

**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ  
О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ  
ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

УДК 537.32.323

**ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

**ПЬЕЗОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ.  
ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ  
КОЭФФИЦИЕНТ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ  
ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ 300 К ДО 900 К**

**ССД СНГ 326–2020 (ГСССД 326–2017)**

|               |  |
|---------------|--|
| РАЗРАБОТАНЫ   | Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК-180 «Межгосударственная служба стандартных справочных данных» |
| ВНЕСЕНЫ       | Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии  |
| АВТОРЫ:       | Г.Г. Гаджиев, Х.Х. Абдуллаев, З.М. Омаров, М-Р.М. Магомедов, А.А. Амирова; Л.А. Резниченко                                   |
| СОГЛАСОВАНЫ   | С национальными органами по стандартизации стран СНГ:  |
| РЕКОМЕНДОВАНЫ | Научно-технической комиссией по метрологии Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации           |
| ПРИНЯТЫ       | Евразийским советом по стандартизации, метрологии и сертификации<br>(протоколом от 2020 г. № 2020)                           |

**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ  
О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ  
ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

---

**Таблицы стандартных справочных данных**

|  |                 |
|--|-----------------|
| Пьезокерамики на основе ниобата лития.         | <b>ССД СНГ</b>  |
| Теплопроводность, теплоемкость и температурный | <b>326–2020</b> |
| коэффициент линейного расширения в диапазоне   | <b>ГСССД</b>    |
| температуры от 300 К до 900 К                  | <b>326–2017</b> |

**Tables of Standard Reference Data**

|   |                 |
|---|-----------------|
| Piezoceramics niobate based lithium. Thermal conductivity,    | <b>SSD CNG</b>  |
| heat capacity and temperature coefficient of linear expansion | <b>326–2020</b> |
| in the temperature range from 300 K to 900 K                  | <b>GSSSD</b>    |
|   | <b>326–2017</b> |

---

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение  | 6  |
| 1. Краткое описание методов экспериментального определения<br>теплофизических свойств керамических материалов   | 9  |
| 2. Расчет теплофизических свойств сегнетокерамических материалов  | 14 |
| 3. Стандартные справочные данные о теплопроводности, теплоемкости<br>и температурном коэффициенте линейного расширения<br>пьезокерамики ПКР-35 ( $\text{Li}_{0.125}\text{Na}_{0.875}\text{NbO}_3$ )                   | 16 |
| 4. Стандартные справочные данные о теплопроводности, теплоемкости<br>и температурном коэффициенте линейного расширения<br>пьезокерамики ПКР-61 ( $0.97\text{LiNbO}_3 + 0.03\text{EuTiO}_3$ )                          | 20 |
| 5. Стандартные справочные данные о теплопроводности, теплоемкости<br>и температурном коэффициенте линейного расширения<br>пьезокерамики ПКР-38 ( $0.97\text{LiNbO}_3 + 0.01\text{B}_2\text{O}_3 + 0.02\text{SiO}_2$ ) | 22 |
| 6. Список литературы  | 24 |

## **ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И РАЗМЕРНОСТЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

$\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения,  $\alpha \cdot 10^6$ ,  $K^{-1}$ ;

$C_p$  – изобарная теплоемкость, Дж/кг·К ;

$\lambda$  - теплопроводность, Вт/м·К;

### **СОКРАЩЕНИЯ:**

ЦТС – цирконат-титаната свинца;

СПМ – сегнетокерамические материалы;

НЩМ – ниобаты щелочных металлов;

ТФС – теплофизические свойства;

ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения;

ПАВ – поверхностные акустические волны;

## ВВЕДЕНИЕ

Большинство пьезосегнетокерамик (сегнетокерамические материалы-СПМ) серийно выпускаемых в мире составляют многокомпонентные системы свинцовосодержащих сложных оксидов на основе твердых растворов цирконата-титаната свинца (ЦТС). Экологические требования к этим пьезокерамикам делает необходимым исключение токсичного оксида свинца из технологического процесса, и изыскать новые пьезоэлектрические материалы по своим свойствам, не уступающим ЦТС керамик.

Многолетний опыт разработки высокоэффективных СПМ в НИИ физики Южного Федерального университета (Ростов н/Д) позволил получать группу безсвинцовых материалов на основе ниобатов щелочных металлов НЦМ (ниобаты лития, натрия), обладающих рядом уникальных свойств не реализуемых в ЦТС составах. [1-7]

Достоинствами таких СПМ являются:

- высокая скорость звука, определяющая высокочастотный (ВЧ) диапазон эксплуатации преобразователя, а также получать заданную частоту на менее тонких пластинах, что упрощает технологию изготовления ВЧ-устройств за счет возможности увеличения их резонансных размеров (это, в свою очередь, выгодно и с точки зрения уменьшения емкости преобразователя);
- низкая плотность, приводящая, с одной стороны, к значительному снижению веса изделий, а с другой – к уменьшению акустического импеданса;
- очень низкая диэлектрическая проницаемость, что немаловажно для электрического согласования с генератором и нагрузкой;
- повышенный толщинный коэффициент электромеханической связи;
- достаточная анизотропия пьезосвойств, что позволяет улучшить отношение сигнал/шум и упростить технологию получения, исключив операцию резки материала;

- низкие диэлектрические и умеренные механические потери, что важно для получения коротких импульсов и равномерных амплитудно-частотных характеристик.

**Пьезосегнетокерамики НЦМ** применяются в устройствах, работающих на основе поверхностных акустических волн (ПАВ), благодаря относительной простоте возбуждения и приема, возможности реализации различных амплитудно-частотных характеристик, малым габаритам, высокой надежности, совместимости с промышленными процессами.

При работе в экстремальных условиях наиболее важное значение имеет поведение теплофизических свойств (ТФС), особенно в областях структурных фазовых переходов, где наблюдаются их аномалии. Поэтому необходимо иметь данные о температурной зависимости теплопроводности, теплоемкости и температурного коэффициента линейного расширения в широком диапазоне температур (в области структурных фазовых переходов необходимо иметь данные о ТФС через один – три градуса).

