

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ АДИАБАТИЗАЦИЕЙ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Я. А. Крафтмахер, П. Г. Стрелков

(Москва)

Для автоматического управления адиабатизирующей оболочкой низкотемпературного калориметра [1] применена схема, представляющая сочетание чувствительных фотокомпенсационных гальванометров с простыми ламповыми усилителями мощности, питающими нагреватели адиабатизирующих элементов. Чувствительность схемы при сопротивлении нагревателей порядка 100  $\Omega$  составляет 30  $\text{мВ/мкВ}$ . Использование автоматического регулирования позволяет обойтись без специального ассистента при калориметрических измерениях и повышает точность получаемых результатов.

Применяемая методика адиабатической калориметрии достаточно совершенна для получения надежных результатов [1-4]. Недостатком ее, затрудняющим измерения и ограничивающим их точность, является то, что операции, приводящие к адиабатизации условий измерения, производятся вручную; при измерениях приходится непрерывно наблюдать за показаниями трех [1] или четырех [2] гальванометров и регулировать токи нагрева элементов адиабатизирующего устройства.

Автоматическое управление адиабатизирующим устройством калориметра позволяет облегчить измерения теплостойкости и повысить их точность. Процесс адиабатизации калориметрического опыта отличается некоторыми особенностями, сохраняющимися и при автоматическом управлении. Адиабатизирующее устройство состоит из трех элементов (если исследуемое вещество во всем температурном интервале не переходит в газовую фазу): из двух ширм, окружающих калориметр, и барабана, на который наматываются все провода, ведущие к калориметру, и выводы дифференциальных термопар. Каждый элемент адиабатизирующего устройства соединен с калориметром дифференциальной термопарой медь-константан-медь. Температура каждого элемента регулируется путем изменения тока в его нагревателе в зависимости от величины и знака термо-эдс термопары, измеряемой чувствительным гальванометром с точностью  $10^{-7}$   $\epsilon$ .

В интервале температур от 12 до 300° К теплостойкость элементов адиабатизирующего устройства меняется в десятки раз. Соответственно меняется тепловая инерция этих элементов, а необходимая для их нагрева мощность в зависимости от условий опыта изменяется весьма значительно.

Калориметрический опыт протекает следующим образом. Вначале температура калориметра устанавливается и поддерживается постоянной, так что дрейф в результате остаточных потерь, не поддающихся компенсации, не превышает  $10^{-4}$  град./мин. Адиабатизирующее устройство работает при этом в режиме постоянной температуры. Затем следует нагрев калориметра, который ведут со скоростью нескольких десятых градуса в минуту. При этом температура элементов адиабатизирующего устройства должна строго следовать за температурой стенки калориметра. Наконец, по окончании нагрева и выравнивания температуры в калориметре адиабатизирующее устройство возвращается к режиму поддержания постоянной температуры, а температура калориметра испытывает лишь незначительный дрейф, как и до нагрева.

Создание системы автоматического управления адиабатизацией калориметрических измерений затрудняется необходимостью сочетания режимов поддержания постоянной температуры и следящего нагрева с большой точностью при сильно изменяющихся тепловой инерции элементов адиабатизирующего устройства и мощности их нагрева.

За последнее время описано несколько устройств для автоматической адиабатизации калориметрических установок [5-10]. В некоторых из них используются фотоэлектрические реле, управляемые дифференциальными термопарами и осуществляющие включение и выключение токов нагрева элементов адиабатизирующего устройства при достижении определенной разности температур между калориметром и этими элементами [5,6]. Такое релейное регулирование элементов адиабатизирующего устройства представляется недостаточно эффективным по указанным выше причинам. Известны также устройства с пропорциональным регулированием [7] и с сочетанием релейного и пропорционального регулирования [8-10]. Для этой цели использовались обычно простые фотоэлектрические реле [6,9] или схемы с прерыванием постоянного тока и дальнейшим усилением на переменном токе [7,8,10].

