союзным приборостроением ряд производственных задач, к числу которых относится развитие и усовершенствование производства ртутно-стеклянных термометров, термометров давления и оптических пирометров, установление производства термометров сопротивления и радиационных пирометров и обеспечение этими приборами всех отраслей народного хозяйства.

Все перечисленные вопросы находят отражение в работах Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии и стандартизации.

В настоящем сборнике помещены лишь некоторые из этих работ. Другая часть работ, посвященных изготовлению ртутно-стеклянных термометров, поверке их, техническим методам определения теплопроводности изоляционных материалов, установлению цветовой температуры и исследованию наиболее распространенных систем калориметров, служащих для определения теплотворной способности топлива, была помещена в сборнике статей „Тепловые измерения“, вышедшем в 1934 г. Дальнейшие работы Института в этом направлении послужат материалом для следующих сборников Трудов Института. Таким образом, настоящий сборник представляет собой лишь одно из звеньев в ряде научно-исследовательских работ в области указанной выше тематики, публикуемых по мере их осуществления.

При измерении нестационарных температур существенное значение имеет отставание термометра в его показаниях. Несмотря на важность этого фактора, вопрос об отставании термометров до настоящего времени не получил освещения в отечественной научной литературе. В иностранной литературе по этому вопросу имеется всего лишь несколько работ, из которых наиболее полной и оригинальной является работа Harper'a, опубликованная в изданиях Бюро Стандартов.

Помещенная в настоящем сборнике статья Г. М. Кондратьева является весьма ценным вкладом в литературу по вопросу об измерении нестационарных температур и заслуживает особого внимания. Рассматривая общий случай отставания термометров, автор дает вывод новых формул, полученных им на основании предположенной Boussinesq'ом и развитой автором теории регулярного режима. Теория эта была уже ранее положена Г. М. Кондратьевым в основу новых методов определения теплопроводности дурных проводников тепла, опубликованных в упомянутом выше сборнике, вышедшем в 1934 г. Ценность выводов автора заключается не только в их новизне но и в общности их и они являются ценным дополнением к выводам Harper'a.

Вопросу об отставании ртутно-стеклянных термометров посвящена работа В. А. Яковлевой. Экспериментальные исследования явления отставания палочных термометров и термометров со вложенной шкалой, произведенные автором и описанные в статье, показали, что на отставание термометров оказывает влияние предварительная температура нагрева стержня термометра — явление, до настоящего времени не принятое во внимание и не отмеченное в работах Harper'a и других исследователей.

Возрастающее применение в технике термометров давления, применявшихся до настоящего времени главным образом в авиа-



ции, поставило на очередь вопрос о поверке этих термометров. Существенным моментом в измерении температур посредством термометров давления и в поверке их является их отставание, обусловливаемое в термометрах этого типа не только термическими явлениями, но и механическими факторами. В этой части работа А. В. Тарховой примыкает к упомянутым выше работам Г. М. Кондратьева и В. А. Яковлевой.

Устройство термометров давления в отечественной литературе описано лишь в брошюре „Аэротермометры Фурнье“, представляющей в настоящее время почти библиографическую редкость. Это обстоятельство послужило причиной к тому, чтобы предположить описание метода поверки этих термометров и исследованию отставания их краткое описание их устройства и классификацию их.

Выше было упомянуто, что в сборнике „Тепловые измерения“, выпущенном в 1934 г. была помещена статья, касающаяся исследования наиболее распространенных систем калориметров, служащих для определения теплотворной способности топлива. Некоторые результаты, полученные автором на основании экспериментальных исследований, были им впоследствии проверены и дополнены на основании новых опытов с калориметром его конструкции. Эти опыты, как и описание конструкции калориметра, изложены в работе С. В. Липина и С. А. Копваловой, помещенной в настоящем сборнике. Калориметр сам по себе представляет главным образом метрологический интерес и предназначен для определений высокой точности, но результаты его испытания могут представлять практический интерес при работе с другими калориметрами и, несомненно, должны быть приняты во внимание при создании новых моделей калориметров, производство которых лишь нарождается в СССР.

Казалось бы, что при современном уровне научных знаний и при существующем внедрении научных методов исследования в промышленной жизни нашего Союза, основные вопросы метрологии, как например установление температурной шкалы, не должны были бы вызывать никаких сомнений. К сожалению, однако, этот вопрос, который принято считать общеизвестным, далеко не так хорошо известен не только в производственных кругах, но и в среде работников лабораторий. До настоящего времени весьма часто приходится сталкиваться с мнением, что применяемой у нас шкалой температур является шкала Цельсия, и с этой шкалой отождествляется международная температурная шкала. Это мнение, господствующее в широких массах и весьма распространенное среди техников и даже среди работников лабораторий, встречается и в современных справочниках. В качестве конкретного примера такой неосведомленности можно привести „Справочник по основной химической промышленности“ Берль-Лунге, перевод под редакцией инж. В. И. Яковлевского и А. В. Виноградова, Госхимиздат, 1933. В этом

сборнике градусы международной шкалы переведены как градусы Цельсия.

В виду этого представилось вполне целесообразным и своевременным поместить в настоящем сборнике специальную статью, посвященную основным положениям, связанным с установлением международной температурной шкалы и воспроизведению ее в СССР. Эти вопросы подробно излагаются в работе В. А. Яковлевой, помещенной в начале сборника.

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ШКАЛА В ТЕОРИИ И НА ПРАКТИКЕ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ ШКАЛЫ ТЕМПЕРАТУР В ИНТЕРВАЛЕ $0^{\circ}$ — $660^{\circ}$ ПРИ ПОМОЩИ ЭТАЛОННОГО ПЛАТИНОВОГО ТЕРМОМЕТРА СОПРОТИВЛЕНИЯ

[В. А. Яковлева

Международной конференцией по мерам и весам, состоявшейся в Париже в 1927 г., для установления единства измерений температуры, за основную термометрическую шкалу была принята термодинамическая стоградусная шкала, у которой температура таящего льда и температура конденсации водяного пара при нормальном атмосферном давлении обозначены соответственно через  $0^{\circ}$  и  $100^{\circ}$ .

Для практического воспроизведения термодинамической шкалы были выработаны экспериментальные условия, дающие возможность воспроизвести ее с возможно большей точностью, отвечающей современному состоянию науки. Эта практическая шкала, обусловленная температурными реперами, применяемыми приборами, интерполяционными формулами и методами измерений, получила название международной шкалы температур.

Эта шкала была выработана метрологическими учреждениями США, Англии и Германии. Предложение их было принято 31 государством, в том числе СССР.

### ИСТОРИЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ШКАЛ

До принятия термодинамической шкалы международной температурной шкалой служила шкала водородного термометра, постоянного объема. Практически она осуществлялась ртутными термометрами. Для температур от  $-30$  до  $+200^{\circ}$  такими нормальными термометрами служили термометры фирмы Toppelot из стекла „verre dur“, сверенные Шарриис с водородным термометром. При технических измерениях шкалу водородного термометра часто называли шкалой Цельсия, тогда как с этой шкалой она имела только две совпадающие точки, а именно:  $0^{\circ}$  и  $100^{\circ}$ . На всех же остальных температурах учитывались неравномерности в коэффициентах расширения стекла и ртути. Но шкала водородного термометра оказалась непригодной для измерения температур ниже  $-250^{\circ}$ , где водород сжижается ( $-252,8^{\circ}$ ), и для измерения высоких температур, так как не оказалось подходящих сосудов,

с  
д  
в  
п  
и  
в  
л

через которые водород не диффундирует. С открытием гелия область измерений газовым термометром увеличилась. Гелий сжижается при  $-268,9^\circ$ , а при высоких температурах не диффундирует сквозь сосуды из платиноиридия, что дает возможность производить измерения до  $+1600^\circ$ . Таким образом гелиевый термометр расширил пределы шкалы, но не охватил собою всю шкалу температур. Следует еще отметить, что газовые термометры не обладают достаточной точностью измерения; кроме того, все реальные газы несколько отступают от законов термодинамики, и если не принять во внимание этих отступлений, то в зависимости от рода газа, наполняющего термометр при одних и тех же экспериментальных условиях получатся несколько различные результаты.

### ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ШКАЛЫ

Теоретические основы температурной шкалы даются в термодинамике и основываются на связи между теплотой и работой.

Наглядное представление об этой связи дает цикл Карно, в котором какое-либо тело попеременно приводится в контакт с двумя другими телами различной температуры  $T_2$  и  $T_1$ , причем оно получает количество тепла  $\Theta_2$  от более теплого тела и передает более холодному количество тепла  $\Theta_1$ . Если процесс совершается попеременно то изотермически, то адиабатически, и притом вполне обратимо, — имеем согласно второму началу термодинамики следующее отношение:

$$\frac{\Theta_1}{\Theta_2} = \frac{T_1}{T_2}, \text{ откуда } T_1 = T_2 \frac{\Theta_1}{\Theta_2}.$$

Таким образом соотношение количеств тепла дает нам соотношение термодинамических температур.

Для того, чтобы иметь возможность выражать температуры в термодинамической шкале, необходимо выбрать какие-либо температуры, которые могут служить реперными точками. Если цикл Карно совершается между  $T_1$  — температурой таяния льда — и  $T_2$  — температурой водяного пара при нормальном атмосферном давлении, тогда мы будем иметь следующее соотношение:

$$T_2 = T_1 + 100 = T_1 \frac{\Theta_2}{\Theta_1} \text{ или } T_1 = 100 \frac{\Theta_1}{\Theta_2 - \Theta_1}.$$

Так как круговой обратимый процесс нельзя осуществить опытным путем, то для установления термодинамической шкалы температур применяют иной путь, основанный тоже на втором законе термодинамики.

Для измерения очень низких температур, близких к абсолютному нулю, то-есть к такой температуре, при которой прекра-



щается всякое движение молекул, удобнее всего воспользоваться уравнением Клайперона-Кляузиуса

$$L = T \frac{dp}{dT} (v - v') \text{ или после интегрирования } \ln \frac{T}{T_0} = \int_{p_0}^p \frac{v - v'}{L} dp.$$

Посредством этого уравнения температуры, близкие к температурам сжижения газов, могут быть вычислены в термодинамической шкале из теплоты испарения  $L$ , давления насыщенных паров  $p$ , удельного объема насыщенного пара  $v$  и удельного объема кипящей жидкости  $v'$ .

Для других областей температур, выше температур сжижения, применяемых для измерения газов, приведение к термодинамической шкале производится при помощи эффекта Джоуль-Томсона. Эффект Джоуль-Томсона состоит в том, что газ испытывает изменение температуры  $\Delta T$ , если он подвергается изменению давления  $\Delta p$  при прохождении через тормозящие перегородки. Для большей части газов  $\frac{\Delta T}{\Delta p}$  бывает отрицательно, так что принято обозначать  $\mu = -\frac{\Delta T}{\Delta p}$ . Термодинамика дает следующее уравнение для  $\mu$ :

$$\mu = \frac{1}{C_p} \left[ v - T \left( \frac{dv}{dT} \right)_p \right].$$

В применении к газовым термометрам постоянного давления путем простых преобразований и интегрирования получается следующее уравнение:

$$\ln \frac{T}{T_0} = v_0 \int_{T_0}^{T'} \frac{dT'}{T_0' C_p' \mu' + T' v_0},$$

где  $\mu'$  есть понижение температуры газа, проходящего под давлением через какое-либо пористое вещество,

$C_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении,

$T' = T_0' \frac{v}{v_0}$  — температура по шкале газового термометра,

$T$  — температура по термодинамической шкале.

Эффект Джоуль-Томсона не удается определить с точностью, необходимой для установления разности между температурами по газовой и термодинамической шкале, но для установления связи между этими шкалами можно избежать точного определения  $\mu'$ .

Рассматривая уравнение Джоуль-Томсона, видно, что температуры по газовой и по термодинамической шкале тем ближе друг к другу, чем меньше  $\mu'$ , и при  $\mu'$  равном нулю они совпадут, так как  $\mu'$  есть количество работы, затрачиваемое на прео-

доление молекулярных сил притяжения, которое будет тем меньше, чем меньше будет плотность газа, и при плотности газа равной нулю  $p'$  тоже будет равно нулю. Применяемый до сих пор метод основывается на измерениях, произведенных с газовыми термометрами, заполненными определенными реальными газами, имеющими определенную конечную плотность, и результаты перечисляются на идеальный газ. Этот пересчет возможен при рассмотрении изотерм данного реального газа. На оси ординат наносится произведение давления  $p$  на удельный объем газа  $v$ , а на оси абсцисс давление  $p$ . Изотермы тогда представятся в виде прямых

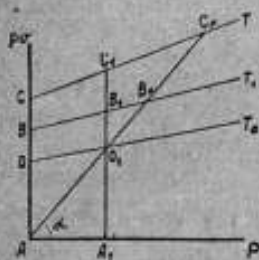


Рис. 1

линий, если давление не превышает нескольких атмосфер и если температура газа не слишком близко подходит к температуре его сжижения. На рис. 1 изображены такие изотермы, относящиеся к температурам  $T_0$  (точка плавления льда),  $T_1$  (температура кипения воды при нормальном давлении) и  $T$  (температура по термодинамической шкале). Прямая  $A'C'$  соединяет точки одинакового давления  $p$ , таким образом расстояния  $A'O':A'B':A'C'$  относятся друг к другу, как соответствующие объемы  $v_0:v_1:v$  или как соответствующие газовой термометру постоянного давления температуры  $T'_{p_0}:T'_{p_1}:T'_p$ . Чем больше приближается линия  $A'C'$  к оси ординат, тем меньше будет давление  $p$  и тем больше газовая температура будет приближаться к термодинамической, а при давлении  $p=0$  шкалы будут совпадать, так что можно написать следующее соотношение:

$$AO:AB:AC = T_0:T_1:T.$$

Пользуясь этим соотношением, можно найти разность между показаниями газового термометра с постоянным давлением  $p_0$  и термодинамической шкалой:

$$T_p - T = \frac{T_0}{100} p_0 \left[ (T - T_1) \left( \frac{dpv}{dp} \right)_{T_0} - (T - T_0) \left( \frac{dpv}{dp} \right)_{T_1} + 100 \left( \frac{dpv}{dp} \right)_T \right].$$

Эти же выводы, с небольшими изменениями, могут быть применены и к газовому термометру постоянного объема. Если обозначить через  $T_v$  газовую температуру, а через  $p_0$  давление газа в точке таяния льда, то получим следующую формулу:

$$T_v - T = p_0 \left[ \frac{T_0}{100} (T - T_1) \left( \frac{dpv}{dp} \right)_{T_0} - \frac{T_1}{100} (T - T_0) \left( \frac{dpv}{dp} \right)_{T_1} + T \left( \frac{dpv}{dp} \right)_T \right].$$



Приведем таблицу разностей между термодинамической шкалой и шкалами газовых термометров с давлением, равным 1000 мм ртутного столба при 0°.

Числа, обозначенные звездочками, получены из наблюдений Henning'a и Otto, а остальные—по данным Kamerlingh-Onnes'a.

t	Гелий		Водород		Азот	
	v—const	p—const	v—const	p—const	v—const	p—const
-250	+0,037		+0,135			
-200	+0,020		+0,069		+0,519	
-150	+0,008		+0,035		+0,174	
-100	+0,003		+0,017		+0,051	
-50	+0,001		+0,007		+0,013	
0	±0,000	±0,000	±0,000	±0,000	±0,000	±0,000
50	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,003	-0,004
	-0,001*	-0,000	-0,003*	+0,004*	-0,010*	+0,032*
100	±0,000	±0,000	±0,000	+0,000	±0,000	±0,000
200	0,000	0,000	+0,003	+0,005	+0,051	+0,117
	+0,006*	+0,001*	+0,024*	+0,024*	+0,022*	+0,123*
400	0,000	0,000	+0,009	+0,021	+0,21	+0,46
	+0,037*	+0,005*	—	—	+0,12*	+0,53*
500	0,000	+0,001	+0,015	+0,030	+0,32	+0,64
1000	+0,001	+0,012	+0,040	+0,076	+0,80	+1,70

Как видно из приведенной таблицы, гелий наиболее близко подходит к термодинамической шкале. Но точность газовых термометров в значительной мере зависит от равномерности нагрева сосуда, содержащего газ, и при высоких температурах эта точность невелика. Так, например, при 1000° она, по подсчетам Henning'a, не выше ±1°. Вообще измерения с газовыми термометрами могут производиться с удовлетворительной точностью только приблизительно до 1100°. Для более высоких температур применяется температурная шкала, основанная на законах излучения. Шкала эта связана со шкалою газовых термометров через температуру плавления золота.

#### МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКАЛА ТЕМПЕРАТУР

Измерительная аппаратура газовых термометров очень громоздка, сложна и дорога, операции с ними требуют лабораторной установки, большого экспериментального опыта и большого количества вычислений, поэтому работа с ними с достаточной точ-

ностью может производиться только в первоклассных метрологических учреждениях.

VII Генеральной конференцией по мерам и весам, на основании многолетних работ с газовыми термометрами, были установлены наиболее достоверные значения температур превращения ряда химически чистых веществ, которые послужили реперными точками для международной шкалы. С целью получения промежуточных значений вся температурная шкала делится на четыре области, воспроизводимые при помощи ряда приборов, показания которых хотя и нельзя непосредственно перечислить на термодинамическую шкалу, но для которых из многократных сравнений их с газовыми термометрами были установлены интерполяционные формулы, дающие возможность произвести такой пересчет. Градуировка этих вторичных термометров основывается на применении постоянных точек—температур таяния и кипения химически чистых веществ.

В качестве таких измерительных приборов применяются: платиновый термометр сопротивления, платино-платино родиевый термоэлемент и оптический пирометр. Следует отметить, что точность отчетов по этим приборам значительно превышает ту точность с которой реперные точки установлены в градусах термодинамической шкалы при помощи газового термометра.

Методы интерполяции приводят к разделению шкалы на следующие четыре области:

1. От точки плавления льда до  $660^{\circ}\text{C}$  температура выводится из сопротивления  $R_t$  эталонного платинового термометра сопротивления при помощи формулы:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2).$$

Константы  $R_0$ ,  $A$  и  $B$  определяются путем наблюдений в точке таяния льда и в точках кипения воды и серы.

2. От  $-190^{\circ}$  до точки плавления льда температуру определяют из сопротивления эталонного платинового термометра сопротивления при помощи формулы:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3].$$

Константы  $R_0$ ,  $A$  и  $B$  должны быть предварительно определены путем эталонирования термометра в точках плавления льда и в точках кипения воды и серы, а константа  $C$  дополнительно получается из наблюдений в точке кипения кислорода.

3. От  $660^{\circ}\text{C}$  до точки плавления золота температура выводится из электродвижущей силы  $e$  эталонной платино-платино-родиевой термопары, один спай которой находится при постоянной температуре, а второй подвергается действию температуры  $t$ , определяемой из формулы:

$$e = a + bt + at^2.$$

Константы  $a$ ,  $b$  и  $c$  определяются по точкам затвердевания сурьмы и плавления золота и серебра.

4. Выше точки плавления золота температура  $t$  определяется отношением силы света  $I_2$  видимых монохроматических лучей, длины волны  $\lambda$ , выраженной в сантиметрах, испускаемых черным телом при температуре  $t$ , к силе  $I_1$  лучей той же длины волны, испускаемых черным телом в точке плавления золота.

$$\text{Формула } \log \frac{I_2}{I_1} = \frac{C_2}{\lambda} \left( \frac{1}{1336} - \frac{1}{t+273} \right).$$

в которой величина  $C_2$  равна 1,432 см. град. служит для определения  $t$  когда  $(t+273)$  меньше 0,3 см. град.

Связывающим звеном между частью шкалы, осуществляемой платиновым термометром сопротивления и платино-платинородиевой термопарой, служит точка затвердевания сурьмы. Она служит одной из основных точек, по которым градуируются термопары. Между термопарами и оптическим пирометром за такую связывающую точку обычно принимается точка плавления золота.

За основные реперные точки международной шкалы принимаются:

а. Температура равновесия между жидким газообразным кислородом при нормальном атмосферном давлении (точка кипения кислорода) •

— 182°,97

$$t_p = t_{760} + 0,0126(p - 760) - 0,0000065(p - 760)^2.$$

б. Температура равновесия между льдом и насыщенной воздухом водой при нормальном атмосферном давлении (точка плавления льда)

0°,000

в. Температура равновесия между жидкой водой и ее паром при нормальном атмосферном давлении (точка кипения воды)

100°,000

$$t_p = t_{760} + 0,0367(p - 760) - 0,000023(p - 760)^2$$

г. Температура равновесия между жидкой серой и ее паром при нормальном атмосферном давлении (точка кипения серы)

444°,60

$$t_p = t_{760} + 0,0909(p - 760) - 0,000048(p - 760)^2$$

д. Температура равновесия между твердым и жидким серебром при нормальном атмосферном давлении (точка плавления серебра).

960°,5

е. Температура равновесия между твердым и жидким золотом при нормальном атмосферном давлении (точка плавления золота)

1063°,0

Нормальное атмосферное давление определяется как давление столба ртути высотой в 760 мм, имеющей удельную массу в 13,5951 г/см<sup>3</sup>, при ускорении силы тяжести равной 980,665 см/сек<sup>2</sup>; оно эквивалентно 1013 250 дин/см<sup>2</sup>.

Кроме основных постоянных точек Международной конференцией было указано несколько вторичных точек, перечисленных ниже, которыми можно пользоваться для эталонирования вторичных приборов, предназначенных для измерения температур. Соответствующая им температура отнесена к нормальному атмосферному давлению. Приведенные формулы, связывающие давление пара с температурой, пригодны в пределах от 680 до 780 мм ртутного столба.

1. Температура равновесия между твердой и газообразной углекислотой . . . . .	-78,5°
$t_p = t_{760} + 0,01595 (p - 760) - 0,0000111 (p - 760)^2$	
2. Температура затвердевания ртути . . . . .	-38,87°
3. Температура перехода сернокислого натрия . . . . .	3°,38°
4. Температура конденсации паров нафталина . . . . .	217,96°
$t_p = t_{760} + 0,058 (p - 760)$	
5. Температура затвердевания олова . . . . .	231,85°
6. Температура конденсации паров бензофенона . . . . .	305,9°
$t_p = t_{760} + 0,063 (p - 760)$	
7. Температура затвердевания кадмия . . . . .	320,9°
8. Температура затвердевания свинца . . . . .	327,3°
9. Температура затвердевания цинка . . . . .	419,45°
10. Температура затвердевания сурьмы . . . . .	630,5°
11. Температура затвердевания меди в восстановительной атмосфере . . . . .	10°3°
12. Температура затвердевания палладия . . . . .	1555°
13. Температура затвердевания вольфрама . . . . .	3400°

#### ЭТАЛОННЫЙ ПЛАТИНОВЫЙ ТЕРМОМЕТР СОПРОТИВЛЕНИЯ

Из приборов, практически воспроизводящих международную шкалу температур, самое видное место занимает платиновый термометр сопротивления, при помощи которого осуществляется громадный интервал шкалы: от -190° до +660°.

Платиновый термометр, как точный измерительный прибор, стал применяться в метрологии лишь сравнительно в недавнее время. Хотя предложен он был W. Siemens'ом еще в 1871 г., но Британская Ассоциация дала неблагоприятный отзыв о постоянстве показаний этого термометра. Лишь с 1886 г., благодаря



работам Callendar'a, Griffiths'a, Heyscoch'a и Nevill'a, которые усовершенствовали его, он начал завоевывать себе место, как прибор, обладающий высшей степенью точности.

В интервале от  $0^{\circ}$  до  $660^{\circ}$  изменение сопротивления проволоки от нагрева подчиняется квадратичному закону и выражается формулой

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2).$$

Выше  $660^{\circ}$  по наблюдениям Callendar'a, Griffiths'a и др. хоть квадратичный закон и остается в силе, но нагревания до высокой температуры оказывают влияние во-первых, на материал креста, на который намотана проволока, а во-вторых, происходит распыление самой платиновой проволоки, и эти причины вызывают заметное непостоянство в показаниях термометра. По наблюдениям Callendar'a, Henning'a и др. квадратичная формула может быть применена до  $-40^{\circ}$ , ниже этой температуры изменение сопротивления платиновой проволоки уже не подчиняется квадратичному закону и для интервала от  $0^{\circ}$  до  $-190^{\circ}$  температура определяется из уравнения:

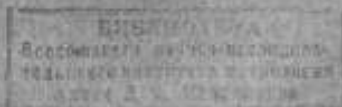
$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3].$$

Около  $-190^{\circ}$  закон изменения сопротивления проволоки опять изменяется, а именно от  $-190^{\circ}$  до точки абсолютного нуля это изменение имеет форму синусоиды. Эти причины в настоящее время и ограничивают область применения платиновых термометров от  $-190^{\circ}$  до  $+660^{\circ}$ .

Обе интерполяционные формулы были выведены из сравнения платиновых термометров сопротивления с газовыми термометрами, показания которых были перечислены на термодинамическую шкалу. Эти формулы явились в результате многолетней работы Callendar'a, Griffiths'a, Dickson'a, Henning'a и Otto, Buckingham'a, Holborn'a, Müller'a, Burgass'a и других ученых.

Формулы эти справедливы лишь для термометров из чистой платины; термометры из недостаточно чистой платины, градуированные в системе  $0^{\circ}$ ,  $100^{\circ}$ ,  $444,60$ , дают для температур ниже  $444^{\circ}$  пониженные, а при температурах выше — повышенные показания по сравнению с термометрами из чистой платины. Поэтому Международная конференция обусловила чистоту платины для эталонных термометров сопротивлением следующим образом: „Чистота и физические свойства платины, из которой изготавливается эталонный тер-

мометр сопротивления должны быть таковыми, чтобы отношение  $\frac{R_t}{R_0}$  было не меньше 1,390 для  $t=100^{\circ}$  и не менее 2,645 для  $t=444,60$ . У эталонного термометра, при употреблении его ниже  $0^{\circ}$  С, кроме того отношение  $R_t/R_0$  должно быть меньше 0,250 при  $t=-183^{\circ}$ . Для термометров, изготовленных из платины, удовлетворяющей этим требованиям, точность квадратичной формулы в интервале



от  $-40^{\circ}$  до  $+660^{\circ}$  C настолько велика, что до сих пор в этом интервале не удалось обнаружить никаких отклонений между температурой, полученной по платиновым термометрам, и температурой по газовым термометрам, перечисленной на термодинамическую шкалу.

Конструкция эталонного платинового термометра сопротивления не фиксирована конференцией. Точные указания относятся только к диаметру проволоки, который должен заключаться в пределах между 0,05 мм и 0,2 мм.

Остальные указания даны только в общих чертах, а именно:

1. Платиновая проволока термометра должна быть смонтирована с минимальным механическим натяжением, чтобы при изменении температуры могла происходить минимальная механическая деформация платины.

2. Конструкция термометра должна быть такова, чтобы та его часть, сопротивление которой измеряется, была сделана только из платины и могла равномерно нагреваться до измеряемой температуры.

3. После изготовления термометр необходимо отжечь при температуре не ниже  $660^{\circ}$  C.

Обычно употребляются эталонные термометры следующей конструкции. Чистая платиновая проволока навивается бифилярно на слюдяной, фарфоровый или кварцевый крест, и к каждому концу ее пришиваются по две проволоки, поддерживаемые слюдяными кружками с прорезами, идущими радиально вдоль предохранительной трубки. Предохранительные трубки делаются из кварца, фарфора, тугоплавкого стекла пирекс, иенского 59<sup>11</sup> и т. п. Сопротивление  $R_0$  эталонных термометров, употребляемых в интервале от  $0^{\circ}$  до  $660^{\circ}$ , колеблется в широких пределах, а именно от 2,5 до 30 омов.

Слюдяные или кварцевые кружки, придающие проводам термометра радиальное направление и служащие одновременно предохранителями от конвекционных токов, размещаются на различных расстояниях: так, например, PTR ставит их на расстоянии 8 см друг от друга, тогда как NPL рекомендует это расстояние не делать больше 2 см.

Что касается материала для креста, на который наматывается проволока, то наибольшее распространение имеет и сейчас слюдяной крест, предложенный Callendar'ом, хотя он и обладает недостатком, состоящим в том, что слюда при нагревании до  $660^{\circ}$ — $700^{\circ}$  выделяет кристаллизационную влагу, что вызывает загрязнение платины.

