

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ**

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА  
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ  
(ГСССД)**

Разрешаю на денонацию  
Генеральный директор  
ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»  
 А. А. Коровайцев  
 «31» октября 2013 г.

УДК 669./539.5 -536.6/

**ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

**Сегнетопьезокерамики на основе  $(1-x)(\text{K},\text{Na})(\text{Nb},\text{Ta})\text{O}_3+x\text{LiSbO}_3$   
+модификатор. Температура Кюри, диэлектрические и  
пьезоэлектрические свойства в диапазоне температур  $(300\div 700)$  К**

**ГСССД 279 – 2013**

**(ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, тема RU.3.052-2014)**

Москва – 2013

РАЗРАБОТАНЫ ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» с участием специалистов Научно - исследовательского института физики Южного федерального университета д-ра. физ.-мат. наук Л.А. Резниченко, канд. физ.-мат. наук К. П. Андриюшина, канд. физ.-мат. наук И. А. Вербенко, канд. физ.-мат. наук И.Н. Андриюшина, А. В. Павленко

ОДОБРЕНЫ экспертной комиссией в составе:

докт. физ.-мат. наук Е. М. Панченко,  
канд. физ.-мат. наук С. В. Титова,  
канд. физ.-мат. наук А. А. Есиса,  
канд. техн. наук П. В. Попова

ПОДГОТОВЛЕНЫ к утверждению Российским научно-техническим центром информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»)

УТВЕРЖДЕНЫ Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии **«31» октября 2013 г. (протокол № 3)**

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА  
СТАНДАРТНЫХ СПРАВЧНЫХ ДАННЫХ**

---

**Таблицы стандартных справочных данных**

Сегнетопъезокерамики на основе  $(1-x)(\text{K},\text{Na})(\text{Nb},\text{Ta})\text{O}_3+x\text{LiSbO}_3$  +модификатор.  
Температура Кюри, диэлектрические и  
пьезоэлектрические свойства в диапазоне  
температур  $(300\div 700)$  К

**ГСССД  
279 —2013**

**Tables of Standard Reference Data**

Dielectric, piezoelectric and elastic properties and  
Curie temperature of ferroelectric ceramics based on the  
system  $(1-x)(\text{K},\text{Na})(\text{Nb},\text{Ta})\text{O}_3+x\text{LiSbO}_3$  + modifier in  
temperature range  $(300\div 700)$  K

**GSSSD  
279—2013**




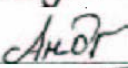

---

## ДЕПОНИРОВАННАЯ РУКОПИСЬ

УДК 669./539.5 – 536.6/

Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 279–2013. Сегнетопьезокерамики на основе  $(1-x)(\text{K},\text{Na})(\text{Nb},\text{Ta})\text{O}_3+x\text{LiSbO}_3$  +модификатор. Температура Кюри, диэлектрические и пьезоэлектрические свойства в диапазоне температур (300÷700) К/ Л.А. Резниченко, А.В. Павленко, К.П. Андрюшин, И.А. Вербенко, И.Н. Андрюшина ; Росс. научн.–технич. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия ФГУП “СТАНДАРТИНФОРМ” » – М., 2013, - 21 с.: Ил. – 5. Библиогр. 3 назв. Депонированы в ФГУП “СТАНДАРТИНФОРМ” 31.10.2013 г., № 871 – 2013 кк..

В таблицах представлены стандартные справочные данные о диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих свойствах керамик на основе системы  $(\text{Na}, \text{K}, \text{Li})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Sb})\text{O}_3$  в диапазоне температур (300 ... 700) К.

Авторы :  Л.А. Резниченко  
 К.П. Андрюшин  
 И.А. Вербенко  
 И.Н. Андрюшина  
 А.В. Павленко

Настоящие таблицы стандартных справочных данных (ССД) являются новыми и распространяются на диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие свойства керамик на основе системы (Na, K, Li) (Nb, Ta, Sb) O<sub>3</sub> в диапазоне температур (300÷700) К.