В данном проекте таблиц представлены экспериментальные данные о температурной зависимости теплопроводности ( $\lambda$ ), теплоемкости ( $C_p$ ) и температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) сегнетопьезокерамик на основе ниобата лития, исследованных в Институте физики ДНЦ РАН совместно с НИИ Физики Южного Федерального университета Ростова-на-Дону.

1. **ПКР-35** - пьезокерамика, твердый раствор  $\text{Na}_{0.875}\text{Li}_{0.125}\text{NbO}_3$ , модифицированный стронцием. Обладает рядом уникальных свойств, не реализуемых в сегнетокерамиках на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС): низкая плотность, высокая скорость ультразвука и достаточно высокие пьезохарактеристики при чрезвычайно низкой диэлектрической проницаемости, широкий диапазон механической добротности, высокая температура Кюри, что делает незаменимым для сверхвысокочастотной пьезотехники.

**2. ПКР-61** - пьезокерамика на основе твердых растворов ниобата лития ( $0.97\text{LiNbO}_3 + 0.03\text{EuTiO}_3$ ), модифицированный другими химическими элементами.

По сравнению с ЦТС - керамиками обладает высокой температурой Кюри ( $t > 1200^\circ\text{C}$ ), низкой плотностью и высокой скоростью ультразвука. Она имеет повышенную рабочую температуру до  $950^\circ\text{C}$  и крайне низкую диэлектрическую проницаемость, особенно благоприятную при использовании в высокочастотных устройствах (пьезодатчики быстроменяющихся давлений генераторного типа в системах контроля объектов, испытывавших экстремальные внешние воздействия)  $t > 930^\circ\text{C}$ ,  $P > 200\text{МПа}$ . Конкретно: высокотемпературные датчики давления.

**3. ПКР-38** - пьезокерамика ( $0.97\text{LiNbO}_3 + 0.01\text{B}_2\text{O}_3 + 0.02\text{SiO}_2$ ) на основе твердых растворов ниобатов лития, является высокотемпературным материалом,  $t_k > 1200^\circ\text{C}$ , рабочая температура  $> 1000^\circ\text{C}$ . Отличительная особенность: в интервале от комнатной температуры до  $1000^\circ\text{C}$  отсутствуют структурные переходы. Она очень чувствительна к изменению давления, влажности и температуры. На его основе можно создать пьезодатчики для кожухов ТВЭЛ (атомных реакторов на быстрых нейтронах), которые способны с высокой точностью регулироваться системой охлаждения (температура кожуха больше  $600^\circ\text{C}$ ).

Имеются достаточное количество работ, посвященных исследованию структуры, пьезосегнетоэлектрических и упругих свойств, возможностей применения и создания промышленных пьезодатчиков.

Однако, исследования их теплофизических свойств (теплопроводность, теплоемкость, температурный коэффициент линейного расширения) в научно-технической литературе не представлены. Принцип работы в экстремальных условиях (высокие температура, давление, влажность) в большой степени зависят от характера и изменения теплофизических свойств. Без наличия точных данных о температурной зависимости ТФС, характера их изменений,



связанных со структурными фазовыми переходами, не возможно конструировать пьезодатчики с заданными свойствами.

Данные таблицы дадут возможность технологам при синтезе получать керамику с заданными свойствами, а разработчикам пьезокерамических устройств выбрать оптимальный режим их работы (температурная область, фазовые переходы, долговечность работы при различных режимах нагрева и охлаждения, способность выдерживать тепловые и ударные нагрузки).

В представляемом проекте таблиц приведены экспериментальные данные, полученные авторами. Они будут востребованы технологиями при разработке новых пьезосегнетокерамик, а также при создании устройств для УЗ - преобразователей. Отдельные результаты исследований опубликованы в журналах и трудах международных конференций.

## **1. Краткое описание методов экспериментального определения теплофизических свойств сегнетокерамических материалов СПМ**

Существуют различные экспериментальные методы определения теплофизических свойств (ТФС) материалов в зависимости от температуры. Наиболее надежными экспериментальными методами определения ТФС являются стационарные.

В Институте физики Дагестанского научного центра Российской академии наук (ИФ ДНЦ РАН) разработаны оригинальные установки для экспериментальных исследований коэффициентов теплопроводности, удельной теплоемкости при постоянном давлении и температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) в широком диапазоне температур от 300 до 900 К. [8-10].

Определение температурной зависимости удельной теплоемкости проводилось на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 204 F1

Phoenix немецкой фирмы NETZSCH.. Погрешность в исследованном интервале температур составляет 3 %.

Теплопроводность определялась абсолютным компенсационным методом в стационарном режиме по методике, аттестованной Государственной службой стандартных справочных данных [8,9]. Общая погрешность определения теплопроводности при 900 К составляла 5 %. Подробный анализ методики определения теплопроводности описан в [9].

Температурный коэффициент линейного расширения определяли емкостным dilatометром, разработанным в ИФ ДНЦ. Суммарная погрешность измерения ТКЛР с учетом погрешности определения размеров образца, температуры и постоянной установки не превышает 3%, с доверительной вероятностью 0.95. [10]

Для определения теплопроводности в стационарном тепловом режиме существуют различные варианты абсолютного компенсационного метода, где компенсация тепловых потерь осуществляется компенсационными экранами и контролируется проволоочными или полупроводниковыми датчиками температуры.

Наиболее чувствительными датчиками оказались система металл-полупроводник-металл (поверхностная дифференциальная термопара), где чувствительность на порядок выше, чем у проволоочных датчиков.