В NPL принят следующий метод изготовления эталонных термометров сопротивления. Для предохранения от выделения кристаллизационной влаги из слюды термометр до монтировки нагревают в трубке из кварца до  $720^{\circ}$  C в течение  $\frac{1}{2}$  часа, после чего термометр погружают в жидкий кислород; эту операцию повторяют 2 или 3 раза, в результате чего происходит обезво-



живание слюды, но зато сам слюдяной крест становится более хрупким. Если продлить нагревание, то окажется, что платина постепенно сплавляется со слюдой, но это впрочем мало влияет на постоянные термометра. После нагрева в печи проволоку подвергают дальнейшему отжигу в течение двух часов, пропускают ток, достаточный для нагревания проволоки до температуры  $1000^{\circ}$ — $1100^{\circ}$  С. Лишь после этого термометр монтируется в трубку, затем его помещают в электрическую печь и соединяют с вакуумным насосом для удаления воздуха. Термометр нагревается в печи приблизительно до  $500^{\circ}$ , выдерживая вакуум в течение двух или трех дней, потом два или три раза в трубку медленно впускают тщательно просушенный воздух; наконец термометр наполняют таким же воздухом и запаявают при  $t=450^{\circ}$ . Если произвести отжиг в печи при  $1000^{\circ}$ , без предварительного обезвоживания, то происходит заметное загрязнение платины и отношение  $R_{100}/R_0$  значительно понижается. Конечно такая обработка представляет большое неудобство, и поэтому все время производятся изыскания для замены слюдяных крестов крестами из другого материала. Последнее время в PTR стали изготавливать эталонные термометры на фарфоровых крестах. Следует, однако, отметить, что такие кресты слишком тяжелы и, кроме того, термометры с крестами из фарфора обладают значительной тепловой инерцией.

Лишь в 1933 г. NPL в результате своей многолетней работы по изысканию подходящего материала для креста, который был бы легче фарфорового и в то же время прочнее слюдяного, остановилась на кварце. Некоторые затруднения представляются только при механической обработке кварцевых пластинок, а очистка кварца очень несложна и производится посредством бензина, хромовой кислоты и кипячения в дистиллированной воде. Такие термометры можно применять до точки плавления золота ( $1063^{\circ}$ ). Запайка и просушка термометра производится обычным образом, но только если термометр предназначен для измерения температур выше  $660^{\circ}$ , то запайка его производится при более высокой температуре.

Недостаточная разработанность деталей конструкции термометров сопротивления объясняется тем, что еще не найдено подходящей конструкции, которая обеспечивала бы неизменность сопротивления термометра. При применении эталонных платиновых термометров наблюдается изменение сопротивления, вследствие чего приходится производить повторное эталонирование их, и нельзя принять постоянные  $R_0$ ,  $A$  и  $B$  квадратичной формулы за неизменные величины. Эти величины, как это и указывается в свидетельствах PTR, можно считать достаточно постоянными для технических работ, где не требуется особой точности.

Ненпнг, при сравнении платиновых термометров, однотипных с теми, которыми располагает Эталонная термометрическая лаборатория Всесоюзного института метрологии, с гелиевым

термометром в интервале от  $0^{\circ}$  до  $100^{\circ}$  производил все время контрольные определения  $R_0$ ,  $R_{100}$  и  $R_{144,00}$  и отмечает, что за время сравнения эти величины подверглись заметному изменению, правда очень незначительно отражающемуся на измерении температуры. При подсчете результатов опыта, происходящего в июле, Henning употребляет значения  $R_0$  и  $R_{100}$  отличные от значений, полученных им при трех сериях предварительного эталонирования, произведенных в марте, апреле того же года.

Hall (NPL) при сравнении ртутных термометров с платиновым в интервале  $0-100$  производил определения  $R_0$  у платиновых термометров два раза в день.

Чем вызывается такое непостоянство в сопротивлении? Мнения различных ученых расходятся. Henning это приписывает происходящей при нагреваниях перекристаллизации платины. Callendar—изменению в натяжении проволоки. Hall объясняет эти изменения главным образом изменениями, происходящими в сопротивлениях мостика. Müller и Burgess наблюдали у своего термометра во время работы весьма значительные изменения  $R_0$ , а именно 5 апреля  $R_0=25,5476$ , 19 мая  $R_0=25,5461$  и 23 мая  $R_0=25,5499$ . Кроме того, эти изменения не носят планомерного характера и у различных термометров происходит различно, но следует отметить, что чем выше и продолжительнее температура нагрева термометра, тем заметнее происходит изменения его постоянных  $R_0$ ,  $A$  и  $B$ .

Hall при испытании термометров новой конструкции NPL с проволоками, навитыми на кварцевые кресты, отмечает, что наблюдаемые им для этого типа термометров изменения сопротивления находились в пределах  $0,00037$  ома, что эквивалентно  $0^{\circ},0025$  С, причем, если в наблюдении ввести соответствующие поправки, зависящие от скачка при калибровке мостика, то ни одно изменение не превышает  $0^{\circ},0005$ . Результаты эти Hall'em выведены из 12 дней наблюдения над термометрами, причем они не подвергались нагреванию выше температуры кипения серы.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ ШКАЛЫ ПРИ ПОМОЩИ ПЛАТИНОВОГО ТЕРМОМЕТРА СОПРОТИВЛЕНИЯ

Платиновый термометр сопротивления дает точность измерений значительно выше точности измерений, получаемой с газовыми термометрами. Так, например, при определении температуры кипения серы при нормальном атмосферном давлении по термодинамической шкале, различные экспериментаторы в различных странах при работе с газовыми термометрами получили величины, расходящиеся между собою более, чем на  $0^{\circ},2$ , тогда как при помощи платинового термометра легко может быть получена точность в  $0^{\circ},02$ . Но показания платинового термометра в значительной степени зависят от условий опыта, и для получения

единства измерений VII Международной конференцией были выработаны подробные спецификации. Спецификация для определения температуры кипения серы была выработана на основании работ Callendar'a и Griffiths'a, Burgess'a, Meissner'a и других. Изменение температуры в связи с давлением было исследовано опытным путем Holborn'ом и Henning'ом, Katter'ом и Sexton'ом, Charpuis и др.

Главные положения спецификации, выработанной Международной конференцией, сводятся к следующему:

1. *Кислород.* Температура равновесия между жидким и газообразным кислородом наиболее достоверно получается статическим методом путем сравнения в соответствующей ванне для низкой температуры термометра, подлежащего эталонированию, с кислородным термометром давления.

2. *Лед.* Температура таящего льда воспроизводится как температура, при которой лед, разбитый на мелкие кусочки, находится в равновесии с чистой насыщенной воздухом водой при нормальном атмосферном давлении. Увеличение давления вызывает понижение точки замерзания на 0,007 градуса С на атмосферу.

3. *Водяной пар.* Температура конденсации водяного пара получается при помощи гисометра, защищенного от перегрева пара около термометра и от проникновения воздуха или других примесей. При соблюдении указанных условий наблюдаемая температура должна быть независима от скорости притока тепла к кипятивильнику, за исключением тех случаев, когда это может повлиять на давление внутри кипятивильника, и от времени действия гисометра.

4. *Сера.* Для эталонирования термометров сопротивления температура конденсации паров серы получается при выполнении нижеследующих спецификаций, относящихся к кипятивильнику, чистоте серы, экранам против излучения и к применяемым приборам вообще.

Кипятивильная трубка делается из стекла, плавленого кварца, или другого аналогичного материала, с внутренним диаметром не менее 4 см и не более 6 см. Столб пара должен быть такой высоты, чтобы нижний край экрана был по крайней мере на 6 см выше свободной поверхности жидкости, а верхний его край — на 2 см ниже изолирующего материала, защищающего трубку от притока окружающего тепла. Лучше всего пользоваться электрическим нагревателем, хотя можно пользоваться и газом; источник тепла и все соприкасающиеся с ним хорошо проводящие материалы должны кончатся, по крайней мере, на 4 см ниже свободной поверхности жидкой серы. Над источником тепла трубка окружается изолирующим веществом. Приспособление, закрывающее конец трубки, должно иметь свободное отверстие для выравнивания давления внутри трубки с атмосферным.

Сера не должна содержать более 0,02% примесей (селен является примесью, встречающейся чаще всего в количестве

достаточном, чтобы повлиять на температуру кипения). Экран должен иметь форму открытого цилиндра, снабженного сверху конической частью, плотно охватывающей защитную трубку термометра. Диаметр его цилиндрической части должен быть на 1,5—2,5 см больше диаметра защитной трубки. Цилиндр должен быть с каждого конца, по крайней мере, на 1,5 см длиннее рабочей обмотки термометра. Сверху и снизу цилиндра должно быть достаточное пространство для свободной циркуляции пара. Под термометром должна быть помещена горизонтальная пластинка для защиты его от прямого действия излучения нагретой жидкости. Внутренняя стенка экрана должна быть слабо отражающей; экран может быть изготовлен из металлического листа, графита и т. п.

При эталонировании термометра сера нагревается до точки кипения, и нагревание регулируется так, чтобы линия конденсации была, по крайней мере, на 1 см выше верхней части изолирующего материала. Термометр вместе с экраном погружается в пар, и когда линия конденсации снова достигает своей прежней высоты, производится одновременно наблюдение сопротивления и атмосферного давления. Во всех случаях следует тщательно убедиться, что температура не зависит от вертикальных перемещений термометра с экраном, по крайней мере, на 3 см.

Стандартизация диаметра кипяtilьных трубок вызвана тем, что по наблюдениям Müller'a и Burgess'a в кипяtilьной трубке диаметром в 72 мм термометр сопротивления показал температуру на 0,03° ниже, чем при диаметре в 60 мм, а кипяtilьники с диаметром меньше 40 мм, дают перегрев пара и значительные разности температур на различных высотах трубки.

При приближении нижнего края экрана к поверхности серы ближе, чем на 6 см, наблюдается значительное повышение температуры, а при приближении верхнего края экрана к концу изоляции ближе, чем на 2 см—заметно понижение температуры.

При пользовании газовым нагревом Müller и Burgess получили незначительное понижение температуры от 0,01° до 0,03°. Часть трубки, находящаяся над нагревателем, окружается теплоизолирующим материалом для того, чтобы, во-первых, защитить трубку от нагревания потоками горячего воздуха, исходящего от нагревателя, и, во-вторых, чтобы предохранить трубку от потери тепла в окружающий воздух. В случае проникновения потоков горячего воздуха вдоль трубки или недостаточного слоя жидкой серы над источником тепла легко может произойти перегрев паров серы на несколько градусов, причем сохраняется постоянство показаний термометра во время его перемещений по длине трубки. В случае отсутствия теплоизолирующего слоя происходит потеря тепла в окружающий воздух, и величина этой потери в значительной мере зависит от устройства нагревателя. Так, по наблюдениям E. T. Müller'a и H. A. Burgess'a, которые применяли нагреватель в виде фарфоровой трубы с навитой на нее нагревательной проволокой, при отсутствии изолирующего



материала на кипяtilьной трубке получили понижение температуры на  $0,08^\circ$ . По опыту же термометрической лаборатории ВИМС, где нагревательная проволока наматывалась непосредственно на кипяtilьную трубку, при отсутствии теплоизоляции понижение температуры доходило до  $0,2^\circ$ . Высота изолирующего материала, согласно спецификации Конференции, должна быть не менее 20 см + длина катушки термометра, а толщина его, согласно опытам Müller'a и Burgess'a, при изоляции асбестом не менее 1 см.

Сера не должна содержать примесей. Примесь  $0,05\%$  селена, по наблюдениям тех же исследователей, вызывает повышение температуры кипения на  $0,08^\circ$ . Примесь мышьяка менее опасна:  $0,1\%$  мышьяка вызывает повышение точки кипения только на  $0,02^\circ$ .

Форма и размеры экрана строго стандартизированы, так как опыты с алюминиевыми экранами с блестящей внутренней поверхностью показали, что температура в значительной мере зависит как от отражающей способности внутренней стенки экрана, так и от материала предохранительной трубки термометра. Для термометров, заключенных в прозрачную оболочку с блестящим алюминиевым экраном в виде конуса, получена температура на  $0,2^\circ$  ниже истинной, а для термометров, заключенных в фарфор, она ниже только на  $0,1^\circ$ . Алюминиевые экраны с ребристыми стенками дают вполне удовлетворительные результаты. Железные экраны дают тоже вполне удовлетворительные результаты, но железо разъедается серой и происходит порча экрана и загрязнение серы.

Снятие экрана вызывает понижение температуры, достигающее до  $5^\circ$ .

Как видно из изложенного, в спецификациях Международной конференции охвачены все детали опыта, так что при точном наблюдении их обеспечена точность измерения температуры до сотых долей градуса, причем при нарушении этих условий можно определить порядок ошибки, которую мы вводим.

Следует, однако, отметить, что введение термометра в пары энергично кипящей серы вызывает вспышку ее, и для предупреждения этого лучше термометр вводить в кипяtilьник ранее, а именно—как только сера расплавится, тем более, что заметного изменения сопротивления от пребывания термометра при температуре кипения серы не наблюдается.

На практике часто употребляются кипяtilьники для серы, имеющие, для ускорения прогрева серы, дополнительную нагревательную обмотку вдоль кипяtilьной трубки. При пользовании таким дополнительным нагревателем очень легко можно получить значительный перегрев паров серы.

Во всяком случае этот нагреватель, согласно опытам Heping'a, следует выключать, по крайней мере, за полчаса до начала измерений.

## ЭТАЛОНИРОВАНИЕ ПЛАТИНОВЫХ ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЭТАЛОННОЙ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ВИМС

До 1929 г. Эталонная термометрическая лаборатория ВИМС располагала двумя платиновыми термометрами сопротивления типа Callendar's, изготовленными Cambridge Scientific Instruments Co., с платиновой проволокой, навитой на слюдяном кресте, и имеющими компенсационную петлю для компенсационных проводов. Термометры заключены в фарфоровые трубки длиной в 40 см и диаметром 1,5 см. Эталонирование их было произведено в 1923 г.<sup>1</sup> Во время дальнейшей работы с этими термометрами обнаружены изменения, как  $R_0$ , так и в основном интервале  $IF$ , показывающие загрязнение платины.

В 1929 г. термометрической лабораторией были получены от фирмы Hegeleus три платиновых термометра сопротивления №№ 210, 211 и 212 модели PTR со свидетельством PTR. Платиновая проволока навита бифилярно на фарфоровый крест на протяжении 5 см, концы же ее посредством четырех более толстых платиновых проволок припаяны к золотым проводам, ведущим к четырем клеммам в верхней части термометра (рис. 2). Термометры заключены в трубки из плавящего кварца длиной в 53 см и диаметром в 1 см. При эталонировании этих термометров тщательно соблюдались все условия спецификации, предусмотренные Международной конференцией 1927 г., благодаря чему международная шкала температур в интервале  $0^{\circ}$ — $660^{\circ}$  воспроизведена с достаточной точностью.

Сопротивление термометра определялось путем сравнения его с нормальным сопротивлением. Измерения производились на пятикурбельном потенциометре фирмы Wolff № 3984, который был испытан предварительно по методу Disselhorst'a.

Схема включения изображена на рис. 3.



Рис. 2

<sup>1</sup> Платиновые термометры сопротивления, „Временных Гл. палаты мер и весов“, 1928 г., II часть.



Нормальное сопротивление и сопротивление платинового термометра включаются последовательно в цепь аккумулятора  $A_2$ , в ту же цепь включены еще магазин сопротивлений  $R_2$  и коммутатор  $C$ . Посредством переключателя нормальное сопротивление и сопротивление термометра приключаются к зажимам  $X$  компенсационного прибора. Ток от другого аккумулятора  $A_1$  проходит через реостат  $R_1$ , коммутатор  $C_1$  и делитель напряжения  $D$ . Для избежания паразитных электродвижущих сил, могущих возникнуть в компенсационном приборе и цепи, а также изменения электродвижущей силы аккумуляторов, при измерении напряжения у нормального сопротивления и платинового термометра

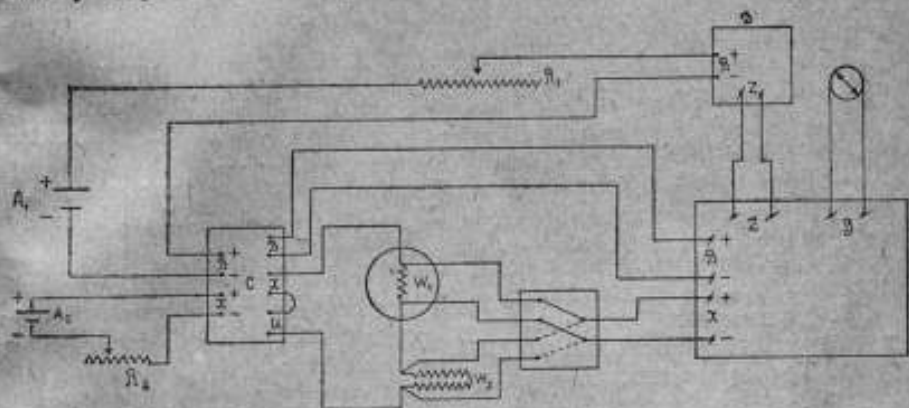


Рис. 3

брали среднее из результатов, полученных при прямом и обратном направлении тока, которое менялось посредством коммутатора  $C$ .

Эти измерения производились в следующем порядке:

- |    |  |       |
|----|--|-------|
| 1) | напряжение у нормального сопротивления | $W_1$ |
| 2) | " у платинового термометра             | $W_2$ |
| 3) | " у платинового термометра             | $W_3$ |
| 4) | " у нормального сопротивления          | $W_4$ |

Для того чтобы уменьшить непостоянство электродвижущей силы аккумуляторов и учесть незначительное изменение температуры проволоки, происходящее от прохождения через нее измерительного тока, ток включался не менее чем за 15 мин. до начала измерений.

Нормальным сопротивлением служила марганциновая катушка сопротивления № 97 в 10 ом, изготовленная лабораторией электрических образцовых мер ВИС и эталонированная в Эталонной электрической лаборатории ВИС. Катушка была помещена

в трансформаторное масло и при ней находился обыкновенный ртутный термометр, для того, чтобы иметь возможность учесть изменение ее сопротивления в зависимости от изменения комнатной температуры.

Сила измерительного тока, проходящего по термометру, равнялась 0,002 ампера. Гальванометр фирмы Сименс и Гальске имел чувствительность  $8 \cdot 10^{-8}$ , что при данных условиях установки давало отклонение нити на шкале в 1,2 мм при изменении температуры на  $0,001^\circ$ . Такая точность соответствует обычной точности измерений, получаемой и в иных метрологических институтах; например в PTR Henning пользовался установкой для платиновых термометров сопротивления где  $0,001^\circ$  вызывала отклонение по шкале на 1,5 мм.

При эталонировании термометра при температуре  $100^\circ$  применялся кипятыльник типа Международного бюро мер и весов.

Атмосферное давление измерили при помощи нормального барометра № 2 с точностью до сотых долей мм.

Кипятыльные трубки для серы из стекла пирекс (изготовляемого заводом Лензос) имели диаметр от 4,2 до 5,2 см и длину 50—55 см.

Нагревание кипятыльника для серы производилось электричеством, причем применялись нагреватели двух типов:

1. Нихромовая лента навивалась непосредственно на стеклянную трубку кипятыльника на 7 см ее длины.

2. Трубку помещали в печь шахтного типа.

Вверху трубку неплотно прикрывали кусочком асбеста, так чтобы давление свободно могло выравниваться с наружной атмосферой.

В обоих случаях нагреватель находился на 4—5 см ниже поверхности жидкой серы. Изоляция в первом случае (рис. 4) имела форму конуса, изготовленного из смеси асбеста с магнезией, во втором случае применялся асбестовый цилиндр. Кипятыльники трубки тщательно обматывались асбестовым шнуром, так чтобы обмотанная трубка плотно прилежала к отверстиям конуса. Высота изоляционного слоя равнялась 29 см, что давало возможность изменять погружение термометра в пределах 4 см, не нарушая условий международной спецификации.

В качестве защитного приспособления от потери тепла катушки термометра радиацией был устроен матовый алюминиевый экран, цилиндрической формы, диаметром в 3 см и длиной в 11 см, зачерненный изнутри платиновой чернью. Коническая часть в виде зонтика вверху и диск внизу находились в расстоянии 1 см от цилиндра.

Во время наблюдений в точках  $0^\circ$  и  $100^\circ$  глубина погружения термометра менялась от 20 до 38 см, наблюдения в точке кипения серы производились при погружении от 23 до 27 см. Эти изменения глубины погружения не оказали влияния на показания термометра.

Замена одного типа кипятыльника для серы другим на результатах опыта не отозвалась. Сера бралась кристаллическая от фирмы E. Merck, исследованная в химической лаборатории

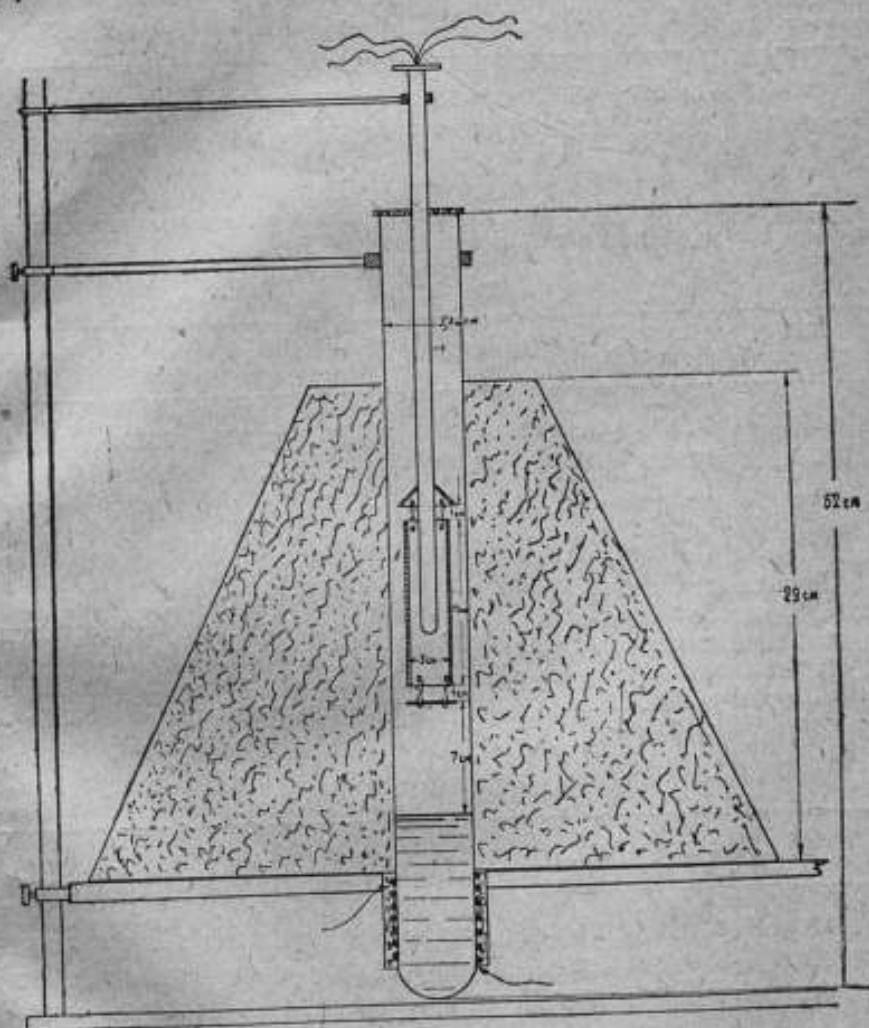


Рис. 4

ВИМС А. М. Маруновой, причем примесей селена в ней не обнаружено.

Термометры были предварительно выдержаны при температуре  $700^{\circ}$  в течение 1—2 часов, затем медленно охлаждены до комнатной температуры.

При первом эталонировании получены следующие результаты:

ТАБЛИЦА 1

№№ термометров	$R_0$	$R_{100}$	$R_x$	$IF$	$\delta$	$R_{100}/R_0$	$R_x/R_0$
210	10,8955	15,1492	28,8338	4,2537	1,494	1,3904	2,646 <sub>4</sub>
211	10,9451	15,2172	28,9608	4,2721	1,497	1,3903	2,646 <sub>0</sub>

Для сравнения приводим результаты эталонирования тех же термометров, раньше произведенного PTR:

ТАБЛИЦА 2

№№ термометров	$R_0$	$R_{100}$	$R_x$	$IF$	$\delta$	$R_{100}/R_0$	$R_x/R_0$
210	10,8973	15,1506	28,8353	4,2533	1,492	1,3903	2,646
211	10,9459	15,2175	28,9624	4,2716	1,490	1,3903	2,6459
212	10,7090	14,8887	28,3377	4,1797		1,3903	2,6462

Дальнейшая работа с этими термометрами сопротивления показала, что сопротивления  $R_0$  и  $R_{100}$  систематически уменьшаются, а основной интервал  $IF$  все время возрастает.

Приводим результаты последнего эталонирования термометров № 210 и № 211, а также и результаты эталонирования термометра № 212.

ТАБЛИЦА 3

№№ термометров	$R_0$	$R_{100}$	$R_x$	$IF$	$\delta$	$R_{100}/R_0$	$R_x/R_0$
210	10,8925	15,1467	28,8336	4,2542	1,493	1,3906	2,6471
211	10,9408	15,2146	28,9633	4,2738	1,497	1,3906	2,6472
212	10,7060	15,8871	28,3382	4,1811	1,494	1,3905	2,6469

Из сопоставления вышеприведенных данных эталонирования видно, что и отношения  $R_{100}/R_0$  и  $R_x/R_0$  систематически возрастают. Для более подробной характеристики термометров приводим сводку результатов наблюдений над ними, причем приведенные величины  $R$  представляют собой среднее от 4 до 12 измерений.



ТАБЛИЦА 4

Дата	Термометр № 210			Термометр № 211			Термометр № 212		
	$R_0$	$IF$	$R_s$	$R_0$	$IF$	$R_s$	$R_0$	$IF$	$R_s$
1932	После выдерживания при температуре 700 и медленного охлаждения								
Февр.				10,9451	4,2718	28,9605			
				10,9451	4,2716	28,9610			
				10,9450	4,2719				
				10,9451	4,2723				
				10,9450	4,2727				
				10,9451	4,2720				
апрель	Без нагрева								
	10,8966	4,2529							
	10,8966	4,2531							
	После нагревания до температуры 700°								
	10,8954	4,2537	28,8330	10,9445	4,2723	18,9586			
	10,8957	4,2542	28,8335	10,9445	4,2721	28,9583			
	10,8954	4,2526	28,8341			28,9597			
	10,8956	4,2539							
	10,8953								
декабрь	Определялась температура затвердевания олова и сурьмы								
	10,8552			10,9440					
	10,8953			10,9440					
	После нагревания до 700°								
				10,9439	4,2730				
				10,9437	4,2732				
1933 г.	После нагревания до 700°								
апрель	10,8922	4,2544	28,8335	10,9406	4,2736	28,9638	10,7061	4,1812	28,3384
	10,8928	4,2542	28,8336	10,9410	4,2738	28,9633	10,7059	4,1813	28,3386
	10,8928	4,2540	28,8330	10,9406	4,2739	28,9632	10,7060	4,1811	28,3378
	10,8922			10,9407		28,9635	10,7061	4,1811	28,3380
						28,9631			
						28,9628			
					28,9632				
	После нагревания термометра 200° до 300°								
				10,9394					

Для приблизительной оценки точности измерений температуры данными платиновыми термометрами, можно принять, что изменение  $R$  на 0,0004 соответствует изменению температуры на 0,01°.

Из приведенных данных видно, что всякое нагревание термометра вызывало изменение  $R_0$  в сторону понижения, и чем продолжительнее и выше было это нагревание, тем сильнее происходило изменение  $R_0$ , а также и изменение  $R_{100}$  и  $R_{444,60}$ . Отсюда следует, что нельзя ограничиться одним эталонированием термометра, но для точных работ необходимо производить повторные эталонирования, и во всяком случае при работе с термометром все время контролировать  $R_0$ . Для характеристики того, как эти изменения в  $R_0$ ,  $R_{100}$  и  $R_x$  отражаются на вычислении температуры, в нижеприведенной таблице даны температуры, вычисленные при одинаковом сопротивлении  $R_x$  термометра, но во втором столбце применяются для вычисления ее данные первого эталонирования термометра № 211, а в третьем столбце — данные последнего его эталонирования.

