

АКУСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

УДК 536.412

ПРИМЕНЕНИЕ ДВОЙНОЙ МОДУЛЯЦИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ**Л. А. Благодоров, О. О. Карчевский, П. В. Иванников, А. С. Клепиков***(кафедра молекулярной физики)*

E-mail: inter@phys.msu.su; blagonravov@mail.ru

Предложен новый метод измерения коэффициента теплового расширения проводящих жидкостей, существенной особенностью которого является одновременное использование двух видов модуляционного воздействия различной физической природы на исследуемый образец. Описана установка, которая позволяет реализовать предложенный метод. С целью апробации метода изучено изменение коэффициента теплового расширения дистиллированной воды в интервале температур 20–40 °С.

Введение

Интерес к измерениям коэффициента теплового расширения проводящих жидкостей связан с тем, что в свойствах некоторых щелочных металлов были обнаружены особенности, предположительно свидетельствующие о наличии у них структурных переходов. В работах [1–3] на основе полученных в разное время экспериментальных данных сделан вывод о наличии признаков фазового перехода 2-го рода в жидком цезии при температуре 590 К. В связи с этим большую актуальность приобретает вопрос о получении наиболее точных сведений о коэффициенте теплового расширения жидких металлов, у которых обнаружены аномалии в поведении теплофизических свойств. В работах [4, 5] предложен новый метод измерения коэффициента теплового расширения проводящих жидкостей, использующий двойную модуляцию. Этот метод должен дать возможность измерять локальное значение коэффициента α_p , а не усредненное его значение по некоторому температурному интервалу. Сущность метода состоит в том, что исследуемая проводящая жидкость одновременно подвергается воздействию периодических изменений давления с частотой ν и переменного электрического тока, мощность которого изменяется по гармоническому закону с той же частотой ν . Фаза колебаний мощности электрического тока сдвинута относительно колебаний давления на величину, при которой температурные колебания в образце, вызванные указанными воздействиями, находятся в противофазе. Если путем изменения амплитуды колебаний мощности электрического тока добиться того, чтобы амплитуда температурных колебаний в жидкости стала равной нулю (вследствие взаимной компенсации температурных эффектов), то коэффициент теплового расширения может быть определен

по формуле

$$\alpha_p = \frac{w_{\sim}}{2\pi\nu V p_{\sim} T}, \quad (1)$$

где ν — линейная частота колебаний, w_{\sim} — амплитуда колебаний мощности джоулева нагрева, p_{\sim} — амплитуда колебаний давления, T и V — абсолютная температура и объем исследуемой жидкости соответственно.

Цель настоящей работы заключалась в создании установки, реализующей предложенный в [4, 5] метод измерения α_p и проведении его испытания на каком-либо жидком образце. Ранее в практике теплофизического эксперимента одновременное использование двойной модуляции не встречалось. Таким образом, получение компенсации температурных откликов образца от двух синхронных модуляционных воздействий различной физической природы представляет собой самостоятельную задачу. Поэтому на начальном этапе разработки метода было сочтено целесообразным во избежание трудностей, сопряженных с применением жидкометаллического образца, заменить последний на комбинированный образец (хотя конечная цель разработки — получение возможности проведения измерений именно на жидких металлах).

1. Особенности эксперимента, связанные с использованием комбинированного образца

Комбинированный образец состоит из двух частей, на каждую из которых производится воздействие только одного вида модуляции. Это значит, что температурный отклик, возникающий в результате периодического изменения давления, регистрируется термодатчиком, установленным в ячейке, заполненной диэлектрической жидкостью. А температурный отклик, вызванный периодическим изменением электрического тока, регистрируется термо-

датчиком, установленным на твердом проводнике. В случае использования комбинированного образца коэффициент теплового расширения α_p должен определяться по формуле, отличной от (1). Действительно, амплитуда температурных колебаний, вызванных колебаниями давления в жидком диэлектрике, т. е. θ_1 , может быть найдена по формуле

$$\theta_1 = \frac{T_1 \alpha_{p1}}{c_{p1} \rho_1} p_{\sim} g_1,$$

где p_{\sim} — амплитуда колебаний давления, g_1 — безразмерный множитель, являющийся поправкой на неадиабатичность процесса. Выражение для θ_1 непосредственно следует из определения адиабатического термического коэффициента давления

$$(1/T)(\partial T/\partial p)_S = \alpha_p/(c_p \rho).$$

Амплитуда температурных колебаний, вызванных колебаниями мощности электрического тока, протекающего через графитовый стержень, находится из соотношения

