

Ядро разогревается в опыте тепловым потоком, который поступает к нему от стакана через исследуемое вещество. Для температурных измерений используются термопары, рабочие спаи которых установлены в точках *H* и *Я*, а “холодные” спаи термостатируются при комнатной температуре. Рабочий спай термопары *Я* обычно размещается внутри тонкостенной металлической иглы, которая своей хвостовой частью жестко и герметично крепится в дне стакана и одновременно служит опорой для стержня 2.

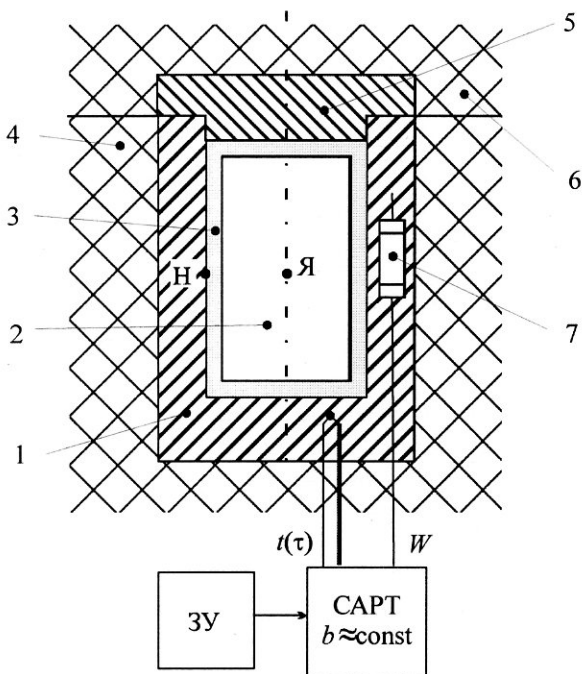


Рис. 17.3.3

Контактные тепловые сопротивления в рассматриваемой ячейке не играют роли. Конструкция ячеек для газов и жидкостей, как правило, существенно отличается от конструкции ячеек, ориентированных на исследования порошковых материалов. В частности, приходится учитывать, что в жидкостях и газах в зазоре может возникать конвекция. Чтобы ее устранить, приходится использовать очень тонкий зазор и ограничивать температурный перепад в нем.

Расчетная формула имеет вид

$$\lambda(t_0) = \frac{C_{\text{я}} h b_{\text{я}}}{F \mathcal{G}_{\text{ня}}} (1 + \Delta\sigma_c), \quad (17.3.7)$$

где F – общая площадь зазора в его среднем сечении; $\Delta\sigma_c$ – относительная поправка на теплоемкость образца, $\Delta\sigma_c = 0,5C/C_a$; $t_0(t)$ – температура отнесения, равная температуре среднего слоя в зазоре.

Более подробные сведения о динамических λ -калориметрах цилиндрического типа, предназначенных для исследования жидкостей и их паров, можно найти в работах Р.А. Мустафаева [3.19, 3.20] и О.Б. Цветкова [3.34].

17.4. Динамические c -калориметры

При изучении теплоемкости обычно стремятся создавать тепловые ячейки, обеспечивающие по возможности равномерное температурное поле в образце и сопрягаемых с ним деталях. Следовательно, c -калориметры не требуют таких жестких ограничений на температурный режим опыта, как λ - и a -калориметры. В частности, в режиме монотонного разогрева могут работать все широко известные дифференциальные и адиабатические c -калориметры непрерывного нагрева. Ограничимся описанием их простейших схем.

1. Адиабатический c -калориметр монотонного режима. Схема его ячейки показана на рис. 17.4.1. Основу ячейки образует металлический стакан 1 с крышкой 6 , покрытый снаружи теплозащитной оболочкой $2, 7$. Тонкостенная цилиндрическая металлическая кювета 3 , заполненная исследуемым веществом 4 , имеет на своей наружной боковой поверхности равномерно распределенную нагревательную спираль 5 и с помощью металлических игл-распорок размещается соосно в полости стакана 1 . Воздушный (а иногда и вакуумный) зазор, образующийся между кюветой и стаканом, обладает пренебрежимо малой теплоемкостью и достаточно хорошими теплоизоляционными свойствами. На поверхности стакана смонтирован нагреватель 8 , управляемый системой автоматического регулирования температуры (САРТ).

При необходимости внутри кюветы могут устанавливаться тонкие металлические радиальные лепестки, обеспечивающие дополнительное выравнивание температурного поля внутри исследуемого вещества. Иногда с этой целью кювету 3 выполняют в виде короткого цилиндра с высверленными сверху аксиальными глухими отверстиями для вещества.

В процессе опыта кювета и образец монотонно разогреваются с помощью нагревателя 5 , мощность W_k которого поддерживается по возможности постоянной. Регистрируется кривая изменения температуры кюветы $t_k(\tau)$, и по ней рассчитывается кривая изменения скорости разогрева кюветы $b_k(\tau)$. Система САРТ с помощью дифференциальной термопары

(или термостолбика) 9 управляет мощностью W_p нагревателя 8 и автоматически поддерживает равенство температур стакана и кюветы.

Расчет теплоемкости исследуемого вещества производится по формуле

$$c(t) = \frac{1}{M} \left(\frac{W_k}{b_k} - C_k \right), \quad (17.4.1)$$

где M – масса исследуемого вещества; $C_k(t)$ – теплоемкость кюветы.

Теплоемкость кюветы $C_k(t)$ целесообразно определять экспериментально, по результатам опыта с пустой кюветой, так как при этом учитывается эффективная теплоемкость кюветы с вмонтированным в нее нагревателем, термопарами и крепежными иглами. Градуировочный опыт исключает также систематическую ошибку, вносимую адиабатной системой САРТ.

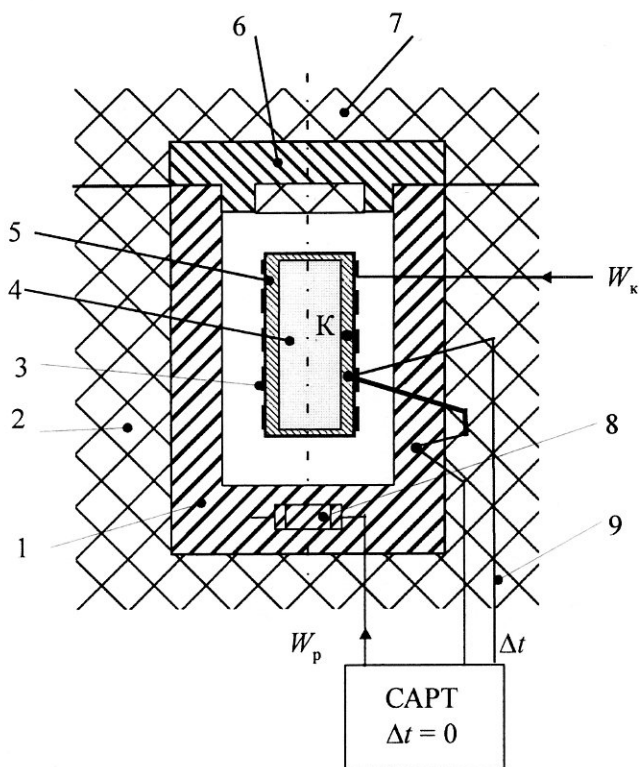


Рис. 17.4.1

Возможны различные варианты конструктивного оформления кюветы. В частности, для большего удобства кювету можно делать составной. С этой целью внутри стакана 1 устанавливается тонкостенный стаканчик с нагревателем и термопарами, а съемная кювета после заполнения исследуемым веществом и взвешивания вставляется в этот стаканчик по скользящей посадке. Если используется кювета сотовой конструкции, то ее можно насаживать на три гибкие металлические трубки, смонтированными в них термопарами и нагревателем.

По внешнему оформлению ячейка может совпадать с ячейками, изображенными на рис. 17.2.1 и 17.3.3. Ее конструкция во многом определяется диапазоном рабочих температур. Основные детали кюветы целесообразно изготавливать из меди. Рекомендуемые габаритные размеры кюветы: диаметр 10...20 мм, высота 30...40 мм. Нагреватель должен иметь хороший тепловой контакт с кюветой и по возможности размещаться внутри ее стенки в специальных аксиальных отверстиях малого диаметра. Иглы-трубки могут иметь диаметр ~1,5 мм и длину свободных участков не менее 20 мм. Это позволяет сохранить достаточно слабую тепловую связь кюветы со стаканом, что снижает требования к работе САРТ.

2. Дифференциальный с-калориметр монотонного режима. Калориметры такого типа часто называют сканирующими. Схема тепловой ячейки калориметра показана на рис. 17.4.2. Основу ячейки составляет массивный металлический блок 1 с двумя симметричными цилиндрическими полостями. В них концентрично, с зазором установлены одинаковые металлические кюветы 3, 8. Блок имеет плотно прилегающую крышку 5 и защищен от внешней среды теплоизоляционной оболочкой 2, 6. Одна из кювет заполняется эталонным веществом с удельной теплоемкостью $c_3(t)$, а во вторую кювету помещается исследуемое вещество с искомой удельной теплоемкостью $c(t)$. При необходимости внутри кювет радиально устанавливаются тонкие металлические лепестки, выравнивающие температурное поле в веществе.