Х.И.Амирханов впервые в качестве полупроводникового слоя для определения теплопроводности (абсолютный компенсационный метод в стационарном режиме) использовал закись меди и создал оригинальный прибор медь - закись меди - медь. Недостатком этого прибора являлась одноразовость использования (необходимость замены закиси меди при каждом измерении).

В дальнейшем этот метод авторами был усовершенствован для увеличения температурного диапазона измерений до 1400К и многократного использования.

В этом приборе вместо закиси меди применен полупроводниковый твердый раствор на основе сульфида гадолиния, преимущество которого:

многократное использование, измерение теплопроводности изоляторов, полупроводников, металлов (от 0.2 до 150 Вт/мК), высокий температурный диапазон - от 300 до 1600К.

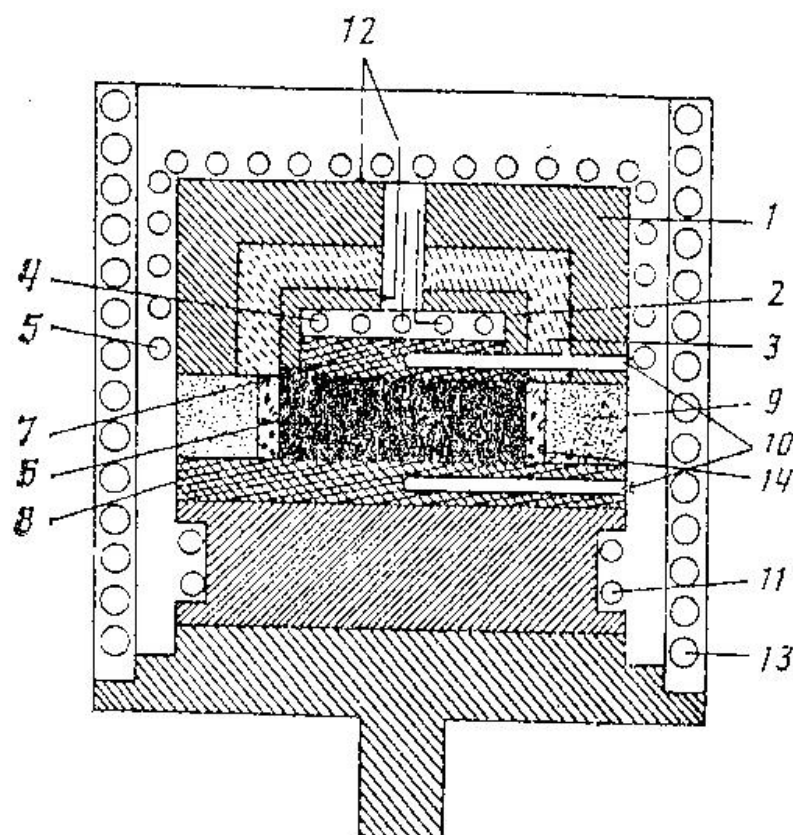


Рисунок 1 – Принципиальная схема прибора для определения теплопроводности твердых тел и их расплавов при высоких температурах абсолютным компенсационным методом плоского слоя

Предлагаемый вариант прибора для измерения теплопроводности при высоких температурах имеет меньшую погрешность (8% при 1500 К) измерения по сравнению с погрешностями других методов и приборов при этих температурах (от 10 до 15%).

Прибор состоит из двух цилиндров-стаканов из нержавеющей стали 1, 2, между которыми запрессован слой тугоплавкого полупроводника-сульфида гадолиния 3. Они образуют высокотемпературную дифференциальную поверхностную термопару для контроля компенсации тепловых утечек с поверхности градиентного нагревателя 4,

вмонтированного внутри меньшего стакана. Компенсационный нагреватель 5 намотан на поверхность внешнего стакана - второго электрода дифференциальной термопары, тщательно изолировав его от корпуса прибора. Образец исследуемого вещества 6 в виде таблетки диаметром, равным диаметру градиентного нагревателя - меньшего стакана, зажат между рабочими поверхностями прибора 7 и холодильника 8 и засыпан теплоизоляционным материалом – ультралегковесом 9 для уменьшения тепловых потерь с боковой поверхности. Перепад температуры на образце исследуемого материала измеряется двумя вольфрам-рениевыми термопарами 10. Регулировка градиента температуры на образце осуществляется высокоточным регулятором температуры РИФ 101 с помощью нагревателя 13. При исследовании теплопроводности расплавов образец закладывается в кварцевое кольцо-контейнер 14. Выводы 12 от термоэлектродов поверхностной термопары подводятся к чувствительному гальванометру или потенциометру. Фиксируя с большой точностью (0,01 К) разность температур между поверхностями градиентного и компенсационного нагревателей и регулируя мощность компенсационного нагревателя, можно добиться нулевой разности температур между ними, что свидетельствует об отсутствии тепловых утечек с корпуса градиентного нагревателя.

Тепловой поток  $Q=IU$ , выделяемый градиентным нагревателем, при компенсации тепловых утечек компенсационным нагревателем проходит через образец. По перепаду температуры на образце  $\Delta T$ , геометрическим размерам образца ( $\Delta l$  - толщина,  $\Delta S$  - площадь сечения) и мощности теплового потока коэффициент теплопроводности определяется: по  $\lambda = \frac{N}{\Delta T} \frac{\Delta l}{\Delta S}$  где  $N=IU$  (I-ток, U-падение напряжения). Оба параметра измеряются компаратором напряжения с точностью 0.001 А и 0.001В.\*)

Погрешность измерения теплопроводности с учетом неконтролируемых тепловых потерь, погрешностей измерения температур термопарами, тока и

\*) Сила тока в цепи измерялась с точностью 0,001 А автономно : высокоточный источник постоянного тока В5-45, последовательно миллиамперметр стрелочный М1104, класса точности 0,01, далее Щ 300.

напряжения на градиентной печи и контактного теплового сопротивления с поверхностями образец – графит – образец составляет 5% при 1200К.