$$\theta_2 = \frac{w_{\sim}}{c_{p2} \rho_2 \omega V} g_2,$$

где w_{\sim} — амплитуда колебаний мощности переменного тока, c_2 — удельная теплоемкость стержня, ρ_2 — его плотность, V — объем, g_2 — поправочный множитель, учитывающий неадиабатичность процесса. Поскольку в условиях компенсации $\theta_1 = \theta_2$, то отсюда следует выражение для α_p :

$$\alpha_p = \frac{w_{\sim} c_{p1} \rho_1}{p_{\sim} \omega V_2 T_1 c_{p2} \rho_2} (g_2/g_1). \quad (2)$$

2. Описание установки

Установка, реализующая описанный выше метод измерения коэффициента теплового расширения, включает в себя следующие основные узлы: комбинированный образец, состоящий из заполненной жидким диэлектриком измерительной ячейки и графитового стержня; генератор периодической составляющей давления, генератор переменного тока и нановольтметр для измерения температурных колебаний образца. Общая схема установки показана на рис. 1. Генератор периодической составляющей давления представляет собой разновидность поршневого насоса, в котором возвратно-поступательные движения поршня вызывают циркуляцию вязкой жидкости в замкнутом контуре, создавая при этом периодическое изменение давления в системе. Генератор включает в себя: поршень 1, капилляр 2, вспомогательную камеру 3, клапан 4, эксцентрик 5 и шатун 6. Подвижные части генератора приводятся в движение с помощью электродвигателя мощностью 50 Вт. Подробно работа генератора описана в статье [6]. Периодические изменения давления в генераторе благодаря сифонам 7 передаются изучаемым жидкостям, находящимся в ячейках 8

и 9. Ячейка 8 заполнена исследуемой жидкостью, ячейка 9 — эталонной жидкостью, находящейся при фиксированной температуре. Конструкции ячеек одинаковы. Каждая из них представляет собой цилиндрический стакан из нержавеющей стали, состоящий из двух одинаковых частей. Герметизация внутренней полости стакана осуществляется благодаря наличию двух тефлоновых кольцевых прокладок, между которыми пропущены вводы хромель-алюмелевой термопары. Обе части стакана стягиваются с помощью накладных фланцев и шпилек (на схеме не показаны). Спай термопары находится в средней части измерительной и эталонной ячеек.

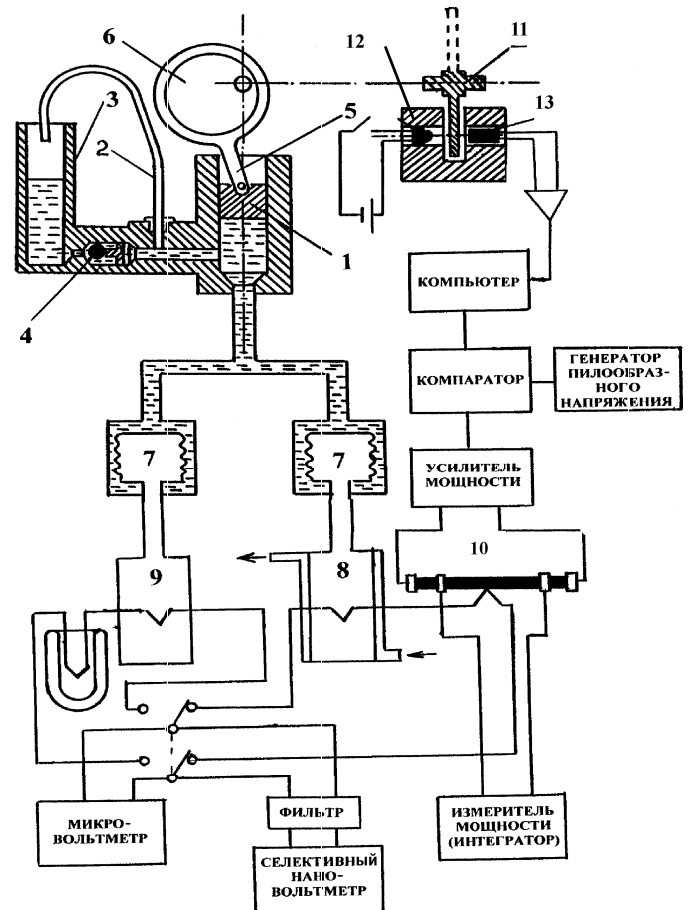


Рис. 1. Схема установки

Приведенное выше описание относится к той части установки, которая включает в себя ячейку с жидким диэлектриком, а также аппаратуру, создающую модуляционное воздействие на образец в виде периодического изменения давления. Другая часть установки, имеющая отношение к вспомогательному образцу 10 (графитовому стержню) и способу модуляционного воздействия, оказываемого на него, включает в себя: 1) устройство, формирующее последовательность тактовых импульсов; 2) компьютер, вырабатывающий под действием тактовых импульсов напряжение синусоидальной формы с периодом, равным периоду колебаний давления; 3) компаратор и 4) усилитель мощности. Для реализации