Система САРТ с ЗУ, нагревателем 9 и термопарой 10 обеспечивает близкий к линейному разогрев ячейки. В опыте регистрируются температура блока $t_0(\tau)$ и отставание температур кювет от температуры блока $\vartheta_3(\tau)$, $\vartheta_n(\tau)$.

Расчет теплоемкости исследуемого образца массой M производится по формуле

$$c(t)M = (C_3 + C_K)\vartheta_n/\vartheta_3 - C_K. \quad (17.4.2)$$

Блок целесообразно изготавливать из меди. Оптимальными можно считать одинаковые значения диаметра и высоты блока, примерно рав-

ные 60 мм. Диаметры полостей ~ 15 мм. Диаметр и высоту кювет можно выбирать равными 10 мм и 30...40 мм, соответственно. Обе кюветы удобно вставлять в блок, надевая их на тонкие металлические трубки, установленные внутри полостей блока. В трубках монтируются рабочие концы дифференциальных термопар, регистрирующих отставание $\vartheta_3(\tau)$, $\vartheta_n(\tau)$ кювет относительно блока.

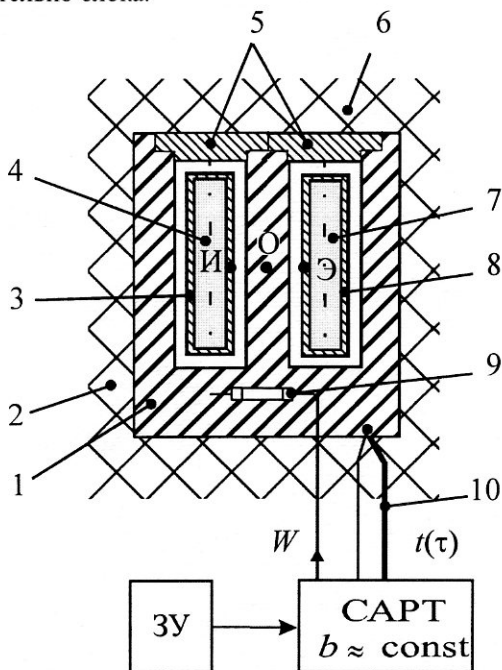


Рис. 17.4.2

Дифференциальные s -калориметры отличаются высокой чувствительностью, поэтому их особенно часто применяют при сличении исследуемого вещества с близким к нему веществом, чтобы иметь возможность выявлять температурные аномалии в структуре и составе сравниваемого вещества.

3. Динамический s -калориметр с градиентным тепломером. Схема ячейки калориметра показана на рис. 17.4.3. По своему конструктивному оформлению ячейка практически совпадает с ячейками λ -калориметров, изображенных на рис. 17.3.1 и 17.3.2. Основу калориметра составляют основание 1 и колпак 4, защищенные снаружи теплоизоляционной оболочкой 6, 11. В основание и колпак вмонтированы нагреватели 9, 7. В вер-

хнюю грань основания вмонтирован градиентный тепломер 2, к лицевой пластинке которого припаяна металлическая кювета 3 с крышкой и нагревателем 5. В полость кюветы вставляется по скользящей посадке вспомогательная съемная тонкостенная кювета с исследуемым веществом (на схеме не показана).

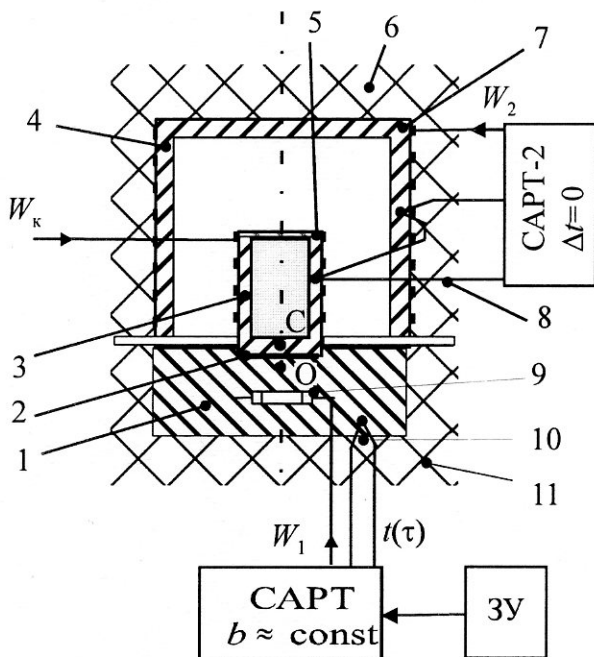


Рис. 17.4.3

Режим разогрева ячейки задается системой САРТ-1 с ЗУ, термопарой 10 и нагревателем 9. Система САРТ-2 с помощью дифференциальной термопары 8 и нагревателя 7 поддерживает равенство температур кюветы 3 и колпака 4.

Калориметр можно использовать в двух режимах работы.

В первом режиме кювета с исследуемым веществом разогревается только тем тепловым потоком, который проникает в них через тепломер. Нагреватель 5 остается отключенным. Для расчета теплоемкости используется формула

$$c(t)M = K_T(t) \frac{\mathcal{Q}_T(\tau)}{b_K(\tau)} - C_K(t), \quad (17.4.3)$$

где $K_T(t)$ – тепловая проводимость тепломера; $\vartheta_T(\tau)$ – сигнал тепломера; $C_K(t)$ – суммарная теплоемкость кюветы и верхней пластинки тепломера; $b_K(\tau)$ – скорость разогрева кюветы.

В другом варианте опыт проводится при включенном нагревателе 5, причем его мощность W_K подбирается так, чтобы показания тепломера оставались близкими к нулю. К достоинствам данного варианта опыта можно отнести то, что в нем слабее проявляются систематические погрешности тепломера. Для расчета теплоемкости пригодна формула

$$c(t)M = \frac{(W_T + K_n \vartheta_n)}{b_T} - C_K(t). \quad (17.4.4)$$

Градуировку ячейки во втором варианте работы можно производить с помощью нагревателя 5, не прибегая к эталонному образцу с известной теплоемкостью. Для этого достаточно поставить два опыта с пустой кюветой, один с отключенным, а второй с включенным нагревателем 5. Совместная обработка опытов позволяет определить тепловую проводимость тепломера и эффективную теплоемкость кюветы, как функции температуры.

Все требования к допустимой неизотермичности стенок кюветы и исследуемому веществу остаются такими же, как и в предыдущих c -калориметрах. Более подробные сведения о реализованных в разное время динамических c -калориметрах имеются в работах [3.1, 3.4–3.6, 3.13, 3.23, 3.26, 3.28–3.30, 3.31, 3.36].

17.5. Комплексные динамические калориметры

Калориметры рассматриваемой группы позволяют в одном опыте определять одновременно и независимо две теплофизические характеристики исследуемого материала. Ограничимся кратким анализом двух таких калориметров.

1. Динамический комплексный калориметр для теплоизоляторов и полупроводников. Схема ячейки калориметра показана на рис. 17.5.1. Ячейка рассчитана на образцы в виде коротких стержней диаметром ~ 20 мм, высотой 5...30 мм, которые разогреваются в опыте осевым тепловым потоком. Основу ячейки образует, как обычно, металлический блок, состоящий из основания 1 и колпака 3, с теплоизоляцией 2, 8. В основании имеются нагреватель 9 и градиентный тепломер 4 с металлической контактной пластинкой, на которую в опыте устанавливается своим нижним торцом образец 5. К верхнему торцу образца принудительно поджимается своей контактной пластинкой другой градиентный

тепломер b , идентичный по своим характеристикам нижнему тепломеру. В верхнюю пластинку тепломера b вмонтирован нагреватель 7. Рабочие спай термодпар H и B , регистрирующих перепад температуры в образце, вмонтированы в лицевые, контактные пластинки тепломеров.

