

**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 (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 теплофизических свойств керамических материалов	9
2. Расчет теплофизических свойств сегнетокерамических материалов	14
3. Стандартные справочные данные о теплопроводности, теплоемкости и температурном коэффициенте линейного расширения пьезокерамики ПКР-35 ( $\text{Li}_{0.125}\text{Na}_{0.875}\text{NbO}_3$ )	16
4. Стандартные справочные данные о теплопроводности, теплоемкости и температурном коэффициенте линейного расширения пьезокерамики ПКР-61 ( $0.97\text{LiNbO}_3 + 0.03\text{EuTiO}_3$ )	20
5. Стандартные справочные данные о теплопроводности, теплоемкости и температурном коэффициенте линейного расширения 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 НЩМ (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 проволочными или полупроводниковыми датчиками температуры.

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

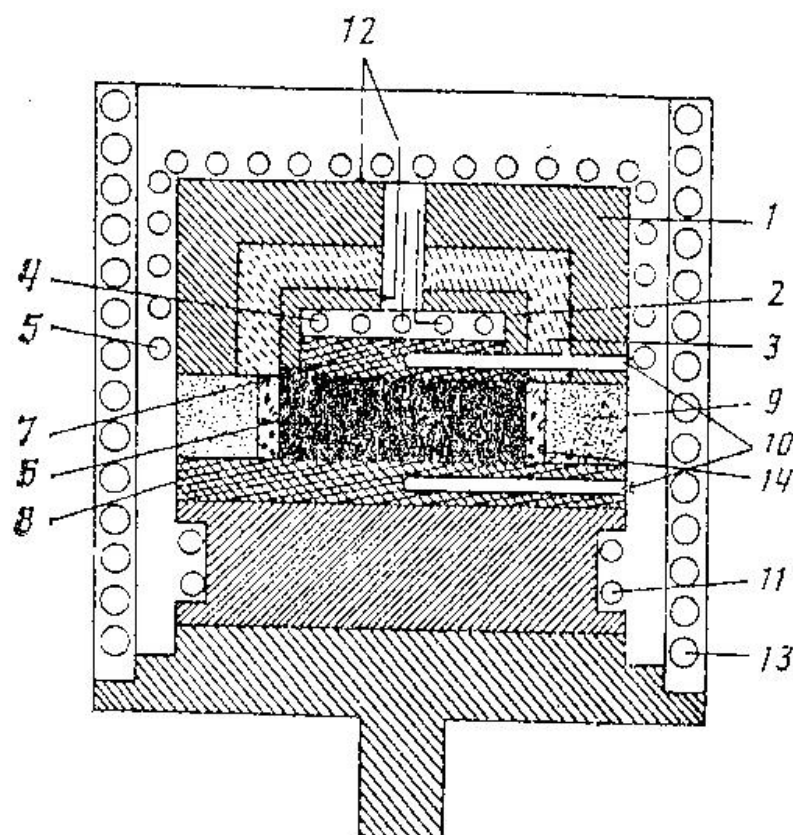


Рисунок 1 – Принципиальная схема прибора для определения теплопроводности твердых тел и их расплавов при высоких температурах абсолютным компенсационным методом плоского слоя

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



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, К	$\lambda$ , Вт/м·К	$C_p$ , Дж/кг·К	$\alpha \cdot 10^6$ , К <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.