Основой для составления таблиц явились данные, приведенные в таблицах А2-А11 приложения А.

Табличные данные рассчитаны согласно ОСТ 11 0444-87 [1] с применением методик ГСССД 183-2011 [2] и ГСССД 184-2011 [3] и отображают значения следующих характеристик керамик на основе системы (Na, K, Li) (Nb, Ta, Sb) O<sub>3</sub> в диапазоне температур (300÷700)К:

1. Относительная диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon/\epsilon_0$ ) – отношение индуцированного в электрическом поле заряда на обкладках конденсатора, заполненного диэлектриком, к заряду, индуцированному в том же поле на обкладках того же конденсатора с вакуумным промежутком. Расчеты проводили по формуле:

$$\epsilon / \epsilon_0 = \frac{14.4 \cdot C_0 \cdot d}{t}, \quad (1)$$

где  $C_0$ - емкость образца;  $d$ - диаметр образца;  $t$ - толщина образца;  $\epsilon_0$ - диэлектрическая постоянная, равная  $8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

2. Относительная диэлектрическая проницаемость,  $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$ , поляризованного образца в форме диска в направлении, параллельном его оси поляризации, в условиях постоянного давления;

3. Тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) – угол между векторами плотностей переменного тока проводимости и тока смещения диэлектрика на комплексной плоскости;

4. Коэффициент электромеханической связи планарной моды колебаний ( $K_p$ ) – показатель эффективности преобразования электрической энергии в механическую энергию или преобразования механической в электрическую. Расчеты проводили по формуле:

$$K_p = \sqrt{\frac{\eta^2 - 1 + \sigma^2}{2(1 + \sigma)}} \left(1 - \frac{f_{r1}^2}{f_{a1}^2}\right), \quad (2)$$

где  $f_{r1}$ ,  $f_{a1}$  – частоты резонанса и антирезонанса для первой гармоники,  $f_{r3}$  – частота резонанса для третьей гармоники, соответственно (Гц),  $\sigma$  – планарный коэффициент Пуассона из [1], который выбирается в соответствии с рассчитанным  $\beta$ ,  $\eta$  – наименьший положительный корень частотного уравнения Бесселя из [1], выбирается в соответствии с рассчитанным  $\beta$ , где  $\beta = \frac{f_{r3}}{f_{r1}}$ ;

5. Пьезоэлектрический модуль ( $d_{ij}$ ) – наведенная поляризация в направлении  $i$  на единицу механического давления, приложенного в направлении  $j$ , или величина деформации в направлении  $i$  на единицу напряженности электрического поля, приложенного в направлении  $j$ ; направление 3 – параллельно оси поляризации, 1 – перпендикулярно оси поляризации. Расчеты  $d_{31}$  проводили по формуле:

$$d_{31} = \frac{0.188 \cdot K_p \cdot 10^{-5}}{rf_{r1}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0}{\rho}}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – измеренная плотность образца, определяемая методом гидростатического взвешивания в октане (г/см<sup>3</sup>),  $r$  – радиус образца;

$d_{33}$  – измеряли квазистатическим методом с помощью YE2730A  $d_{33}$  METER.

6. Механическая добротность планарной моды колебаний ( $Q_m$ ) – отношение реактивного сопротивления к сопротивлению последовательной электрической цепи эквивалентной пьезокерамическому элементу. Расчеты проводили по формуле:

$$Q_m = \frac{f_{a1}^2 \cdot 10^{12}}{2\pi \cdot R \cdot f_{r1} (f_{a1}^2 - f_{r1}^2)}, \quad (4)$$

где  $R$  – сопротивления образца, измеренное на частоте резонанса первой гармоники;

7. Пьезоэлектрический коэффициент по напряжению (пьезочувствительность) ( $g_{ij}$ ) – величина генерируемого электрического поля в направлении  $i$  к единице механического давления в направлении  $j$ . Расчеты проводили по формуле:

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\varepsilon_{33}^T}, \quad (5)$$