ТАБЛИЦА 5

$R_t$	$R_0 = 10,9451,$ $IF = 4,2721$ $\delta = 1,497$	$R_0 = 10,9408,$ $IF = 4,2738,$ $\delta = 1,497$	Разность
12,0000	24,417	24,506	-0,089
13,0000	47,723	47,808	-0,081
14,0000	71,201	71,274	-0,073
16,0000	118,655	118,709	-0,054
18,0000	166,806	116,844	-0,038
20,0000	215,689	215,712	-0,023
22,0000	265,337	265,334	+0,003
24,0000	315,784	315,763	+0,021
26,0000	367,076	367,038	+0,038
28,0000	419,253	419,191	+0,062
30,0000	472,361	472,275	+0,086
32,0000	526,454	526,344	+0,110
34,0000	581,590	581,456	+0,134

Как видно, ошибка, вызванная изменением постоянных эталонирования, при измерении температуры находится в пределе 0,1, что не представляется важным для технических работ, но имеет значение при точных работах.



В приведенных выше таблицах помещены значения для коэффициентов  $A$  и  $B$  в квадратичной формуле  $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$ , так как на практике для вычисления температуры в пределах от  $0^\circ$  до  $660^\circ$  удобнее пользоваться упрощенной формулой Callendar'a, которая аналогична данной, а именно:

$$t = t_p + \delta \cdot t \cdot (t - 100) \cdot 10^{-4},$$

где  $t_p$  — так называемая платиновая температура — вычисляется по формуле

$$t_p = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} \cdot 100.$$

Коэффициент  $\delta$  определяется при температуре кипения серы и равняется

$$\delta = \frac{t_s - t_p}{R_{100} - R_0} \cdot 100,$$

где  $t_s$  — температура кипения серы при данном атмосферном давлении,  $t_p$  — платиновая температура в точке кипения серы.

С коэффициентами квадратичной формулы, данной Международной конференцией формула Callendar'a связана следующими соотношениями:

$$\delta = -\frac{10000 B}{A + 100 B}; \quad \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100} = A + 100 B.$$

Температура по этой формуле вычисляется способом приближения.

В правой части уравнения  $t_p$  вычисляется по приведенной выше формуле для  $t_p$ , затем в правую часть формулы Callendar'a вместо  $t$  подставляют величину  $t_p$  и производят вычисление, затем, оставляя  $t_p$  прежним, вместо  $t$  подставляем величину, только что полученную для  $t$ , и так далее, пока подстановка новых значений не перестанет оказывать влияние на значение левой части уравнения.

Пример вычисления.

При  $R_t = 22,0000$ ,  $R_0 = 10,9451$ ,  $R_{100} - R_0 = 4,2721$ ,  $\delta = 1,497$ , имеем:

$$t_p = \frac{22,0000 - 10,9451}{4,2721} \cdot 100 = 258,770;$$

$$t = 258,770 - 1,497 \cdot 258,770 \cdot 158,770 \cdot 10^{-4} = 258,770 - 6,150 = 254,920$$

$$t = 258,770 - 1,497 \cdot 254,920 \cdot 164,920 \cdot 10^{-4} = 258,770 - 6,540 = 265,310$$

$$t = 258,770 - 1,497 \cdot 265,310 \cdot 165,310 \cdot 10^{-4} = 258,770 - 6,566 = 265,336$$

$$t = 258,770 - 1,497 \cdot 265,336 \cdot 165,336 \cdot 10^{-4} = 258,770 - 6,567 = 265,337$$

Дальнейшая подстановка не вызывает никакого изменения  $t$ , следовательно, вычисление можно считать законченным.

При описании эталонных платиновых термометров, применяемых в Термометрической лаборатории ВИМС, было указано, что у них платиновая проволока навита на фарфоровые кресты, а такие термометры обладают значительной тепловой инерцией. Поэтому в лаборатории было произведено определение значения константы отставания  $\lambda$  всех трех термометров №№ 210, 211 и 212. Испытание производилось при погружении их в смесь мелко наструганного льда, залитого дистиллированной водой. Для всех трех термометров получены одинаковые значения для константы отставания, а именно:

$$\lambda = 50 \text{ сек.}$$

За константу отставания применяется число секунд, в течение которых разность между показаниями термометра и температурой ванны упадет до  $0,4^1$  своего первоначального значения, т. е. того значения, которое она имела в момент погружения термометра в ванну. При тех же условиях для ртутных термометров фирмы Toppelot, служивших эталонными термометрами для всех метрологических учреждений,  $\lambda$  равняется от 4 до 5 сек., таким образом тепловая инерция данного типа платиновых термометров превосходит тепловую инерцию ртутных термометров фирмы Toppelot в 10 раз.

Зная константу отставания, при помощи дифференциального уравнения

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{\lambda}(u - \theta),$$

выражающего закон отставания термометров, можно учесть влияние отставания на показания термометра. В этой формуле  $\theta$  — показания термометра,  $u$  температура ванны,  $\lambda$  — константа отставания,  $t$  — время.

Из этого уравнения можно точно определить температуру ванны при изменяющемся режиме лишь в случае постоянства  $\frac{du}{dt}$ , т. е. когда нагревание идет с одинаковой скоростью. Так, например, при определении температуры ванны, которая нагревается со скоростью  $0,01^\circ$  в 1 мин., при определении ее температуры термометрами Toppelot мы получим температуру ниже истинной на  $5 \cdot \frac{0,01^\circ}{60} = 0,0008^\circ$ , а платиновыми термометрами лаборатории уже ниже на  $50 \cdot \frac{0,01^\circ}{60} = 0,008^\circ$ , что для точных измерений является уже заметной величиной.

Следует еще отметить, что значение  $\lambda$  зависит не только от свойств самого термометра, но и в значительной мере от среды

<sup>1</sup> Округленное значение величины  $\frac{1}{e}$ .

его окружающей и, следовательно, для точного вычисления температуры нестационарного режима ванны  $\lambda$  необходимо определять в условиях опыта.

Вследствие этого для уменьшения тепловой инерции стремятся заменить термометры сопротивления с фарфоровыми крестами термометрами с кварцевыми крестами, для которых тепловая инерция значительно меньше.

Применяемые в лаборатории, описанные выше три эталонных платиновых термометра №№ 210, 211, 212 по своему устройству и чистоте платины удовлетворили требованиям спецификации, данной Международной конференцией, и так как при эталонировании их были соблюдены в точности все требования этой спецификации, то работа по воспроизведению международной шкалы температур в интервале  $0^{\circ}$ — $660^{\circ}$  может считаться законченной.

Для установления единства измерения температур в области, осуществляемой платиновыми термометрами и термопарами, как уже упомянуто было выше, связующей точкой служит температура затвердевания сурьмы, которая является одной из основных точек при градуировке термопар. Международная конференция по мерам и весам в 1927 г. установила для температуры затвердевания сурьмы величину  $630,5^{\circ}$ , но эта температура может иметь значительные колебания (до  $0,2^{\circ}$ ) в зависимости от чистоты сурьмы. В Эталонной термометрической лаборатории ВИМС определение температуры затвердевания сурьмы (фирмы Кальбаум) производилось дважды. Испытание производилось в электрической печи с внутренней фарфоровой трубой, устройство которой видно из рис. 5.

Тигель с металлом высотой в 160 мм, внутренним диаметром в 38 мм, помещался в середине печи, поддерживаемой снизу тремя графитовыми цилиндрическими колпачками, поставленными один

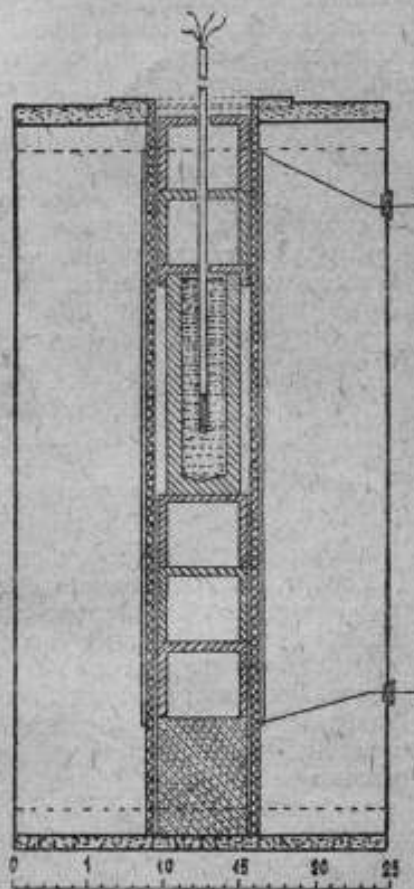


Рис. 5

на другой; сверху тигель тоже прикрывался такими же колпачками, через отверстия в центре которых вводился платиновый термометр сопротивления. Перед опытом, посредством термопары, было произведено исследование распределения температуры в тигле на расстоянии от двух до пяти см от дна тигля, причем оказалось, что электродвижущая сила термопары менялась в пределах двух микровольт, т. е. в пределах  $0,2^\circ$ . Поэтому при определении температуры затвердевания по возможности дольше производилось перемешивание металла с помощью самого же термометра сопротивления.

При первом испытании было произведено определение температуры затвердевания трех плавков при помощи термометра № 210 и трех плавков при помощи термометра № 211, причем площадка постоянной температуры держалась около 4 мин.

Получены следующие результаты, причем для вычисления применялись данные табл. 1:

Термометр № 211		Термометр № 210	
плавка	$R_t = 35,7427 \quad t = 630,58$	$R_t = 35,5875 \quad t = 630,44$	
II	$R_t = 35,7400 \quad t = 630,49$	$R_t = 35,5878 \quad t = 630,45$	
III	$R_t = 35,7424 \quad t = 630,57$	$R_t = 35,5875 \quad t = 630,44$	
	среднее $630,55$	среднее $630,44$	

Температура затвердевания  $630,5^\circ$ .

В виду того, что температура затвердевания, определенная при помощи двух платиновых термометров, разошлась на  $0^\circ,1$ , было произведено повторное эталонирование термометров, а также и эталонирование термометра № 212, и следующее определение велось уже при помощи трех термометров сопротивления, причем для вычисления пользовались данными табл. 3. Для того чтобы получить возможность при каждой плавке сделать большее количество наблюдений, была замедлена скорость охлаждения печи и площадка постоянной температуры держалась уже около 10 минут.

Получены результаты:

	Термометр № 210	Термометр № 211	Термометр № 212
I плавка	$R_t = 35,5920 \quad t = 630,53$	$R_t = 35,7471 \quad t = 630,51$	$R_t = 34,9798 \quad t = 630,53$
II	$R_t = 35,5892 \quad t = 630,46$	$R_t = 35,7473 \quad t = 630,51$	$R_t = 34,9788 \quad t = 630,50$
III	$R_t = 35,5896 \quad t = 630,47$	$R_t = 35,7473 \quad t = 630,51$	$R_t = 34,9781 \quad t = 630,49$
	среднее $630,49$	среднее $630,51$	среднее $630,51$

Расхождения получены в пределах допущенной ошибки измерений с платиновыми термометрами и за точку затвердевания сурьмы принята температура  $630,50^\circ$ .



При определении точки плавления того же образца сурьмы, площадка постоянной температуры держалась менее определенно, и температура плавления получена более низкая, а именно:

Термометр № 210	Термометр № 211	Термометр № 212
$R_1 = 35,5888 \quad t = 630,44$	$R_2 = 35,7470 \quad t = 630,51$	$R_3 = 34,9783 \quad t = 630,49$
	среднее $\frac{630,48}{}$	

Опыты эти дали возможность оценить точность, с которой показания отдельных термометров сходятся между собою, и результаты опыта показали, что это сходжение находится в пределах возможной точности измерений платиновыми термометрами.

Таким образом можно считать, что воспроизведение международной шкалы температур в интервале  $0^\circ - 660^\circ$  в настоящее время осуществлено, и кроме того посредством определения температуры затвердевания сурьмы удалось сомкнуть два интервала этой шкалы, осуществляемой двумя различными приборами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Callender. Platin resistance thermometer (Phil. Trans. 178, 161 (1887)).
2. Dickson. On the reduction to Normal air thermometer of the platin thermometer (Phil. Mag. (1898) 45).
3. Waindner and Burgess. Platin resistance thermometer at high temperatures (Bull. Bureau of Standards. 6 149. (1909)).
4. Diesselhorst. Ueber einen Kompensationsapparat mit kleinem Widerstand. [Zeitschr. f. Instrumentenkunde. XXVI p. 173—297 (1906)].
5. Henning. Wasserstoff- und Widerstandsthermometer zwischen  $0^\circ$  und  $-193^\circ$ . [Ann. d. Phys. 40 639 (1913)].
6. Henning und Heuse. Vergleich der Temperaturskala der PTR mit thermodynamischen Skala zwischen 0 und 100. (Z. f. Phys. 6. 215 (1921)).
7. Henning. Die Temperaturskala in Theorie und Praxis [Zeitschr. Instrumentenkunde (1924) 349—356].
8. Mueller and Burgess. Standardization of the Sulphur boiling point (Scient. Papers Bur. of Stand. No. 339 (1919)).
9. Sligh. Recent modifications in the construction of platinum resistance thermometers. [Scient. Papers Bur. Stand. No. 407 (1921)].
10. Н. А. Маренин. Платиновые термометры сопротивления. [Временник Гл. Пат. мер и весов (1928), стр. 70—94].
11. Hall. The international temperature scale between  $0^\circ$  and  $100^\circ$  C. [(Phil. Trans. A 670, A 229 1—(8) (1929)].
12. Lang. The construction of platinum thermometers [J. Scientific Instruments, 2, 228 (1925)].
13. Hall. A Design for precision platinum resistance thermometers. [J. Scientific Instruments (1933) 4—10].
14. T. Henning. Temperaturmessung. Handbuch der Physik, IX, 521—540 (1926).



L'ÉCHELLE THERMOMÉTRIQUE CONSIDÉRÉE AU POINT DE VUE DE LA THÉORIE ET DE LA PRATIQUE ET LA REPRODUCTION DE L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE DANS L'INTERVALLE DE  $0^{\circ}$ — $660^{\circ}$  AU MOYEN DU THERMOMÈTRE—ÉTALON À RÉSISTANCE DE PLATINE

Par V. A. Jakovleva

*(Résumé)*

L'auteur considère les principes de l'établissement de l'échelle internationale de température et examine en détail les spécifications, données par la VII Conférence Générale des Poids et Mesures, dans la partie qui concerne la reproduction de l'échelle dans l'intervalle de  $0^{\circ}$ — $660^{\circ}$  au moyen du thermomètre-étalon à résistance de platine.

Dans la seconde partie de l'article l'auteur décrit l'installation du thermomètre à résistance de platine au Laboratoire Thermométrique de l'Institut de Métrologie et rapporte les résultats de la graduation de ce thermomètre et ceux de la détermination du point de solidification de l'antimoine.

---

## ОТСТАВАНИЕ ТЕРМОМЕТРОВ И ИЗМЕРЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУР

Г. М. Кондратьев

Вопрос об отставании термометров, важный для практической термометрии и имеющий особое значение при измерении нестационарных температур, не может считаться в настоящее время достаточно полно и всесторонне освещенным. В иностранной литературе имеется ряд отдельных статей по этому вопросу, по большей части относящихся к отдельным типам термометров. Наиболее полное и довольно систематическое исследование принадлежит Harper,<sup>1</sup> но и оно целиком вопроса не исчерпывает. Что же касается нашей отечественной литературы, то в ней он и вовсе не затрагивался, и публикуемое автором исследование является одним из первых в этом направлении. Оно не претендует на полное и исчерпывающее освещение вопроса: автор имел в виду только дать правильную его постановку, изложить основные понятия и принципы общего характера и привести некоторые примеры из практики.

В этом исследовании обращено внимание на тот фактор, влияние которого до сих пор еще не дооценивается, а именно на роль коэффициента теплоотдачи.<sup>2</sup>

### § 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ФОРМУЛЫ

Опыт показывает, что всякий термометр,<sup>3</sup> будучи введен в среду горячую или холодную, воспринимает ее температуру не мгновенно: должно пройти некоторое время, прежде чем температура термометра будет отличаться от температуры среды на вперед заданную величину.

Если температура среды изменяется с течением времени, то показания термометра будут отставать от температуры среды, отличаясь от нее на большую или меньшую величину в зависимости от скорости изменения температуры среды, от ее свойств

<sup>1</sup> Harper, Thermometric Lag, Bull. Bur. Stand. 8, 658 (1912).

<sup>2</sup> Под коэффициентом теплоотдачи или коэффициентом теплообмена понимают количество тепла, теряемое или приобретаемое единицей поверхности тела за единицу времени, когда разность температур поверхности и окружающей среды равна одному градусу.

<sup>3</sup> Под словом „термометр“ понимается любой прибор, предназначенный для измерения температуры.

и от свойств самого термометра. Это явление условимся называть отставанием термометра, инерцией термометра или запаздыванием. Термин „чувствительность термометра“ мы умышленно избегаем, так как он дает повод к недоразумениям.

Термометр любой конструкции содержит три основных элемента: 1) часть, воспринимающую температуру (приемник, резервуар), 2) передаточную часть или передаточный механизм, 3) указывающее приспособление. Например в обыкновенном ртутном стеклянном термометре воспринимающей температуру частью является резервуар (шарик), передатчиком — столбик ртути в капилляре, указателем — его мениск и шкала.

Соответственно этому в инерцию термометра входят два слагаемых: во-первых, чисто термическая часть, зависящая от того, что резервуар термометра не мгновенно воспринимает температуру; во-вторых, механическая часть, зависящая от того, что передаточный механизм запаздывает передать указателю изменение температуры резервуара.

Первая часть является собственно термической инерцией, второй можно присвоить название мертвого хода.

В большинстве случаев при удовлетворительной конструкции термометра преобладающую роль играет чисто термическая инерция, поэтому автор почти исключительно останавливается на ней. Тем не менее нельзя совершенно оставить без внимания и мертвый ход: не во всех случаях им позволительно пренебречь, и в каждом таком случае он должен составить предмет специального исследования.

Сюда же может быть отнесено явление отставания гальванометра в случае электрических термометров. Оно подробно рассмотрено в вышецитированной работе Nagreg'a, к которой мы и отсылаем читателя.

Воспринимающая температуру часть термометра представляет собою тело или систему тел, характеризуемую определенными термическими константами и определенными размерами и формой. Таким образом вопрос о термической инерции прибора сводится к вопросу о скорости прогревания или охлаждения этой системы при заданных внешних условиях.

Чрезвычайно сложное явление, имеющее здесь место, принято описывать упрощенно, пользуясь так называемым законом охлаждения Ньютона и вводя константу отставания, которую мы вместе с Nagreg'ом обозначим буквой  $\lambda$ .

Исходя из закона Ньютона, получается очень просто основная формула, удобная для целей практики.

Введем следующие обозначения:

$\tau$  — время,

$\mu$  — температура среды,

$\theta$  — средняя температура резервуара термометра, относящаяся к моменту времени  $\tau$ .

При этом  $u$  есть вообще функция времени  $t$  и лишь в частном случае — постоянная величина.

В силу закона Ньютона изменение температуры резервуара термометра  $db$  за элемент времени  $dt$  пропорционально  $dt$  и разности температур  $u$  и  $b$ ; следовательно, обозначив коэффициент пропорциональности через  $m$ , получим

$$db = m(u - b) dt, \quad (1)$$

а отсюда, вводя новую величину

$$\lambda = \frac{1}{m} \quad (2)$$

приходим к дифференциальному уравнению:

$$\lambda \frac{db}{dt} + b = u. \quad (3)$$

Относя его к отдельным частным случаям, Нергет получает наглядную физическую интерпретацию величины  $\lambda$ .

1. Рассмотрим случай, когда температура среды, в которую введен термометр, все время остается постоянной и равной  $t$ . Из уравнения (3) получится

$$b - t = (b_0 - t) e^{-m(t - \tau_0)}. \quad (4)$$

Здесь  $b_0$  есть значение величины  $b$  в начальный момент времени. Из уравнения (4) следует, что

$$\frac{b - t}{b_0 - t} = e^{-\frac{t - \tau_0}{\lambda}}.$$

Возьмем момент времени  $\tau_1$ , так, чтобы промежуток времени  $\tau_1 - \tau_0$  стал равным  $\lambda$ :  $\tau_1 - \tau_0 = \lambda$ ; соответствующее значение температуры резервуара обозначим через  $b_1$ ; тогда окажется:

$$\frac{b_1 - t}{b_0 - t} \cong e^{-1} = \frac{1}{2,718} \cong 0,4 \text{ при } \tau_1 - \tau_0 = \lambda.$$

Поэтому, выбирая за единицу времени секунду, можно сказать, что  $\lambda$  есть то число секунд, в течение которого разность между показанием термометра и температурой среды упадет до  $\frac{1}{2} \cong 0,4$  своего первоначального значения<sup>1</sup> при условии, что температура среды остается постоянной и что термометр в момент погружения в среду имел отличающуюся от нее температуру.

<sup>1</sup> Заметим, что  $m$  имеет размерность  $\frac{1}{\text{ед. времени}}$ , поэтому  $\lambda$  имеет размерность времени.



2. Пусть  $u$  меняется со временем по линейному закону:

$$u = u_0 + r(\tau - \tau_0).$$

Решение дифференциального уравнения (3) будет

$$\theta - u = -r\lambda + (\theta_0 - u_0 + r\lambda)e^{-m(\tau - \tau_0)}.$$

По истечении достаточно большого времени вторым членом в правой части можно пренебречь; получится

$$\theta - u = -r\lambda.$$

Исходя отсюда, Nagreg определяет  $\lambda$ , как выраженную в секундах разность между временем, протекшим до момента, в который температура среды достигает какого-либо значения, и временем, когда термометр покажет эту температуру. При этом предполагается, что термометр на долгое время был погружен в ванну, температура которой меняется по линейному закону.

## § 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТЫ ОТСТАВАНИЯ

Классический прием определения  $\lambda$  опытным путем применялся еще Thiesen'ом и Guillaume'ом<sup>1</sup> и широко использован Nagreg'ом и другими учеными.

Он заключается в том, что испытываемый на отставание термометр вводят в среду, жидкую или газообразную, температура которой  $t$  все время поддерживается постоянной, отмечают моменты времени и соответствующие им показания термометра, а затем строят по точкам кривую охлаждения в полулогарифмической анаморфозе, т. е. откладывают по оси ординат  $\ln(\theta - t)$ , а по оси абсцисс время  $\tau - \tau_0$ . Поскольку правильны предпосылки, лежащие в основе вывода формул (3) и (4), эта кривая сведется к прямой, угловой коэффициент которой и будет равен  $\frac{1}{\lambda}$ .

На рис. 1 представлены три таких прямые, полученные из опыта. К этим предпосылкам необходимо отнестись критически, ибо они покоятся на законе охлаждения Ньютона, то есть на предположении, что  $m$ , а следовательно и  $\lambda$ , не зависят от времени ни явно, ни через посредство  $\theta$  и  $u$ . Это предположение не всегда оправдывается в действительности, либо потому, что условия охлаждения меняются со временем, а не остаются в течение всего опыта постоянными, либо потому, что закон простой пропорциональности между теплопотерей и разностью температур неправильно изображает явление.

Поэтому на все формулы<sup>1</sup> выводимые как частные случаи из общей формулы (3) при различных предположениях о виде

<sup>1</sup> См. Guillaume, Traité de la thermométrie de précision, 185—188 (1889).



функции  $u$ ,<sup>1</sup> следует смотреть, как на приближенные формулы, пригодные вообще для практических целей, не упуская, однако, из вида, что не исключены случаи, когда они приведут и к неверным результатам. Однако следует сказать, что ввиду край-

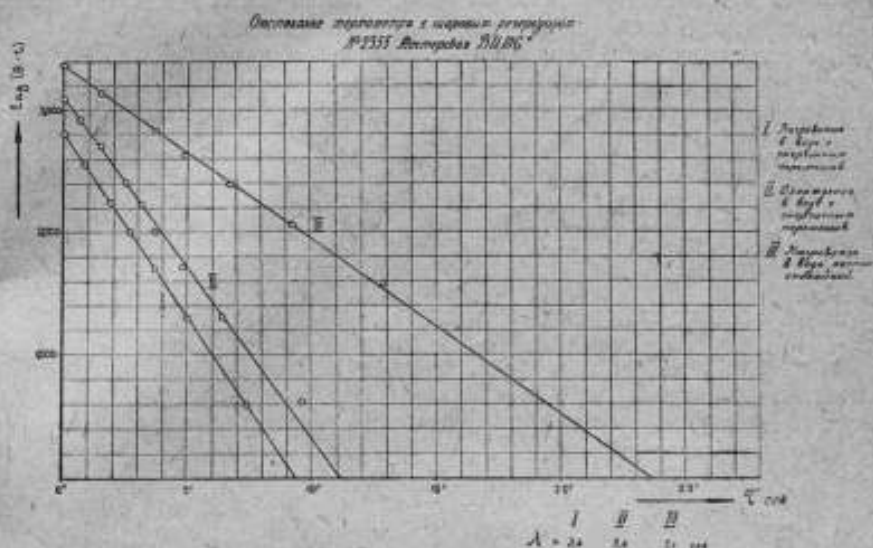


Рис. 1. Отставание термометра с шаровым резервуаром № 2355 мастерских ВИС

I.—Нагревание в воде с энергичным перемешиванием. II.—Охлаждение в воде с энергичным перемешиванием. III.—Нагревание в воде почти спокойной

ней сложности явления такой путь оказывается единственным практически приемлемым для термометров различных конструкций.

### § 3. НОВАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ ОТСТАВАНИЯ ТЕРМОМЕТРОВ. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ ОТСТАВАНИЯ

Переходим к рассмотрению влияния различных факторов на константу термической инерции  $\lambda$ .

Прежде всего исследуем, нет ли возможности, исходя из теоретических соображений, уже наперед предвидеть хотя бы характер некоторых закономерностей.

Для этого возьмем простейшее явление—охлаждение или нагревание однородного изотропного тела в среде постоянной температуры  $t$ .

<sup>1</sup> Например формулы (5), (7) и др. в труде Негре'а.

Применим к нему выводы теории „регулярного режима“.<sup>1</sup> Обозначим через

$S$  — полную поверхность тела,

$C$  — полную теплоемкость его,

$\alpha$  — коэффициент теплообмена тела (путем радиации, конвекции и теплопроводности) с окружающими телами и средой.

Автором доказано, что в этом случае величина  $m$ , играющая центральную роль в теории регулярного режима и обратно пропорциональная термической инерции тела  $\lambda$ , выражается формулой:

$$m = \alpha \Psi \frac{S}{C}.$$

Здесь  $\Psi$  обозначает число нулевой размерности, лежащее между 0 и 1, которое характеризует степень неравномерности распределения температур в теле. В случае равенства температуры во всех точках тела,  $\Psi = 1$ .

В общем случае  $\Psi$  есть функция  $\frac{L_1 \alpha}{K}, \frac{L_2 \alpha}{K}, \dots$  где  $L_1, L_2, \dots$  обозначают длины отрезков, определяющих форму и размеры тела,  $K$  — коэффициент теплопроводности вещества тела.

Отсюда вытекает, что

$$\lambda = \frac{1}{\alpha \Psi} \frac{C}{S}. \quad (6)$$

Эта формула позволяет сделать некоторые заключения относительно  $\lambda$ .

Мы видим, что  $\lambda$  зависит прежде всего от свойств самого термометра:  $\lambda$  тем больше, чем больше теплоемкость резервуара; при  $\Psi$  близком к 1, что имеет место для малых значений коэффициента теплообмена  $\alpha$ ,  $\lambda$  тем больше, чем меньше поверхность резервуара.

Далее,  $\lambda$  в сильной степени зависит от внешних условий, которые суммарно характеризуются коэффициентом  $\alpha$ , так что отставание одного и того же термометра может быть чрезвычайно различным, смотря по тому, в каких условиях он применяется. Характер этой зависимости нетрудно установить, исследуя, как изменяется функция

$$f(\alpha) = \frac{1}{\alpha \Psi},$$

когда  $\alpha$  пробегает ряд значений от весьма малых до весьма больших — от 0 до  $\infty$ .

Вид  $f(\alpha)$ , конечно, зависит от формы резервуара. Вычислить ее можно только для некоторых простейших форм, например

<sup>1</sup> См. J. Boussinesq, *Théorie analytique de la chaleur*, I, §§ 119—125, а также статьи автора в „Журнале техн. физ.“ I, вып. 4 (1931) и в „Журн. прикл. физ.“ 5, № 3—4 (1928).