метода необходимо применить такой способ модуляции электрического тока, при котором колебания тока происходят синхронно с колебаниями давления. Синхронизация получается благодаря тому, что устройство, формирующее тактовые импульсы, устанавливается на одном валу с генератором периодической составляющей давления. Указанное устройство представляет собой секторный диск 11, при вращении которого чередование темных и светлых секторов вызывает периодическое прерывание светового потока в паре светодиод — фотодиод (12, 13). На выходе фотодиода формируется последовательность прямоугольных импульсов одинаковой длительности и равной амплитуды. Частота следования импульсов составляет 110 Гц. Тактовые импульсы инициируют формирование на выходе компьютера синусоидального сигнала в цифровом виде. Установленная в компьютере измерительная плата L-305 преобразует цифровой сигнал в аналоговый.

В настоящей работе в целях предотвращения попадания на термодатчик прямой наводки от источника модулирующего напряжения использована широтно-импульсная модуляция. Для ее создания необходим вспомогательный генератор пилообразных импульсов. От источника эти импульсы поступают на один из входов компаратора, а на другой вход подается синусоидальное напряжение, поступающее с компьютера. В результате на выходе компаратора формируется последовательность прямоугольных импульсов, длительность которых изменяется по гармоническому закону с частотой $\Omega = 2.3$ Гц. Промодулированный таким образом сигнал, усиленный с помощью усилителя мощности, подается на графитовый стержень. На рис. 2 приведены формы напряжений на выходе устройств, участвующих в формировании модуляционного воздействия на вспомогательный образец. Датчиком температурных

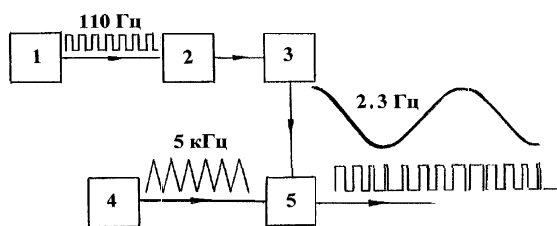


Рис. 2. Широтно-импульсная модуляция. Блок-схема формирующего устройства. 1 — источник тактовых импульсов; 2 — усилитель; 3 — компьютер; 4 — генератор пилообразного напряжения; 5 — компаратор

колебаний образца является дифференциальная термодатчик, один спай которой помещен внутри ячейки с жидким диэлектриком, а другой спай плотно прижат к поверхности графитового стержня. Этот второй спай не имеет со стержнем электрического контакта, поскольку изолирован от него посредством слюдяной пластины толщиной 0.05 мм.

При использовании широтно-импульсной модуляции переменная составляющая мощности, выделяе-

мой в стержне, совпадает по форме с переменной составляющей напряжения на входе компаратора, несмотря на то, что мощность пропорциональна квадрату напряжения. Дело в том, что переменная составляющая мощности в этом случае имеет вид:

$$w_{\sim}(t) = (U_R^2/R)(\Delta\tau/T_1) \sin(\Omega t), \quad (3)$$

где U_R — падение напряжения на стержне, R — сопротивление стержня, $\Delta\tau$ — амплитуда вызванных модуляцией колебаний положения заднего фронта импульса, T_1 — интервал между передними фронтами соседних импульсов (период), Ω — циклическая частота колебаний давления, она же — частота колебаний модулирующего напряжения. Отношение $(\Delta\tau/T_1)$ представляет собой глубину модуляции. Существенно, что $w_{\sim}(t)$ не содержит гармоник. Обоснование этого свойства широтно-импульсной модуляции приведено в Приложении.