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\varepsilon_{33}^T}, \quad (6)$$

8. Скорость звука по радиальной моде колебаний ( $V_1^E$ ) – скорость распространения звуковой волны в образце в форме диска в направлении перпендикулярном оси поляризации и приложенному переменному электрическому полю. Расчеты проводили по формуле:

$$V_1^E = \frac{2\pi f_r}{100\eta} \sqrt{1 - \sigma^2}. \quad (7)$$

9. Температура Кюри ( $T_C$ ) – температура максимума зависимости  $\varepsilon/\varepsilon_0(T)$ , соответствующая области сегнето-параэлектрического фазового перехода.

10. Удельная чувствительность, пропорциональна величине:

$$d_{33} / \sqrt{\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0} \quad (8)$$

В таблице 1 приводятся стандартные справочные данные диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих свойств керамики на основе системы (Na, K, Li) (Nb, Ta, Sb) O<sub>3</sub> в диапазоне температур (300÷700) K.

Таблица 1.

Стандартные справочные данные о диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих свойствах керамик состава 0.94 (Na<sub>0.5</sub> K<sub>0.5</sub>) (Nb<sub>0.94</sub> Ta<sub>0.06</sub>) O<sub>3</sub>-0.06 LiSbO<sub>3</sub> + 0.02 NiO в диапазоне температур (300÷700) K.

Na <sub>2</sub> O, масс %	8.67
K <sub>2</sub> O, масс %	11.25
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , масс %	61.98
Li <sub>2</sub> O, масс %	0.49
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , масс %	11.44
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , масс %	5.35
NiO, масс %	0.82
$T_C$ , K	565
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1125
$\text{tg}\delta$	0,035
$K_p$	0.42
$ d_{31} $ , пКл/В	82
$d_{33}$ , пКл/В	202
$g_{33}$ , мВ·м/В	20.3
$Q_M$	56
$d_{33} / \sqrt{\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0}$ , пм/В	6,1
$V_1^E \cdot 10^{-3}$ , м/с	4.29



## Приложение А.

### (справочное)

Данные таблицы являются обобщением работ, проводимых в отделе активных материалов НИИ физики ЮФУ, по созданию и подготовке справочных данных о диэлектрических ( $\epsilon/\epsilon_0$ ,  $\text{tg}\delta$ ,  $T_C$ ), пьезоэлектрических ( $K_p$ ,  $d_{ij}$ ,  $g_{ij}$ ) и упругих ( $Q_M$ ,  $V_1^E$ ) характеристик новых бессвинцовых керамик на основе системы (Na, K, Li) (Nb, Ta, Sb) O<sub>3</sub>. Представленные керамики имеют состав  $0.94 (\text{Na}_{0.5}, \text{K}_{0.5}) (\text{Nb}_{0.94}, \text{Ta}_{0.06}) \text{O}_3 - 0.06 \text{LiSbO}_3 + 0.02 \text{NiO}$  и характеризуются средними значениями относительной диэлектрической проницаемости, достаточно высокими пьезомодулями, пьезочувствительностью, удельной чувствительностью, коэффициентом электромеханической связи, а также низкой механической добротностью и могут быть использованы в среднечастотных радиоэлектронных устройствах, работающих в режиме приема, в том числе, в трансдукторах ультразвуковых передатчиков. Однако на данный момент для них отсутствуют аттестованные справочные данные в диапазоне температур (300÷700) К.

В НИИ физики ЮФУ были проведены обширные исследования свойств керамик на основе системы (Na, K, Li) (Nb, Ta, Sb) O<sub>3</sub> с использованием аттестованных методик ГСССД МЭ 183-2011 [2] и ГСССД МЭ 184-2011 [3] в соответствии с ОСТ 11 0444-87 [1]. Для разработки ССД были отобраны результаты исследований характеристик девяти керамических образцов состава  $0.94 (\text{Na}_{0.5}, \text{K}_{0.5}) (\text{Nb}_{0.94}, \text{Ta}_{0.06}) \text{O}_3 - 0.06 \text{LiSbO}_3 + 0.02 \text{NiO}$ , полученных с использованием одинаковых регламентов синтеза и спекания (температура,  $T$ , время,  $\tau$ ) (таблица А1).