шара, а для тел сложной формы задача представляет непреодолимые трудности. Впрочем ее решать для них нет смысла, так как для всех форм характер изменения функции  $\Psi$  остается один и тот же. Его можно установить на основании следующих соображений.

При малых значениях  $\alpha$ , т. е. когда тело медленно охлаждается и теплообмен его с окружающей средой происходит лениво, температура внутри тела успевает выравниваться и  $\Psi$  близко к 1; следовательно

$$f(\alpha) = \sim \frac{1}{\alpha} \text{ при малых } \alpha.$$

По мере возрастания  $\alpha$ , функция  $\Psi$  убывает, и, как показывают вычисления для случая шара,<sup>1</sup> сперва довольно быстро, затем все медленнее, асимптотически стремясь к нулю.

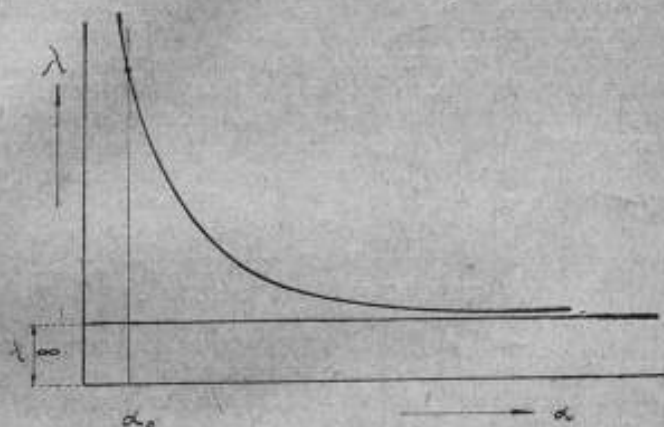


Рис. 2. Характеристическая кривая отставания термометра

Что касается до произведения  $\alpha\Psi$ , то оно возрастает и при  $\alpha \rightarrow \infty$  стремится к пределу, отличному от нуля. Это следует из другой, доказанной автором,<sup>2</sup> теоремы относительно  $m$ , которая говорит, что при  $\alpha \rightarrow \infty$  число  $m$  пропорционально так называемому коэффициенту температуропроводности вещества. В силу указанной теоремы при  $\alpha \rightarrow \infty$  предел, к которому стремится  $\lambda$  и которой мы обозначим  $\lambda_{\infty}$ , вычисляется по формуле

$$\lambda_{\infty} = \frac{c\rho}{K} F \quad (7)$$

Здесь  $\rho$  обозначает видимую плотность вещества,  $c$  — его удельную теплоемкость,  $K$  — теплопроводность,  $F$  — коэффи-

<sup>1</sup> См. Изв. ВТИ\*, 1932, № 7—8 (76), стр. 731. Рис. 1.

<sup>2</sup> Точная индустрия\*, № 4, 26 (1934).

ент формы тела.  $F$  есть величина, имеющая размерность площади и зависящая только от формы и размеров тела. Очевидно, что при  $\alpha = \infty$  тело находится в наиболее интенсивном теплообмене с окружающими телами, и термическая инерция приобретает наименьшее значение из всех возможных.

Из предыдущего следует, что кривая зависимости  $\lambda$  от  $\alpha$ , т. е. от внешних условий, всегда имеет форму, изображенную на рис. 2; у кривой две асимптоты: ось ординат и прямая, параллельная оси абсцисс, находящаяся от нее в расстоянии  $\lambda_{\infty}$ . Эту кривую можно назвать характеристической кривой инерции данного термометра.

Полученные здесь теоретическим путем выводы вполне оправдываются на опыте, в чем нетрудно убедиться, рассматривая, например, опытные кривые, приводимые Harper'ом в его труде.

Следует заметить, что, анализируя результаты своих опытов, Harper входит в излишнюю детализацию: он рассматривает отдельно отставание термометров в воде, керосине, воздухе, движущемся с различными скоростями, тогда как эти случаи можно все объединить вместе, ибо решающим фактором является не род жидкости, омывающей резервуар термометра, и не характер ее движения, а совокупность всех факторов, охватываемых коэффициентом теплообмена  $\alpha$ .

#### § 4. ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ ОТСТАВАНИЯ ПО ДАННЫМ ОПЫТА

Построение кривой  $\lambda = f(\alpha)$  по точкам сопряжено с рядом опытов для каждого отдельного термометра.

Для приближенной оценки  $\lambda$ , которая во многих случаях достаточна на практике,<sup>1</sup> можно число опытов значительно сократить, если воспользоваться нашим выводом совершенно общего характера о форме функции  $f(\alpha)$ .

Прежде всего следует произвести опыты для крайних точек, т. е. для тех точек, которые соответствуют, с одной стороны малым значениям  $\alpha$  и с другой — большим значениям  $\alpha$ .

Экспериментально наименьшее значение  $\alpha$  легко получается, если охлаждать тело в газообразной среде, находящейся в „спокойном состоянии“, например охлаждать в спокойном воздухе, при определенном давлении и определенной температуре. Такие условия будут иметь место, когда нагретое тело охлаждается в закрытой воздушной камере, стенки которой поддерживаются при постоянной температуре и размеры которой весьма велики сравнительно с размерами тела. Воздух движется в этой камере исключительно под влиянием разностей плотностей в различных ее частях, возникающих вследствие ввода внутрь нагретого

<sup>1</sup> Harper — Cit. loco.



тела. Благодаря большим размерам камеры влиянием стенок можно пренебречь. В этом случае тело охлаждается в свободном потоке газа или в условиях свободной конвекции<sup>1</sup>. Соответствующее этим условиям значение  $\alpha$  для воздуха при обыкновенных температурах (вблизи 20°) и обыкновенных давлениях (около 760 мм) обозначим через  $\alpha_0$  (рис. 2).

Экспериментально воспроизвести условия, близкие к  $\alpha = \infty$ , можно путем охлаждения тела в потоке жидкости большой скорости или в жидкости энергично перемешиваемой. Чем меньше размеры тела, тем должна быть больше скорость.

Имея значение  $\lambda$  для  $\alpha = \alpha_0$  и для  $\alpha$  практически  $= \infty$ , достаточно произвести еще один-два опыта для какого-нибудь промежуточного значения  $\alpha$ , чтобы начертить приближенно характеристическую кривую.

#### § 5. ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА ФОРМУЛЫ НА ТЕРМОМЕТРЕ С ШАРОВЫМ РЕЗЕРВУАРОМ

В целях проверки изложенной здесь приближенной теории отставания было произведено несколько опытов с термометрами палочного типа, специально изготовленными для исследований этого рода. Размеры и форма одного из термометров изображены на рис. 3. Термометр имеет резервуар шарообразной формы и очень массивный; благодаря этому можно пренебречь влиянием капилляра и ртути, в нем заключенной, и считать, что явление отставания целиком сводится к охлаждению или нагреванию резервуара. К этому последнему автор применил формулы охлаждения шара и сравнил результаты вычислений с результатами опытов в различных условиях, а именно: в спокойном воздухе, в спокойной воде и в воде, энергично перемешиваемой.

Для вычисления коэффициента теплообмена  $\alpha$  в первых двух случаях служит формула Nusselt'a для теплоотдачи шара в свободном потоке (газа или жидкости):

$$\alpha = 0,156 K \sqrt[3]{\frac{s^2 g}{\eta^2 T}} (u - t). \quad (8)$$

Входящие в нее физические величины выражены в технической системе единиц, построенной на единицах кг, м, час. Буквы имеют следующий смысл:

$K$  — коэффициент теплопроводности среды;

$s$  — ее плотность;

<sup>1</sup> Gröber, Die Grundgesetze der Wärmeleitung, Jm. Springer 1921, стр. 231.

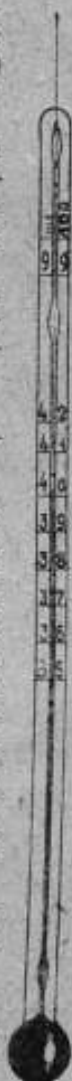


Рис. 3

е  
и  
п  
с  
н  
о  
у  
а  
ь  
д

$\eta$  — ее вязкость;  
 $t, T$  — ее температура, выраженная соответственно в °С и °К;  
 $a$  — температура на поверхности шара;  
 $g$  — ускорение силы тяжести.

Служивший объектом опытов термометр № 2355, изготовленный мастерскими ВИМС, охлаждался в воздухе, имевшем температуру = 20°, причем наблюдалось спадание его показаний от 42° до 36°, поэтому принимаем среднюю температуру за все время опыта равную 39°.

Эта температура совпадает с температурой поверхности резервуара, так как ртуть хороший проводник тепла и при не чрезмерно больших значениях  $\alpha$  распределение температур в резервуаре термометра равномерное:  $\Psi = 1$ .

Вычислим константу отставания  $\lambda$ . Для этого воспользуемся общей формулой (6) нашей теории и применим ее к данному частному случаю. Стеклянными стенками резервуара можно пренебречь, за  $s$  следует взять поверхность шара за вычетом той ее части, которая сопрягается с капилляром. Получаем:

$$\lambda = \frac{1}{\alpha \left(1 - \frac{r^2}{4R^2}\right)} \cdot R \frac{cp}{3} \quad (9)$$

Здесь  $R$  — радиус резервуара,  $r$  — радиус (наружный) капилляра,  $c$  и  $\rho$  — удельная теплоемкость и плотность ртути.

Для термометра № 2355

$$r = 0,43 \text{ см}; \quad R = 0,855 \text{ см.}$$

Для ртути  $\frac{cp}{3} = 0,15$ . Поэтому формула (9) в применении к нему дает результаты:

$$\lambda = \frac{1}{\alpha \cdot 0,937} \cdot 0,855 \cdot 0,15 = \frac{0,137}{\alpha}$$

При вычислении  $\alpha$  следует принять во внимание, что в формулу Nusselt'a (8) входит лишь одна конвекционная часть потери тепла  $\alpha_c$ , поэтому для того, чтобы получить полный коэффициент теплообмена  $\alpha$ , необходимо добавить  $\alpha_c$  потерю радиацией, обозначенную  $\alpha_r$ :  $\alpha = \alpha_c + \alpha_r$ .

Потеря радиацией  $\alpha_r$  может быть вычислена по формуле

$$\alpha_r = \sigma \frac{\left(\frac{100}{T_1}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2} \quad (10)$$

в которой  $\sigma$  означает величину лучеиспускательной способности поверхности тела,  $T_1$  — ее температуру,  $T_2$  — температуру окру-

жающих его тел в абсолютной шкале. Для стекла в технических единицах в условиях нашего опыта

$$\sigma = 4,4; T_1 = 273 + 39 = 312^\circ; T_2 = 273 + 20 = 293^\circ.$$

Поэтому  $\alpha_T = 4,4 \cdot 1,15 = 5,1$  технических единиц.

Для конвекционной части по (8) получим, принимая для воздуха при

$$t = 20^\circ$$

$$s = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$K = 0,022 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \times \text{час} \times \text{град}}; \gamma = 0,066 \frac{\text{кг}}{\text{м} \times \text{час}};$$

$$\alpha_c = 0,156 \cdot 0,022 \sqrt[3]{\frac{(1,2)^2 \cdot 127 \cdot 10^6}{6,6 \cdot 10^{-4} \cdot 293}} \cdot 19 = 4,8.$$

Поэтому полное  $\alpha$  будет в нашем случае равно

$$\alpha = 5,1 + 4,8 = 9,9 \text{ технических единиц}$$

или, переходя к системе CGS,

$$\alpha = \frac{9,9}{3500} \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \times \text{сек} \times \text{град}} = 2,75 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \times \text{сек} \times \text{град}}.$$

Поэтому, в силу предыдущего

$$\lambda = \frac{0,137}{2,75} \cdot 10^4 = 498.$$

Опыт дал  $\lambda = 412$  сек.

Расхождение в значении  $\lambda$ , полученным опытным путем и  $\lambda$  вычисленным следует признать незначительным, если принять во внимание, что камера „спокойного воздуха“, в которой производились опыты, была до крайности примитивна: она представляла собой деревянный цилиндр, диаметром около 50 см и высотой около 80 см, открытый сверху и снизу и помещенный на расстоянии около 1 м от пола. Термометр подвешивался посредине. Влияние стенок камеры здесь довольно значительно, так как опыт велся на охлаждение и более холодные стенки со значительной теплоемкостью должны были ускорить темп охлаждения, по сравнению с тем, который имел бы место при охлаждении в неискаженных условиях свободной конвекции. Этим объясняется, почему значение  $\lambda$ , найденное опытным путем, меньше вычисленного значения.

При охлаждении или нагревании того же термометра в „спокойной“ воде можно считать  $\alpha_c = 0$  и  $\alpha = \alpha_c$ . Оно вычислится по формуле (8).

Для воды, имеющей температуру  $t=20^\circ$ , примем:

$$K=0,5, s=1000, \eta=3,61 \text{ в технических единицах.}$$

В нашем опыте термометр нагревался от  $35^\circ$  до  $41^\circ$ , поэтому для  $n$  следует взять среднее значение, равное  $38^\circ$ .

$$T=293. \quad \text{Отсюда}$$

$$\alpha = 0,156 \cdot 0,5 \sqrt{\frac{10^{127} \cdot 10^6}{(3,61)^2} \cdot \frac{18}{293}} = 660 \text{ технических единиц.}$$

Переходя к системе единиц CGS, имеем

$$\alpha = 0,0183 \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \times \text{сек} \times \text{град}} \text{ и, следовательно,}$$

$$\lambda = \frac{0,137}{0,0183} = 7,5 \text{ сек.}$$

Из опыта было получено  $\lambda_{\text{оп}} = 7,1$  сек.  $\lambda_{\text{оп}}$  получилась меньше  $\lambda_{\text{теор}}$ , как и следовало ожидать, ибо условия опыта отличались от условий свободного потока: вода в ванне была нагрета, энергично перемешана и затем предоставлена самой себе; выждав известное время, приступали к опыту, причем вода еще находилась при этом в слабом движении, а это обстоятельство действовало в сторону ускорения нагревания, т. е. уменьшения  $\lambda$ .

Наконец, были произведены опыты с тем же термометром в энергично размешиваемой воде, как при охлаждении его, так и при нагревании. Эти условия уже довольно близко подходили к условиям  $\alpha = \infty$ . Было получено:

$$\lambda = 3,6 \text{ сек. при охлаждении}$$

$$\lambda = 3,4 \text{ сек. при нагревании.}$$

Расхождения объясняются эффектом трения в капилляре.

Для теоретического вычисления  $\lambda_\infty$  воспользуемся формулой (7). В случае шара коэффициент формы  $F = \frac{R^2}{\pi^2}$ . Приняв для ртути вблизи комнатной температуры:

$$c = 0,033 \quad \rho = 13,6 \quad K = 0,015,^1$$

$$\text{получим } \frac{c\rho}{K} = 30 \frac{\text{сек}}{\text{см}^2}; F = 0,074 \text{ см}^2; \text{ отсюда } \lambda_\infty = 2,22 \text{ сек.}$$

Как показывают теоретические рассуждения, это асимптотическое значение для  $\lambda$  тем труднее достигается на практике, чем

<sup>1</sup>Gröber, Grundgesetze der Wärmeleitung, стр. 261 (1921).  $K = 5,4$  технических единиц = 0,015 CGS-ед.



меньше линейные размеры охлаждающегося тела. Это как раз имеет место в случае ртутно-стеклянных термометров, а поэтому здесь и не приходится ожидать близкого согласия между  $\lambda_{\text{теор}}$  и  $\lambda_{\text{опытн}}$ .

Заметим, что при больших значениях  $\alpha$  нельзя считать распределение температур внутри резервуара термометра равномерным, хотя ртуть и хороший проводник тепла: при интенсивном охлаждении теплопроводность ртути уже недостаточна, чтобы выравнивать температуры внутри нее; нельзя считать  $\Psi = 1$  и применять формулу (9), выведенную в этом предположении и годную только при не особенно больших значениях  $\alpha$ . Здесь — при  $\alpha$  вблизи  $\infty$ , наоборот, следует положить  $\Psi = 0$  (см выше — стр. 43), и поэтому решение вопроса дается формулой (7).

Результаты опытов сведены в следующую таблицу.

Отставание термометра палочного типа с шаровым резервуаром  $R = 8,55$  мм.

Внешние условия	$\alpha \cdot 10^4$	$\lambda$ сек.	
	кал. см <sup>2</sup> × сек. × град.	опытн.	выч.
Свободный поток воздуха в нормальных условиях . . . . .	2,75	—	498
Камера спокойного воздуха . . . . .	3,3	4,12	—
Спокойная вода . . . . .	183	—	7,5
Вода почти спокойная . . . . .	200 — 300 прибл.	7,1	—
Вода энергично размешиваемая . . . . .	прибл. 11000	3,4	—
Самый интенсивный вынужденный поток	$\infty$	—	2,2

#### § 6. ЯВЛЕНИЯ, НЕ УЧИТЫВАЕМЫЕ ПРЕДЫДУЩЕЙ ПРИБЛИЖЕННОЙ ТЕОРИЕЙ ОТСТАВАНИЯ

Разобранный здесь подробно случай отставания термометра — простейший из возможных. Огромное большинство встречающихся на практике приборов устроено гораздо сложнее и их константа отставания не может быть вычислена, а находится исключительно из опыта. Дело осложняется еще и тем, что кроме факторов, перечисленных выше, играют роль и другие факторы, которые еще до сего времени игнорировались.

В предыдущей теории совершенно не учитывается роль предварительного прогрева (или охлаждения) частей термометра, непосредственно присоединенных к резервуару; таковыми являются: в ртутно-стеклянном термометре — стеклянная оболочка, заключающая шкалу, в термометре давления — капиллярная трубка и части оправы и т. д. В термометре с шаровым резервуаром № 2355, о котором речь шла выше, прогрев капилляра никакого влияния на  $\lambda$  не оказывает, что можно было и наперед предвидеть и в чем мы убедились путем опыта.

Но далеко не так обстоит дело с термометрами давления, в частности с так называемым ртутно-пружинными термометрами, которым посвящена статья А. В. Тарховой в этом сборнике. Так для термометра № 10417 давления Кембриджской комп. инструментов, наполненного ртутью со шкалой до 100°, А. В. Тарховой были найдены следующие значения константы отставания  $\lambda$  при различном предварительном нагреве:

нагрев до 40°	60°	80°
$\lambda = 8,7$	12,5	19,6 мин.

Термометр предварительно выдерживался при нормальном погружении в водяной ванне, имевшей хорошо отрегулированную температуру (40°, 60°, 80°), а затем охлаждался в спокойном воздухе — в комнате с постоянной температурой 20° при снятой оправе, т. е. всегда в одних и тех же внешних условиях. Различие заключалось в начальном состоянии охлаждавшегося термометра, и оно существенно влияло на  $\lambda$ .

Аналогичное явление имеет место и для термометров других типов. Мы здесь не можем вдаваться в его подробный анализ, но считаем необходимым его отметить и учесть при исследовании отставания.

Второй фактор, влияющий на процесс охлаждения, а поэтому и на  $\lambda$ , заключается в следующем. Охлаждающаяся (или нагревающаяся) система, состоящая из резервуара и передаточного приспособления, представляет собою комплекс различных не только твердых, но и жидких и газообразных тел. Так, например, даже в таком простом приборе, как ртутно-стеклянный термометр со вложенной шкалой, имеются: твердое тело — стекло, жидкое — ртуть, и газообразное — воздух, заключенный в стеклянную оболочку. Всякий процесс, сопряженный с возникновением температурных градиентов внутри такой системы, неизбежно повлечет за собой конвекционные токи в газе и жидкости. При наличии же их нельзя утверждать, что полулогарифмическая кривая охлаждения, из которой определяется  $\lambda$ , во всех без исключения случаях сведется к прямой: это утверждение базируется на уравнении (6), относящемся к твердому телу, или на уравнении (4), в которое входит средняя температура резервуара термометра, тогда как вместо нее, строго говоря, должна

входить средняя температура всей охлаждающейся системы. Но тогда уже нельзя утверждать, что изменение  $\theta$  во всех случаях подчиняется экспоненциальному закону, другими словами — не всегда из опыта получится прямолинейный график. Ряд опытов, произведенных по другому поводу, показал, что в этом случае график охлаждения представляется не прямой, как на рис. 1, а вогнутой кривой линией. Графики такого вида получили Nagreg в своем исследовании отставания Бекмановских термометров и в недавнее время В. А. Яковлева при исследовании отставания термометров со вложенной шкалой и палочных.

Во многих случаях наблюдается собственно даже не криволинейный график, а ломаный — состоящий из двух прямых.

Из прямолинейного или ломаного графика охлаждения можно определить, проводя касательные, максимальное и минимальное значения  $\lambda$ , что уже часто оказывается достаточным для решения практических задач.

#### § 7. ИНЕРЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИМ ДЕЙСТВИЕМ (МЕРТВЫЙ ХОД)

Здесь мы рассматриваем главным образом термическую инерцию термометра. Вкратце затронем вопрос и о „мертвом ходе“, т. е. о том инерционном явлении, которое обусловлено механическим действием. Эти действия могут быть различны в зависимости от того, в каком направлении меняется температура — в сторону повышения или понижения.

Для количественной характеристики механической части инерции термометра можно ввести коэффициент  $\mu$  следующим образом.

Рассматривая основное уравнение (1), введем в него на место  $\frac{1}{m}$  число  $L$ , которое суммарно характеризует отставание термометра. Это  $L$  (совпадающее по смыслу с  $\lambda$  в мемуаре Nagreg'a) разобьем на 2 слагаемых  $\lambda$  и  $\mu$ , так что

$$L = \lambda + \mu, \quad (11)$$

причем  $\lambda$  пусть означает термическую часть инерции; тогда  $\mu$  составит ее механическую часть. Из опыта очевидно получается суммарное отставание.

Хороший пример того, как можно разграничить  $\lambda$  и  $\mu$ , дает ртутно-стеклянный термометр. Здесь механическими силами, вызывающими запаздывание показаний прибора, являются силы трения, возникающие при движении ртутного столба в капилляре. При повышающейся температуре, когда мениск движется вверх, величина этих сил ничтожна по сравнению с действием теплового расширения и — почти всегда — можно считать  $\mu = 0$ , так что  $L$  сводится к  $\lambda$ . Совсем не то будет при понижении температуры, т. е. при спадании мениска; здесь против силы трения

действуют силы сцепления между частицами ртути и сила тяжести, которые не всегда оказываются достаточными для полного преодоления силы трения. Поэтому, чтобы получить  $\mu$ , следует определить константу отставания (полную) при нагревании термометра — пусть это будет  $L'$  — и при его охлаждении —  $L''$ . В силу предыдущего  $L' = \lambda$ ,  $L'' = \lambda + \mu$ . Отсюда получаем  $\mu = L'' - L'$ .

В качестве примера приведу опыты с термометром № 2355, некоторые результаты которых даны на рис. 1. Из рисунка видно, что при наблюдениях в энергично перемешиваемой воде найдено

$$L' = 3,4 \text{ сек.}, \quad L'' = 3,6 \text{ сек.}$$

Отсюда  $\mu = 0,2$  сек. При иных значениях  $\alpha$  получится другое  $\mu$ . При малых значениях  $\alpha$  может оказаться, что  $\mu$  практически равно нулю.

Мертвый ход играет особенно большую роль в термометрах с узким капиллярным каналом — Бекмановских, калориметрических и т. п. Это явление должно быть объектом специального исследования и говорить о нем более подробно здесь мы не будем.<sup>1</sup>

Вопрос о роли механических факторов в отставании термометров давления рассмотрен А. В. Тарховой.<sup>2</sup>

Устраняется „мертвый ход“ посредством сотрясений прибора. Наггер избрал другой путь: все свои опыты со ртутно-стеклянными термометрами он вел при повышающейся температуре.

#### § 8. ВЕЛИЧИНА ОТСТАВАНИЯ ДЛЯ ТЕРМОМЕТРОВ РАЗЛИЧНОГО УСТРОЙСТВА

Свойство отставания, присущее всем приборам, заставляет нас по-новому рассматривать вопрос о поверке термометра, а именно: для полной его характеристики нужно не только определить его поправки, но необходимо также получить данные о его инерции. Наиболее полно они представлены характеристической кривой, изображенной на рис. 2. Ясно, что для каждого типа термометров и зачастую даже для каждого экземпляра, принадлежащего к данному типу, будет иметь место своя характеристическая кривая.

Построение ее требует ряда экспериментов и соответствующего оборудования. Поэтому большинство авторов, исследовавших вопрос об отставании термометров, ограничивается тем, что приводит значения  $L$  или  $\lambda$  для какой-нибудь одной точки характеристической кривой.

<sup>1</sup> Укажем, например, статью Guillaume в „Archives des Sciences physiques“, 12 (1930).

<sup>2</sup> „Термометры давления, их устройство и поверка“, стр. 69.



В дальнейшем мы приводим некоторые цифровые данные, чтобы читатель получил представление о порядке величины отставания для термометров некоторых типов.<sup>1</sup>

Наличие оправы весьма значительно повышает инерцию ртутно-стеклянного термометра. А. В. Тарховой были произведены опыты с термометром, заключенным в легкую оправу, погружаемая часть которой представляла собой металлическую трубку диаметром только в 12 мм при длине в 150 мм. При охлаждении термометра, нагретого до 250°, в спокойном воздухе, имеющем температуру  $t = 15,5^\circ$ , то-есть при малом  $\alpha$ , найдено  $\lambda = 358$  сек. При нагревании термометра, имевшего в начале температуру 15,5°, в масляной ванне с температурой 250°, т. е. при большом  $\alpha$ , найдено  $\lambda = 72,8$  сек., тогда как для термометров без оправ в последних условиях  $\lambda$  величина порядка нескольких секунд.

Само собой разумеется, что  $\lambda$  весьма сильно зависит от конструкции оправы и от  $\alpha$ . При малом  $\alpha$  и неудачной ее конструкции термометр может оказаться непригодным для измерений даже незначительной точности, хотя бы он и был изготовлен сам по себе безупречно.

Опыты над отставанием термометров давления, которые снабжены довольно массивной оболочкой, были произведены А. В. Тарховой. Некоторые данные помещены в вышецитированной статье. Полученные результаты — того же порядка, что и приводимые в литературе. Так, например, E. Griffiths и J. H. Awberry приводят для отставания термометра, имеющего цилиндрический резервуар длиной 20 см, и с диаметром 1,9 см цифру 18,28 мин. в камере спокойного воздуха; у нас для термометра, имеющего погружаемую часть длиной 20 см и диам. 2 см, получено

$\lambda = 19,6$  мин. в спокойном воздухе  
и  $\lambda = 3,4$  мин. в спокойной воде.

Приводим еще результаты наблюдений над отставанием технического термометра давления насыщенных паров (т. е. так назыв. типа Фурнье) фирмы Foxboro со шкалой до 100°. Диаметр резервуара 9,6 мм, длина его — 103,3 мм. Термометр изготовлен весьма тщательно и инерция механического характера  $\mu$  для него практически равна нулю. Опыты дали:

$\lambda = 0,43$  мин. = 26 сек. в энергично перемешиваемой воде,  
 $\lambda = 5,1$  мин. = 306 сек. в спокойном воздухе.

Небезынтересно отметить малую термическую инерцию этого термометра сравнительно с термометрами давления, наполненными ртутью.

<sup>1</sup> На отставании ртутно-стеклянных термометров без оправ мы не останавливаемся, так как этот вопрос подробно рассмотрен Э. А. Яковлевой в этом сборнике, стр. 58.

Отставание электрических термометров сопротивления нами не было исследовано, если не считать наблюдения над охлаждением платинового термометра сопротивления эталонного типа. Термометр был погружен после комнатной температуры в ледяную ванну на глубину 23 см; найдено  $\lambda = 50$  сек. Кварцевая оболочка термометра имеет диаметр в 1 см.

За отсутствием достаточных экспериментальных данных мы не приводим величин отставания для спиртовых термометров, термолар и пр. Те основные моменты, которые были нами здесь указаны, например прогрев оправы, соединительных частей, распределение температур в резервуаре и т. д., имеют существенное значение и для этих термометров. Ими предопределяется, в каком направлении следует вести исследование каждого специального типа термометров.