3. Результаты испытаний установки

Согласно формулам (1) и (2) для определения коэффициента теплового расширения требуется знание амплитуд колебаний давления и мощности электрического тока при условии компенсации температурного отклика образца на оба воздействия. Сигнал, пропорциональный давлению в системе, поступает с термодатчика, установленной внутри ячейки 9 (рис. 1), заполненной эталонной жидкостью. При выполнении температурных измерений ее температура поддерживается постоянной. В качестве эталонной жидкости используется изооктан. Измеряется сигнал с помощью селективного нановольтметра «Униран-233». Амплитуда колебаний мощности электрического тока при использовании широтно-импульсной модуляции определяется по формуле

$$w_{\sim} = \frac{U_R^2}{R} \left(\frac{\Delta\tau}{T_1} \right). \quad (4)$$

Здесь T_1 — период, соответствующий частоте следования импульсов, равной 5 кГц. Согласно формуле (4) мощность электрического тока, а следовательно, и температурный отклик термодатчика, помещенного на сопротивлении R , пропорциональны квадрату падения напряжения U_R . Зависимость температурного отклика от U_R показана на рис. 3, а. Квадратичная парабола достаточно точно описывает эту зависимость. С другой стороны, согласно той же формуле (4) температурный отклик термодатчика должен быть пропорционален $\Delta\tau$ в первой степени. На рис. 3, б представлена зависимость температурных колебаний термодатчика от амплитуды колебаний модулирующего напряжения U_{mod} , которое определяет размах колебаний заднего фронта импульсов $\Delta\tau$. Полученная линейная зависимость согласуется с ожидаемой в соответствии с формулой (4).

Апробация установки была начата с построения амплитудно-фазовой характеристики. Измерял-

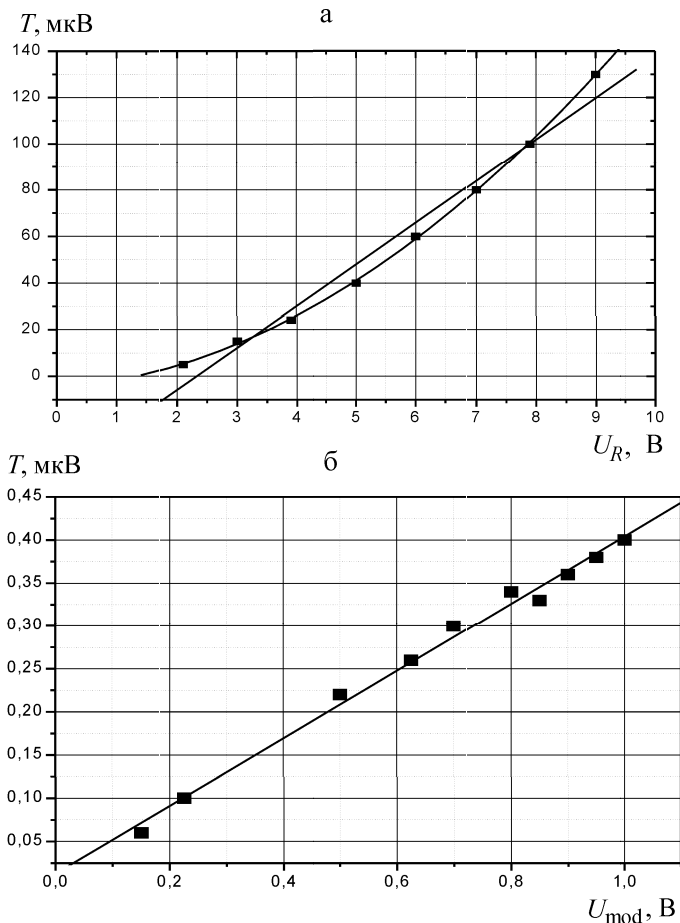


Рис. 3. а — Зависимость температурного отклика T от амплитуды падения напряжения на стержне U_R ; б — зависимость температурных колебаний T термодатчика от амплитуды колебаний модулирующего напряжения U_{mod}