Таблица А1 – Концентрации компонентов, регламенты синтеза и спекания аттестуемых керамик  $0.94 (\text{Na}_{0.5}, \text{K}_{0.5}) (\text{Nb}_{0.94}, \text{Ta}_{0.06}) \text{O}_3 - 0.06 \text{LiSbO}_3 + 0.02 \text{NiO}$ .

Состав. масс. %							$T_{\text{синт.1}}, \text{K}$	$T_{\text{спек.}}, \text{K}$
$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Nb}_2\text{O}_5$	$\text{Li}_2\text{O}$	$\text{Ta}_2\text{O}_5$	$\text{Sb}_2\text{O}_5$	$\text{NiO}$	$\tau_{\text{синт.1}}, \text{час.}$	$\tau_{\text{спек.}}, \text{час.}$
8.67	11.25	61.98	0.49	11.44	5.35	0.82	1223 5	1393 1.5

## 1. Метод получения образцов

### *Регламенты синтеза и спекания*

Экспериментальные образцы керамик  $0.94 (\text{Na}_{0.5}, \text{K}_{0.5}) (\text{Nb}_{0.94}, \text{Ta}_{0.06}) \text{O}_3 - 0.06 \text{LiSbO}_3 + 0.02 \text{NiO}$  получали твердофазным синтезом, спекали по обычной керамической технологии. В качестве исходных реагентов использовали гидрокарбонаты, карбонаты и оксиды следующих квалификаций:  $\text{NaHCO}_3$  – «чда»,  $\text{KHCO}_3$  – «ч»,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  – «NbO-PT»,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  – «хч»,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  – «TaO-1»,  $\text{Sb}_2\text{O}_5$  – «хч»,  $\text{NiO}$  – «ч». Синтез осуществляли путем однократного обжига смесей сырьевых компонентов:  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{KHCO}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{NiO}$ , взятых в количествах (масс %, в случае  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{KHCO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  в пересчёте на соответствующие оксиды):  $\text{Na}_2\text{O} = 8.67$ ;  $\text{K}_2\text{O} = 11.25$ ;  $\text{Nb}_2\text{O}_5 = 61.98$ ;  $\text{Li}_2\text{O} = 0.49$ ;  $\text{Ta}_2\text{O}_5 = 11.44$ ;  $\text{Sb}_2\text{O}_5 = 5.35$ ,  $\text{NiO} = 0.82$ . Температура обжига при синтезе,  $T_{\text{синт}}$ , составила 1223 К, длительность изотермической выдержки,  $\tau_{\text{синт}} = 5$  час. Спекание образцов в виде столбиков диаметром 12 мм, высотой (15÷18) мм осуществляли при температуре,  $T_{\text{сп}}$ , равной 1393 К, длительность изотермической выдержки,  $\tau_{\text{сп}} = 1.5$  час.

### *Механическая обработка.*

Измерительные образцы изготавливали в виде дисков диаметром 10 мм и толщиной 1 мм (или 0.5 мм). Обработку поверхностей производили алмазным

инструментом по 6 классу точности.

### *Металлизация.*

Электроды наносили двукратным вжиганием серебрясодержащей пасты при температуре 1070 К в течение 0.5 час.

### *Поляризация.*

Формирование поляризованного состояния в объектах осуществляли методом "горячей" поляризации: образцы загружали в камеру с полиэтиленсилоксановой жидкостью ПЭС-5 при  $\sim 300$  К, в течение 0.5 час. осуществляли плавный подъем температуры до 410 К, сопровождающийся увеличением создаваемого поля от 0 кВ/мм до 4 кВ/мм. В этих условиях образцы выдерживали 40 мин и затем охлаждали под полем до комнатной температуры.