#### § 9. ИЗМЕРЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ ВЫШЕИЗЛОЖЕННОЙ ТЕОРИИ

Как и прежде, обозначим буквой  $u$  температуру среды, для измерения которой пусть применяется термометр известной конструкции, константа отставания которого  $L$  известна. Показание термометра обозначим буквой  $\theta$ . Величины  $u$  и  $\theta$  соответствуют одному и тому же моменту времени  $\tau$  и связаны между собой уравнением (3), которое мы напомним в виде

$$\theta - u = -L \frac{d\theta}{d\tau}, \quad (12)$$

заменяв  $\lambda$  через  $L$ . Эта формула содержит, в первом приближении, решение задачи об измерении изменяющейся со временем температуры  $u$  среды.

В самом деле, наблюдая показания термометра  $\theta$ , мы получаем  $\theta$  как функцию времени

$$\theta = f(\tau), \quad (13)$$

так что  $f\theta$  можно считать заданной или графически или аналитически. Тогда уравнение (12) позволяет вычислить искомую температуру  $u$  как функцию  $\tau$ , а именно

$$u = f(\tau) + L f'(\tau). \quad (14)$$

Константа отставания  $L$  находится из характеристической кривой отставания данного термометра, изображенной на рис. 2 (вместо  $\lambda$  можно ввести  $L$ ). Из нее можно определить  $L$ , если известно  $\alpha$ .

Таким образом для правильного измерения температуры  $u$  необходимо знать, хотя бы приближенно, коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  погруженной в среду части термометра. Рис. 2 показывает, что ошибка в оценке  $\alpha$  тем меньше отражается на точности

определения  $L$ , а следовательно и на точности измерения температуры  $u$ , чем  $\alpha$  больше. Наоборот, при малых значениях  $\alpha$  всякая небольшая ошибка в оценке  $\alpha$  значительно влияет на  $L$ , в соответствии с чем получается и большая ошибка в измерении  $u$ . Таким образом видно, с какими трудностями сопряжено измерение температуры газов в спокойном состоянии или движущихся с незначительными скоростями около резервуара термометра: это — особо неблагоприятный случай малых значений  $\alpha$ .

Отсюда также видно, какое практическое значение имеет введенная нами характеристическая кривая отставания: она позволяет сделать заключение о том, в каких случаях практики пригоден данный термометр.

#### § 10. ПРИМЕРЫ

Для иллюстрации высказанных здесь общих положений приведем два примера.

Рассмотрим самый простой случай, являющийся частным случаем формулы (12): измерение постоянной температуры  $t$ . Термометр до погружения в среду температуры  $t$  имел отличающуюся от нее температуру  $\theta_0$ ; спрашивается, чрез сколько времени, начиная с момента погружения в среду, термометр покажет ее температуру с заданной точностью  $\epsilon$ .

Очевидно, в силу уравнения (4), искомое время (по немецкой терминологии *Einstellungszeit*) определяется очень просто:

$$\tau - \tau_0 = L \log \frac{\theta_0 - t}{\epsilon}.$$

Пусть, например, ртутно-стеклянным термометром измеряют температуру воздуха в закрытом помещении в условиях спокойного воздуха, причем в начальный момент температура термометра на  $10^\circ$  отличается от температуры воздуха в помещении и пусть константа отставания  $L$  для этих условий (т. е. для  $\alpha \approx 10$ ) найдена = 190 сек. Тогда разность температур термометра и воздуха упадет до  $0,01^\circ$  только через 22 мин. и только по истечении этого времени можно отсчитать  $t$  с точностью до сотых долей.<sup>1</sup>

Рассмотрим, далее, случай, когда температура среды изменяется по линейному закону (см. выше, стр. 40)

$$u = u_0 + r(\tau - \tau_0).$$

В этом случае по прошествии достаточного времени показание термометра будет изменяться с той же скоростью по тому же закону, так как при больших значениях  $\tau - \tau_0$  можно считать

$$\theta - u = -rL.$$

<sup>1</sup> Пример взят из вышецитированного мемуара Harterá, стр. 679.

Рассмотрим следующий пример:<sup>1</sup> для измерения температуры помещения, которая довольно медленно изменяется, пользуются термометром давления с отсчетом показаний на расстоянии. Отмечены показания термометра:

$$\tau = 11 \text{ ч. } 50 \text{ мин.} \quad \theta = 39,7^\circ$$

$$\tau = 12 \text{ ч. } 10 \text{ мин.} \quad \theta = 40,8^\circ$$

Требуется определить истинную температуру воздуха в помещении в 12 часов. Отставание термометра для идентичных условий найдено  $L = 18,3$  мин.

В силу предыдущего уравнения помещение имело отмеченные температуры в моменты времени

$$11 \text{ час. } 50 \text{ мин.} - 18,3 \text{ мин.} = 11 \text{ час. } 31,7 \text{ мин.}$$

$$12 \text{ час. } 10 \text{ мин.} - 18,3 \text{ мин.} = 11 \text{ час. } 51,7 \text{ мин.}$$

Поэтому скорость возрастания температуры, обозначенная  $r$ , составляет  $1,1^\circ$  в 20 мин. и за время с 11 часов 51,9 мин. до 12 часов, т. е. в течение 8,3 мин., температура возрастет на  $0,46^\circ$ . Поэтому в 12 часов температура помещения будет равна  $40,8^\circ + 0,46^\circ = 41,3^\circ$ , в то время, как арифметическое среднее из показаний термометра, соответствующее тому же моменту времени, будет только  $40,25^\circ$ .

Приведенные здесь простые примеры показывают, как можно использовать для целей практической термометрии константу отставания  $L$ .

Вместе с тем выясняется, насколько сложен вопрос об измерении нестационарных температур: его решение, между прочим, зависит от знания такой сложной величины, как коэффициент теплоотдачи.

<sup>1</sup> Пример взят из статьи Griffiths и Awberry, The Nat. Phys. L. Collected Researches (1926), 119.



## SUR LE RETARD DES THERMOMÈTRES ET LA MESURE DES TEMPÉRATURES VARIABLES

G. Kondratiew

*(Résumé)*

Dans l'article de G. Kondratiew ce phénomène est considéré d'une façon générale au point de vue de la théorie analytique de la chaleur. La formule approchée donnée par l'auteur pour la „constante de retard“ est vérifiée par les expériences. Les facteurs divers dont dépend le retard sont examinés, entre autres le coefficient de la conductibilité extérieure, jouant un grand rôle que l'on n'apprécie pas suffisamment. Les exemples empruntés au domaine de la thermométrie pratique servent à illustrer des conclusions générales.

A la fin de l'article l'auteur indique comment la „constante de retard“ peut être utilisée dans le problème important de la mesure des températures variables.

---

## ОТСТАВАНИЕ РТУТНО-СТЕКЛЯННЫХ ТЕРМОМЕТРОВ

В. А. Яковлева

Вопрос об отставании термометров изложен в статье Г. М. Кондратьева „Отставание термометров“ (см. стр. 37).

Настоящая статья рассматривает частный случай отставания ртутно-стеклянных термометров. В отечественной литературе вопрос этот затрагивается впервые, поэтому, не ограничиваясь результатами собственных исследований, сообщаются также некоторые данные из иностранной литературы по трудам Harpeг'a и Thiesen'a.

Работа наша состояла в экспериментальном определении константы отставания для термометров различных типов. Особое внимание было обращено на влияние предварительного прогрева или охлаждения стержня термометра, так как это обстоятельство совершенно игнорировалось другими исследователями.

Основой здесь является формула:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -\frac{1}{\lambda}(\theta - u),$$

где  $\theta$  — показание термометра,

$u$  — температура ванны,

$\tau$  — время,

$\lambda$  — константа отставаний, которая имеет следующее физическое значение:

1. Если термометр был долго погружен в ванну, температура которой повышается с одинаковой скоростью, то  $\lambda$  есть число секунд, на которое показания термометра отстают от температуры ванны.

2. При постоянной температуре ванны  $\lambda$  будет числом секунд, в течение которых разность между показанием термометра и температурой ванны упадет до  $\frac{1}{e} = \frac{1}{2,718}$  (приблизительно 0,4) своей первоначальной величины.

Для вычисления  $\lambda$  мы пользовались графическим методом, определяя ее из отношения

$$\lambda = \frac{\tau}{\ln \frac{\theta_0 - u}{\theta - u}}$$

Если

$$\ln \frac{\theta_0 - u}{\theta - u}$$

отложить на оси ординат, а время  $\tau$  на оси абсцисс, то  $\lambda$  определяется как  $\cotg$  угла между полученной прямой и осью абсцисс. (Для упрощения можно откладывать по оси ординат  $\ln(\theta - u)$ ). Производство опыта очень простое. Термометр, предварительно охлажденный, погружают в ванну постоянной температуры и по секундомеру или хронографу отмечают время  $\tau$  прохождения мениска через деления термометра. Для каждого отсчета по термометру  $\theta$  записывается время  $\tau$  и вычисляется  $\ln(\theta - u)$ . За  $\theta_0$  можно взять любой из первых отсчетов по термометру. Заметим, что  $\theta$  — исправленное показание термометра.

Были произведены ряд опытов над отставанием термометров в воде, спокойной и энергично перемешиваемой, над следующими термометрами: а) термометр палочного типа с диаметром стержня равным 5,6 мм, длиной в 520 мм, б) термометр с вложенной шкалой с диаметром стержня равным 10 мм, длиной в 520 мм, в) термометр Бекмана с диаметром ножки в 11 мм, длиной в 200 мм.

Так как главной задачей являлось выяснение влияния первоначального теплового состояния стержня термометра на константу отставания, то при испытаниях варьировалась первоначальная температура стержня термометра, а резервуар охлаждался всегда до одной и той же температуры.

Чтобы исключить влияние так называемого „мертвого хода“, вызываемого трением ртути о стенки капилляра, которое наиболее заметно сказывается при понижении показаний термометра, наблюдения велись всегда при повышающемся мениске в водяной ванне емкостью в 40 л.

Первая серия опытов была произведена в спокойной воде, причем ванна была выдержана при комнатной температуре равной 20° С в течение двух суток.

Опыты производились при двух различных начальных температурах стержня термометра.

1. Термометр предварительно выдерживался при температуре 20° С, затем резервуар охлаждался во льду (так что стержень термометра сохранял комнатную температуру 20°), и после этого уже термометр погружался в ванну до деления 15° и производилось определение константы отставания.

2. Термометр весь выдерживался предварительно в течение часа в тающем льде и затем, при тех же условиях, производилось определение константы отставания.

Как и можно было ожидать, получены разные значения  $\lambda$  в зависимости от первоначального теплового состояния стержня.

В случае прогрева стержня до температуры ванны термометры в точности следуют закону прямой линии, так как незначительные отклонения линии от прямой в начале и в конце

опыта находятся в пределах возможных ошибок. Константа отставания в этих условиях найдена равной: для палочного термометра  $\lambda = 5,2$  сек., для термометра со вложенной шкалой  $\lambda = 9,2$  сек.

График отставания для термометра со стержнями, предварительно охлажденными до  $0^\circ$ , уже не следует в точности прямолинейному закону, и представляет собою ломаную линию, и объяснить это явление ошибками отсчета уже нельзя, так как промежуток времени между отсчетами значительно превышает возможную ошибку между действительным временем прохождения ртутного мениска через деления шкалы термометра с записью его на хронографе. В этом случае получены два различных значения для  $\lambda$ .

	Термометры палочного типа	Термометры со вложенной шкалой
В начале опыта при нагревании от $15^\circ$ до $18^\circ$ . . . . .	$\lambda_1 = 10,1$ сек.	$\lambda_1 = 13,8$ сек.
В середине опыта при нагревании от $18^\circ$ до $19,6^\circ$ . . . . .	$\lambda_2 = 20$ сек.	$\lambda_2 = 46$ сек.

Как видно из приложенных графиков (рис. 1 и 2), точки в конце опыта уже располагаются незакономерно, и разбросан-

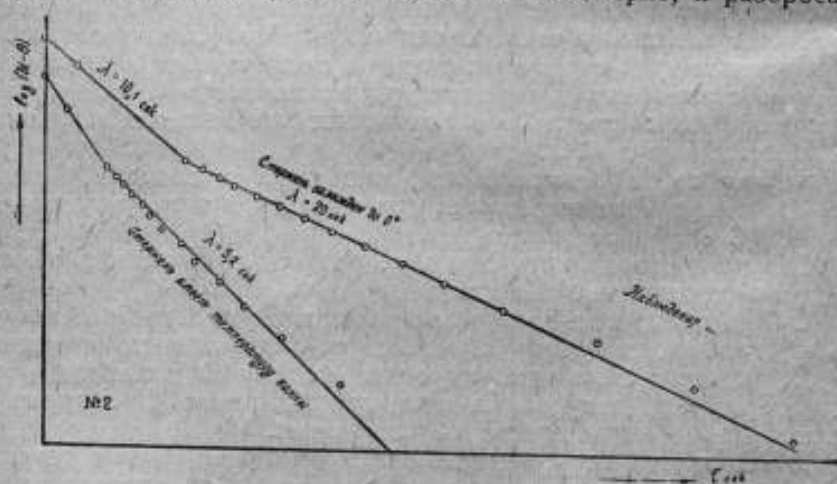


Рис. 1

ность их может быть объяснена ошибками наблюдений, так как ртутный мениск здесь движется очень медленно, время прохождения его через черту не поддается точному учету, и эти наблюдения следует отбросить при построении кривой. Рис. 1



относится к термометру палочного типа, рис. 2 — к термометру со вложенной шкалой.

При сопоставлении полученных значений  $\lambda$  со значением  $\lambda$  при стержне, имеющем температуру ванны, видно, насколько

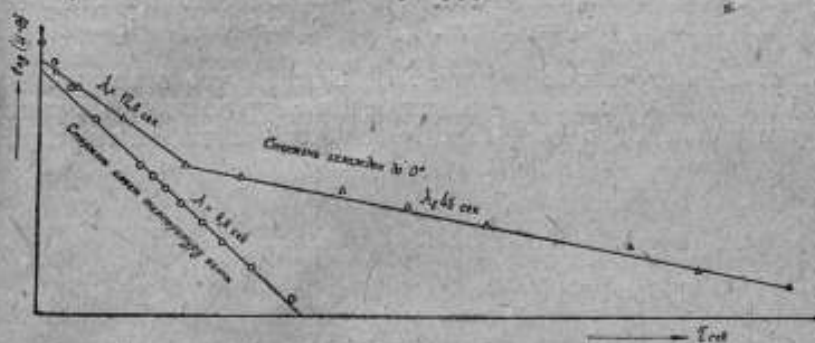


Рис. 2

сильно эти значения отличаются друг от друга, причем следует отметить, что начальное тепловое состояние стержня оказывает значительное влияние на константу отставания для обоих испытываемых типов термометра.

В случае недостаточно установившегося начального теплового состояния стержня термометра опыты дают криволинейные графики, и таким образом здесь  $\lambda$  является переменной величиной.

Для выяснения влияния на константу отставания увеличения разности между температурами ванны и стержня были произведены опыты с тем же термометром со вложенной шкалой, но в первой серии опытов температура ванны была равна  $40^\circ$ , а во второй  $60^\circ$ .

К сожалению эти температуры не могли поддерживаться постоянными без подогрева ванны током и без перемешивания воды, так что эти опыты велись уже при иных тепловых условиях и полученные  $\lambda$  не сравнимы с  $\lambda$  предыдущего опыта. Начальное тепловое состояние стержня варьировалось, а именно: в одном ряде опытов весь термометр нагревался до температуры ванны ( $40^\circ$  или  $60^\circ$ ) и лишь его резервуар перед опытом подвергался охлаждению до нуля, в другом ряде весь термометр перед погружением в ванну имел температуру  $0^\circ$ . Результаты, полученные при температурах выше  $20^\circ$ , изображены в виде кривой на рис. 3, при чем константа отставания в начале опыта обозначена через  $\lambda_1$ , а в конце его через  $\lambda_2$ .

Приводим значения, полученные для этих начальных тепловых состояний стержня.

При прогреве стержня  
термометра.

до $40^\circ$ ( $u=40^\circ$ )	до $60^\circ$ ( $u=60^\circ$ )
$\lambda_1 = 2,2$ сек.	$\lambda_1 = 2,4$ сек.
$\lambda_2 = 2,6$ сек.	$\lambda_2 = 6,2$ сек.

При охлаждении стержня  
до  $0^\circ$ .

при $u=40^\circ$	при $u=60^\circ$
$\lambda_1 = 3$ сек.	$\lambda_1 = 3,6$ сек.
$\lambda_2 = 9$ сек.	$\lambda_2 = 35$ сек.

Сличая полученные результаты, видим, что в том случае, когда стержни термометра имеют температуру близкую к температурам ванны  $U$ , кривые имеют меньший изгиб, чем в случае

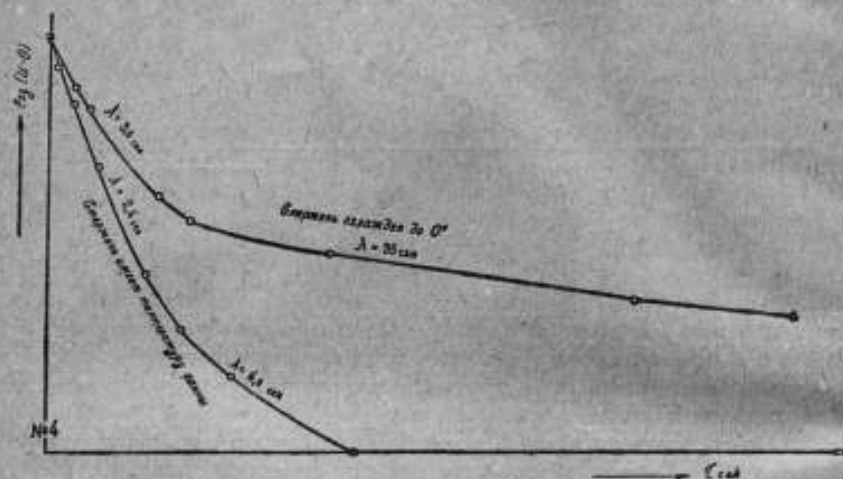


Рис. 3

охлажденных стержней. Значения для  $\lambda_1$ , при  $u=40^\circ$  и при  $u=60^\circ$  практически совпадают. Точно также незначительно различаются между собой значения  $\lambda_1$ , и в случае предварительного охлаждения всего термометра до нуля, тогда как значения  $\lambda_2$  в обоих случаях оказываются сильно зависящими от  $u$ .

Аналогичные опыты были произведены Thiesen'ом<sup>1</sup> при следующих условиях: термометры, предварительно нагретые до  $35^\circ$ , помещались в ванну со льдом и производилось определение  $\lambda$  при падающем мениске, затем из нулевой ванны они переносились в водяную ванну, имеющую температуру  $35^\circ$ , и снова определялась  $\lambda$  уже при поднимающемся ртутном мениске. При опытах отклонение от закона прямой линии при понижении мениска вышло больше, чем при его повышении, причем в среднем для  $\lambda$  при понижающемся мениске Thiesen получил значительно большую величину, чем при поднимающемся. Рассма-

<sup>1</sup> „Metronomische Beiträge“. № 3, 13 (1881).

тривая полученные Thlesen'ом кривые (рис. 4), видно, что в начале опыта как для охлаждающегося термометра, так и нагревающегося значения  $\lambda$  близки между собой, затем происходит перелом прямой и для первого случая он больше, чем для второго.

Прежде чем перейти к изложению опытов с отставанием термометров типа Бекмана, у которых имеется значительное количество ртути в широком капилляре, проходящем в охранной трубке термометра и отделенной от температуры ванны воздуш-

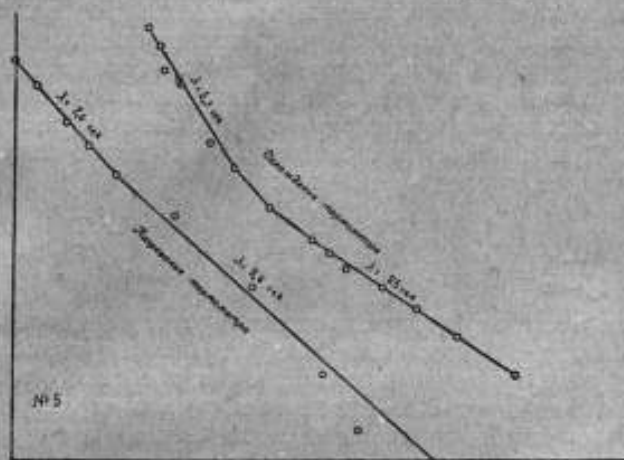


Рис. 4

ным слоем, приводится теория Nagreg<sup>1</sup> для отставаний Бекмановских термометров.

Nagreg рассматривает термометр этого типа как имеющий два резервуара и применяет закон охлаждения Ньютона в отдельности к каждому из них. Таким образом Nagreg получает

$$\frac{dB}{d\tau} = -\frac{1}{\lambda_0} (B - u) \text{ — для главного резервуара,}$$

$$\frac{dC}{d\tau} = -\frac{1}{\lambda_c} (C - u) \text{ — для широкого капилляра термометра,}$$

где  $B$  — температура резервуара в момент времени  $\tau$ ,

$\lambda_0$  — константа отставания резервуара,

$C$  — температура капилляра в момент времени,

$\lambda_c$  — константа отставания капилляра.

Эти величины связаны с  $\theta$  уравнением:  $\theta = (1-K) B + KC$ , в котором  $K$  обозначает количество ртути, перетекающее из резервуара в капилляр, если все количество ртути принять за 1.

<sup>1</sup> Bull. Bur. Stand. 8, 6<sup>o</sup> (1912).

Интегрируя уравнение, получаемое путем исключения  $B$  и  $C$ , Harper для отставания термометров типа Бекмана приходит к следующей формуле в случае, когда  $u = \text{const}$ :

$$\frac{\theta - u}{\theta_0 - u_0} = (1 - K)e^{-\frac{\tau}{\lambda_a}} + Ke^{-\frac{\tau}{\lambda_c}}$$

Для оценки величины  $K$  можно сделать следующий приближенный расчет: принимая во внимание коэффициент расширения ртути в стекле, объем резервуара должен содержать 6300 объемов, равных  $1^\circ$  по капилляру, и нагревание на  $1^\circ$  вызовет перетекание ртути из резервуара в капилляр, равное  $1:6300 = 0,00016$  от объема резервуара, величина незначительная, по которой будет постепенно возрастать при повышении температуры термометра. При первоначальном нагревании термометра на  $20^\circ$  эта формула примет следующий вид:

$$\frac{\theta - u}{\theta_0 - u} = (1 - 0,0032)e^{-\frac{\tau}{\lambda_a}} + 0,0032e^{-\frac{\tau}{\lambda_c}}$$

Константа отставания ртути в капилляре термометра  $\lambda_c$  должна быть, благодаря прослойке воздуха, больше константы отставания  $\lambda_a$  резервуара термометра; опыт показал, что  $\lambda_c$  в несколько раз превышает  $\lambda_a$ . Рассматривая оба члена уравнения в отдельности, Harper приходит к заключению, что при начале опыта превалирует первый член, так как  $K$  является незначительной величиной по сравнению с единицей, но так как показатель при  $\lambda$  в первом члене убывает значительно быстрее, чем во втором, то с увеличением времени  $\tau$  первый член будет убывать быстрее и в конце опыта он почти совсем исчезнет, и тогда представится возможность определить второй член. Эти выводы Harper подтвердил опытом с термометром Бекмана, охлажденным до  $0^\circ$  и помещенным в ванну с постоянной температурой  $29,10^\circ$  при нормальном перемешивании калориметра. Результаты опыта подтвердили теоретические выводы. На рис. 5 изображена кривая, полученная Harper'ом из опыта с одним из

термометров Бекмана. Здесь  $F = (1 - 0,0032)e^{-\frac{\tau}{870}} + 0,0032e^{-\frac{\tau}{50}}$ .

Наши опыты с термометром Бекмана были произведены в водной ванне с энергичным перемешиванием воды и при постоянной температуре, равной  $45^\circ$ . Они имели целью выяснить роль начального теплового состояния термометра. Поэтому определение  $\lambda$  произведено было при трех различных начальных температурах нижней части термометра, заключающей широкий капилляр — его „ножки“, а именно в первом случае она имела температуру  $45^\circ$ , во втором случае  $20^\circ$  и в третьем случае  $0^\circ$ , причем нижняя часть термометра выдерживалась при данной температуре не менее часа. В остальной части опыт велся так же, как и у Harper'a,



а именно: резервуар термометра охлаждался всегда до одной и той же температуры, так чтобы ртуть стояла у самого конца резервуара, т. е. чтобы во всех случаях количество ртути, перекачающее из резервуара в капилляр, обозначенное Hargre'ом буквой  $K$ , оставалось одним и тем же, и термометр погружался в ванну до начала делений шкалы. Опыт дал в случае прогрева ножки до температуры ванны прямую линию, что соответствует наличию лишь одного значения константы отставания  $\lambda_0$ , а для ножки, имеющей температуру  $20^\circ$  и  $0^\circ$ , получены кривые линии (рис. 6), подобные полученным Hargre'ом, имеющие две константы  $\lambda_0$  и  $\lambda_c$ , причем с увеличением разности температур получены большие величины, как для  $\lambda_0$ , так и для  $\lambda_c$ .

Приводим полученные результаты:

Температура ножки

$45^\circ$        $20^\circ$        $0^\circ$

$\lambda_0 = 2,5$  сек.    $3,1$  сек.    $3,5$  сек.

$\lambda_c = 0$  сек.    $14,1$  сек.    $14,7$  сек.

Из произведенных в нашей лаборатории опытов можно сделать следующий вывод: константа отставания  $\lambda$  в значительной мере зависит от начальной температуры всех частей термометра, и чем больше разность между начальной их температурой и температурой измеряемой среды, тем больше получается значение для  $\lambda$ .

Зависимость  $\lambda$  от свойств среды, в которую погружен термометр, рассмотрена с общей точки зрения в статье Г. М. Кондратьева. Обширный экспериментальный материал приведен в статье Hargre'a.

Hargre'ом были произведены исследования отставания ртутно-стеклянного термометра на приборе, специально сконструированном для этой цели так, что можно было измерить скорость потока жидкости, омывающей резервуар термометра. Приводим здесь таблицу, данную Hargre'ом для константы отставания  $\lambda$  палочного термометра обычного типа с небольшим резервуаром в зависимости от среды и от скорости движения потока, омывающего резервуар.

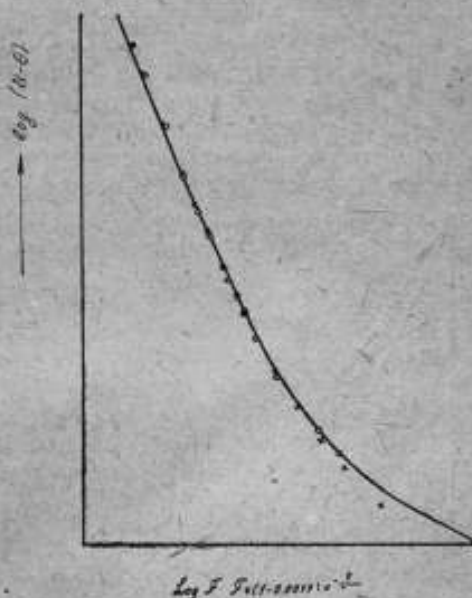


Рис. 5

Более вязкая жидкость для данной скорости дает большее значение для  $\lambda$ .

Скорость потока в см/сек. . . .	0	1	5	10	50	100	500	1000	$\infty$
в воде . . . .	10,0	5,1	3,3	2,9	2,4	2,3	—	—	2,2
при $U=20$ в нефт. масле от—	10 до 50	13,4	7,5	6,4	4,8	—	—	—	—
в воздухе . . . .	190	170	148	128	71	58	33	25	—

Из приведенной таблицы видно, что  $\lambda$  резко изменяется в зависимости от свойств среды и в значительной мере изменяется также и от скорости ее движения.