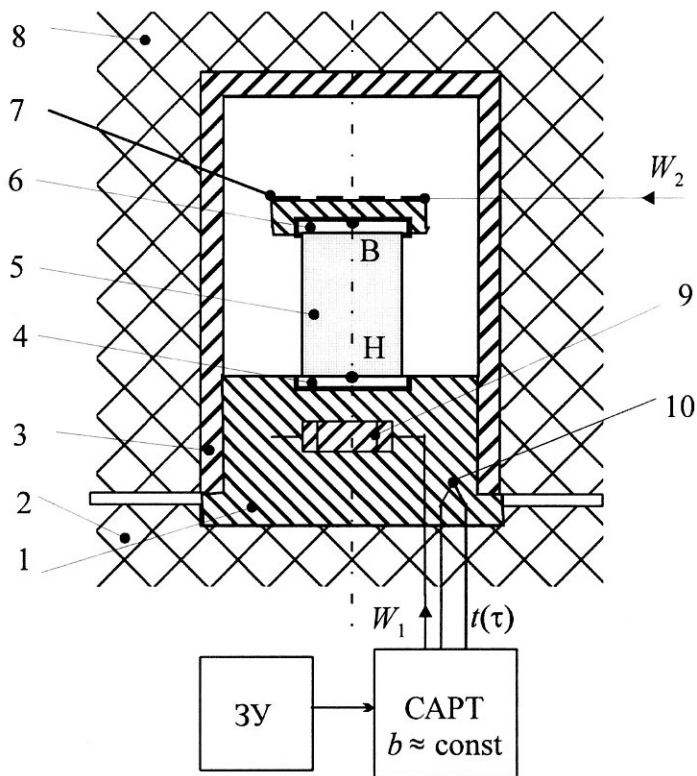


Рис. 17.5.1

Верхний тепломер имеет возможность вертикально перемещаться в полости колпака 3. Колпак имеет контакт с основанием по цилиндрической поверхности и надевается на него по скользящей посадке.

С целью упрощения структуры расчетных формул желательно использовать тепломеры с одинаковыми характеристиками. В частности, всегда имеется возможность использовать лицевые пластинки с одинаковыми теплоемкостями $C_T(t)$. При выбранных ограничениях регистрируемые тепломерами тепловые потоки $Q_n = K_n \vartheta_{тн}$ и $Q_b = K_b \vartheta_{тв}$ связаны с удельными тепловыми потоками q_n и q_b соотношениям

$$K_H \vartheta_{\text{ТН}} = q_H S + C_T b, \quad K_B \vartheta_{\text{ТВ}} = q_B S - C_T b, \quad (17.5.1)$$

где $\vartheta_{\text{ТН}}$ и $\vartheta_{\text{ТВ}}$ – сигналы термомеров (приняты положительными, если тепловой поток проникает через них снизу вверх); S – площадь поперечного сечения образца.

Расчетные формулы для теплопроводности и теплоемкости образца имеют вид

$$\lambda(t_0) = \frac{h}{2S} \frac{K_B \vartheta_{\text{ТВ}} + K_H \vartheta_{\text{ТН}}}{\vartheta_{\text{ВН}}}, \quad (17.5.2)$$

$$c(t_0) = \frac{1}{M} \left(\frac{K_H \vartheta_{\text{ТН}} - K_B \vartheta_{\text{ТВ}}}{b} - 2C_T \right), \quad (17.5.3)$$

где $\vartheta_{\text{ВН}}(\tau)$ – перепад температуры между лицевыми пластинками термомеров.

Толщину h образцов рекомендуется подбирать, ориентируясь на условие $P = h/\lambda > 100(2P_{\kappa})$, так как при этом отпадает необходимость вводить поправку на контактные тепловые сопротивления между образцом и термомерами. При необходимости поправку на контактные сопротивления можно учитывать, используя рекомендации, рассмотренные в п. 17.3.

Привлекателен режим опыта, в котором с помощью нагревателя 7, вмонтированного в верхний термомер, в его рабочем слое принудительно поддерживается нулевой перепад температуры $\vartheta_{\text{ТВ}} \cong 0$. При этом снимается требование идентичности.

Если опыты проводятся без привлечения системы автоматического регулирования, то с помощью нагревателя 7 можно вручную поддерживать температурный перепад в образце в пределах 5...20 К.

2. Динамический комплексный λ -калориметр для металлов. Схема тепловой ячейки калориметра показана на рис. 17.5.2. Ее основу составляет ячейка a -калориметра для металлов (см. рис. 17.2.3). Основными деталями ячейки являются основание 1 и колпак 2 металлического блока, а также адиабатическая оболочка 3 с нагревателем 4. Блок защищен от внешней среды теплоизоляцией 5, 10. В основании блока имеется нагреватель 8, питание которого управляется САРТ-1, ЗУ и термопарой 9. Работой адиабатической оболочки 3 управляют САРТ-2 и дифференциальная термопара, обеспечивающая равенство температур оболочки и верхнего торца образца. Отличительной особенностью ячейки является наличие в ней градиентного термомера 7, вмонтированного в лицевую поверхность основания 1. Образец 6, имеющий форму короткого стержня, находится в тепловом контакте с термомером и разогревается преимущественно тем

тепловым потоком, который проникает в него через рабочий слой тепломера. Рабочие спай термопар O и H , регистрирующих температурное поле образца, вставляются в радиальные отверстия образца.

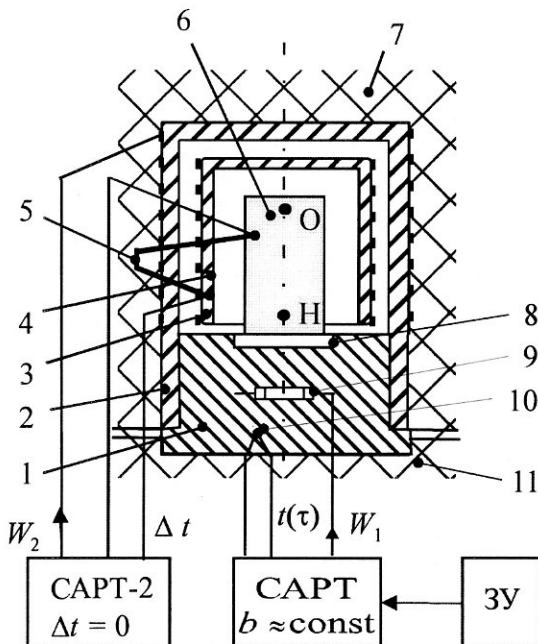


Рис. 17.5.2

Расчетные формулы для температуропроводности и теплоемкости образца имеют вид

$$a(t_0) = \frac{b_0(x_H^2 - x_0^2)}{2g_{HO}} (1 + \Delta\sigma_{aa}), \quad (17.5.4)$$

$$c(t_0) = \frac{1}{M} \left[\frac{K_T g_T}{b} (1 - \Delta\sigma_{ac}) - C_T \right], \quad (17.5.5)$$

где $\Delta\sigma_{aa}$, $\Delta\sigma_{ac}$ – относительные поправки на боковой теплообмен образца

$$\Delta\sigma_{aa} = \frac{x_H^2}{6R^2} \frac{\alpha_R R}{\lambda}, \quad \Delta\sigma_{ac} = \frac{2\pi R h \alpha_R}{3K_T} \left(\frac{g_{HO}}{g_T} \right). \quad (17.5.6)$$

Появление поправок на боковой теплообмен вызвано тем, что при исследовании металлов образец имеет большую неизотермическую боковую поверхность. Вследствие этого в комплексных калориметрах теплосъемность удается определять с погрешностью 3...5%.

Дополнительные сведения по теоретическому обоснованию динамических калориметров и области их применения можно найти в монографиях [3.26, 3.33] и имеющихся в них ссылках на оригинальные статьи. Наиболее значимые результаты более поздних исследований, относящихся к области низких и криогенных температур, можно найти в работах С.Е. Буравого, В.В. Курепина, Е.С. Платунова, В.А. Самолетова, В.М. Козина, Н.В. Нименского, И.В. Баранова, С.С. Прошкина [3.1, 3.4, 3.7, 3.10, 3.27, 3.28, 3.31, 3.32, 3.37].

17.6. Вспомогательные блоки динамических калориметров

Все рассмотренные выше динамические калориметры рассчитаны в основном на общий диапазон рабочих температур и предполагают измерения в режиме разогрева. Следовательно, для ускоренной подготовки ячейки к очередному опыту ее приходится принудительно охлаждать до исходной температуры. Если измерения проводятся при положительных температурах, для принудительного охлаждения ячейки с успехом может использоваться проточная вода или бытовой вентилятор. Но если измерения проводятся при низких температурах, то для их проведения уже нужны специальные системы охлаждения.

У всех унифицированных приборов, изготавливавшихся серийно, диапазон рабочих температур, с учетом технических потребностей, был выбран равным минус 100...+ 400°C, поэтому в каждом приборе имелась специальная система предварительного охлаждения ячейки до минус 150°C. Для этого через систему каналов ячейки прогонялся холодный азот, нагнетаемый под небольшим избыточным давлением из сосуда Дьюара.

Если жидкий азот отсутствует, то для работы в области низких температур можно воспользоваться любой морозильной или холодильной камерой с рабочим объемом более 5 литров. В этом случае тепловая ячейка перед опытом помещается в камеру и охлаждается в ней до стационарного теплового состояния. Во время опыта ячейка может оставаться внутри камеры.