Для автоматического управления элементами адиабатизирующего устройства низкотемпературного калориметра [1] мы применили схему, представляющую сочетание чувствительных фотокомпенсационных гальванометров с ламповыми усилителями мощности, питающими нагреватели адиабатизирующих элементов. На фиг. 1 представлена блок-схема автоматического регулятора, осуществленного по этому принципу. Калориметр 1 окружен адиабатизирующими ширмами 2 и 2а, которые, так же как и барабан 2б, на который наматываются провода, ведущие к калориметру, соединены с калориметром дифференциальными термопарами. Выводы от этих термопар подключены к фотокомпенсационным гальванометрам 3, 3а и 3б соответственно. Величина и

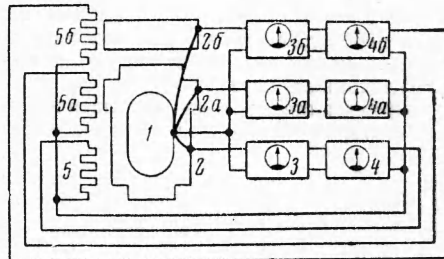
знак термо-эдс могут отсчитываться по стрелочным приборам с нулем посередине шкалы. Двухламповые усилители постоянного тока 4, 4а и 4б с мощными выходными каскадами обеспечивают необходимый ток для питания нагревателей 5, 5а и 5б элементов адиабатизирующего устройства. Токи в нагревателях измеряются миллиамперметрами. При возникновении разностей температур между калориметром и элементами адиабатизирующего устройства происходят соответствующие изменения токов нагревателей, приводящие к восстановлению адиабатных условий.

Полная схема автоматического регулятора для одного из элементов адиабатизирующего устройства приведена на фиг. 2. Между калориметром 1 и адиабатизирующей ширмой 2 включена дифференциальная термопара, выводы которой замыкаются через зеркальный гальванометр 3 и сопротивление  $R_1$ . Луч света от осветителя 4 падает на зеркальце гальванометра, отражается от него и попадает на светочувствительные поверхности фотосопротивлений 5 и 6. Эти фотосопротивления вместе с сопротивлениями  $R_2 - R_8$  образуют схему фотокомпенсационного гальванометра. При наличии входной эдс происходит поворот рамки гальванометра 3 и изменяется распределение светового потока между фотосопротивлениями 5 и 6. Вследствие этого изменяется потенциал точки А, а в цепи между точками А и В протекает электрический ток. Создаваемое этим током падение напряжения на сопротивлении  $R_1$  компенсирует входную эдс, величина и знак которой отсчитываются по микроамперметру со шкалой 100—0—100 мкА, включенному между точками А и В последовательно с сопротивлением  $R_3$ . Шкала этого микроамперметра соответствует входным эдс 1—0—1 мкВ. Таким образом, величина эдс термопары может отсчитываться весьма точно. В качестве зеркальных гальванометров использовались приборы типа ГПЗ-2. Они были оборудованы упорами, ограничивающими угол поворота рамки таким образом, чтобы отраженный от зеркальца луч не выходил за пределы светочувствительной поверхности фотосопротивлений 5 и 6 типа ФС-К1. Потенциометр  $R_7$  и сопротивление  $R_8$  служат для введения в цепь компенсации дополнительного напряжения с изменяемой полярностью, которое используется для установки нуля гальванометра и компенсации паразитных термо-эдс при измерениях.

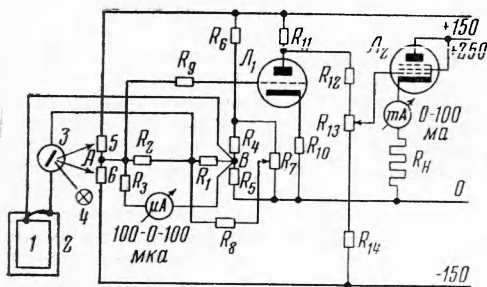
Изменения потенциала точки А при работе фотокомпенсационного гальванометра через сопротивление  $R_9$  передаются на управляющую сетку радиолампы  $L_1$  типа 6Н2П (используется только один триод), являющейся усилителем напряжения. Изменения падения напряжения на сопротивлении нагрузки этой лампы в анодной цепи  $R_{11}$  через сопротивления  $R_{12}$  и  $R_{14}$  и потенциометр  $R_{13}$  передаются на управляющую сетку радиолампы  $L_2$  типа 6П18П, являющейся усилителем мощности. В катодную цепь этой лампы включены последовательно миллиамперметр и нагреватель элемента адиабатизирующего устройства  $R_H$ .

Сочетание фотокомпенсационного гальванометра с усилителем мощности, питающим нагреватель элемента адиабатизирующего устройства, позволяет получить пропорциональное регулирование режима этого элемента. При равенстве температур калориметра и адиабатизирующего элемента по нагревателю  $R_H$  протекает некоторый ток. Величина его, различная для разных температурных областей, устанавливается потенциометром  $R_{13}$ . Благодаря высокой чувствительности автоматического регулятора эта установка может быть грубой и не представляет трудностей. По этой же причине при пропорциональном регулировании допускаются лишь незначительные отклонения температуры адиабатизирующих элементов от температуры калориметра во время измерений. При сопротивлениях нагревателей порядка 100 Ом чувствительность системы автоматического регулирования составляет 30 мВ/мкВ.