Коэффициент теплового расширения измерялся емкостным dilatометром, разработанным в нашем институте.

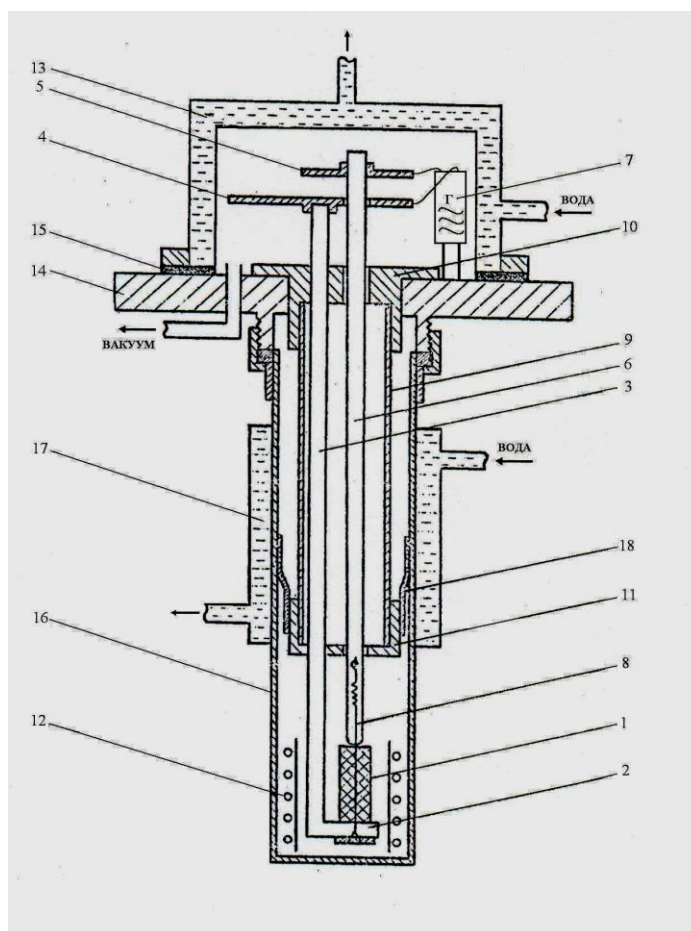


Рисунок 2 – Схема установки для измерения КТЛР

На рисунке 2 представлена принципиальная схема измерительной ячейки установки для измерения коэффициента теплового линейного расширения (КТЛР). Установка состоит из следующих основных узлов: Высокостабильный генератор синусоидальных колебаний на 7-15МГц, кварцевая двухтрубная ячейка, блок измерения и управления тепловым режимом образцов, система термостатирования.

Нагрев образца приводит к перемещению подвижного штока, в результате чего изменяется емкость измерительного конденсатора, что приводит к изменению частоты колебаний высокочастотного генератора.

Суммарная погрешность измерения КЛТР этой установки, с учетом погрешности измерений размеров образца, температуры и постоянной установки не превышает 3%, доверительная вероятность 0,95. Были проведены контрольные измерения КТР образцов поликристаллического молибдена, серебра, алюминия размерами 5 мм и 10 мм.

Наши экспериментальные данные имеют хорошее согласие с литературными данными для вольфрама, молибдена, кварца.

## **2. Расчет теплофизических свойств сегнетокерамических материалов**

1. Измерение температурной зависимости удельной теплоемкости проводилось на дифференциальном сканирующем калориметре ДСК 204.F1 немецкой фирмы NETZCH. Погрешность в исследованном интервале температур составляет 3%. Индивидуальные значения  $C_p$  при разных температурах определяются согласно следующему уравнению:

$$C_{p,T}(S) = \frac{m_{std}}{m_s} \frac{DSC_s(T) - DSC_{bl}(T)}{DSC_{std}(T) - DSC_{bl}(T)} \cdot C_{p,T}(std)$$

$C_{p,T}(S)$  – удельная теплоемкость образца при температуре  $T$

$C_{p,T}(std)$  – удельная теплоемкость стандарта при температуре  $T$

$m_{std}$  – вес стандарта

$m_s$  – вес образца

$DSC_s$  – величина сигнала ДСК при температуре  $T$  из кривой образца

$DSC_{std}$  – величина сигнала ДСК при температуре  $T$  из кривой стандарта

$DSC_{bl}$  – величина сигнала ДСК при температуре  $T$  из базовой линии

2. Температурный коэффициент линейного расширения определяли емкостным дилатометром, разработанным в ИФ ДНЦ РАН.

Формула для определения ТКЛР:

$$\alpha = \frac{\Delta f}{k \Delta T \ell_0},$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения;

$\Delta f$  – изменение частоты, приходящееся на изменение температуры  $\Delta T$

$\ell_0$  – размеры образца при  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}=293\text{ K}$

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{\Delta f}{k \ell_0}$$

$k$  – чувствительность установки (постоянная)

Установка проградуирована на образцах:

медь - 99.9% чистоты и молибден - 99.95% чистоты

Например: при  $T=400\text{ K}$  - для меди

$$\alpha = 17.4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$$

$$k = \frac{\Delta \ell}{\alpha \Delta T \ell_0}$$

$$\Delta f \approx 2 \cdot 10^4 \text{ Гц}$$

$$\Delta T = 10 \text{ K}$$

$$\ell_0 = 10 \text{ мм} = 10^{-2} \text{ м}$$

$$k = \frac{2 \cdot 10^4 \text{ Гц}}{(17.4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}) \cdot (10 \text{ K}) \cdot 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 11.5 \cdot 10^9 \text{ Гц/м} \approx 11.5 \cdot 10^6 \text{ Гц/мм}$$

$$\alpha = \frac{\Delta f}{k \Delta T \cdot \ell_0} \approx 17.39 \text{ K}^{-1}$$

3. Температуропроводность и теплопроводность определяли методом лазерной вспышки (Flech met). На нашей установке одновременно измеряются  $\lambda$ ,  $C_p$  и  $a$ . Формула расчета теплопроводности  $\lambda = a C_p \rho$  ( $a$  - температуропроводность,  $C_p$  – теплоемкость,  $\rho$  – плотность)

Измерения проводили по специальной программе, где на мониторе компьютера и в памяти записываются данные и выдаются в виде графиков и таблиц.