Для разогрева тепловой ячейки калориметра с заданной, приблизительно постоянной скоростью $b(\tau)$ вполне пригодны нихромовые нагреватели с диаметром проволоки 0,2...0,8 мм. Расчет необходимой электри-

ческой мощности нагревателя может производиться по упрощенной методике, в предположении, что тепловая энергия расходуется на разогрев металлического ядра ячейки и на тепловые потери через теплозащитную оболочку ячейки в окружающую среду. Если известны суммарная теплоемкость ядра $C_{\text{я}}(t)$ и тепловое сопротивление оболочки $P_{\text{об}}(t)$, то ориентировочный режим изменения мощности $W(\tau)$ основного нагревателя можно рассчитать с помощью соотношения

$$W(\tau) = C_{\text{я}}(t) b(\tau) + [t(\tau) - t_c] / P_{\text{об}}(t), \quad (17.6.1)$$

где t_c – температура окружающей среды.

Управление мощностью нагревателя можно осуществлять периодическим включением – отключением его питания с периодом цикла не более 10 с. Электрический расчет нагревателя производится с привлечением сведений о предельно допустимой плотности тока через находящуюся в воздухе нихромовую спираль ($j_{\text{доп}} < 5 \text{ А/мм}^2$). Для электроизоляции удобно использовать одноканальные и двухканальные керамические трубочки. В маломощных нагревателях можно применять нихромовую проволоку, облицованную кварцевым чулком. Если ячейка рассчитана на работу в области умеренных и низких температур, то для нагревателей вполне пригодна проволока из покрытого эмалью константана.

При теплофизических измерениях практически всегда приходится иметь дело с регистрацией температуры в фиксированных точках ячейки, поэтому в качестве температурных датчиков повсеместно применяются только термопары со стандартными открытыми термоэлектродами диаметром не более 0,2 мм. В последнее время, правда, в некоторых калориметрах удалось использовать полупроводниковые микротермисторы и даже транзисторы. Однако область их применения ограничена узким температурным диапазоном. Термопары имеют чувствительность порядка 40 мкВ/К, поэтому к электроизмерительной аппаратуре теплофизических приборов приходится предъявлять довольно жесткие требования. Она, как правило, должна обеспечивать регистрацию электрических напряжений с пороговой чувствительностью порядка 1...2 мкВ. Именно это обстоятельство многие десятилетия мешало автоматизации теплофизических измерений, так как указанную чувствительность обеспечивали лишь гальванометры с зеркальными световыми шкалами. Применению высокочувствительных усилителей постоянного тока мешал высокий уровень фоновых шумов, достигающий десятков мкВ.

Однако в последние годы и в этой области электронной техники наметился серьезный прорыв. Успеху содействовало появление высокочувствительных многоразрядных аналого-цифровых преобразователей

(АЦП). Созданная на их базе измерительная техника позволила резко расширить возможности современных средств измерения теплофизических свойств. Появилась возможность всю получаемую в опыте первичную информацию собирать специализированными контроллерами и обрабатывать современными средствами вычислительной техники [3.1, 3.9, 3.31, 3.32]. При этом контроллер оказывается способным взять на себя все функции управления режимом опыта. Имеются все предпосылки для перевода теплофизических измерений на качественно новый уровень, более высокий по точности измерений и более широкий по своим эксплуатационным возможностям.

3.1. *Баранов И.В.* Методы и средства измерения тепловых и влажностных свойств пищевых продуктов и материалов в условиях их замораживания и размораживания. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПбГАХПТ, СПб, 1999.

3.2. *Бегункова А.Ф., Гольдберг Г.Р., Куретин В.В., Платунов Е.С.* Приборы для исследования теплоемкости и теплопроводности//Изв. вузов. Приборостроение. Т. XX. № 8. 1977. С. 114–119.

3.3. *Белов Е.А.* Определение теплофизических характеристик материалов теплозащитных покрытий средствами неразрушающего контроля. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. ЛТИХП. Л., 1984.

3.4. *Буравой С.Е.* Теория, методы и средства определения теплофизических характеристик материалов холодильной и криогенной техники при комбинированных тепловых воздействиях. Автореф. дис. ... докт. техн. наук, СПбГАХПТ. СПб, 1995.

3.5. *Буравой С.Е., Дульнев Г.Н., Куретин В.В., Платунов Е.С.* Прибор для комплексных теплофизических измерений в интервале температур от 50 до 1000°C. ГОСИНТИ. № 18-66-989/72. М., 1966, 16 с.

3.6. *Буравой С.Е., Кошаровский Г.Н., Платунов Е.С.* Прибор для комплексного исследования теплофизических свойств металлов. ТВТ, 1975. Т. 13. № 6. С. 1255–1260.

3.7. *Буравой С.Е., Платунов Е.С., Самолетов В.А.* Динамический метод измерения тепло- и электропроводности металлов// Пром. теплотехника, 1983. Т. 5. № 5. С. 43–49.

3.8. Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Курепин В.В. Прибор для скоростных измерений теплопроводности в интервале температур от -100 до $+400^{\circ}\text{C}$. ГОСИНТИ, № 18-66-688/41, М., 1966, 20 с.

3.9. Ключев А.В., Платунов А.Е. Контроллеры для теплотехнических измерений//Теплофизические свойства холодильных агентов и процессы теплообмена: Межвуз. сб. науч. тр.: СПбГАХИТ. СПб., 1995.

3.10. Козин В.М. Разработка и исследование методов измерения теплопроводности и удельной теплоемкости твердых материалов и создание на их основе цифровых рабочих и образцового средств измерения для области температур от минус 150 до 400°C . Автореф. дис. ...канд. техн. наук. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Л., 1985.

3.11. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М.: Гостехиздат, 1954, 408 с.

3.12. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. М.–Л.: Машгиз, 1957, 244 с.

3.13. Курепин В.В. Основы теории расчета, создание и внедрение средств измерений теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности твердых тел в диапазоне температур $150-700$ К. Автореф. дис. ...докт. техн. наук. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Л., 1984.

3.14. Курепин В.В., Платунов Е.С. Металлический тепломер для теплофизических исследований// Изв. вузов. Приборостроение, 1965, т. 7, № 5. С. 126–130.

3.15. Левкович Л.В., Платунов Е.С. Калориметры для скоростных широко-температурных теплофизических испытаний металлов// Изв. вузов. Приборостроение. 1962, Т. V. №4.

3.16. Левочкин Ю.В. Эффективные теплотехнические характеристики дисперсных материалов при низких температурах в условиях несимметричных нестационарных тепловых воздействий. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. ЛТИХП, Л., 1984.

3.17. *Литовский Е.Я.* Теплофизические свойства огнеупоров в широком диапазоне температур, давлений и состава газовой среды. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. ИВТАН СССР, М., 1984.

3.18. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967. 599 с.

3.19. *Мустафаев Р.А.* Методы, аппаратура и исследование теплофизических свойств органических жидкостей и их паров при высоких параметрах состояния. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Баку, 1973.

3.20. *Мустафаев Р.А.* Теплофизические свойства углеводородов при высоких параметрах состояния. М.: Энергия, 1980.

3.21. *Ниженский Н.В.* Определение теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов при низких температурах на основе численного решения нелинейных обратных задач теплопроводности. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. ЛТИХП, Л., 1984.

3.22. *Платунов Е.С.* Метод скоростного измерения температуропроводности теплоизоляционных и полупроводниковых материалов в широком интервале температур // Изв. вузов. Приборостроение, 1961. № 1. С. 84–93.

3.23. *Платунов Е.С.* Метод скоростных измерений теплопроводности и теплоемкости материалов в широком интервале температур // Изв. вузов. Приборостроение, 1961. № 4. с. 90–97.

3.24. *Платунов Е.С.* Обобщение методов регулярного теплового режима на случай переменных теплофизических коэффициентов. В кн.: Тепло- и массоперенос. Т. 7. Минск. «Наука и техника», 1968. С. 376–387.

3.25. *Платунов Е.С.* Теория, методы и приборы теплофизических измерений в режиме монотонного изменения температуры. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. ЛИТМО, Л., 1969.

- 3.26. *Платунов Е.С.* Теплофизические измерения в монотонном режиме. Л.: Энергия. 1973. 144 с.
- 3.27. *Платунов Е.С.* Средства измерения теплопроводности и теплоемкости в области средних, низких и криогенных температур // ИФЖ. 1987. Т. 53. № 6. С. 987–994.
- 3.28. *Платунов Е.С., Баранов И.В., Прошкин С.С., Самолетов В.А.* Определение теплофизических характеристик пищевых продуктов в области кристаллизации связанной влаги // Вестник международной академии холода, СПб.–М, 1999, вып. 1. С. 41–44.
- 3.29. *Платунов Е.С., Курепин В.В., Шубин И.Ф., Алешкевич Ю.В.* Прибор для комплексных теплофизических измерений (ДК-ас1-400). Изв. вузов. Приборостроение, 1972. Т. XV. № 1. С. 130–133.
- 3.30. *Платунов Е.С., Федоров В.Б.* Импульсно-динамический метод измерения истинной теплоемкости металлов при температурах выше 1000°С. ПТБ, 1963. № 7.
- 3.31. *Прошкин С.С.* Методы и средства измерения теплофизических свойств пищевых продуктов, включая область фазовых превращений. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПбГУНиПТ, СПб., 2001.
- 3.32. *Самолетов В.А.* Динамические методы измерения теплофизических характеристик веществ и материалов при низких температурах. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. СПбГУНиПТ, СПб. 2002.
- 3.33. Теплофизические измерения и приборы/ *Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин, Г.С. Петров*/ Под общ. ред. Е.С. Платунова. –Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. 256 с.
- 3.34. *Цветков О.Б.* Теплопроводность холодильных агентов. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1984.