На фиг. 2 приведена схема автоматического регулятора только одного адиабатизирующего элемента. Автоматические регуляторы для других элементов выполнены по такой же схеме. При этом сопротивления  $R_4$ ,  $R_5$  и  $R_6$  являются общими для всех схем. Дифференциальные термопары, включенные между калориметром и элементами



Фиг. 1



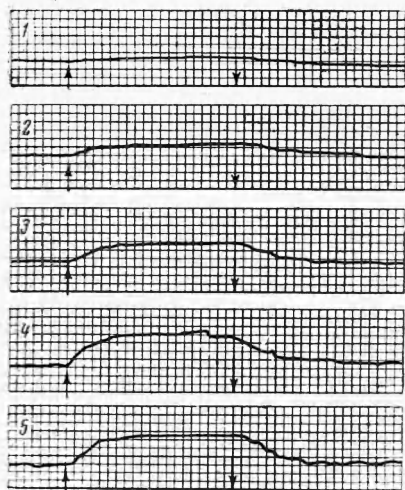
Фиг. 2

адиабатизирующего устройства, имеют общую точку на калориметре, вывод от которой подключается к точке *B*. Все схемы автоматических регуляторов питаются от общего выпрямителя, причем напряжения  $+150$  и  $-150$  в стабилизированы при помощи стабилитронов типа СГ1П.

Данные деталей схемы следующие:  $R_1 = 0.25$  ом,  $R_2 = 1.5$  Мом,  $R_3 = 33$  ком,  $R_4 = R_5 = 56$  ом,  $R_6 = 51$  к.ом,  $R_7 = 2.2$  ком,  $R_8 = 10$  ком,  $R_9 = 51$  ком,  $R_{10} = 5.1$  ком,  $R_{11} = 110$  ком,  $R_{12} = 0.82$  Мом,  $R_{13} = 0.68$  Мом,  $R_{14} = 1.5$  Мом.

В случае низкоомных нагревателей адиабатизирующих элементов может возникнуть необходимость в токе, большем допустимого для лампы типа 6П18П. В таких случаях целесообразно применять дополнительное питание нагревателей током от аккумуляторных батарей.

Испытания системы автоматического управления адиабатизирующим устройством калориметра показали, что адиабатные условия осуществляются достаточно надежно в течение всего калориметрического опыта.



Фиг. 3

Дрейф температуры калориметра после выравнивания температуры всегда меньше  $10^{-4}$  град./мин.

На фиг. 3 представлены примеры записи необходимой для работы автомата величины разности температур между калориметром и элементом адиабатизирующего устройства при различных скоростях нагрева калориметра. Кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют скоростям нагрева калориметра 0.06, 0.15, 0.25, 0.4 и 0.6 град./мин. при температуре  $90^\circ$  К. Одно деление масштабной сетки составляет 0.2 мкв. Стрелки указывают моменты включения и выключения нагрева. При обычно используемых скоростях нагрева (0.1—0.2 град./мин.) отклонения от нулевой разности температур незначительны. Однако при достигнутой чувствительности фотокомпенсационных гальванометров они могут наблюдаться. Поэтому после включения нагрева калориметра экспериментатор для уменьшения разности температур между калориметром и адиабатизирующим элементом изменяет установку потенциометра  $R_{13}$ . Высокая чувствительность автоматического регулятора позволяет проводить это изменение установки

потенциометра  $R_{13}$  весьма приближенно. С такой методикой работы эдс термопар, включенных между калориметром и элементами адиабатизирующего устройства, в течение всего калориметрического опыта не превышает  $\sim 10^{-7}$  в, причем период нагрева на записи термо-эдс не выделяется.

Автоматическое изменение установки потенциометра  $R_{13}$  во время нагрева калориметра нетрудно осуществить с помощью сервомотора. Но вследствие значительного изменения тепловой инерции адиабатизирующих элементов в интервале температур 12— $300^\circ$  К необходимо принять специальные меры для совмещения достаточно высокой скорости срабатывания и отсутствия «рыскания» сервомотора.