**3. Стандартные справочные данные о теплопроводности, теплоемкости и температурном коэффициенте линейного расширения пьезокерамики ПКР-35 ( $\text{Li}_{0.125}\text{Na}_{0.875}\text{NbO}_3$ )**

Таблица 1

| T, K | $\lambda$ , Вт/м·К | $C_p$ , Дж/кг·К | $\alpha \cdot 10^6$ , $\text{K}^{-1}$ |
|------|--------------------|-----------------|---------------------------------------|
| 300  | 2,85               | 619             | 9,56                                  |
| 320  | 2,92               | 636             | 10,32                                 |
| 340  | 2,98               | 651             | 10,7                                  |
| 360  | 3,02               | 664             | 10,87                                 |
| 380  | 3,09               | 676             | 10,94                                 |
| 400  | 3,14               | 686             | 11,1                                  |
| 420  | 3,19               | 694             | 11,21                                 |
| 440  | 3,7                | 704             | 11,36                                 |
| 460  | 3,35               | 713             | 11,52                                 |
| 480  | 3,44               | 720             | 11,64                                 |
| 490  | 3,47               | 724             | 11,84                                 |
| 500  | 3,50               | 729             | 11,95                                 |
| 510  | 3,52               | 732             | 12,04                                 |
| 520  | 3,60               | 737             | 12,1                                  |
| 530  | 3,70               | 740             | 12,24                                 |
| 540  | 3,73               | 744             | 12,1                                  |
| 550  | 3,79               | 746             | 12,0                                  |
| 560  | 3,32               | 754             | 12,0                                  |
| 565  | 3,86               | 758             | 11,92                                 |
| 570  | 3,87               | 770             | 10,86                                 |
| 571  | 3,87               | 780             | 10,7                                  |
| 572  | 3,88               | 793             | 10,56                                 |
| 573  | 3,88               | 822             | 10,0                                  |
| 574  | 3,89               | 896             | 9,34                                  |
| 575  | 3,91               | 992             | 9,00                                  |
| 576  | 3,92               | 1039            | 8,85                                  |
| 577  | 3,94               | 1018            | 8,60                                  |
| 578  | 3,94               | 973             | 8,38                                  |
| 579  | 3,94               | 930             | 8,10                                  |
| 580  | 3,95               | 896             | 7,98                                  |



Продолжение таблицы 1

| T, K | $\lambda$ , Вт/м·K | $C_p$ , Дж/кг·K | $\alpha \cdot 10^6$ , K <sup>-1</sup> |
|------|--------------------|-----------------|---------------------------------------|
| 581  | 3,964              | 868             | 7,84                                  |
| 582  | 3,968              | 842             | 7,7                                   |
| 583  | 3,97               | 832             | 7,59                                  |
| 584  | 3,99               | 821             | 7,16                                  |
| 585  | 4,00               | 812             | 6,94                                  |
| 586  | 4,01               | 805             | 6,73                                  |
| 587  | 4,02               | 800             | 6,48                                  |
| 588  | 4,03               | 794             | 6,4                                   |
| 589  | 4,024              | 792             | 6,0                                   |
| 590  | 4,028              | 790             | 5,38                                  |
| 595  | 4,06               | 787             | 4,21                                  |
| 600  | 4,13               | 784             | 1,38                                  |
| 605  | 4,14               | 790             | 1,09                                  |
| 610  | 4,19               | 794             | 0,47                                  |
| 612  | 4,21               | 800             | 0,32                                  |
| 613  | 4,22               | 806             | 0,21                                  |
| 615  | 4,24               | 819             | 0,16                                  |
| 616  | 4,25               | 832             | 0,0                                   |
| 617  | 4,26               | 866             | -1,22                                 |
| 618  | 4,27               | 965             | -6,15                                 |
| 619  | 4,28               | 950             | -8,22                                 |
| 620  | 4,28               | 908             | -12,10                                |
| 621  | 4,29               | 863             | -24                                   |
| 622  | 4,31               | 832             | -64                                   |
| 623  | 4,322              | 811             | -85                                   |
| 624  | 4,33               | 797             | -70                                   |
| 625  | 4,34               | 787             | -47                                   |
| 627  | 4,37               | 775             | -30                                   |
| 630  | 4,40               | 767             | -2,8                                  |
| 635  | 4,50               | 763             | 8,2                                   |
| 640  | 4,64               | 760             | 11,36                                 |
| 650  | 4,69               | 760             | 12,6                                  |
| 660  | 4,78               | 760             | 12,74                                 |
| 670  | 4,83               | 761             | 12,81                                 |
| 680  | 4,88               | 763             | 12,9                                  |
| 690  | 4,92               | 766             | 13,08                                 |
| 700  | 4,973              | 769             | 13,2                                  |

Окончание таблицы 1

| T, K | $\lambda$ , Вт/м·К | $C_p$ , Дж/кг·К | $\alpha \cdot 10^6$ , K <sup>-1</sup> |
|------|--------------------|-----------------|---------------------------------------|
| 710  | 4,99               | 776             | 13,32                                 |
| 720  | 5,04               | 780             | 13,4                                  |
| 740  | 5,18               | 783             | 13,51                                 |
| 760  | 5,22               | 787             | 13,56                                 |
| 780  | 5,28               | 789             | 13,62                                 |
| 800  | 5,33               | 790             | 13,73                                 |
| 820  | 5,38               | 792             | 13,87                                 |
| 840  | 5,43               | 793             | 14,0                                  |
| 860  | 5,49               | 792             | 14,13                                 |
| 880  | 5,52               | 790             | 15,29                                 |
| 900  | 5,56               | 790             | 15,4                                  |

На рис. 3 представлена температурная зависимость теплоемкости в области структурных фазовых переходов.