3.35. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.

3.36. Шрамко Ю.П., Буравой С.Е., Платунов Е.С. Установка для комплексных теплофизических исследований при температурах 900–2000°С. ГОСИНТИ, № 18-67-197/19, М., 1967. – 16 с.

3.37. *Platunov E.S.* Instruments for Measuring Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, and Specific Heat under Monotonic Heating// *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods. Vol. 2. Recommended Measurement Techniques and Practices.* Plenum Press. New York and London. 1992. P. 347–373.

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ. ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ ПРИБОРОВ, ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

Введение

Направления научно-прикладных работ, как это следует из названия раздела, были традиционными со времени открытия отраслевой и проблемной лабораторий кафедры теплофизики.

Главы 18 и 19 этого раздела посвящены описанию методов расчета систем термостатирования объектов точного приборостроения различного назначения.

Поддержание во времени и в определенных объемах требуемой температуры среды, окружающей объект, привело к созданию многочисленных вариантов систем тепловой защиты объектов—термостатирующих устройств (термостатов), снабженных различными системами автоматической стабилизации или программного изменения температуры и работающих на разных физических принципах.

Созданием термостатов занимались многие лаборатории и отделы обеспечения надежности различных предприятий. В периодической печати имеется значительное число публикаций, в которых изложены особенности работы и конструкций термостатов различного назначения. Большинство авторов основное внимание уделяют описанию отдельных схем регулирования температуры и выбору типа регулятора, рассматривают специфику работы конкретных видов термостатов. В последние десятилетия появились обобщающие работы и начала складываться методология тепловой защиты аппаратов и теплового расчета термостатов [4.21-4.28].

Существовала, однако, необходимость в анализе и систематизации работы различных типов термостатов и в создании методов их теплового расчета не зависимо от того, какие функции выполняют подлежащие термостатированию устройства. Впервые такая попытка систематизации была предпринята авторами монографии [4.10], подытожившими результаты исследований, которые проводились группой научных сотрудников и аспирантов кафедр теплофизики и физики

ЛИТМО в 1970-90 годах. Был также учтен опыт чтения специализированного лекционного курса “Регулирование тепловых процессов и термостатирование приборов”.

Необходимо было сформулировать основные задачи теплового расчета термостатов, выделить из множества конструкций типовые тепловые модели и предложить математический аппарат, адекватный используемому в теории и прикладных задачах автоматического регулирования процессами.

Помимо авторов монографии [4.10], в этой работе принимали активное участие аспиранты и сотрудники кафедр теплофизики и физики. В 1972 году Л.Б. Андреевой была защищена первая кандидатская диссертация [4.31]. Совершенствовались аппаратные средства теплового расчета типовых групп термостатов, в создании которых участвовали аспиранты С.Ц. Манжикова (в настоящее время доцент Киргизско-Российского Славянского университета в г. Бишкек, Кыргызстан) [4.32], С.М. Горохов (ныне д.т.н., профессор, работающий в г. Одесса, Украина) [4.33]. В диссертации А.Ф. Светлова были проведены расчеты средств термостабилизации кварцевых и квантовых резонаторов частоты. Названные выше сотрудники и А.С. Столяров опубликовали статьи по динамике теплообмена объектов и защитных элементов термостатов, а также обобщенным моделям неоднородных объектов – см. литературу разд.2 [2.21, 2.23-2.26, 2.28-2.30] и [4.34].

Задачи синтеза и разработки методов расчета специальных термостатов (оптические элементы, радиоэлектронные блоки, квантовые генераторы) в течение многих лет успешно решались группой сотрудников кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга под руководством проф. Г.Н. Дульнева и проф. А.В. Шаркова. Преподаватели, научные сотрудники и инженеры кафедры П.А. Корнев, А.П. Беляков, А.В. Сигалов, В.А. Кораблев, В.И. Егоров, М.Ю. Спокойный, В.Г. Парфенов, Б.И. Польшиков, А.Н. Салунин, Л.А. Савинцева, А.О. Сергеев, М.В. Короткевич, Н.Н. Романов, Г.Н. Лукьянов, С.Л. Макаров, С.В. Тихонов, П.С. Брусницын, Ю.В. Алешкевич, К.А. Кузьмин провели расчеты и выполнили проектирование систем термостатирования для широкой группы объектов приборостроения.

Разработка теоретических и метрологических основ динамической контактной термометрии (гл. 20) стала для проф. Н.А. Ярышева, начиная со студенческих времен, одним из основных научных направлений его деятельности. Результаты этих исследований систематизированы в монографии [4.6. 2.7], вошли в справочные пособия, написанные авторскими коллективами с его участием [4.5. 4.15], способствовали подготовке научно-технических и педа-

гоических кадров. В начале 60-х годов А.С. Махновецким была выполнена и защищена работа по расчету погрешностей измерения нестационарных температур [4.35]. Большая научно-исследовательская работа была выполнена сотрудниками кафедры теплофизики (Н.А. Ярышев, А.С. Махновецкий, И.Н.Соколов, В.Л. Диденко) по изучению характеристик измерителей температуры, применяемых в ракетной технике.

Различные способы и тепловые модели измерителей температуры поверхности исследовались аспирантом Цинь Юнле (в последствии д.т.н., профессор Шанхайского механического университета. КНР) [4.75]. Методы восстановления нестационарной температуры в твердом теле изучались О.В. Мининым [4.43, 4.44]. Детальная их разработка для использования при высоких температурах стала основой докторской диссертации В. Минкина (ныне д.т.н., профессор Ченстоховского технического университета, Польша) [4.36, 4.37].

В последующие годы сотрудниками кафедры физики Н.Н. Заровой [4.38, 4,39], С.В. Уточкиным [4.40. 4.41], Т.В. Шугаевой [4.42] были разработаны математические тепловые модели плоских малоинерционных измерительных преобразователей температуры и теплового потока с учетом их геометрических локальных характеристик и поглощения лучистого потока в частично прозрачных материалах.

Особенности температурных измерений в стенках парогенерирующих систем были изучены А.Ф. Залетневым (ныне д.т.н., профессор НПО Масложирпром, СанктПетербург) в его кандидатской диссертации [4.45].

В теплофизических измерениях регистрируют температуру, тепловой поток и количество энергии в локальных или обширных областях в различные моменты времени. В главе 20 были рассмотрены математические модели, на основе которых строятся методы измерения нестационарных температур в различных условиях опыта или промышленной эксплуатации какого-либо объекта. В главе 21 та же задача решается для регистрации тепловых потоков. Существует обширная мировая литература, посвященная различным методам измерения стационарных тепловых потоков [4.76], гораздо меньше известно исследований для нестационарных тепловых потоков.

В семидесятые годы прошлого века в проблемной лаборатории был выполнен цикл работ по созданию теоретических основ измерения нестационарных тепловых потоков датчиками типа “вспомогательной стенки”. Эти исследования были связаны с поиском решений непростых задач математической физики и выполнены группой авторов – Г.Н. Дульневым, Н.В. Пилипенко, С.В. Тихоновым, В.А. Кузьминым, В.И. Завгородним, В.М. Ключевым, Е.С. Платуновым [4.78-4.85]. Впоследствии основная

часть этих исследований было опубликовано Н.В. Пилипенко в брошюре [4.97] и учебном пособии [4.96]. Однако методы измерения нестационарных тепловых потоков разрабатывались на кафедре гораздо раньше для целей калориметрических исследований в физиологии.

В 1958 году профессор Г.Н. Дульнев опубликовал теоретические основы метода регистрации нестационарных потоков любой природы [4.83]. В дальнейшем А.М. Миндлиным на основе этого метода был изготовлен прибор для калориметрических исследований человека [4.93], а также метод и прибор для определения газового обмена теплокровных животных [4.92] или отдельных их частей [4.91]. В семидесятых годах эти исследования были продолжены Н.В. Пилипенко применительно как к человеку, так и небольшим животным [4.84, 4.85, 4.94]. Предложенные методы нашли применение во многих организациях страны, в том числе применялись в космических исследованиях.

ГЛАВА 18. ТЕПЛОВЫЕ МОДЕЛИ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

18.1. Требования к точности обеспечения температурного режима объектов

Потребность в защите от нежелательных тепловых воздействий возникает для многих приборов и устройств, номенклатура и назначение которых весьма разнообразны. Приведем несколько поясняющих примеров.