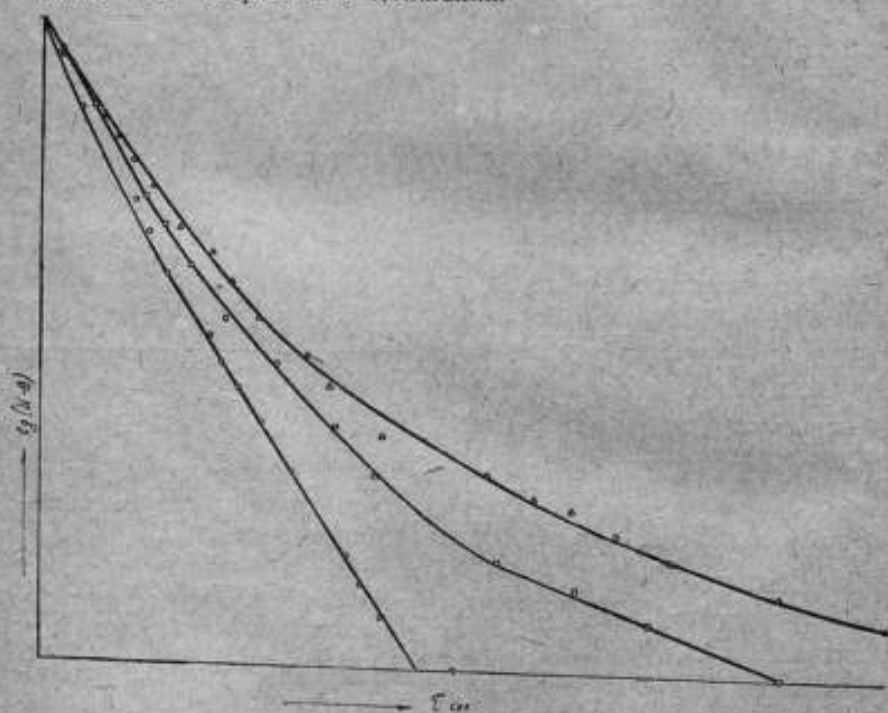


Рис. 6

Зная  $\lambda$  для данных условий, можно сделать приблизительный расчет, через какое время термометр, помещенный в среду постоянной температуры, будет указывать ее, помня, что каждому  $\lambda$

секунд соответствует уменьшение разности между  $u$  и  $\theta$  на  $\frac{1}{e}$  своей первоначальной величины.

За время равное		Разность $(u - \theta)$ упадет до	
$\lambda$	$\frac{1}{e} (u - \theta) = 0,3679$	$6\lambda$	$\frac{1}{e^6} (u - \theta) = 0,0025$
$2\lambda$	$\frac{1}{e^2} (u - \theta) = 0,1353$	$7\lambda$	$\frac{1}{e^7} (u - \theta) = 0,0009$
$3\lambda$	$\frac{1}{e^3} (u - \theta) = 0,0302$	$8\lambda$	$\frac{1}{e^8} (u - \theta) = 0,00033$
$4\lambda$	$\frac{1}{e^4} (u - \theta) = 0,0183$	$9\lambda$	$\frac{1}{e^9} (u - \theta) = 0,00012$
$5\lambda$	$\frac{1}{e^5} (u - \theta) = 0,0067$	$10\lambda$	$\frac{1}{e^{10}} (u - \theta) = 0,00004$

При линейном изменении температуры ванны  $\lambda$  есть число секунд, на которые показания термометра отстают от температуры ванны, и для данного режима это будет постоянной величиной  $r = \lambda \frac{du}{dt}$ , где  $\frac{du}{dt}$  изменение температуры ванны в 1 сек. При сравнении термометров, зная  $\lambda$ , которое определено для данной среды и скорости перемешивания, эта величина может быть точно вычислена.

Например в ванне, температура которой повышается со скоростью  $0,03^\circ$  в 60 сек., термометр с  $\lambda = 3$  сек. будет отставать от температуры ванны на величину  $\lambda \frac{du}{dt} = \frac{0,03^\circ}{60} \cdot 3 = 0,0015^\circ$ , а термометр с  $\lambda = 15$  сек. на величину  $\frac{0,03^\circ}{60} \cdot 15 = 0,0075^\circ$ , и между показаниями этих термометров будет постоянная разность, равная  $0,0075^\circ - 0,0015^\circ = 0,006^\circ$ . При очень точных сравнениях эта разность между  $\lambda$  термометров и учитывается. Следует отметить, что в случае сравнения термометров в водяной ванне с энергичным перемешиванием для обычных типов термометров, значения  $\lambda$  много ближе сходятся между собою, чем в приведенном примере.

## SUR LE RETARD DES THERMOMÈTRES À MERCURE

par V. A. Iakovleva

(Résumé)

En se basant sur ses déterminations expérimentales de la „constante de retard“ des thermomètres à mercure, l'auteur de l'article considère spécialement l'influence de l'état thermique initial de la tige du thermomètre.

Trois types de thermomètres furent examinés: 1) le thermomètre à tige; 2) le thermomètre de forme allemande; 3) le thermomètre Beckmann.

Les résultats des expériences démontrèrent que la constante de retard dépend grandement de la température initiale de la tige et que la valeur de  $\lambda$  augmente avec l'augmentation de la différence entre la température initiale de la tige et la température mesurée.

L'auteur a obtenu les résultats suivants:

Dans un bain d'eau, l'eau étant immobile et la température de la tige de 20°.

	La tige a la température du bain.	La tige est refroidie jusqu'à 0°	
Thermomètre à tige . . .	5,2 sec	10,1 sec	20 sec
Thermomètre de forme allemande . . . . .	9,2 sec	13,8 sec	46 sec

Dans un bain d'eau, l'eau étant fortement agitée, pour un thermomètre de forme allemande.

La tige du thermomètre jusqu'à 60°, la température du bain 60°	étant refroidie jusqu'à 40°, la tempé- rature du bain 40°	La tige du thermomètre re- froïdie jusqu'à 0°	
		t-40°	t-60°
2,4 sec	2,2 sec	3 sec	3,6 sec
6,2 sec	2,6 sec	9 sec	35 sec

Dans un bain d'eau, l'eau étant fortement agitée, la température const. de 45°.

	Thermomètre Beckmann		
t du tube protecteur	45°	20°	0°
$\lambda$	2,5 sec	3,1 sec	3,5 sec
$\lambda$	0 „	14,1 „	14,7 sec



## ТЕРМОМЕТРЫ ДАВЛЕНИЯ, ИХ УСТРОЙСТВО И ПОВЕРКА

А. В. Тархова

Настоящая статья не преследует цели дать исчерпывающий материал по термометрам давления, а имеет в виду лишь осветить основные моменты устройства, поверки и применения их.

После ртутно-стеклянного термометра термометр давления является наиболее распространенным и простым прибором для определения температур в промышленности и технике.

Термометры этого типа состоят из: а) металлического корпуса, в котором помещаются манометрическое приспособление и шкала термометра, и б) чувствительной части или резервуара термо-



Рис. 1

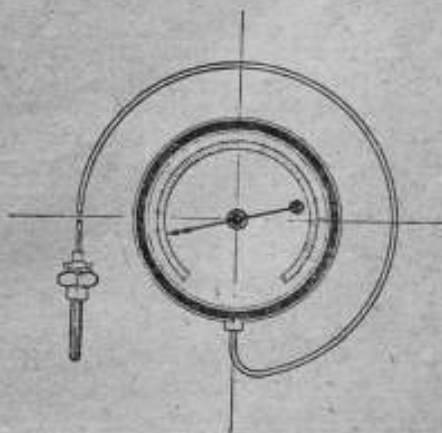


Рис. 2

метра, соединенного непосредственно или при помощи металлической капиллярной трубки с манометрической трубкой (рис. 1 и 2).

Измерение давления в этих термометрах основано на том же принципе, как измерение давления при помощи манометров Бурдона. Индикатором для них служит манометрическая трубка

Бурдона, градуированная так, чтобы по положению стрелки, соединенной с нею, можно было бы непосредственно отсчитывать температуру.

Термометры давления бывают трех типов:

Тип I. Термометры, наполненные жидкостью.

Тип II. Термометры давления насыщенных паров, т. е. наполненные жидкостью и ее насыщенными парами.

Тип III. Термометры, наполненные газом.

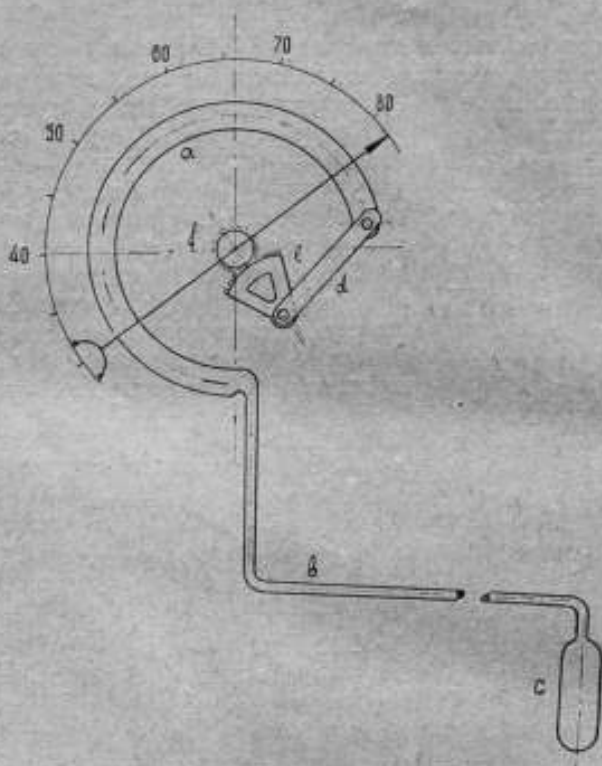


Рис. 3

Манометрическое приспособление у термометров всех трех типов одинаково (рис. 3). Главную часть его является трубка Бурдона *a*, представляющая собой металлическую трубку, овального сечения, согнутую по дуге круга. Внутри трубки проходит очень узкий канал.

Один конец этой трубки впаян в медную колодку, прикрепленную неподвижно к корпусу прибора. При помощи канала, высверленного в колодке, этот конец соединяется с металлической капиллярной трубкой *b*, идущей к резервуару термометра *c*.

Другой конец трубки Бурдона остается свободным и может передвигаться. При помощи поводка *d* движение передается зубчатому сектору *e*, зацепляющему шестеренку с укрепленной на ней стрелкой.

Если давление внутри системы равно внешнему давлению, стрелка остается неподвижной. При изменении температуры среды, в которую помещен резервуар, давление внутри системы изменится, вследствие расширения или сжатия жидкости или газа, наполняющих систему прибора. Под влиянием изменившегося давления трубка Бурдона сожмется или разогнется и тем вызовет движение стрелки вдоль шкалы, деления которой нанесены в градусах температуры.

При конструировании термометра давления необходимо подобрать размеры манометрической трубки таким образом, чтобы деформации ее, вызванные изменениями температуры резервуара, не выходили за пределы упругих деформаций, т. е. чтобы трубка принимала прежнюю форму после прекращения действия силы, вызывавшей ее деформации.

По закону Гука величина упругой деформации будет прямо пропорциональна силе, изгибающей какой-либо стержень. Если сила, действовавшая на стержень, перешла предел упругости, то стержень уже не принимает прежней формы, так что перегревание термометра выше предела, указанного на шкале, делает его непригодным.

Трубка Бурдона восстанавливает свою форму под влиянием внутренних сил упругости, но так как вследствие остаточного упругого последования эта работа не может быть совершена мгновенно, то показания прибора несколько запаздывают. Чем дольше находится трубка в рабочем состоянии, тем медленнее она принимает прежнюю форму.

После нескольких лет работы манометрическая трубка совсем теряет свою упругость, вследствие усталости материала.

Одной из причин запаздывания движения стрелки является мертвый ход передаточного механизма, так как между частями его, даже при очень тщательном изготовлении, остаются небольшие зазоры увеличивающиеся вследствие изнашивания этих частей во время работы. Для уменьшения мертвого хода на оси шестеренки укрепляется пружина обратного действия.

Манометрическое приспособление соединено с резервуаром при помощи капиллярной трубки или непосредственно. Длина трубки бывает различна: от 1,5 до 60 м. Внешний диаметр обычно делается около 3 мм, внутренний, — по возможности малым; обыкновенно он не превышает 0,5 мм.

Соединения трубки Бурдона с капиллярной трубкой и последней с резервуаром должны быть выполнены с особой тщательностью, так как малейшая неплотность может вызвать нарушение действия всей системы, особенно при высоких температурах, вызывающих высокие давления.

В термометрах I типа вся система заполнена жидкостью, и движение стрелки происходит вследствие расширения жидкости при нагревании резервуара термометра. Для наполнения этих термометров употребляются керосин, спирт, вода и ртуть. Две первых жидкости легко испаряются даже через поры резервуара термометра, что, конечно, снижает показания прибора. Значительно больше распространены термометры, заполненные ртутью. Обладая сравнительно небольшим коэффициентом расширения, ртуть может быть использована для большого температурного интервала. Шкала термометров I типа имеет равные деления, так как жидкость при нагревании расширяется равномерно.

Неудобство пользования ртутью при заполнении термометров состоит в том, что ртуть легко образует амальгамы со многими металлами. Разрушительному действию ее противостоят из металлов железо и никкель, которые и могут быть употреблены на изготовление манометрической трубки, капилляра и резервуара термометров.

После изготовления ртутно-пружинные термометры подвергают продолжительному старению, чтобы ртуть заполнила мельчайшие поры металлических трубок и резервуара. Только по окончании этого процесса производится градуировка прибора.

Недостатком термометра этого типа является зависимость показаний прибора от колебаний температуры капиллярной трубки. Чем больше длина этой трубки и чем больше ее внутренний диаметр, тем меньше отношение количества ртути, находящейся в резервуаре, к количеству ртути в капилляре и тем значительнее влияние колебаний температуры капиллярной трубки. Чтобы уменьшить его, резервуар термометра обычно делают довольно больших размеров: диаметр бывает около 12 мм, а длина достигает 250 мм.

Такие значительные размеры резервуара замедляют показания прибора, так как при большой объемной теплоемкости ртути необходимо продолжительное выдерживание резервуара термометра в измеряемой среде для того, чтобы он принял температуру среды.

Ошибки, происходящие вследствие колебаний температуры капилляра, могут быть устранены путем устройства дополнительной компенсационной трубки. Она представляет собою капиллярную трубку с таким же диаметром, как и основной капилляр, заполненную той же жидкостью и проложенную вдоль основного капилляра.

Один конец компенсационного капилляра помещается около верхнего конца резервуара; он не должен входить в ту среду, температуру которой измеряют. Другой конец компенсационного капилляра соединен со второй трубкой Бурдова, помещенной



рядом с первой и закрепленной таким образом, что ее деформации противодействуют движению стрелки, вызванному деформациями первой основной манометрической трубки. При таком устройстве вторая манометрическая трубка реагирует только на колебания температуры среды, скружающей капиллярные трубки.

Если подвергнуть местному подогреву (например, на спиртовой лампочке) оба капиллярных провода, то стрелка прибора останется неподвижной.

Длина капилляра для ртутно-пружинных термометров не превышает обычно 5 м.

Приводим таблицу жидкостей, применяемых в США для наполнения термометров I типа, с указанием их пределов температуры.

Жидкость	Пределы температуры
Ртуть . . . . .	от $-30^{\circ}$ до $540^{\circ}$ C
Вода . . . . .	+ $93^{\circ}$ . $260^{\circ}$ .
Спирт . . . . .	- $45^{\circ}$ . $205^{\circ}$ .

У ртутно-пружинных термометров, изготовляемых в Германии, верхний предел шкалы достигает  $600^{\circ}$ . При дальнейшем нагревании давление ртути становится так велико, что стенки резервуара при нагревании не смогли бы его выдержать.

Наиболее часто встречающиеся ртутно-пружинные термометры имеют шкалы от  $0^{\circ}$  до  $100^{\circ}$  или для высоких температур от  $100^{\circ}$  до  $540^{\circ}$  C.

#### ТЕРМОМЕТРЫ ДАВЛЕНИЯ II ТИПА

В термометрах этого типа для движения стрелки, регистрирующей температуру, используется изменение давления насыщенных паров в зависимости от температуры.

Устройство термометра этого типа изображено на рис. 4. Резервуар термометра частично заполняют летучей жидкостью, имеющей низкую температуру кипения. Остальная часть системы — капиллярная трубка и трубка Бурдона — заполнена парами этой жидкости. Давление паров внутри всей системы определяется температурой жидкости и ее насыщенного пара, находящихся в резервуаре.

У термометров типа Фуриье капилляр и трубка Бурдона заполнены жидкостью, назначение которой — передавать давление насыщенных паров в резервуаре в манометрическую часть прибора.

Количество жидкости, заливаемой в резервуар, рассчитывается таким образом, чтобы свободная поверхность жидкости всегда находилась внутри резервуара, когда он подвергается действию температур в пределах шкалы термометра.

Если поместить в резервуар большее количество летучей жидкости, чем нужно, то при нагревании термометра расширение жидкости будет так велико, что в резервуаре не останется свободного объема для испарения, жидкость войдет в капилляр, и

показания прибора будут соответствовать давлению расширившейся жидкости.

При малом количестве жидкости в резервуаре она может вся обратиться в пар при повышении температуры, тогда в резервуаре будет находиться перегретый пар вместо насыщенного

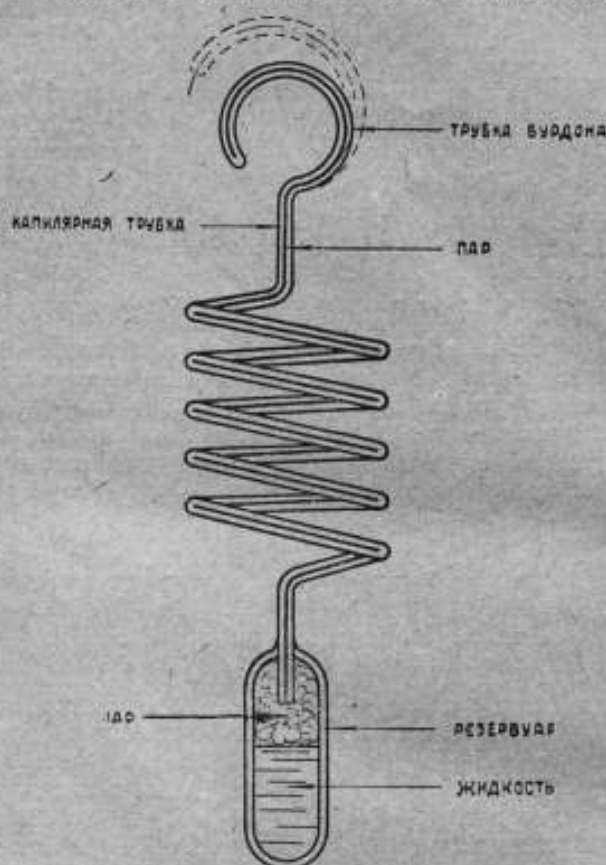


Рис. 4

пара. В первом случае мы будем иметь преувеличенные, во втором — уменьшенные показания прибора.

Термометры последнего типа широко распространены у нас в воздухоплавании, где их применяют для определения температуры воды в радиаторе и температуры смазочного масла в моторе.<sup>1</sup>

В аэротермометрах резервуар заполнен на  $\frac{1}{3}$  своего объема хлористым метилом, имеющим температуру кипения  $-24,09^\circ$  или

<sup>1</sup> Подробно устройство их описано в брошюре, изданной Научным комитетом УВВС РККА в 1926 г.: „Аэротермометр Фурнье“.

хлористым этилом, температура кипения которого  $+13,1^\circ$  при нормальном давлении. В качестве передающей давление жидкости применяется смесь глицерина со спиртом. Эта смесь удовлетворяет двум требованиям: а) она достаточно вязка и не вытекает из капилляра в резервуар; б) давление ее насыщенных паров ничтожно по сравнению с давлением насыщенных паров жидкости, находящейся в резервуаре.

Давление насыщенных паров возрастает неравномерно при возрастании температуры, поэтому и деления в различных частях шкалы термометров II типа не равны между собой.

Предельной температурой, которую можно измерять термометрами этого класса, является критическая температура жидкости, находящейся в резервуаре. Соответствующее давление является предельным давлением для данного прибора. Даже незначительное нагревание выше критической температуры вызывает резкое повышение давления и грозит разрушением прибора.

При тщательном изготовлении прибора воздух должен быть выкачан из корпуса и последний герметически заделан, чтобы устроить ошибку, происходящую вследствие изменения внешнего давления на манометрическую трубку.

Положим, что прибор сообщается с внешним воздухом и градуирован при каком-нибудь давлении  $p$ , тогда при увеличении внешнего давления, ставшего равным  $p + \Delta p$ , трубка Бурдона разогнется меньше, и стрелка укажет меньшую температуру при одинаковой температуре резервуара.

Зная формулу зависимости давления насыщенных паров от температуры для данной жидкости, можно подсчитать ошибку от изменения внешнего давления внутри корпуса прибора. Наиболее распространенной формулой является формула Вiot

$$\lg p = a + b \frac{1}{T} + c \beta^t.$$

В вышеупомянутой брошюре<sup>1</sup> даны величины ошибок для термометров, наполненных хлористым метилом и хлористым этилом, вследствие колебаний внешнего давления от 710 мм до 810 мм. Ошибки достигают  $\pm 1,5^\circ$  для первых термометров и  $\pm 3^\circ$  для вторых, что составляет соответственно около 1,5% и около 3% от верхнего предела шкалы.

Когда корпус прибора заделан герметически, давление внутри его остается то же, какое было в момент заделки прибора, если температура среды, окружающей корпус, не меняется. Ошибку в показаниях, происходящую вследствие изменения температуры корпуса, можно вычислить, пользуясь формулой:

$$\frac{p_1}{p} = \frac{T_1}{T},$$

<sup>1</sup> „Аэротермометры Фурнье“, стр. 26.

где  $p$  и  $p_1$  — давление,  
 $T$  и  $T_1$  — абсолютная температура.

Принимая  $p$  равным 760 мм, получим

$$p_1 = 760 \frac{T_1}{T}.$$

Подставляя вместо  $T_1$  значение максимальной и минимальной температур, при которых может находиться корпус прибора, можно вычислить предел колебания давления внутри корпуса в зависимости от температуры.

Длина капилляра термометров этого типа может достигать 60 м, так как колебания температуры среды, окружающей капилляр, не отражаются на показаниях прибора.

У термометров Фуриье открытый конец капилляра, входящий в резервуар, делается такой длины, чтобы отверстие капилляра всегда было покрыто жидкостью при любых положениях резервуара.

Запаздывание показаний термометров давления насыщенных паров меньше, чем для термометров I и III типов, так как их резервуары быстрее принимают температуру среды.

Приводим таблицу жидкостей, применяемых для наполнения термометров II типа, с указанием их температуры кипения при нормальном давлении, критической температуры, критического давления и соответствующих пределов шкалы.

Жидкость	Температура кипения в °С	Критическая температура в °С	Критическое давление в атм.	Пределы шкалы в °С
Этиловый спирт . . . . .	76,26	243,33	62,90	от 93 до 205
Бензол . . . . .	80,00	287,78	47,94	93 . 260
Вода . . . . .	100,00	374,00	217,40	121 . 315
Толуол . . . . .	110,28	320,55	41,75	121 . 260
Анилин . . . . .	183,89	426,11	51,95	205 . 371
Двуокись серы . . . . .	-10,00	155,00	78,88	7 . 121
Этиловый эфир . . . . .	35,00	197,22	36,04	38 . 149
Метиловый эфир . . . . .	-33,89	111,67	56,98	-29 . 93
Хлористый метил . . . . .	-24,09	153,20	65,82	20 . 120
Хлористый этил . . . . .	13,16	187,20	51,72	20 . 150

#### ТЕРМОМЕТРЫ III ТИПА

Движение стрелки, указывающей температуру, у термометров этого типа происходит под влиянием изменения давления газа, заполняющего всю систему прибора. Шкала этих термометров имеет равные деления на всем протяжении.



Обычно для наполнения термометров применяют азот, который дает возможность измерять температуру в пределах от  $-50^{\circ}$  до  $540^{\circ}$ .

Так как изменения температуры капилляра заметно отражаются на показаниях приборов этого типа, то объем резервуара должен быть достаточно большим по сравнению с объемом капилляра для уменьшения ошибки в измерениях.

#### ПОВЕРКА ТЕРМОМЕТРОВ ДАВЛЕНИЯ

При испытании термометров давления необходимо помнить, что перегревание прибора ведет за собой если не поломку, то порчу его манометрической части.

Условия испытания термометров давления должны соответствовать тем условиям, при которых производилась градуировка прибора, так как точность их показаний в значительной степени зависит от способа установки.

##### *1. Глубина погружения*

У термометров I и III типов показания прибора варьируют в связи с изменением температуры капилляра и корпуса прибора, если отношение объема резервуара к объему капилляра недостаточно велико. Стрелка некоторых термометров I типа реагирует на подогревание в одной точке даже на пламени горячей спички.

Для выяснения величины ошибки показаний прибора в зависимости от колебаний температуры капилляра в Термометрической лаборатории были произведены опыты с ртутно-пружинным термометром фирмы Cambridge Company. Длина резервуара термометра равнялась 20 см, а диаметр (наружный) 1,8 см. Пределы шкалы: от  $0^{\circ}$  до  $100^{\circ}$  C, с наименьшим подразделением в  $2^{\circ}$ . Длина капилляра равна 150 см, наружный диаметр его 0,3 см.

Подогревание капилляра на спиртовой лампе в одной точке не вызывало движения стрелки термометра, что указывает на правильное соотношение между объемами резервуара и капилляра.

При первом опыте в термостат были погружены резервуар термометра и только 5 см длины капилляра. Термометр был подвергнут нагреванию до  $80^{\circ}$  и определены поправки к его показаниям путем сравнения с образцовым термометром в точках  $20^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$  и  $80^{\circ}$ .

При повторном опыте, помимо резервуара, в термостат был погружен и капилляр термометра на 120 см.

Показания прибора возросли следующим образом:

в точке $20^{\circ}$	на $0,1^{\circ}$ C
• 40	• 0,5
• 60	• 1,0
• 80	• 0,9

Для термометров второго типа особенно важно, чтобы при проверке относительное расположение корпуса и резервуара было тоже, какое было при градуировке прибора и при котором он должен работать.

Это важно в целях устранения влияния гидравлического давления неуравновешенного столбика жидкости на показания прибора.<sup>1</sup>

## 2. Регулировка термометра давления

Прежде чем приступать к проверке прибора, необходимо его отрегулировать, т. е., погрузив резервуар и надлежащую часть капилляра в термостат, температура которого соответствует средней точке шкалы термометра, установить стрелку прибора на этой точке.

Приспособления для регулировки у разных термометров бывают различные, и способ регулировки обычно указывается в паспорте прибора. При постоянной работе прибора регулировку его приходится повторять периодически, так как вследствие упругого гистерезиса манометрическая трубка постепенно теряет свою жесткость и разгибается.

Если прибор правильно отрегулирован в одной температурной точке, шкала устанавливается с прежней точностью по всей длине, так как сдвиг ее, вследствие усталости манометрической трубки, равномерен во всех точках и температурные интервалы остаются неизменными.

## 3. Запаздывание показаний

Запаздывание показаний термометров давления вызывается несколькими факторами. Во-первых, показания замедляются вследствие мертвого хода передаточного механизма. Влияние мертвого хода можно устранить путем легкого постукивания по корпусу прибора.

В лабораторной практике наблюдалось смещение стрелки на  $0,5^\circ$  после постукивания у термометров со шкалой от  $0^\circ$  до  $100^\circ$ .

Во-вторых, массивный резервуар термометров I и III типов требует значительного промежутка времени для того, чтобы принять температуру среды.

В-третьих, работа сил упругости, восстанавливающих форму манометрической трубки после деформации, не может быть совершена мгновенно.

Для выяснения ошибки, происходящей вследствие запаздываний показаний, в Термометрической лаборатории был произведен следующий опыт с вышеописанным ртутно-пружинным термометром.

<sup>1</sup> „Mechanical Engineering“ 50, 795 (1928).

Резервуар термометра был погружен на надлежащую глубину в водяной термостат, который подвергался быстрому нагреванию, с замедлением скорости нагревания в течение 7 мин. в точках  $40^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $80^{\circ}$  для производства отчетов. Процесс нагревания в термостате продолжался 2 часа 35 мин. После этого была определена точка  $100^{\circ}$  в парах кипящей воды. Затем резервуар термометра поместили опять в термостат при  $80^{\circ}$ . По окончании отчета в точке  $80^{\circ}$ , путем постепенного приливания холодной воды, при постоянном энергичном перемешивании, охладили термостат до  $20^{\circ}$  в течение 1 ч. 40 мин. Процесс охлаждения прерывали на 10 мин. в точках  $60^{\circ}$  и  $40^{\circ}$  для производства отчетов.