Система автоматического управления адиабатизирующим устройством калориметра испытывалась на калориметрических установках А. И. Лазаревым и В. В. Ногтевой, которым авторы выражают благодарность за содействие.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков П. Г., Ицкевич Е. С., Кострюков В. Н., Мирская Г. Г., Самойлов Б. Н. Измерение теплоемкости твердых тел и жидкостей между 12 и  $300^\circ$  К. ЖФХ, 1954, т. 28, № 3.
2. Кострюков В. Н., Алиханянц Р. А., Самойлов Б. Н., Стрелков П. Г. Методика измерения теплоемкости конденсированных газов. ЖФХ, 1954, т. 28, № 4.
3. Склианки А. А., Стрелков П. Г. О воспроизводимости и точности современных численных значений энтропии и энтальпии конденсированных фаз при стандартной температуре. ПМТФ, 1960, № 2.
4. Cinnings D. C., Furukawa G. T. Heat capacity standarts for the range 14 to  $1200^\circ$  К. J. Amer. Chem. Soc., 1953. vol. 75, № 3.
5. Черняев И. И., Палкин В. А., Баранова Р. А. Калориметр для определения истинной теплоемкости комплексных соединений платиновых металлов ЖНХ, 1958, т. 3, № 7.
6. Zabetakis M. G., Craig R. S., Sterrett K. F. Automatic adiabatic calorimeter shield control. Rev. Scient. Instrum., 1957, vol. 28, № 7.

7. Dauphinee T. M., Woods S. B. Low-level thermocouple amplifier and a temperature regulation system. Rev. Scient. Instrum., 1955, vol. 26, № 7.
8. West E. D., Ginnings D. C. Automatic temperature regulation and recording in precision adiabatic calorimetry. Rev. Scient. Instrum., 1957, vol. 28, № 12.
9. Барский Ю. П. Разработка метода количественной термографии. Дисс. Всесоюзный н.-и. ин-т строительной керамики, М., 1958.
10. Cooper W. J., Forsyth R. H., Masi J. E., Pabst R. E. Low-temperature adiabatic calorimeter with automatic shield control. Rev. Scient. Instrum., 1959, vol. 30, № 7.

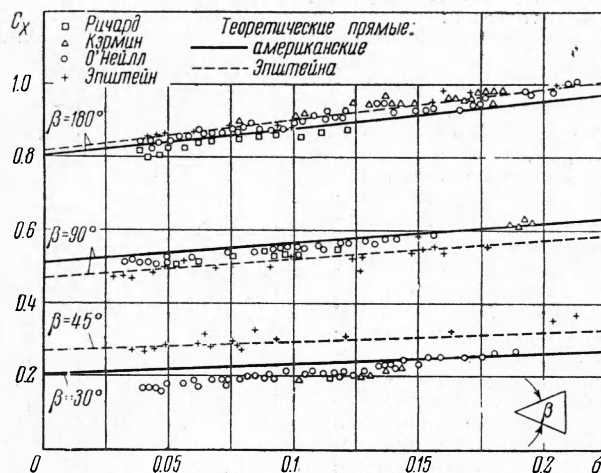
### ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ ОКОЛО ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ В КАРУСЕЛЬНОМ ГИДРОКАНАЛЕ

**А. А. Коваль**, **Б. Г. Новиков**

(Новосибирск)

Кавитационные явления очень сложны; большинство задач в этой области пока не поддается теоретическому исследованию. Точные решения получены только для нескольких простейших случаев плоского движения с каверной. В пространственном случае получено лишь приближенное решение для задачи обтекания диска.

Поэтому экспериментальные исследования остаются пока основными средствами изучения кавитационных явлений. Для исследования кавитации большие возможности представляет описанный в работе [1] карусельный гидроканал, в котором число Фруда зависит только от положения модели и ее размеров, число Рейнольдса изменяется в достаточно широких пределах, а число кавитации изменяется в основном за счет поддува воздуха в каверну.



Фиг. 1

Перед авторами стояла задача оценить влияние криволинейности и завихренности потока на основные характеристики кавитационного обтекания и значительно расширить диапазон изменения чисел кавитации.

Для этой цели определялась зависимость коэффициента сопротивления  $C_x$  от числа кавитации  $\sigma$ . Полученные результаты сравнивались с подобными зависимостями, полученными в прямолинейном потоке Л. А. Эпштейном и американскими исследователями Ричардом (Reichardt), О'Нейлом (O'Neill) и Кермином (Kermeim) [2]. Это авторы получили зависимость коэффициента сопротивления от числа кавитации для диска и конусов с различными углами раствора на различных экспериментальных установках различными методами: Эпштейн буксировал тела на тележке в прямолинейном канале. Ричард проводил исследования в трубе со свободными струями, Кер-