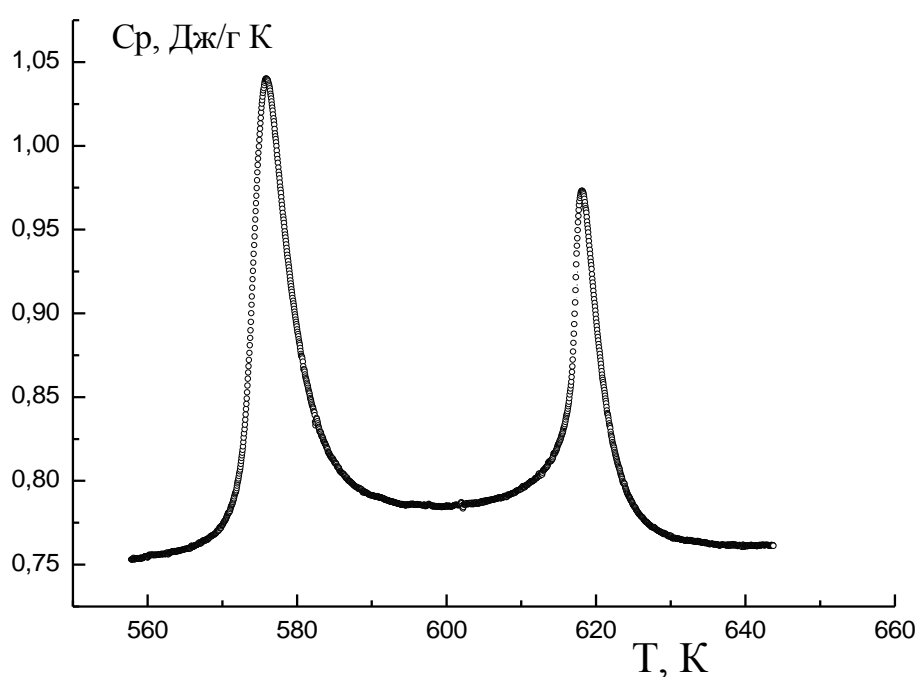


Рисунок 3 – Температурная зависимость изобарной теплоемкости ПКР-35

От 300 до 565 К  $C_p$  растет и удовлетворительно согласуется с уравнением Меера-Келли:  $C_p(T) = a + bT - cT^{-2}$ , где  $C_p(T) = 545/8 + 0.332T - 5,476T^{-2}$ . Расхождения между экспериментальными и расчетными данными составляло  $\pm 2\%$ .

Выше 565K наблюдается резкий рост  $C_p$  с пиком при 576K (1039 Дж/кг\*К), связанный со структурным изменением (содержание ромбической и ромбоэдрической фаз). Далее резкое, уменьшение до 509K, где происходит уменьшение  $P_2$  и  $P$  фаз и частичному переходу к тетрагональной структуре,

От 612 до 618K  $C_p$  с максимумом 965 Дж/кг\*К (температура Кюри). В этой области от тетрагональной структуры состав переходит к псевдокубическую фазу, где происходит сжатие решетки.

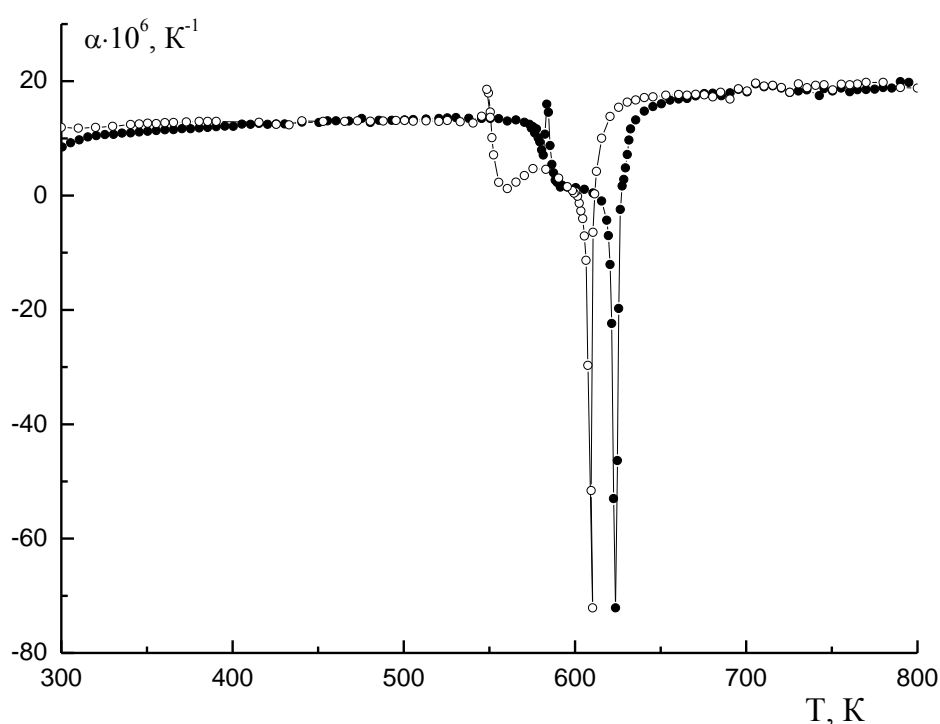


Рисунок 4 – Температурная зависимость ТКЛР ПКР-35.