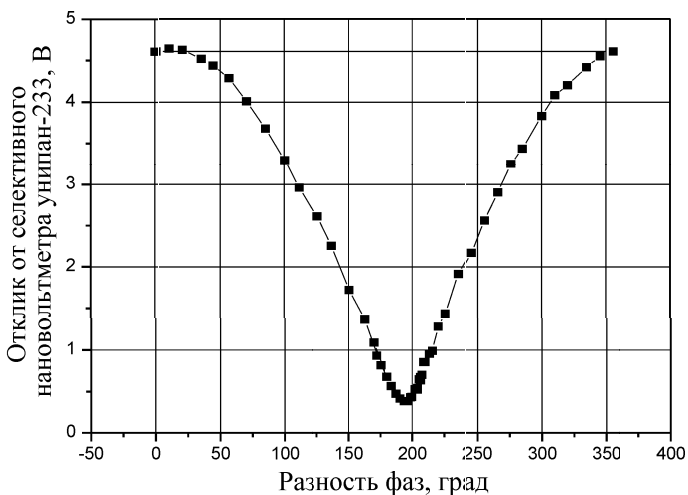


Рис. 4. Амплитудно-фазовая характеристика измерительного тракта

ся сигнал от дифференциальной термопары при одновременном включении обоих видов модуляции. Строилась зависимость сигнала от сдвига фазы между колебаниями давления и колебаниями электрического тока. Полученная амплитудно-фазовая характеристика показана на рис. 4. При измерении коэффициента теплового расширения сначала

находится фазовый сдвиг, при котором получается минимальный сигнал от дифференциальной термопары. Дальнейшая компенсация производится путем изменения амплитуды колебаний электрического тока, пропускаемого через стержень. Ранее [7] было показано, что на описываемой установке соблюдается необходимое условие корректности измерений. Это условие заключается в постоянстве отношения w_{\sim}/p_{\sim} при различных значениях давления.

В настоящей работе апробация метода осуществляется с использованием в качестве жидкого образца дистиллированной воды. Такой выбор обусловлен тем, что коэффициент теплового расширения воды претерпевает довольно значительное изменение в сравнительно узком температурном интервале. Поэтому изучение температурной зависимости этой величины для воды дает возможность проводить тестирование предложенной реализации метода. Установка в существующем виде позволяет определять α_p в относительных единицах.

При изучении температурной зависимости α_p воды измерялись все величины, которые так или иначе зависят от температуры исследуемого образца. Амплитуда колебаний давления поддерживалась примерно постоянной. Амплитуда температурных колебаний воды увеличивалась по мере роста ее температуры. Для компенсации этих колебаний необходимо увеличивать амплитуду колебаний электрического тока, протекающего через графитовый стержень. Для определения α_p по формуле (2) необходимо также учитывать температурную зависимость теплоемкости воды и графита. Согласно справочным данным [8], температурной зависимостью воды в интервале от 20 до 40 °С можно пренебречь. Однако необходимо учитывать температурную зависимость теплоемкости графита [9]. На рис. 5 построена в относительных единицах полученная нами зависимость коэффициента теплового расширения воды от температуры в двадцатиградусном интервале.

$\alpha_p(t)/\alpha_p(20^\circ\text{C})$

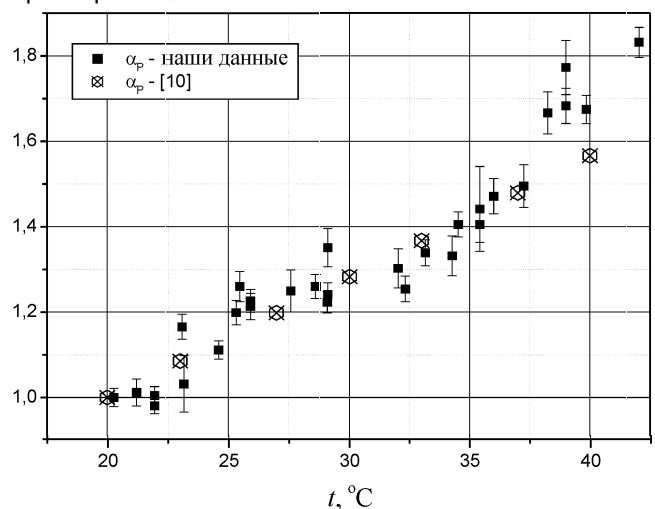


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента теплового расширения дистиллированной воды

Данные отнесены к значению коэффициента теплового расширения при температуре 20 °С. На том же рисунке нанесены значения, приведенные в монографии [10]. Примерно до 37 °С наблюдается удовлетворительное согласие. В области 40 °С расхождение заметно выходит за пределы экспериментальной погрешности. Ресурсы точности установки еще не исчерпаны, поэтому дополнительные измерения позволят оценить значимость наблюдаемого отличия.

Результаты апробации метода указывают на возможность использования установки для измерений коэффициента теплового расширения металлических жидкостей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 00-02-16659).