Результаты опыта представлены на рис. 7, где сплошной линией *AB* изображено нагревание, а пунктирной линией *BC* — охлаждение термометра. По оси абсцисс откладывалась температура, а по оси ординат — поправки к показаниям термометра.

Для определения промежутка времени, необходимого для того, чтобы резервуар принял температуру окружающей среды, были произведены опыты с ртутно-пружинным термометром (описание дано выше) при снятой оправе. Термометр нагревали в термостате последовательно до  $40^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$  и  $80^{\circ}$  и потом подвергали охлаждению в спокойном воздухе при комнатной температуре. Оказалось, что при охлаждении после нагревания до  $40^{\circ}$  константа отставания равна 8,7 мин., после  $60^{\circ}$  — 12,5 мин., после  $80^{\circ}$  — 19,6 мин.

Константа отставания для термометра давления насыщенных паров фирмы Foxboro, резервуар которого имел длину в 10,3 см и наружный диаметр 0,96 см, при охлаждении в спокойном воздухе после нагревания до  $90^{\circ}$  оказалась равной 5,2 мин. Аэротермометр типа Фурнье, с резервуаром длиной в 8,2 см, наружный диаметр которого равен 1 см, после нагревания до  $100^{\circ}$  охладился в спокойном воздухе до комнатной температуры в течение 15 мин.

#### 4. Влияние оправы

Резервуары термометров давления бывают заключены в массивную оправу для предохранения от механических повреждений и коррозии.

Обладая большой теплоемкостью, оправка сама по себе значительно замедляет показания прибора. Запоздыванию способствует также воздушная прослойка между стенками оправы и резервуара.

Один из видов такой оправы изображен на рис. 5; на рис. 6 изображен один из типичных резервуаров ртутно-пружинного термометра.

Проверка термометров, как общее правило, производится при снятой оправе.

Насколько замедляет показания прибора наличие оправы, можно видеть на рис. 7, где кривая *DE* изображает нагревание того же ртутно-пружинного термометра, о котором было упомянуто, только на этот раз резервуар прибора заключен в оправу.

Нагревание производилось тем же темпом, как в предыдущем опыте, изображенном на рис. 7 линией *AB*.

Для уменьшения запаздывания показаний, вызванного оправой, иногда рекомендуют заполнять оправу смазочным или цилиндрическим маслом, в тех случаях, когда измеряемая температура ниже температуры парообразования масла.

А. Крапс,<sup>1</sup> подробно изучивший вопрос о влиянии наполнения оправы на показания термометра, в своих опытах получил неблагоприятные результаты, которые он объясняет сильными конвекционными токами, образовавшимися в масле при нагревании.

Результаты проделанного в термометрической лаборатории опыта нагревания термометра, резервуар которого заключен в оправу, наполненную маслом, изображены на рис. 7 в виде кривой *GH*, из которой видно, что ошибки термометра стали значительно меньше.

Насколько запаздывают показания прибора вследствие влияния оправы, видно из следующего примера:

Резервуар термометра, заключенный в оправу, был выдержан при температуре 40° в течение 40 мин. Первоначальный отсчет, взятый сразу после погружения резервуара, зафиксировал ошибку в 1,6°; по прошествии 40 мин. эта ошибка уменьшилась только на 0,8°.

При снятой оправе термометр давал в этой температурной точке точные показания. Термометры, у которых резервуар непосредственно соединяется с трубкой Бурдона, имеют еще более массивные оправы.

Отвод тепла у таких термометров значительно больше, чем у термометров с капиллярными трубками, вследствие близкого расположения корпуса прибора к среде, температуру которой измеряют.

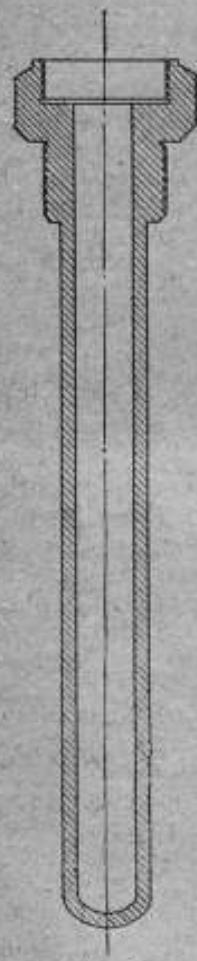


Рис. 5

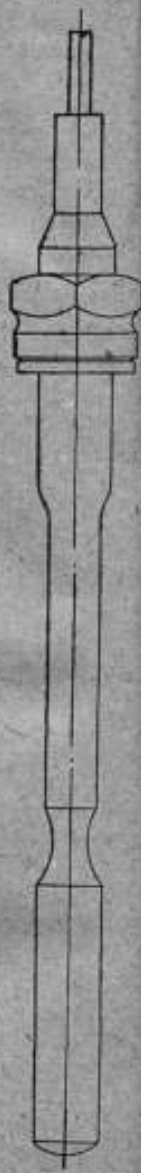


Рис. 6

<sup>1</sup> „Arch. f. Wärmew.“ 1929. Heft 9, S. 301.



При проверке ртутно-пружинного термометра такого типа со шкалой от  $100^{\circ}$  до  $540^{\circ}$  было обнаружено, что даже после выдерживания резервуара в течение 50 мин. в печи при  $300^{\circ}\text{C}$  показа-

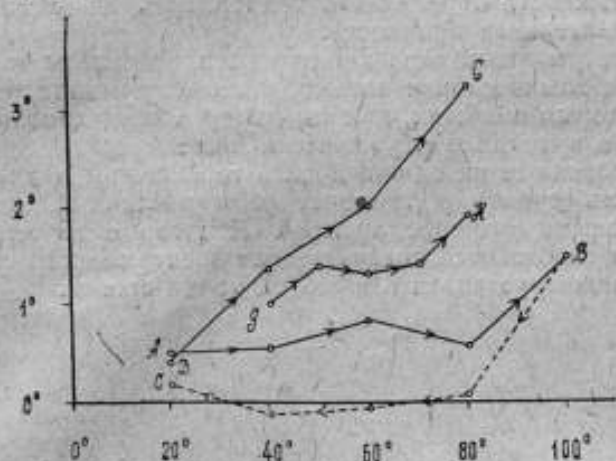


Рис. 7

ния термометра продолжали повышаться, тогда как температура печи оставалась постоянной.

Проверка производилась, как обычно, при снятой оправе.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из всего вышесказанного можно заключить, что термометры давления непригодны для измерения быстро меняющихся температур. Зато при надлежащей установке и хорошей изоляции капилляра ими можно точно измерять мало изменяющуюся температуру.

Точность измерений при помощи правильно сконструированного и правильно смонтированного термометра, согласно табличным данным, приведенным в вышеупомянутой статье,<sup>1</sup> находится в пределах от  $1^{\circ}$  до  $5^{\circ}$ , что является вполне достаточным для технических измерений. Полученные в лабораторной практике поправки к показаниям термометров с пределами шкалы от  $0^{\circ}$  до  $100^{\circ}$  не превышали  $2^{\circ}$ .

Самые большие ошибки получают вследствие неправильной смонтировки термометров давления, особенно при измерении температуры в паропроводах или газопроводах. Способы смонтировки термометров для правильного измерения температур в технике описаны Кноблаухом и Генке<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Мес. Eng.\* 50, 795 (1928).

<sup>2</sup> „Точные измерения температур в технике“, 1931.

Термометры давления имеют перед ртутно-стеклянными следующие преимущества:

1. Простота отчетов.
2. Возможность определения температуры на расстоянии.
3. Сравнительная прочность.

Термометры этого типа широко распространены за границей в пищевой, химической и автомобильной промышленности.

В некоторых областях, как например в воздухоплавании, они совершенно вытеснили ртутно-стеклянные.

Монтированные на одной доске, термометры давления дают возможность судить о температуре в различных помещениях фабрично-заводского предприятия. Некоторые из термометров этого типа снабжаются специальным электрическим сигналами, которые можно установить в любой точке шкалы.

LES THERMOMÈTRES A PRESSION, LEUR CONSTRUCTION ET  
LEUR VÉRIFICATION

par A. W. Tarkhova

(Résumé)

L'auteur de cet article ne prétend pas donner une analyse complète des thermomètres à pression. Son but n'est que d'éclaircir quelques moments essentiels de la construction, de la vérification et de l'emploi de ces thermomètres.

Les thermomètres à pression peuvent être divisés en trois types:

I. Les thermomètres à liquide; II. les thermomètres à tension de vapeur saturée, c'est-à-dire les thermomètres remplis d'un liquide et de sa vapeur saturée, et III. les thermomètres à gaz.

Les avantages et les défauts de chacun de ces trois types sont considérés séparément.

L'auteur analyse les causes des erreurs des indications des thermomètres à pression et rapporte les résultats des essais, effectués au Laboratoire Thermométrique de l'Institut de Métrologie dans le but d'expliquer l'influence exercée sur la précision des indications de l'instrument par les facteurs suivants:

- a) la température du tube capillaire,
- b) le mouvement perdu du mécanisme dans la partie manométrique de l'instrument,
- c) la monture du réservoir.

## КАЛОРИМЕТР КОНСТРУКЦИИ ВИМС

С. В. Лилин и С. А. Коновалова

### КОНСТРУКЦИЯ КАЛОРИМЕТРА

Быстрое развитие измерительной техники и возрастающая точность современных измерений требуют повышения точности калориметрических определений и, в частности, испытания стандартной бензойной кислоты для калориметрических определений, отпускаемой Всесоюзным институтом метрологии и стандартизации. Автором настоящей статьи ранее были уже описаны некоторые усовершенствования в области измерения температуры и оборудования калориметрического отделения Химической лаборатории ВИМС. Повышение точности измерения температуры и улучшение условий производства калориметрических определений не могут, однако, в должной мере повысить точность этих определений при наличии других ошибок, обусловленных несовершенством других частей аппаратуры и в частности калориметра, в котором производится испытание. В цитированной выше работе автор отметил, что одна из ошибок при калориметрических определениях происходит при вычислении поправки на теплообмен калориметра, вследствие изменчивости константы теплообмена при изменении разности температур калориметра и внешней среды.

Возникновение в СССР, в числе новых областей промышленности, области приборостроения побудило автора заняться изучением различных систем калориметров, служащих для определения теплотворной способности топлива, и произвести исследование некоторых из них с целью выяснить главные условия рациональной конструкции этих приборов.

Это исследование,<sup>1</sup> произведенное автором совместно с С. А. Коноваловой над калориметрами Петерса, Парра, Бертело и над калориметром с кольцевой мешалкой, привело автора к следующим выводам:

<sup>1</sup> С. В. Лилин, Обзор работ в области термохимии, Сборник статей, Научно-исследовательские работы в области химии Всесоюзного института метрологии и стандартизации, Госхимтехиздхт, 1932 г.

<sup>2</sup> С. В. Лилин, Исследование некоторых систем калориметров для определения теплотворной способности топлива, Сборник статей, "Тепловые измерения" стр. 79, изд. ВИМС, № 135 (1933).



1. Численное значение константы теплообмена зависит от объема воздуха, заключенного между калориметрическим сосудом и оболочкой. Для уменьшения этой величины необходимо уменьшить это пространство и изолировать его от наружного воздуха при помощи крышки, плотно закрывающей оболочку.

2. Константа теплообмена не является постоянной величиной и зависит от разности температур калориметра и внешней среды. Для достижения большого постоянства этой величины необходимо уменьшить расстояние между калориметрическим сосудом и оболочкой.

3. Наиболее быстрое выравнивание температуры калориметра достигается при помощи пропеллерной и геликоидальной мешалок. Однако геликоидальная мешалка выделяет при работе значительно большее количество теплоты и не допускает устройства крышки, достаточно плотно закрывающей внутреннее пространство оболочки, в котором помещается калориметрический сосуд. Поэтому надо отдать предпочтение пропеллерной мешалке, работающей в камере (по типу калориметра Петерса).

Эти выводы были приняты автором во внимание при конструировании описанного ниже калориметра. При конструировании отдельных элементов были положены в основу следующие соображения.

#### *Калориметрический сосуд*

Остановившись на калориметрическом сосуде, устроенном по типу Петерса, т. е. снабженном камерой для пропеллерной мешалки, необходимо, однако, отметить, что оригинальная конструкция Петерса обладает следующими недостатками: а) калориметрический сосуд имеет недостаточную высоту, вследствие чего вентиля бомбы выступают над поверхностью воды, б) пространство между бомбой и стенками сосуда в месте, где помещается термометр, слишком узко, вследствие чего термометр касается бомбы или стенки калориметрического сосуда. Увеличение высоты и диаметра калориметрического сосуда связано с увеличением водяного эквивалента калориметра и с уменьшением подъема температуры главного периода при заданном тепловом эффекте. Последнее вызвало бы уменьшение относительной точности измерения температуры и понизило бы точность эксперимента. В виду нежелательности этого высота калориметра и пространство, предназначенное для помещения термометра, увеличены за счет придания калориметрическому сосуду эллиптического поперечного сечения. Большая ось эллипса рассчитана таким образом, чтобы термометр свободно помещался, не касаясь стенок сосуда и бомбы, а малая ось значительно уменьшена по сравнению с диаметром цилиндрического калориметра.

Для предотвращения испарения калориметрический сосуд снабжен крышкой, плавающей на поверхности воды, в которой

сделано три отверстия, предназначенных для помещения термометра, стержня мешалки и зажигательного провода. Отверстия эти снабжены воронками, в которые может быть налито масло для предотвращения испарения воды через отверстия.

#### *Оболочка калориметра*

Калориметр имеет водяную оболочку с крышкой, через которую циркулирует вода. Внутреннее пространство оболочки, в которое помещается калориметрический сосуд, имеет сечение концентрическое с последним. Зазор между калориметрическим сосудом и оболочкой составляет 15 мм. Внутренняя поверхность оболочки хорошо отполирована и вызолочена для уменьшения радиации. Емкость водяной оболочки равна 18 л и рассчитана таким образом, чтобы изменение температуры ее в течение опыта, вызываемое теплоотдачей калориметра, не оказывало влияния на точность определения теплообмена.

#### *Мешалка*

Как указано было выше, калориметр снабжен пропеллерной мешалкой, работающей в цилиндрической камере, диаметром в 60 мм. По W. White'y,<sup>1</sup> при скорости 500 оборотов в минуту наиболее благоприятные результаты получаются, когда диаметр пропеллера составляет 0,6 диаметра камеры, так как в этом случае при одинаковой эффективности перемешивания работа мешалки сопровождается наименьшим тепловым эффектом. Учитывая, однако, что эти результаты были получены White'ом с одним калориметром и вряд ли имеют обобщающее значение, при конструировании описываемого калориметра к нему было изготовлено три пропеллера различных диаметров, а именно в 50, 40 и 30 мм, с тем, чтобы окончательный выбор размера мог быть произведен после производства обстоятельного исследования калориметра.

#### *Описание калориметра (рис. 1)*

Калориметрический сосуд *A* из чистого листового серебра, тщательно отполированный и вызолоченный снаружи и внутри, имеет эллиптическое горизонтальное сечение. С одной стороны, в направлении большой оси эллипса, он имеет наполовину выступающую наружу цилиндрическую камеру *a*, в которой работает пропеллерная мешалка *D* с пропеллером *d*, приводимая во вращение посредством шкива *e*. Калориметрический сосуд снабжен тонкой серебряной крышкой *C* с тремя отверстиями для термометра, зажигательного провода и стержня мешалки. Крышка имеет закраины и держится на поверхности воды. Отверстия

<sup>1</sup> The modern calorimeter, стр. 68 и 71 (1928).

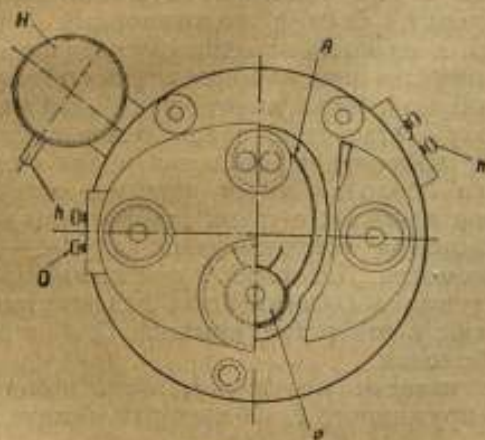
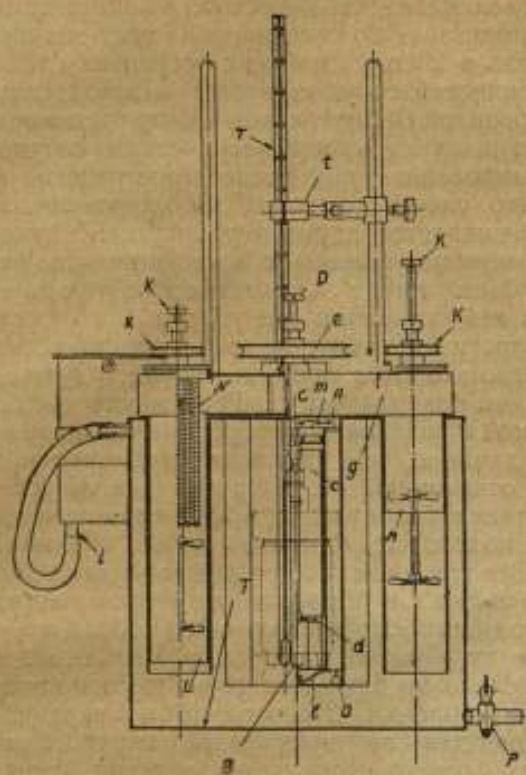


Рис. 1



снабжены воронками, предназначенными для наливания в них поверх воды слоя масла или керосина. Калориметрический сосуд поставлен на подставке *O*, состоящей из трех массивных медных конусов высотой в 20 мм, имеющих острия из слоновой кости.<sup>1</sup>

Калориметрический сосуд помещен в двухстенную латунную оболочку *F* с крышкой *G*. Внутреннее пространство оболочки имеет форму, концентричную с калориметрическим сосудом. Снаружи оболочка никелированная, внутреннее пространство ее отполировано и покрыто слоем позолоты. Оболочка заполнена водой, которая перемешивается двумя мешалками *K*, приводимыми во вращение при помощи шкивов *k* и несущими два ряда лопастей. Крышка оболочки имеет эллиптическую форму; на нижней поверхности к ней припаяны две трубы *L* и *M*, служащие для сообщения полости крышки с водяным пространством оболочки. Эти трубы плотно входят в такие же трубы, идущие внутрь оболочки от верхней поверхности ее. Герметичность достигается хорошей притиркой и смазкой этих труб и резиновыми прокладками. Одна из труб длиннее, чем другая, и служит осью для крышки оболочки при открывании ее. В трубах *L* и *M* установлены мешалки *K*, укрепленные на крышке; в трубе помещен нагреватель *N*, служащий для подогрева воды в оболочке; концы его выведены к клеммам *o*. Все три мешалки приводятся в движение одним ремнем, причем мешалки *L* и *M* работают в разном направлении: одна из них гонит воду из оболочки в крышку, вторая же, через другую трубу, гонит воду обратно в оболочку. Кольцевое пространство оболочки разделено на две части двумя перегородками, не достигающими до дна оболочки. Для того чтобы в верхней части кольцевого пространства не получилось мертвого пространства, в обеих трубах сделано несколько отверстий, площадь которых составляет около половины диаметра трубы. Для наполнения крышки водой и для удаления из нее воды, перед тем как открыть оболочку, служит водонапорный бачек *H* с двумя штуцерами *h* и *i*, из которых один служит для прохода воздуха а другой соединяется при помощи резиновой трубки с крышкой оболочки. Внизу оболочка имеет кран *P*, служащий для спуска воды, а наверху — отверстие, закрываемое винтовой пробкой и служащее для наполнения оболочки и для помещения термометра. Крышка оболочки имеет сквозное отверстие, закрываемое збонитовой пробкой, с двумя отверстиями для термометров: одно для термометра сопротивления, другое — для ртутно-стеклянного термометра. Для работы с крышкой на калориметрическом сосуде мешалка *D* легко освобождается, спускается вниз и ее просовывают в отверстие крышки *C*, а затем в подшипник на крышке оболочки.

Зажигание навески производится при помощи двух контактов: нижнего пружинного *I*, на который нажимает калориметри-

<sup>1</sup> Dickinson—, Bull. Bur. Stand., 11, 213 (1914); Scient. Paper Bur. Stand., № 230.



ческий сосуд при установке его на место, и верхнего  $m$ , выведенного через внутреннюю стенку оболочки и имеющего вид шнура с вилкой на конце, которая зажимается винтом среднего контакта бомбы. Провода от обоих контактов выведены в медных трубках к клеммам  $n$  на наружной поверхности оболочки.

Подготовка калориметра к сожжению несколько сложнее, чем обычно. Однако, в виду специального характера его, это не имеет большого значения. К тому же обращение с ним очень быстро входит в привычку.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЛОРИМЕТРА

Предназначение калориметра для производства прецизионных определений, к числу которых относится испытание эталонной бензойной кислоты, требовало всестороннего изучения и исследования, которые и были произведены авторами настоящей статьи.

Это исследование было произведено по методу, примененному авторами раньше, при изучении калориметров других систем,<sup>1</sup> и состояло: а) в определении величины константы теплообмена и зависимости ее численного значения от разности температур калориметра и внешней среды, б) в выяснении влияния испарения при применении крышки у калориметра и без нее, а также значения масла в отверстиях крышки, и с) в определении скорости выравнивания температуры калориметра и теплоты, выделяемой мешалкой при применении пропеллеров трех различных размеров.

Методика определения константы теплообмена вкратце состояла в следующем: калориметр, наполненный водой определенной температуры, помещали в оболочку, имевшую одинаковую температуру с комнатой. Поверх воды в калориметре наливали слой масла, с целью избежать испарения воды, пускали мешалку, давали температуре выравняться в течение 15 мин. и наблюдали затем изменение температуры калориметра за 10 мин. при данной разности температур калориметра и внешней среды. Из найденной величины определяли изменение температуры в 1 мин., обусловливаемое теплообменом калориметра и теплотой, выделенной мешалкой, т. е. величину  $k(\tau - \theta) + q$ , где  $k$  — константа теплообмена,  $\tau$  — температура калориметра,  $\theta$  — температура внешней среды и  $q$  — повышение температуры, вызванное теплотой, выделяемой при работе мешалки, которое было определено из отдельных опытов. Отняв эту величину (или прибавив ее — при отрицательных значениях  $k$ ) и разделив на  $(\tau - \theta)$ , получают значение константы теплообмена при данной разности температур.

Результаты этих наблюдений приведены в первых двух столбцах табл. 1 и изображены графическим путем на рис. 2. Все

<sup>1</sup> С. В. Липин, Исследование некоторых систем калориметров для определения теплотворной способности топлива. Сборник статей „Тепловые измерения“, изд. ВИМС № 136 (1934 г.), стр. 79.

ТАБЛИЦА I

Под слоем масла		С крышкой и маслом в отверстиях		С крышкой, без масла в отверстиях		Без крышки		Под слоем масла при воздушной оболочке	
$\tau - \theta$	$k(\tau - \theta) + q$	$\tau - \theta$	$k(\tau - \theta) + q + \lambda$	$\tau - \theta$	$k(\tau - \theta) + q + \lambda'$	$\tau - \theta$	$k(\tau - \theta) + q + \lambda''$	$\tau - \theta$	$k(\tau - \theta) + q$
+9,77°	-0,0189°	+9,54°	-0,0189°	+9,25°	-0,0194°	+9,18°	-0,0264°	+8,14°	-0,0146°
8,65	0167	8,42	0177	8,32	0174	8,79	0250	7,37	0129
7,38	0135	7,43	0154	7,32	0154	7,82	0222	5,95	0108
6,38	0119	6,65	0134	6,44	0129	6,75	0191	5,19	0091
5,71	0109	5,48	0110	5,40	0115	5,60	0152	4,61	0088
4,90	0088	4,59	0079	4,63	0105	4,92	0134	4,04	0071
4,21	0074	3,97	0077	4,16	0085	4,06	0107	3,69	0065
3,02	0054	2,90	0057	3,09	0062	3,07	0077	2,77	0049
2,04	0030	2,28	0042	2,25	0042	2,27	0056	1,88	0031
1,10	0021	1,33	0025	1,31	0023	1,17	0028	1,17	0019
0,06	±0,0000	0,02	±0,0000	0,46	0009	0,13	0005	0,10	0001
-1,00	+0,0017	-0,82	+0,0013	-0,06	+0,0001	-0,14	+0,0002	-0,01	±0,0000
1,95	0035	1,69	0030	0,27	0006	0,68	0013	0,91	+0,0014
2,53	0044	2,71	0048	0,84	0017	1,64	0039	1,65	0028
3,61	0066	3,62	0066	1,33	0025	2,59	0045	2,26	0039
4,58	0084	4,71	0091	2,56	0047	3,93	0074	2,88	0049
5,76	0107	5,88	0108	3,97	0075	4,96	0097	2,96	0054
7,03	0136	7,05	0137	5,15	0110	5,47	0105	3,79	0066
7,93	0155	8,01	0153	6,00	0119	6,30	0125	5,39	0094
				7,06	0144			6,23	0109
				8,99	0162			7,65	0138

опыты были произведены с пропеллером мешалки, диаметром в 50 мм, при среднем числе оборотов около 200 в минуту. Повышение температуры калориметра, вызванное работой мешалки, при этих условиях составляло 0,0041° в минуту.

В табл. 2 приведены выравненные графическим путем значения  $k(\tau - \theta) + q$  и вычисленные из них величины константы теплообмена  $k$  для целых значений градуса.

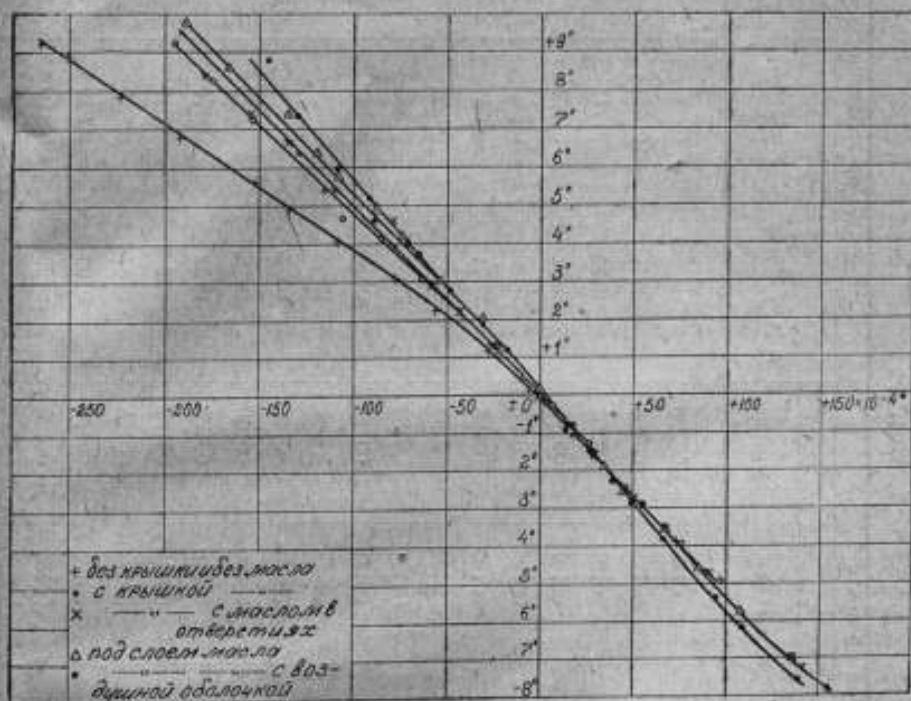


Рис. 2

В той же таблице приведены выравненные значения  $k$  для различных разностей температур. Зависимость величины константы теплообмена от разности температур калориметра и внешней среды изображена графически на рис. 3 в виде сплошной кривой.