От 300 до 550K ТКЛР почти не изменяется (инварный эффект). Далее наблюдается резкое уменьшение ТКЛР с минимумом при 625 K (гигантское отрицательное значение до минус 90 K<sup>-1</sup>). Это связано со сжатием кристаллической структуры от тетрагональной к псевдокубической структуре. При обратном ходе температура минимума смещается в сторону низкой температуры приблизительно на 5 K.

**4. Стандартные справочные данные о теплопроводности, теплоемкости и температурном коэффициенте линейного расширения пьезокерамики ПКР-61 ( $0.97\text{LiNbO}_3+0.03\text{EuTiO}_3$ )**

Таблица 2

| T, К | $\lambda$ , Вт/м·К | $C_p$ , Дж/кг·К | $\alpha \cdot 10^6$ , $K^{-1}$ |
|------|--------------------|-----------------|--------------------------------|
| 300  | 2,80               | 572             | 8,25                           |
| 320  | 2,84               | 596             | 8,36                           |
| 340  | 2,88               | 615             | 8,48                           |
| 360  | 2,93               | 632             | 8,64                           |
| 380  | 2,97               | 646             | 8,80                           |
| 400  | 3,02               | 657             | 9,00                           |
| 420  | 3,07               | 668             | 9,08                           |
| 440  | 3,12               | 677             | 9,03                           |
| 460  | 3,18               | 687             | 8,87                           |
| 480  | 3,25               | 696             | 9,62                           |
| 500  | 3,31               | 705             | 9,73                           |
| 510  | 3,34               | 707             | 9,77                           |
| 515  | 3,37               | 710             | 9,84                           |
| 520  | 3,40               | 712             | 9,83                           |
| 525  | 3,45               | 714             | 9,87                           |
| 530  | 3,37               | 717             | 9,92                           |
| 540  | 3,28               | 720             | 9,95                           |
| 550  | 3,18               | 723             | 10,03                          |
| 560  | 3,10               | 727             | 10,06                          |
| 570  | 3,13               | 731             | 10,13                          |
| 580  | 3,18               | 734             | 10,21                          |
| 590  | 3,23               | 737             | 10,32                          |
| 600  | 3,30               | 741             | 10,40                          |
| 610  | 3,36               | 744             | 10,48                          |
| 620  | 334                | 747             | 10,57                          |
| 630  | 347                | 750             | 10,66                          |
| 640  | 3,54               | 753             | 10,75                          |
| 650  | 3,61               | 757             | 10,87                          |
| 660  | 3,67               | 760             | 10,92                          |
| 670  | 3,72               | 762             | 1106                           |
| 680  | 3,77               | 765             | 11,18                          |

Окончание таблицы 2

| T, K | $\lambda$ , Вт/м·К | $C_p$ , Дж/кг·К | $\alpha \cdot 10^6$ , K <sup>-1</sup> |
|------|--------------------|-----------------|---------------------------------------|
| 690  | 3,82               | 768             | 11,33                                 |
| 700  | 3,89               | 772             | 11,39                                 |
| 710  | 3,94               | 774             | 11,5                                  |
| 720  | 4,00               | 776.4           | 10,63                                 |
| 730  | 4,05               | 779.3           | 10,78                                 |
| 740  | 4,12               | 782.5           | 10,87                                 |
| 750  | 4,15               | 784.2           | 11,98                                 |
| 760  | 4,20               | 787             | 12,10                                 |
| 770  | 4,24               | 789             | 12,28                                 |
| 780  | 4,29               | 791             | 12,40                                 |
| 790  | 4,33               | 793             | 12,50                                 |
| 800  | 4,37               | 795             | 12,61                                 |
| 810  | 4,43               | 797             | 12,69                                 |
| 820  | 4,47               | 799             | 12,82                                 |
| 830  | 4,51               | 800             | 12,96                                 |
| 840  | 4,55               | 802             | 13,12                                 |
| 850  | 4,60               | 803             | 13,29                                 |
| 860  | 4,64               | 804             | 13,38                                 |
| 870  | 4,67               | 806             | 13,47                                 |
| 880  | 4,72               | 808             | 13,59                                 |
| 890  | 4,75               | 809             | 13,73                                 |
| 900  | 4,79               | 812             | 13,82                                 |

В ПКР-61, теплопроводность от 300 до 520K растет почти линейно, однако от 525 до 572K наблюдается ее уменьшение, связанное с вкладом теплосопротивления на примесных центрах, далее ее линейный рост. Теплоемкость удовлетворительно согласуется с расчетными данными по уравнению  $C_p(T) = 545,8 + 0,322T - 5,45 \cdot 10^{-5}T^2$ .

На температурной зависимости ТКЛР аномалии не наблюдалось, ТКЛР растет почти линейно.

**5. Стандартные справочные данные о теплопроводности, теплоемкости и температурном коэффициенте линейного расширения пьезокерамики ПКР-38(0.97LiNbO<sub>3</sub>+0.01B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0.02SiO<sub>2</sub>)**

Таблица 3

| T, К | $\lambda$ , Вт/м·К | $C_p$ , Дж/кг·К | $\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup> |
|------|--------------------|-----------------|---------------------------------------|
| 300  | 5,7                | 544             | 9,05                                  |
| 320  | 5,62               | 556             | 9,17                                  |
| 340  | 5,5                | 572             | 9,3                                   |
| 360  | 5,42               | 587             | 9,68                                  |
| 380  | 5,33               | 601             | 10,17                                 |
| 400  | 5,25               | 612             | 10,48                                 |
| 420  | 5,17               | 624             | 10,79                                 |
| 440  | 5,14               | 635             | 11,03                                 |
| 442  | 5,12               | 637             | 11,12                                 |
| 445  | 5,1                | 640             | 11,14                                 |
| 450  | 5,07               | 662             | 11,2                                  |
| 455  | 5,04               | 673             | 11,28                                 |
| 460  | 5,01               | 670             | 11,38                                 |
| 465  | 4,98               | 675             | 11,42                                 |
| 470  | 4,94               | 655             | 11,5                                  |
| 475  | 4,93               | 650             | 11,58                                 |
| 480  | 4,95               | 660             | 11,65                                 |
| 485  | 4,91               | 666             | 11,72                                 |
| 490  | 4,90               | 674             | 11,81                                 |
| 500  | 4,88               | 680             | 11,96                                 |
| 520  | 4,81               | 693             | 12,24                                 |
| 540  | 4,77               | 702             | 12,55                                 |
| 560  | 4,71               | 708             | 12,84                                 |
| 580  | 4,68               | 713             | 13,12                                 |
| 600  | 4,63               | 719             | 13,40                                 |
| 610  | 4,62               | 723             | 13,56                                 |
| 620  | 4,61               | 726             | 13,70                                 |
| 630  | 4,59               | 730             | 13,86                                 |
| 640  | 4,58               | 734             | 14,00                                 |