Приложение

Учитывая, что при использовании широтно-импульсной модуляции электрический ток, протекающий через образец, представляет собой неограниченную последовательность прямоугольных импульсов (рис. 6), мгновенное значение тока можно определить выражением

$$i(t) = i_0 \left\{ \sum_{n=0} [1(t - nT_1) - 1(t - nT_1 - (\tau_n + \Delta\tau(1 + \sin(\omega t)))))] \right\},$$

где

$$1(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

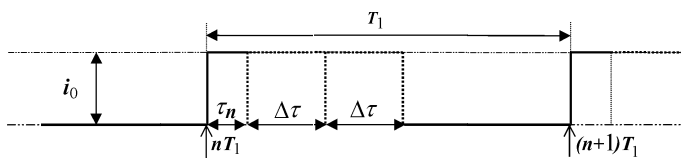


Рис. 6. Широтно-импульсная модуляция

Для получения мгновенной мощности необходимо возвести выражение для тока в квадрат. Используя свойства функции 1(x), получим:

$$\begin{aligned} i(t) &= i_0^2 \left\{ \sum_{n=0} [1(t - nT_1) - 1(t - nT_1 - (\tau_n + \Delta\tau(1 + \sin(\omega t)))))] \right\}^2 = \\ &= i_0^2 \left\{ \sum_{n=0} [1(t - nT_1) - 1(t - nT_1 - (\tau_n + \Delta\tau(1 + \sin(\omega t)))))] \right\}. \end{aligned}$$

Найдем далее среднее значение мощности на интервале времени от nT_1 до $(n + 1)T_1$, т. е. на n -м периоде:

$$\begin{aligned} \overline{i_n^2} &= i_0^2 \frac{1}{T_1} \int_{nT_1}^{(n+1)T_1} [1(t - nT_1) - \\ &- 1(t - nT_1 - (\tau_n + \Delta\tau(1 + \sin(\omega t))))] dt. \end{aligned}$$

Учтем, что $\omega = 2\pi/T$, при этом $T \gg T_1$. Поэтому можем положить в подынтегральном выражении $\sin(\omega t) \cong \sin(\omega nT_1)$. Тогда

$$\begin{aligned} \overline{i_n^2} &= i_0^2 \frac{1}{T_1} [T_1 - (T_1 - (\tau_n + \Delta\tau(1 + \sin(\omega nT_1))))] = \\ &= i_0^2 \left\{ \frac{1}{T_1} (\tau_n + \Delta\tau) + \frac{\Delta\tau}{T_1} \sin(\omega nT_1) \right\}. \end{aligned}$$

Первое слагаемое в фигурных скобках соответствует постоянной составляющей мощности. Второе слагаемое соответствует переменной составляющей, причем колебания мощности, как видно, происходят на частоте колебаний электрического тока. Вторая гармоника отсутствует. В этом заключается особенность широтно-импульсной модуляции.

Принимая во внимание неравенство $T \gg T_1$ и $\sin(\omega t) \cong \sin(\omega nT_1)$, последнее выражение с учетом только переменной составляющей можно переписать:

$$\overline{i_{\approx}^2}(t) = i_0^2 \frac{\Delta\tau}{T_1} \sin(\omega t).$$

Литература

1. Благоднаров Л.А., Кузнецов С.М., Алексеев В.А., Сквородько С.Н. // ТВТ. 1997. **35**, № 1. С. 149.
2. Благоднаров Л.А., Орлов Л.А., Сквородько С.Н., Алексеев В.А. // ТВТ. 2000. **38**, № 4. С. 566.
3. Blagodarov L.A., Skovorod'ko S.N., Krylov A.S. et al. // J. Non-Cryst. Sol. 2000. **277**. P. 182.
4. Благоднаров Л.А. Способ измерения коэффициента теплового расширения проводящих жидкостей. Патент на изобретение № 2076313. 9 бюл. 1997 г. (приор. 8 июля 1994 г.).
5. Благоднаров Л.А. // Письма в ЖТФ. 1995. **21**, № 24. С. 51.
6. Благоднаров Л.А., Модхен Ф. // ПТЭ. 1991. № 4. С. 167.
7. Благоднаров Л.А., Карчевский О.О., Иванников П.В., Клепиков А.С. // Тр. международного семинара «Теплофизические свойства веществ» (жидкие металлы и сплавы). Нальчик. 2001 г. С. 39.
8. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара (Рек. ГССД, Р7-80). М., 1980.
9. Бергман Г.А., Бучнев Л.М., Петрова И.И. и др. Графит квазимонокристаллический УПВ-1Т. (Таблицы стандартных справочных данных). М., 1991.
10. Зацепина Г.Н. Физические свойства и структура воды. М., 1998.

Поступила в редакцию 16.12.02