Результаты точного контроля линейных и угловых размеров изделий зависят от их теплового состояния, то есть температуры в момент измерений, так как коэффициенты линейного и объемного расширения вещества изделий и измерительного инструмента не равны нулю.

Фактор температурных возмущений всегда учитывается при проведении исследований в метрологии. В отдельных случаях применяется тепловая защита вплоть до создания специальных помещений с жестко контролируемой температурой. При уникальных эталонных работах оператор – метролог не допускается в помещение, а процесс измерений проводится дистанционно, так как собственные тепловыделения человека искажают результаты измерений.

Тепловая защита применяется при изготовлении многих оптических и радиоэлектронных изделий, например, при получении дифракционных решеток, элементов микроэлектроники и т. п.

Объемы пространства, в котором проводятся соответствующие работы, колеблются от долей кубического сантиметра до многих кубических метров (помещения, снабженные сложными системами теплового регулирования). В широких пределах варьируется масса объектов – от долей грамма (элементы микроэлектроники, микропорции исследуемых веществ) до сотен и тысяч тонн (передвижные и стационарные станции наблюдения, ЭВМ, оптические телескопы).

Требования к точности обеспечения нормального температурного режима работы объектов меняются в широких пределах для разных групп приборов и аппаратов. Условно можно выделить следующие характерные случаи.

1. Объект работает при сравнительно небольших изменениях температуры внешней среды в интервале 20-40°C, т.е. его элементы мало чувствительны к изменению температуры. В этих случаях тепловая защита обеспечивается мерами, принятыми при разработке конструкции

аппарата в целом. Примерами таких объектов являются бытовые радиоприемники и телевизоры, большая группа электро- и радиоизмерительных приборов. Удачное размещение элементов на шасси, наличие перфорационных отверстий создают естественную вентиляцию тепловыделяющих элементов и предохраняют их от опасных перегревов. Обычно временное изменение температуры окружающей прибор внешней среды происходит медленно (внешние возмущающие воздействия относительно стабильны) и соответствуют изменениям температуры внутри жилого или лабораторного помещения.

2. Объект работает при значительном изменении внешних тепловых воздействий, имеющих импульсный (тепловые помехи кратковременной длительности) или регулярный периодический характер. В таких случаях применяются различные способы так называемой *пассивной тепловой защиты*:

а) используется тепловая изоляция из плохо проводящего теплоту материала, играющего роль теплового фильтра. Тепловые импульсы гасятся, происходит задержка передачи теплоты в объект и ее теплоаккумуляция в теплозащитной оболочке;

б) в качестве тепловой защиты выбирают вещества со специально подобранной температурой плавления и относительно высокой теплотой плавления. Энергия внешних тепловых воздействий тратится на плавление части вещества тепловой защиты и не проникает в объект. Так как температура плавления – стабильный параметр, то реальные конструкции такой защиты часто называют *кристаллическими термостатами*. Их применение оказывается наиболее успешным при условии, что температурные возмущения (внешние или внутренние) имеют периодический характер относительно некоторого среднего значения, а количество теплоты, передаваемое за полупериод изменения возмущения, не способно полностью расплавить вещество тепловой защиты. Защитный слой находится в двух агрегатных состояниях—твердом и жидком; граница раздела фаз испытывает периодические перемещения в соответствии с изменением мощности возмущающих тепловых воздействий;

в) для объектов с внутренним тепловыделением в качестве тепловой защиты используется жидкость, которая вступает в контакт с объектом и превращается в пар, т.е. применяется явление испарительного охлаждения. Интенсивность отвода теплоты от объекта при испарении значительно увеличивается;

г) следующей разновидностью тепловой защиты объектов является использование плохо проводящих теплоту материалов, которые частично разрушаются под воздействием внешних тепловых и механических

нагрузок, сублимируя, т.е. переходя в газообразное состояние, или оплавляясь. Такая “жертвенная” изоляция применяется для тепловой защиты объектов космической техники при их входе в плотные слои атмосферы Земли или других планет; ее действие однократное и кратковременное (несколько десятков секунд). Сложный процесс взаимодействия вещества защиты с атмосферой называют *абляцией*, а сами материалы – *абляционными* теплозащитными материалами. В большинстве случаев это композиционные материалы, основа которых состоит из волокон стекла или кварца, армированных смолами с высокой теплоаккумулирующей способностью (*теплотой абляции*).

Перечисленные выше способы и средства тепловой защиты носят единое название *пассивных*, так как они основаны на использовании собственно теплофизических свойств материалов и на применении теплозащитных веществ. Регулируемые управляющие тепловые воздействия при *пассивной теплозащите* не применяются, что является одним из достоинств указанных способов.

3. Температурный режим приборов должен поддерживаться в узких пределах. Допустимое отклонение температуры объекта от заданного постоянного или переменного во времени значения может изменяться только на несколько градусов или даже на сотые и тысячные доли градуса при возмущающих воздействиях, способных вызвать колебания температуры незащищенного объекта в несколько десятков или сотен градусов. Время работы прибора длительное.

В этих условиях ранее упомянутые способы пассивной защиты, как правило, оказываются непригодными. Необходимо активно противостоять возмущающим тепловым воздействиям. При заданных требованиях должны использоваться *активные средства тепловой защиты*, реализуемые на основе теории и технических средств автоматического регулирования температуры.

Типовые структурные схемы систем автоматического регулирования и термостатирования приведены в работе [4.10].

Общая теория и методы анализа и синтеза систем автоматического регулирования процессов в настоящее время детально разработаны. Однако необходимо отметить ряд особенностей, присущих управлению тепловыми режимами объектов.

Системы термостабилизации в приборостроении и других областях техники выполняют вспомогательную роль, поэтому их приходится создавать или приспособлять с учетом специфики каждого термостатируемого прибора, не нарушая его функций и конструкции. Объект термостатирования связан с внешней средой системой коммуникаций для передачи

электроэнергии, газа, жидкости; каналами наблюдения и съема информации (пропускание электромагнитных волн в радио- и световых диапазонах); рычагами механических передач и т. п. Объект, как правило, является многоэлементным, его температурное поле из-за внутренних тепловыделений может обладать значительной пространственной неоднородностью.

Указанные причины (а их много) осложняют математическое описание объекта как динамического звена системы регулирования. Поэтому одной из центральных задач теории и методов расчета программного изменения или стабилизации температуры является получение динамических соотношений (уравнений передачи теплоты) в объекте и элементах термостата. Только после решения этой задачи возможно решить задачу синтеза всей системы термостабилизации объекта с привлечением общих методов расчета.

Интересно отметить, что широко применяемые приемы и патентованные средства тепловой защиты объектов почти в полной мере присущи биологическим системам. Длительная эволюция растений выработала, по-видимому, оптимальный для каждого их класса режим приспособления к местным климатическим условиям. Форма и размеры листьев растения, общая площадь его зеленого покрова находятся в соответствии с водно-радиационным балансом, необходимым для нормального хода биологических процессов. Сезонное изменение температуры окружающей среды, изменение потока излучения от Солнца, движение окружающего воздуха вызывают ответные компенсирующие действия (изменение площади, ориентации листьев и всего растения по отношению к Солнцу и т. п.).

Значительно большей приспособляемостью к изменениям климатических условий обладают высшие теплокровные животные. У них можно выявить различные принципы тепловой защиты:

а) пассивная теплоизоляция – наличие развитого волосяного покрова сложной структуры (пух, подшерсток, ость); плохо проводящий теплоту жировой слой, особенно внушительный у лишенных шерсти китообразных;

б) активно действующая в жаркую погоду испарительная терморегуляция через кожный покров;

в) тонко регулируемое кровообращение между глубинными и периферийными областями тела (аналогом его в технике является проточное – жидкостное и газовое – терморегулирование), позволяющее выводить из организма избыточную теплоту;

г) локальные системы отвода внутренней теплоты из организма (“тепловые мосты”), которые включаются в действие в тех случаях, когда пассивная (волосяная или жировая) защита становится помехой (например,

язык у собаки; снабженные мощной системой кровообращения лапы у китообразных и т.п.).

Внимательное наблюдение живой природы, эволюция которой насчитывает сотни миллионов лет, позволяет выявить много интересных идей, которые с успехом могут быть использованы при решении различных научно-технических проблем, включая задачи терморегулирования.

18.2. Тепловые модели и основные задачи расчета термостатов

Применяемые в исследовательской и инженерной практике малогабаритные термостаты—это достаточно сложные системы, автоматически поддерживающие необходимый уровень температуры в зоне расположения объекта термостатирования, для которого создаются комфортные тепловые условия его функционирования. Как правило, создаваемый термостат должен отвечать техническим условиям, из которых важнейшими являются: требуемый уровень температуры (температура рабочего объема или температура объекта); допуск на изменение температуры во времени (точность термостабилизации); неравномерность распределения температуры в объекте (в рабочем объеме); диапазон изменения внешних тепловых воздействий; допустимая мощность тепловых источников (стоков), обеспечивающих заданный тепловой режим; время выхода на требуемый режим работы (теплоинерционные характеристики термостата); масса и объем термостата; особенности применяемого регулятора температуры, а также ряд других дополнительных условий.