## Окончание таблицы 3

| T, К | $\lambda$ , Вт/м·К | $C_p$ , Дж/кг·К | $\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup> |
|------|--------------------|-----------------|---------------------------------------|
| 645  | 4,58               | 736             | 13,95                                 |
| 650  | 4,57               | 738             | 14,16                                 |
| 655  | 4,55               | 742             | 14,22                                 |
| 660  | 4,56               | 748             | 14,28                                 |
| 665  | 4,54               | 754             | 14,38                                 |
| 670  | 4,54               | 754             | 14,42                                 |
| 680  | 4,53               | 758             | 14,52                                 |
| 690  | 4,54               | 763             | 14,64                                 |
| 700  | 4,55               | 768             | 14,82                                 |
| 710  | 4,55               | 772             | 14,86                                 |
| 720  | 4,56               | 777             | 14,80                                 |
| 730  | 4,57               | 779             | 15,00                                 |
| 740  | 4,58               | 782             | 15,02                                 |
| 750  | 4,59               | 781             | 15,10                                 |
| 760  | 4,6                | 785             | 15,13                                 |
| 770  | 4,60               | 786             | 15,28                                 |
| 780  | 4,62               | 787             | 15,26                                 |
| 800  | 4,65               | 790             | 15,40                                 |
| 810  | 4,66               | 791             | 15,52                                 |
| 820  | 4,68               | 792             | 15,52                                 |
| 830  | 4,68               | 792             | 15,68                                 |
| 840  | 4,7                | 793             | 15,65                                 |
| 850  | 4,71               | 793             | 15,82                                 |
| 860  | 4,75               | 794             | 15,79                                 |
| 870  | 4,76               | 794             | 15,93                                 |
| 880  | 4,79               | 795             | 15,93                                 |
| 890  | 4,81               | 795             | 16,03                                 |
| 900  | 4,84               | 796             | 16,07                                 |

Этот твердый раствор имеет упорядоченную структуру и теплопроводность с температурой от 300 до 680К уменьшается как  $\lambda = CT^{-0,8}$ , где  $C=113$ . Далее  $\lambda$  до 900К растет почти линейно. Теплоемкость в этой области растет как  $C_p(T)=610+6,52 \cdot 10^{-3}T-4,282 \cdot 10^{-5}T^2$ .

ТКЛР во всем интервале температуры растет линейно.

## 6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. " Г.А.Смоленский и др. Физика сегнетоэлектрических явлений. // Л: Наука, 1985. 296с.
2. И.А.Вербенко, Л.А. Резниченко. Развитие бессвинцовых сегнетопьезоматериалов на рубеже тысячелетия (обзор). // Тр. Международного симпозиума «Бессвинцовая сегнетопьезокерамика и родственные материалы», Ростов н/Д, 2014. С. 1-12.
3. И.А.Вербенко. Бессвинцовая керамика развитие, направления, получение, свойства (ретроспектива-современность-прогнозы). // Тр. Международного симпозиума «Бессвинцовая сегнетопьезокерамика и родственные материалы», Ростов н/Д, 2012. С.
4. Л.А.Резниченко, Г.Г.Гаджиев, С.Н.Каллаев, З.М.Омаров, Х.Х.Абдуллаев. Фазовые переходы, диэлектрические, пьезоэлектрические, тепловые свойства бессвинцовой керамики на основе ниобатов щелочных металлов // Неорг. Матер. 2008. №11. С.1246-1260.
5. Г.Г.Гаджиев, З.М.Омаров, Х.Х.Абдуллаев, М.-Р.М.Магомедов. Особенности теплофизических свойств ПКР-35. // Тр.межд. конф. “Фазовые переходы и критические явления в конденсированных средах” Махачкала, 2010. С.191-195.
6. О.Ю.Кравченко, Л.А.Резниченко, Г.Г.Гаджиев. Свойства керамики  $\text{Na}_{0.875}\text{LiNbO}_3$  // Неорганические материалы. 2008. №10. С.305-309.
7. О.Ю.Кравченко, Г.Г.Гаджиев и др. Фазовый состав, микроструктура и свойства керамики  $\text{Na}_{1-x}\text{LiNbO}_3$  // Неорганические материалы. 2011. №6. С.758-764.
8. Я.Б.Магомедов, Г.Г.Гаджиев. Прибор для измерения высокотемпературной теплопроводности твердых тел и их расплавов // Теплофизика высоких температур. 1990. №1. С.185.
9. Гаджиев Г.Г., Х.И.Амирханов, Магомедов Я.Б., П.В.Попов «Методика экспериментального определения теплопроводности полупроводников и их



расплавов в диапазоне температур 300...900 К». М.: “СТАНДАРТИНФОРМ” 1989. (ГСССД МЭ 66-89).

10. И.К.Камилов, М.-Р.М.Магомедов, З.М.Омаров. Автоматизированная установка для измерения коэффициента теплового расширения твердых тел // Приборы и техника эксперимента. 2007. №4. С.165.