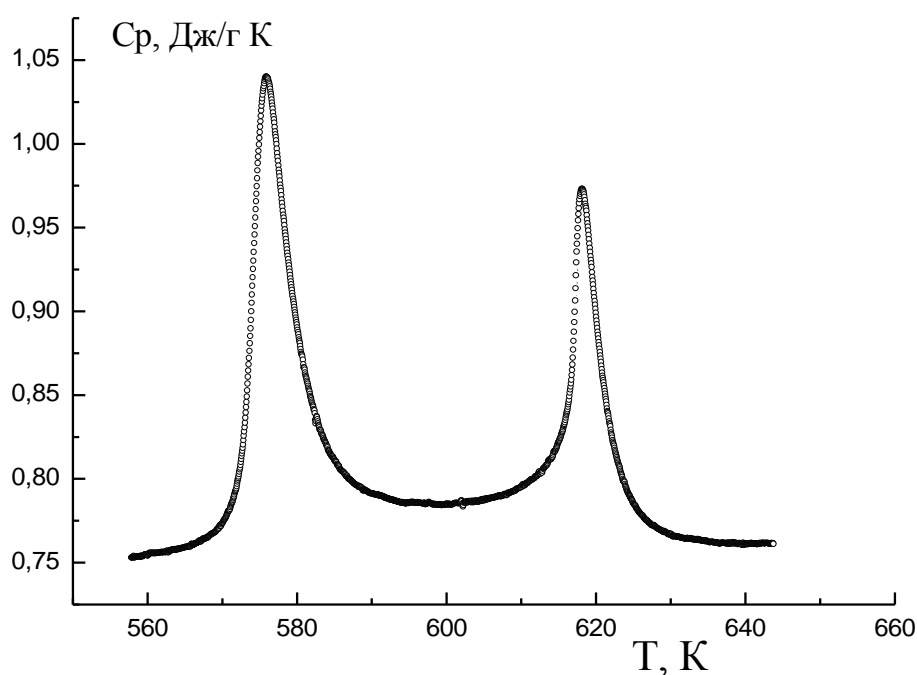


Рисунок 3 – Температурная зависимость изобарной теплоемкости ПКР-35

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.

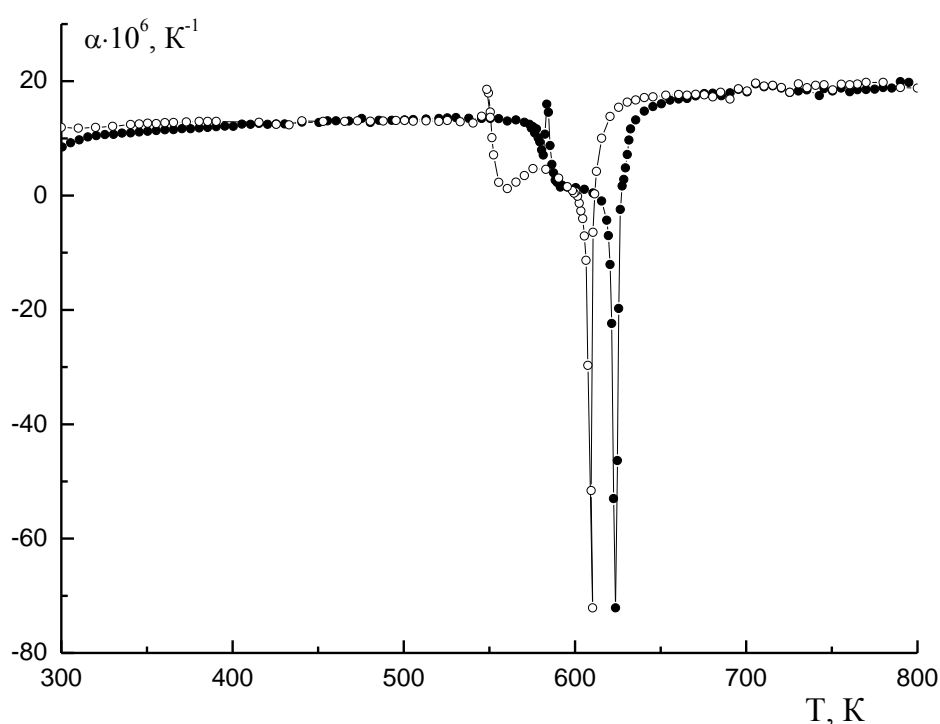


Рисунок 4 – Температурная зависимость ТКЛР ПКР-35.

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	$\alpha \cdot 10^6$ , $\text{K}^{-1}$
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.