При всем многообразии конструктивного выполнения термостатов различного назначения (технологические, медицинские, биологические, для физико-механических исследований, радиоэлектронных и полупроводниковых устройств, оптических систем, гироскопических и геофизических приборов и т. д.) можно выделить основные узлы, которые характерны для большинства термостатов.

1. *Камера термостата*, ограничивающая объект (объем) термостатирования и выравнивающая поле температур в рабочей зоне термостата за счет:

а) изготовления камеры из материала с высокой теплопроводностью (медь, сталь, алюминий и его сплавы) с надежным тепловым контактом между отдельными деталями;

б) создания внутри или снаружи камеры теплообменной проточной среды с постоянной температурой;

в) применения снаружи камеры теплоносителя с постоянной температурой плавления;

г) равномерного размещения около стенок камеры нагревателя или холодильника.

2. *Объект термостатирования*, размещаемый в камере.

3. *Теплоизоляционная прослойка* между камерой и наружной средой, которая уменьшает влияние внешних тепловых воздействий.

4. *Наружный кожух (корпус)*.

5. *Активный элемент* (нагреватель или холодильник), который вместе с системой автоматического регулирования обеспечивает заданный уровень температуры.

6. *Чувствительный элемент* системы терморегулирования.

7. *Тепловые связи* (регулируемые стержни, установочные опоры, соединительные провода, разъемы и т. п.) между объектом, камерой и окружающей средой, которые приводят к нарушению равномерности температурных полей элементов термостата.

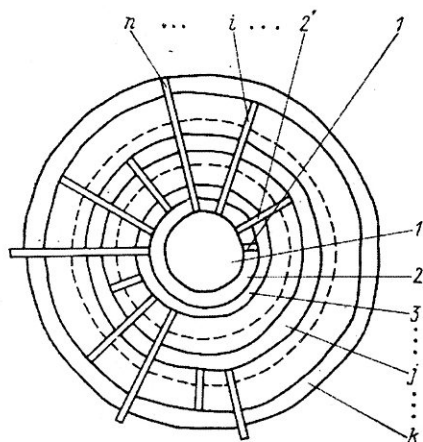


Рис. 18.2.1

На основе анализа разнообразных по своему назначению и конструктивному оформлению термостатов (термоэлектрических, с кристаллическими теплоносителями, электронагревательных с плоскими, проволочными, транзисторными нагревателями и др.) была предложена *обобщенная тепловая модель термостата* [рис. 18.2.1]. Обобщенная тепловая модель представляет собой систему, состоящую из k оболочек произвольной формы (твердых, жидких или газообразных) с *центральной ядром* (объектом термостатирования) и *местными (локальными) тепловыми связями* («тепловыми мостами») элементов термостата с внешней средой и другими элементами.

К элементам модели термостата относятся объект термостатирования, камера (корпус) термостата, воздушные и жидкостные прослойки, теплоноситель с постоянной температурой плавления, электроизоляция, нагреватели, теплоизоляция, кожух и т. д. Каждый элемент характеризуется объемом V_j , внутренней S_{j1} и наружной S_{j2} поверхностями и находится в тесном тепловом контакте с соседними элементами и связями, поэтому $S_{j1} = S_{j-1,2}$; $S_{j2} = S_{j+1,1}$; $V_j = V_{j2} - V_{j1}$. Центральное тело имеет объем V_1 и наружную поверхность S_{12} .

В общем случае любой элемент системы подвержен воздействию следующих факторов: внутреннего, равномерно распределенного по объему V_j источника теплоты с объемной плотностью $w_j(\tau)$; среды с температурой $t_{npj}(\tau)$, проходящей через объем V_j , интенсивность теплообмена которой в расчете на единицу объема составляет α_{npj} ; равномерно распределенных по поверхностям S_{j1} и S_{j2} источников теплоты с удельной плотностью $q_{j-1,j}(\tau)$ и $q_{j+1,j}(\tau)$; локальных источников (стоков) энергии, обусловленных притоком (оттоком) теплоты по тепловым связям.

Система тел находится в теплообмене с внешней средой, температура $t_c(\tau)$ которой может изменяться во времени. Строгое решение задачи теплообмена для обобщенной модели термостата методами аналитической теории теплопроводности сопряжено со значительными трудностями, так как даже для тел простейшей формы необходимы сложные расчеты, причем структура решения в сильной степени зависит от формы тела. Точность решений, получаемых методами непосредственного интегрирования системы уравнений, является во многих случаях условной, так как при формулировке задачи обычно делаются существенные допущения относительно формы, размеров и особенностей теплообмена рассматриваемой системы тел. В частных случаях для модели термостата можно составить систему уравнений, численно решаемую на ЭВМ. Однако машинный способ решения требует фиксированных значений внешних воздействий и четкого задания граничных условий, которые в реальных системах термостабилизации могут меняться от задачи к задаче. В результате этого оценка влияния отдельных физических и конструктивных факторов, необходимая на этапе предварительного расчета и проектирования, значительно усложняется. Анализ работ по исследованию тепловых режимов термостатирующих устройств позволил наметить программу и сформулировать перечень основных задач, решение которых должно служить базой для построения методов теплового расчета термостатов и оптимизации конструкции термостатирующих устройств. К таким задачам можно отнести следующие [4. 10].

1. Расчет стационарного теплового режима термостата, позволяющий произвести выбор значений конструктивных (габаритных) и теплофизических параметров элементов термостата и установить взаимосвязь между температурой отдельных элементов и тепловыми воздействиями (мощность нагревателя, температура окружающей среды, мощность тепловыделения в объекте и др.).

2. Оценка неравномерности температурного поля внутри объекта термостатирования или в элементе, окружающем объем термостатирования (в камере), которая устанавливает соотношения, связывающие распределение источников (стоков) теплоты с коэффициентами теплопередачи между отдельными участками объекта или камеры термостата и внешней средой.

3. Анализ стационарного и нестационарного теплового режима объекта термостатирования по отношению к камере и внешней среде, который выявляет влияние внутренних тепловыделений и тепловых связей объекта термостатирования на характер его температурного поля и дает возможность принять действенные конструктивные меры по уменьшению или ликвидации так называемых статических ошибок термостата.

4. Расчет нестационарного теплового режима термостата, позволяющий оценивать теплоинерционные свойства объекта, отдельных элементов и термостата в целом; определять переходный (пусковой) процесс; оценивать влияние изменения внешних условий (температурные возмущения, внешние тепловые потоки) на точность термостатирования; получать уравнения динамики термостата, объекта термостатирования, термоприемника (датчика), регулятора температуры как элементов системы автоматического регулирования.

5. Анализ работы системы автоматической стабилизации температуры, на основе которого выявляются точностные возможности различных законов регулирования и регуляторов для типовых термостатов и объектов термостатирования.

6. Разработка расчетно-экспериментальных методов исследования геометрических и теплообменных параметров, а также статических и временных характеристик термостатирующих устройств, повышающих точность приближенных аналитических методов расчета, создающих рациональную основу постановки опытов и сокращающих объем экспериментальных работ.

7. Оптимизация на основе разработанной теории теплового расчета типовых конструкций термостатирующих устройств общего или специализированного назначения, т. е. решение с известными ограничениями задачи синтеза термостатирующих устройств.

Для выполнения поставленных задач необходимо прежде всего выбрать метод расчета, который должен удовлетворять следующим требованиям: быть простым по форме, но в то же время обладать достаточной общностью, т. е. давать возможность в единой функциональной зависимости учитывать изменение конструкции отдельных элементов и различные виды тепловых воздействий; позволять проводить при необходимости серию последовательно усложняющихся расчетов, увеличивая их точность; соответствовать методу, используемому в смежных областях знаний.

Анализ обобщенной тепловой модели показал, что решение задачи теплообмена значительно упрощается, если провести его последовательно в два этапа:

а) исследовать тепловой режим термостата при равномерных тепловых воздействиях;

б) исследовать локальные эффекты, вызванные действием тепловых связей, и оценивать влияние неравномерного распределения источников теплоты.

На первом этапе воздействия от внутренних и поверхностных источников энергии элементов, внутренней и внешней среды принимаются равномерными. Коэффициенты теплообмена и теплофизические параметры элементов считаются постоянными.

Совокупность решений задач первого и второго этапов позволяет провести оценочные расчеты и дать приближенную аналитическую картину теплового режима термостатирующих устройств. Такой подход является правомочным, так как при решении задач теплообмена систем термостатирования одно из основных технических требований сводится к обеспечению равномерного температурного поля в термостатируемом объеме.