Полученные результаты вполне подтвердили выводы, сделанные на основании упомянутого выше исследования калориметров других систем, а именно:

1) что численное значение константы теплообмена больше при  $\tau > \theta$ , т. е. когда температура калориметра выше температуры внешней среды, и

ТАБЛИЦА 2

$\tau - \theta$	При водяной оболочке				При воздушной оболочке			
	$k(\tau - \theta) + q$	$k(\tau - \theta)$	K		$k(\tau - \theta) + q$	$k(\tau - \theta)$	K	
			вычисл.	выравни.			вычисл.	выравни.
+9°	-0,0174°	-0,01781°	-0,00198°	-0,00198°	-	-	-	-
8	0154	01581	00198	00198	-0,0141°	-0,01451°	-0,00181°	-0,00180°
7	0131	01381	00197	00197	0123	01271	00182	00184
6	0114	01181	00197	00197	0106	01101	00184	00188
5	0094	00981	00196	00196	0089	00931	00185	00185
4	0074	00781	00195	00195	0071	00751	00188	00192
3	0054	00581	00194	00193	0054	00581	00194	00193
2	0034	00381	00194	00186	0034	00381	00191	00186
1	0013	00171	00171	00173	0013	00171	00171	00173
±0	+0,0004	-	-	-	+0,0004	-	-	-
-1	0018	+0,00139	+0,00139	+0,00140	0017	+0,00129	+0,00129	+0,00133
2	0036	00319	00160	00160	0036	00319	00160	00157
3	0055	00509	00170	00170	0052	00479	00160	00163
4	0074	00699	00175	00174	0069	00649	00162	00154
5	0091	00869	00174	00175	0087	00829	00166	00166
6	0109	01049	00175	00176	0103	00989	00165	00170
7	0130	01259	00180	00178	0123	01189	00170	00173



2) что численное значение константы теплообмена возрастает с увеличением разности температур калориметра и внешней среды.

В табл. 3 сопоставлены некоторые данные, относящиеся к исследуемому калориметру, с данными, полученными для калориметра Петерса, наиболее сходного с ним по своей конструкции. В этой таблице  $k_{cp}$  обозначает среднее значение константы теплообмена для разности температур от 1 до 7° С, а через  $\Delta k$  — среднее приращение численного значения этой константы при изменении разности температур  $\tau - \theta$  на 1° в том же интервале.

Из этих данных видно, что уменьшением объема воздуха во внутреннем пространстве оболочки, уменьшением зазора между калориметром и оболочкой, наличием золоченых полированных поверхностей калориметра и внутреннего пространства оболочки и пр. конструктивными особенностями:

1) достигнуто значительное уменьшение численной величины константы теплообмена, причем это уменьшение, по сравнению с калориметром Петерса, значительно при  $\tau < \theta$ . Это, по-видимому, следует объяснить тем, что при  $\tau > \theta$  восходящие теплые токи воздуха

встречают на своем пути крышку оболочки, охлаждаемую водою, что способствует повышению численного значения константы теплообмена, тогда как в калориметре Петерса крышка оболочки сделана из плохо проводящего тепло материала (дерево).

2) достигнуто большее постоянство константы теплообмена при  $\tau > \theta$  по сравнению с калориметром Петерса; при  $\tau < \theta$ , относительное изменение этой константы с увеличением разности температур калориметра и внешней среды осталось то же, что и для калориметра Петерса. Последнее объясняется тем обстоятельством, что вследствие образования в этом случае в обоих калориметрах защитного слоя холодного воздуха вокруг калориметра и неподвижного слоя теплого воздуха под крышкой оболочки, условия конвекции остаются в них одинаковыми.

Для выяснения значения крышки калориметра и масла, наливаемого в ее отверстия на поверхности воды, в смысле уменьшения испарения воды, были поставлены три серии аналогичных наблюдений, но без покрытия поверхности воды в калориметре слоем масла. В первой из этих серий наблюдений на поверхности находилась плавающая крышка, а в отверстиях, предназначенные для термометра, стержня мешалки и зажигательного провода, было

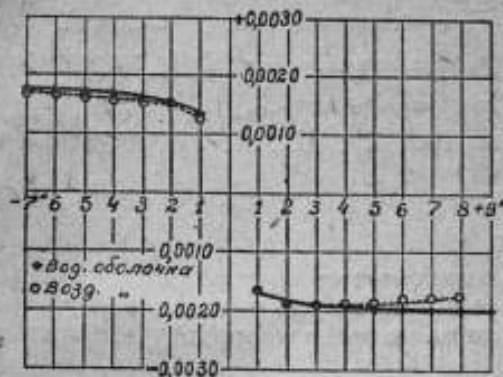


Рис. 3

ТАБЛИЦА 3

	Калориметр Петерса		Исследуемый калориметр	
	$\tau > 0$	$\tau < 0$	$\tau > 0$	$\tau < 0$
Объем калориметра . . . . .	3240 см <sup>3</sup>		3160 см <sup>3</sup>	
Водяной эквивалент . . . . .	2853 г		2880 г	
Поверхность калориметра .	1258 см <sup>2</sup>		1346 см <sup>2</sup>	
$k_{ср}$ град./мин. . . . .	-0,00218	+0,00210	-0,00191	+0,00168
$k_{ср}$ кал./мин . . . . .	-6,2	+6,1	-5,5	+4,8
$k_{ср}$ кал./дм <sup>2</sup> мин. . . . .	-0,49	+0,48	-0,41	+0,36
$\Delta k$ град. . . . .	0,000070	0,000075	0,000040	0,000063
$\frac{\Delta k}{k}$ . . . . .	0,032	0,036	0,021	0,037

налито масло; во второй, при наличии крышки, масло в отверстиях ее отсутствовало и, наконец, в третьей серии наблюдений поверхность воды в калориметре оставалась открытой. В остальном

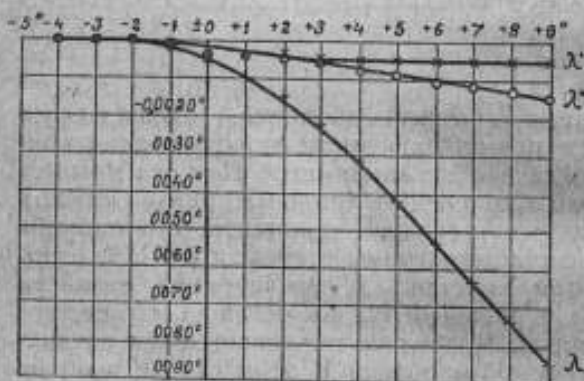


Рис. 4

метод наблюдений оставался описанный выше. Результаты этих наблюдений приведены в табл. 1 и изображены на рис. 2. Выравненные графическим путем результаты приведены в табл. 4. Во втором столбце этой таблицы для удобства приведены найденные раньше выравненные значения  $k(\tau - \theta) + q$ . Вычитая эту величину из полученных результатов, находим понижение температуры калориметра, вызванное испарением воды в калориметре. Кривые, выражающие это понижение температуры как функции разности температур калориметра и оболочки, изображены на рис. 4.

Полученные результаты показывают, что применение крышки резко уменьшает понижение температуры калориметра, вызванное испарением воды, и, что в этом случае его, с достаточным прибли-

жением, можно считать пропорциональным разности температур калориметра и внешней среды.

ТАБЛИЦА 4

$\tau - \theta$	$k(\tau - \theta) + q$	С крышкой и маслом в отверстиях		С крышкой без масла в отверстиях		Без крышки	
		$k(\tau - \theta) + q + \lambda'$	$\lambda'$	$k(\tau - \theta) + q + \lambda''$	$\lambda''$	$k(\tau - \theta) + q + \lambda$	$\lambda$
+9	-0,0174	-0,0179	-0,0005	-0,0189	-0,0015	-0,0258	-0,0084
8	0154	0159	0005	0167	0013	0228	0074
7	0134	0139	0005	0146	0012	0197	0063
6	0114	0119	0005	0125	0011	0167	0053
5	0094	0099	0005	0103	0009	0136	0042
4	0074	0079	0005	0081	0007	0105	0031
3	0054	0059	0005	0060	0006	0075	0021
2	0034	0038	0004	0039	0005	0047	0013
1	0013	0018	0005	0018	0005	0023	0010
$\pm 0$	-0,0004	$\pm 0,0000$	0004	$\pm 0,0000$	0004	0002	0006
-1	0018	+0,0018	$\pm 0,0000$	+0,0018	$\pm 0,0000$	+0,0017	0001
2	0036	0036	0000	0036	0000	0036	$\pm 0,0000$
3	0055	0055	0000	0055	0000	0055	0000
4	0074	0074	0000	0074	0000	0074	0000

Применение масла в отверстиях крышки еще уменьшает испарение, и в последнем случае испарение можно считать постоянным при всех значениях  $\tau - \theta > 0$ . При  $\tau = \theta$  испарение весьма незначительно как при применении крышки, так и без нее. При  $\tau - \theta = -1^\circ$  испарение не имеет места, а при  $\tau - \theta = -4^\circ$  кривые  $k(\tau - \theta) + q + \lambda$  пересекают кривую  $k(\tau - \theta) + q$  и по видимому начинается конденсация.

Необходимо отметить, что все наблюдения, связанные с испарением, были произведены в весьма близких условиях. Относительная влажность в помещении колебалась лишь в узких пределах и влияние этих колебаний не выходило за пределы точности наблюдений.

Для определения скорости выравнивания температуры калориметра служил применявшийся уже ранее метод,<sup>1</sup> состоявший в том, что при помощи электрического тока калориметру сообщали повышение температуры около  $0,1^\circ\text{C}$  и наблюдали время, необходимое для того, чтобы температура в двух точках калориметра выравнивалась в пределах  $\pm 0,005^\circ\text{C}$ . Однако, в отличие от произведенных ранее исследований калориметров других систем, в дан-

<sup>1</sup> С. В. Лигия — см. сноску на стр. 89.

ном случае нулевой спай термопары оставался все время в одной точке. Схема расположения спаев изображена на рис. 5.

Опыты были произведены с пропеллерами трех различных диаметров: 30 мм, 40 мм и 50 мм. Результаты наблюдений приведены в табл. 5. Время выравнивания температуры выражено в минутах и секундах.

Теплоту, выделяемую при работе мешалки, определяли, наблюдая повышение температуры калориметра, происходящее в течение 30 мин., под слоем масла на поверхности воды и при температуре калориметра, равной температуре внешней среды, т. е. при

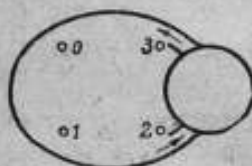
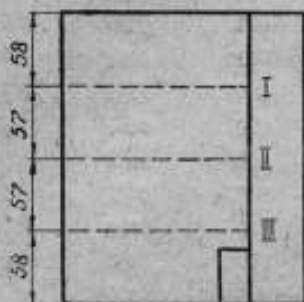


Рис. 5

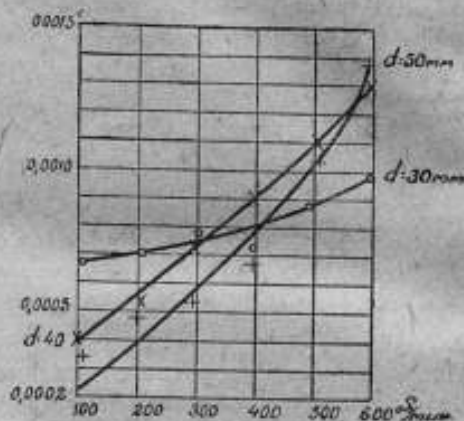


Рис. 6

отсутствии испарения, теплообмена и утечки тепла вследствие теплопроводности выступающих частей. Результаты наблюдений приведены в табл. 6 и на рис. 6.

Из этих результатов видно, что выравнивание температуры калориметра наступает быстрее всего при диаметре пропеллера, равном 50 мм, причем для скорости до 400 оборотов в минуту выделение теплоты меньше, чем при пропеллерах меньшего размера.

При скорости свыше 400 об./мин. количество выделенной теплоты больше, чем для пропеллера в 30 мм, а при 600 об./мин. оно превосходит уже количество теплоты, выделяемое пропеллером диаметром в 40 мм. Таким образом из трех исследованных пропеллеров надо отдать предпочтение пропеллеру наибольшего диаметра при скорости не более 400 об./мин., как выделяющему при наибольшей эффективности перемешивания количество теплоты, не превышающее количества ее, выделяемого пропелле-



ТАБЛИЦА 5

Положение спаев	$d = 30 \text{ мм}$				$d = 40 \text{ мм}$				$d = 50 \text{ мм}$			
	Число оборотов в мин.				Число оборотов в мин.				Число оборотов в мин.			
	100	200	400	600	100	200	400	600	100	200	400	600
1	2.50	2.09	1.31	3.01	1.46	1.49	0.58	0.41	2.15	0.44	0.24	0.25
2	6.50	1.53	4.12	3.27	3.55	2.10	0.55	0.28	1.37	1.03	0.40	0.37
3	6.38	3.04	1.41	1.47	—	2.12	1.08	0.34	1.55	1.08	0.25	0.23
4	3.23	1.32	2.66	1.23	—	2.03	1.17	1.03	1.38	1.19	0.46	0.30
5	2.31	2.31	2.06	2.41	—	1.49	0.46	0.36	2.36	0.48	0.46	0.34
6	2.01	1.41	2.07	2.42	—	1.44	1.12	0.36	1.30	1.22	0.22	—
7	1.08	2.08	1.36	2.30	—	1.45	1.02	0.41	0.52	0.59	0.38	0.19
8	2.16	2.18	1.39	1.44	—	1.34	0.48	0.44	2.36	0.45	0.24	0.44
9	2.26	1.25	1.53	1.37	—	2.05	1.06	0.28	1.49	1.04	0.58	0.50
10	2.56	2.02	2.15	2.01	—	2.13	0.49	0.40	1.00	1.13	0.27	0.22
11	6.30	5.03	3.29	1.13	—	1.49	0.38	0.51	—	—	—	—
12	5.20	4.54	3.06	1.18	—	2.12	1.52	1.50	1.30	1.56	1.00	0.45
Среднее	3.44	2.33	2.14	2.07	—	1.57	1.03	0.46	1.43	1.02	0.34	0.27

рами меньших размеров. Однако необходимо принять во внимание, что значительную роль играет и угол наклона лопастей пропеллера, не принятый во внимание как в настоящем исследовании, так и в работах других авторов.

Полученные результаты находятся в некотором противоречии с результатами, полученными White'ом,<sup>1</sup> который нашел, что для

ТАБЛИЦА 6.

Число оборо- тов в мин.	$d = 30 \text{ мм}$	$d = 40 \text{ мм}$	$d = 50 \text{ мм}$
100	0,00066	0,00039	0,00023
200	00070	00057	00041
300	00074	00073	00059
400	00080	00090	00078
500	00088	00108	00101
600	00097	00130	—

<sup>1</sup> The modern calorimeter, стр. 68 и 71.

500 об/мин. при одинаковой эффективности перемешивания наименьший тепловой эффект получается в том случае, когда диаметр пропеллера составляет 60% диаметра камеры. При диаметре камеры в 60 мм это соответствовало бы диаметру пропеллера в 36 мм.

Причиной этого противоречия, несомненно, служит то, что как эффективность перемешивания, так и теплота, выделяемая мешалкой, зависят не только от соответствия диаметров пропеллера и камеры, но и от других обстоятельств, как-то: от емкости калориметра, от соотношения размеров калориметра и камеры, от формы калориметра, от угла наклона лопастей пропеллера и пр.

В табл. 7 полученные результаты сопоставлены с результатами испытания калориметра Петерса.

ТАБЛИЦА 7

	Калориметр Петерса		Исследуемый калориметр	
	50 мм	60 мм	50 мм	60 мм
Диам. пропеллера . . . . .	50 мм	60 мм	50 мм	60 мм
"    камеры . . . . .	62	60	60	60
Число оборотов в минуту	400	600	400	600
Скорость выравнивания . .	0,47	0,36	0,34	0,27
Повышение температуры в мин. . . . .	0,00022°	0,00027°	0,00078°	0,00101°

Из этих данных видно, что эффективность перемешивания соответствующая в калориметре Петерса 600 об/мин., достигается в калориметре ВИС уже при 400 об/мин. Однако повышение температур при этом в три раза больше.

Упомянутые выше исследования различных систем калориметров привели авторов к выводу, что наименьшее численное значение константы теплообмена имеет калориметр Парра. Так как характерной чертой этого калориметра является плотно закрывающаяся бакелитовая воздушная оболочка, то представляло интерес выяснить, поскольку наблюдаемое уменьшение константы теплообмена может быть отнесено за счет замены водяной оболочки воздушной. Для этой цели было произведено определение константы теплообмена калориметра с кольцевой мешалкой (фирмы Ю. Петерс) при отсутствии воды в оболочке. Результаты этого определения показали, что при отсутствии воды в оболочке чи-

сленное значение константы теплообмена уменьшается, как это видно из следующих данных:

$$\begin{array}{l} k_{cp} \text{ при водяной оболочке} + 0,00171^{\circ} \quad - 0,00186^{\circ} \\ k_{cp} \text{ при воздушной оболочке} + 0,00117^{\circ} \quad - 0,00146^{\circ} \end{array}$$

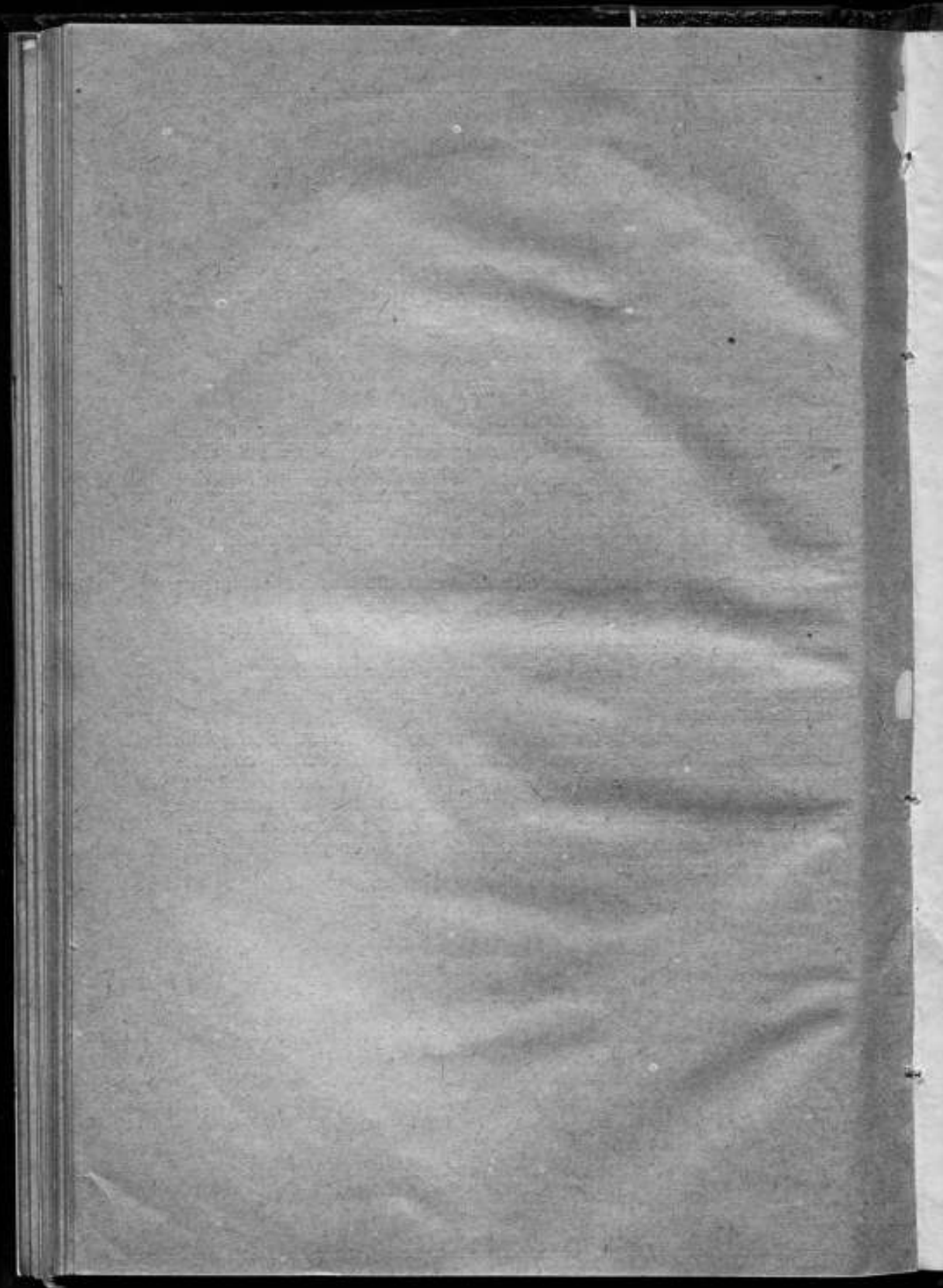
В виду этого при производстве исследования калориметра конструкции ВИМС представляло значительный интерес выяснить, какое численное значение будет иметь константа теплообмена при воздушной оболочке по сравнению с оболочкой, в которой вода циркулирует. Для этой цели была произведена серия определений константы теплообмена калориметра при различной разности температур в отсутствии воды в оболочке. Результаты этих определений приведены в таблицах 1 и 2 и изображены на рис. 2 и 3. На рис. 3 зависимость численного значения константы теплообмена от разности температур калориметра и оболочки изображена в виде пунктирной кривой.

Из этих данных видно, что при перемешивании воды в оболочке константа теплообмена имеет практически то же численное значение, как и при воздушной оболочке.

Резюмируя результаты произведенного исследования, можно сделать следующие выводы:

- 1) в калориметре конструкции ВИМС достигнуто уменьшение численного значения константы теплообмена, а также большее постоянство этого значения в том случае, когда температура калориметра выше температуры внешней среды;
- 2) применение крышки, плавающей на поверхности воды в калориметре, значительно уменьшает испарение, причем его можно считать пропорциональным разности температур калориметра и внешней среды;
- 3) применение масла в отверстиях крышки оказывает лишь незначительное влияние на уменьшение испарения;
- 4) скорость выравнивания температуры калориметра значительно больше, чем в калориметре Петерса с мешалкой того же типа;
- 5) теплота, выделяемая при работе мешалки, значительно больше, чем в калориметре Петерса, при одинаковой эффективности перемешивания;
- 6) применение оболочки с циркулирующей в ней водой уменьшает численное значение константы до величины ее, получаемой при воздушной оболочке.

Для устранения влияния недостатка, отмеченного в п. 5, необходимо, если это окажется возможным, уменьшить теплоту, выделяемую мешалкой, путем измерения угла наклона лопастей пропеллера и их формы.



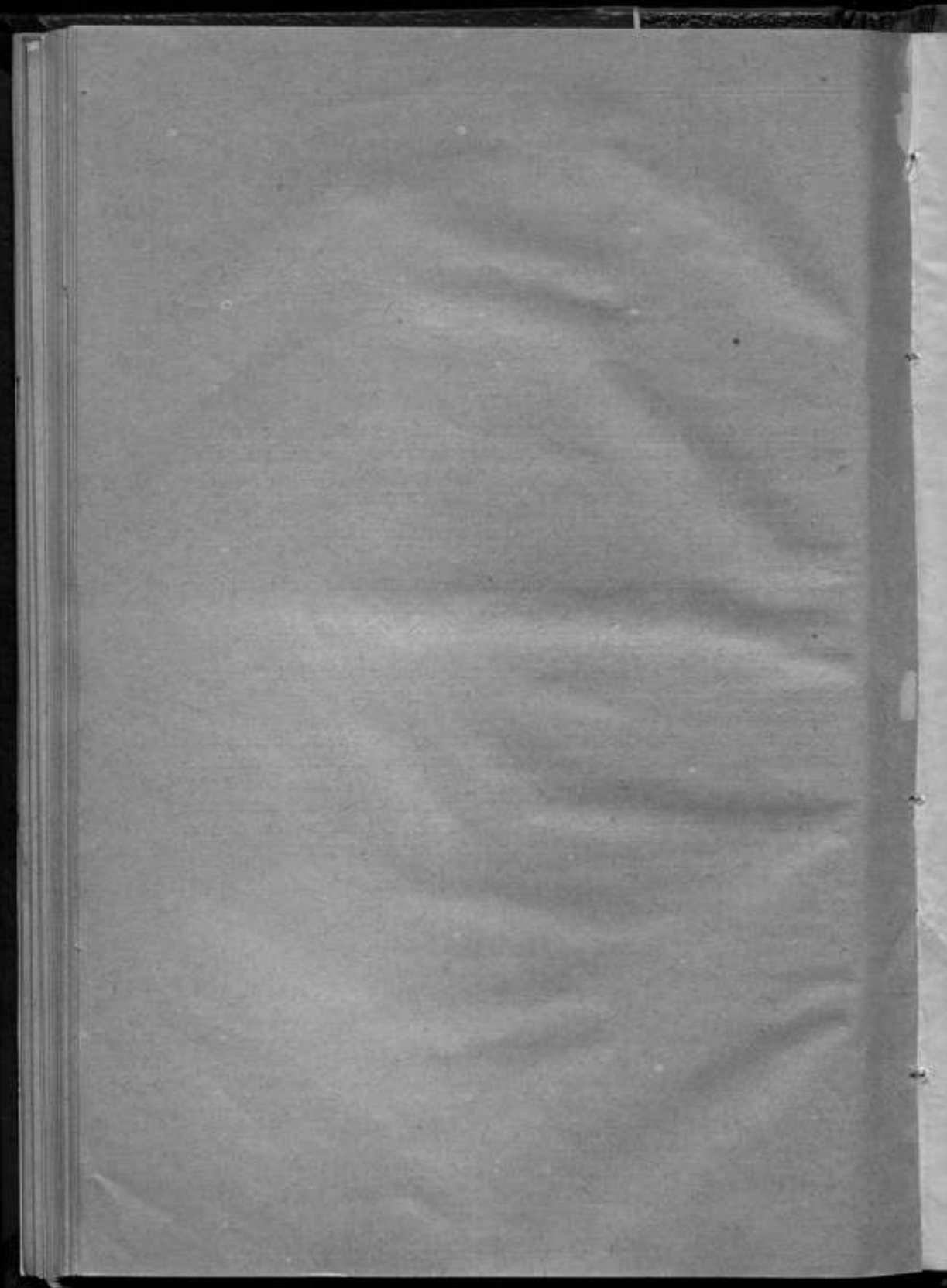


## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
В. А. Яковлева — Температурная шкала в теории и на практике и воспроизведение международной шкалы температур в интервале $0^{\circ}$ — $660^{\circ}$ при помощи эталонного платинового термометра сопротивления . . . . .	9
Г. М. Кондратьев — Отставание термометров и измерение нестационарных температур . . . . .	37
В. А. Яковлева — Отставание ртутно-стеклянных термометров . . . . .	58
А. В. Тархова — Термометры давления, их устройство и поверка . . . . .	69
С. В. Липин и С. А. Коновалова — Калориметр конструкции ВИМС . . . . .	84

## TABLE DES MATIÈRES

V. A. Iakovleva — L'échelle thermométrique au point de vue de la théorie et de la pratique et la reproduction de l'échelle internationale de température dans l'intervalle de $0^{\circ}$ — $660$ au moyen du thermomètre-étalon à résistance de platine . . . . .	9
G. Kondratiev — Sur le retard des thermomètres et la mesure des températures variables . . . . .	37
V. H. Iakovleva — Sur le retard des thermomètres à mercure . . . . .	58
A. V. Tarkhova — Les thermomètres à pression, leur construction et leur vérification . . . . .	69
S. W. Lipine et S. A. Konovalova — Un nouveau calorimètre, construit par l'Institut de Métrologie de l'URSS . . . . .	84



## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
В. А. Яковлева — Температурная шкала в теории и на практике и воспроизведение международной шкалы температур в интервале 0°—660° при помощи эталонного платинового термометра сопротивления . . . . .	9
Г. М. Кондратьев — Отставание термометров и измерение нестационарных температур . . . . .	37
В. А. Яковлева — Отставание ртутно-стеклянных термометров . . . . .	58
А. В. Тархова — Термометры давления, их устройство и поверка . . . . .	69
С. В. Липин и С. А. Коновалова — Калориметр конструкции ВИМС . . . . .	84

## TABLE DES MATIÈRES

V. A. Iakovléva — L'échelle thermométrique au point de vue de la théorie et de la pratique et la reproduction de l'échelle internationale de température dans l'intervalle de 0°—660 au moyen du thermomètre-étalon à résistance de platine . . . . .	9
G. Kondratiev — Sur le retard des thermomètres et la mesure des températures variables . . . . .	37
V. H. Iakovléva — Sur le retard des thermomètres à mercure . . . . .	58
A. V. Tarkhova — Les thermomètres à pression, leur construction et leur vérification . . . . .	69
S. W. Lipine et S. A. Konovalova — Un nouveau calorimètre, construit par l'Institut de Métrologie de l'URSS . . . . .	84

737-5