Отрицательное действие локальных тепловых связей в большинстве случаев стремятся свести к минимуму или скомпенсировать.

18.3. Элементарная теория термостатирования

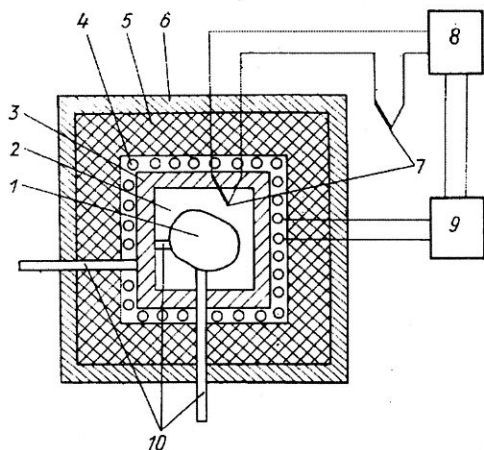


Рис. 18.3.1

Конструктивное выполнение активных термостатов крайне разнообразно. Схематически устройство типового термостата показано на рис. 18.3.1. Термостат включает объект 1, располагаемый в камере 3 термостата, выполняющей роль изотермической оболочки. Равномерность распределения температуры по поверхности камеры обеспечивается источниками (стоками) теплоты 4, находящимися внутри камеры или вблизи от нее. Между объектом 1 и камерой 3 имеется среда 2.

Для уменьшения мощности управляющих воздействий и частичной защиты от внешних возмущающих воздействий камера закрывается слоем теплоизоляционного материала 5, огражденного от внешней среды наружным кожухом 6. Измерительный преобразователь 7 (термопара, термометр

сопротивления и т. п.) совместно с усилительно-преобразовательным 8 и исполнительным 9 органами выполняет функции регулятора температуры камеры и термостатируемого объема, внутри которого находится объект. Элементы 3, 4, 5, 6 образуют собственно термостат. Объект и камера имеют информационные каналы связи и управления объектом, играющие роль локальных тепловых связей 10 с внешней средой и другими элементами термостата.

Проектирование системы тепловой защиты объектов включает несколько основных этапов:

а) исследование объекта регулирования, определение его характеристик, параметров, условий его работы и воздействий, которые он испытывает;

б) формулировка требований к системе защиты;

в) выбор метода тепловой защиты и первоначальной структурной схемы;

г) выбор элементов схемы (разработка принципиальной схемы);

д) уточнение структурной схемы, выбор и расчет элементов и параметров системы на основе требований к статическим и динамическим свойствам системы;

е) экспериментальные исследования системы тепловой защиты (или отдельных ее частей) в лабораторных условиях и внесение необходимых поправок;

ж) конструирование, изготовление и монтаж системы (совместно с автоматическим регулятором температуры для активных систем);

з) наладку системы регулирования в реальных условиях;

и) опытную эксплуатацию всей системы.

Для сложных объектов полное выполнение перечня указанных работ, как правило, требует участия специалистов разного профиля. Начальная стадия – это изучение объекта тепловой защиты, и здесь определяющая роль отводится специалисту по теплофизике.

Для определения основных характеристик целесообразно рассмотреть упрощенную постановку задачи управления тепловым режимом объекта в термостате. Первичные физические и математические модели объекта и термостата строятся при следующих допущениях:

вне зависимости от истинной структуры реальный объект заменяется телом, имеющим объем V и отделенным от окружающей среды (или камеры термостата) поверхностью раздела S (наружная поверхность тела);

теплофизические параметры объекта l (рис. 18.3.1) и камеры 3 термостата определяются их полными теплоемкостями $C_{об}$ и $C_к$;

распределение температуры по всему объему тела равномерное и в любой момент времени τ определяется единственным значением температуры $t_{\infty}(\tau)$; это же допущение делается для камеры;

объект находится в теплообмене с камерой термостата, имеющей температуру $t_k(\tau)$, и с внешней средой, возмущающее тепловое воздействие которой характеризуется ее температурой $t_c(\tau)$;

на поверхности или внутри объекта и камеры имеются возмущающие или управляющие тепловые воздействия, полная мощность которых соответственно составляет $W_{об}(\tau)$ и $W_k(\tau)$;

внутри объекта может быть организована система проточного теплообмена, охватывающая весь объект. Температура проточной среды (теплоносителя или хладагента) обозначается: $t_{пр\ вх}(\tau)$ – на входе, $t_{пр\ вых}(\tau)$ – на выходе и $t_{пр}(\tau) = 0,5(t_{пр\ вх}(\tau) + t_{пр\ вых}(\tau))$ – средняя. Интенсивность проточного теплообмена постоянна и численно определяется коэффициентом объемной теплоотдачи $\alpha_{пр}$, который измеряется в ваттах на кубический метр-кельвин;

предполагается, что среда 2 между объектом и камерой имеет пренебрежимо малую теплоемкость по сравнению с теплоемкостями объекта 1, камеры 3 и внешней теплоизоляции 5, т. е. в процессах теплопередачи она выступает как безынерционный элемент, характеризующийся только ее суммарным тепловым сопротивлением или обратной ему величиной – полной тепловой проводимостью прослойки 2, обозначаемой $\Lambda_{об\ к}$;

теплоемкость внешней теплоизоляции 5 суммируется с теплоемкостью камеры, тем самым C_k является эффективным параметром для элементов 3 и 5);

в отличие от камеры, изготовляемой из материала с высокой теплопроводностью, защитные свойства теплоизоляции 5 количественно определяются полной тепловой проводимостью $\Lambda_{из}$;

локальные тепловые связи l_0 (рис. 18.3.1) предполагаются малотеплоемкими по сравнению с камерой и объектом; их действие характеризуется значениями тепловых проводимостей $\Lambda_{об\ с}$ (между объектом и средой) или суммарно учитывается в тепловых проводимостях $\Lambda_{об\ к}$ между объектом и камерой или $\Lambda_{к\ с}$ между камерой и средой;

для количественного описания суммарного теплообмена тела с внешней и проточной средами используется закон теплопередачи Ньютона.

Математическая модель теплообмена объекта выводится на основе закона сохранения энергии: выделяемая в объекте внутренними источниками энергии теплота аккумулируется объектом, уносится проточной средой, передается камере и через локальные связи во внешнюю среду. Расшифровав составляющие уравнения теплового баланса, получаем дифференциальное уравнение теплообмена объекта, находящегося внутри камеры термостата:

$$W_{об}(\tau) = C_{об} \frac{dt_{об}(\tau)}{d\tau} + \Lambda_{пр} [t_{об}(\tau) - t_{пр}(\tau)] + \Lambda_{обк} [t_{об}(\tau) - t_{к}(\tau)] + \Lambda_{обс} [t_{об}(\tau) - t_{с}(\tau)]. \quad (18.3.1)$$

Здесь, в дополнение к ранее принятым обозначениям, введена полная тепловая проводимость объекта по отношению к проходящей через него (проточной) среде:

$$\Lambda_{пр} = \alpha_{пр} V. \quad (18.3.2)$$

Уравнение, определяющее особенности теплообмена камеры термостата (выделяемая внутри камеры теплота совместно с теплотой, получаемой от объекта, частично аккумулируется камерой, а остальное передается во внешнюю среду), записывается так:

$$W_{к}(\tau) + \Lambda_{обк} [t_{об}(\tau) - t_{к}(\tau)] = C_{к} \frac{dt_{к}(\tau)}{d\tau} + \Lambda_{кс} [t_{к}(\tau) - t_{с}(\tau)]. \quad (18.3.3)$$

Уравнения (18.3.1) и (18.3.3) совместно с начальными условиями

$$t_{об}(\tau)|_{\tau=0} = t_{обн}; \quad t_{к}(\tau)|_{\tau=0} = t_{кн} \quad (18.3.4)$$

формулируют простейшую математическую модель активного термостата и связывают две неизвестные (искомые) величины — температуру объекта $t_{об}(\tau)$ и камеры $t_{к}(\tau)$ с воздействиями $W_{об}(\tau)$, $W_{к}(\tau)$, $t_{пр}(\tau)$, $t_{с}(\tau)$. Если теплофизические и теплообменные характеристики зависят от температуры, то математическая модель является нелинейной. Уравнения (18.3.1) и (18.3.3) в их линеаризованной форме (независимость коэффициентов от температуры) и в частных модификациях многократно применялись для первичной оценки тепловых процессов и в расчетах тепловой защиты объектов. Несмотря на сильные ограничения исходной формулировки задачи, целесообразно подробнее рассмотреть эту модель.

18.4. Передаточные функции и уравнения взаимосвязи для температуры объекта и камеры термостата

Решение системы (18.3.1), (18.3.3), (18.3.4) можно получить различными методами, однако, как и ранее, будем применять операционный метод, основанный на интегральном преобразовании Лапласа – см. гл.8.