## **2. Методы исследования образцов.**

### **3.**

#### *Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализы*

Рентгенографические исследования проводили в отделе активных материалов НИИ физики ЮФУ (старший научный сотрудник Шилкина Л. А.) методом порошковой дифракции (ДРОН-3,  $\text{CuK}\alpha$ , геометрия Брэгга - Брентано). Исследовали синтезированные порошки и измельченные керамические объекты, что позволило исключить влияние поверхностных эффектов, напряжений и текстур, возникающих в процессе получения керамик. Расчет структурных параметров производили по стандартным методикам. Точность определения параметров перовскитной ячейки: линейных  $\delta a = \delta c = \delta b = \pm 0,05$  %; угловых  $\delta \alpha = \delta \beta = \pm 5$  %; объема  $\delta V = \pm 0,07$  %.

### *Определение плотностей (измеренной, рентгеновской, относительной)*

Определение измеренной ( $\rho_{\text{изм.}}$ ) плотности образцов осуществляли методом гидростатического взвешивания, где в качестве жидкой среды использовали октан. Плотность рассчитывали по формуле:

$$\rho_{\text{изм.}} = (\rho_{\text{окт}} \cdot m_1) / (m_2 - m_3 + m_4),$$

где  $\rho_{\text{окт}}$  – плотность октана,  $m_1$  – масса сухой заготовки,  $m_2$  – масса заготовки, насыщенной октаном,  $m_3$  – масса насыщенной заготовки, взвешенной в октане с подвесом,  $m_4$  – масса подвеса без заготовки.

Расчет рентгеновской плотности ( $\rho_{\text{рентг.}}$ ) производили по формуле:  $\rho_{\text{рентг.}} = 1.66 \cdot M / V$ , где  $M$  – вес формульной единицы в граммах,  $V$  – объем перовскитной ячейки в Å. Относительную плотность ( $\rho_{\text{отн.}}$ ) рассчитывали по формуле  $(\rho_{\text{изм.}} / \rho_{\text{рентг.}}) \cdot 100\%$ .

### *Измерения диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик при комнатной температуре*

Измерения диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик проводили по методике ГСССД МЭ 183-2011 [2] с помощью разработанного автоматического измерительного комплекса (АИК). На рис. А1 представлена Блок- схема АИК.

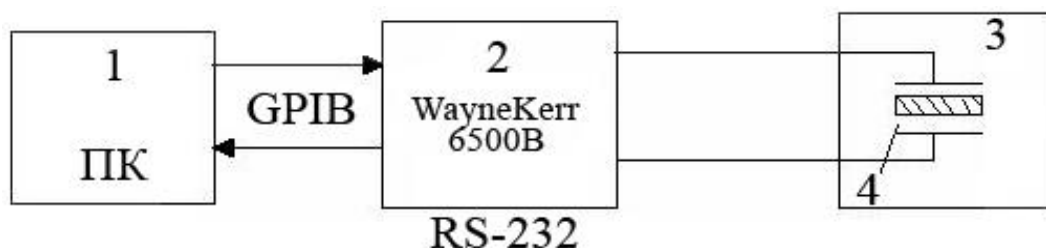


Рисунок А1 – Схема автоматического измерительного комплекса для измерения диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик различных пьезокерамических материалов.

1 – блок управления (персональный компьютер с программным обеспечением);

2 - прецизионный анализатор импеданса Wayne Kerr 6500 B;

3 – измерительная камера;

4 – измерительный образец.

Исследуемый образец (4) помещали в измерительную камеру (3). На него подавали переменное электрическое измерительное поле амплитудой 40 мВ заданной частоты  $f$  и производили автоматическое измерение диэлектрических параметров. При этом данные с (2) передаются в (1), где происходит их дальнейшая обработка и запись. Далее в (1) происходит изменение  $f$  и процедура измерения повторяется через заданный частотный шаг, минимальное значение которого составляет 1 Гц. Из частотных зависимостей адмитанса ( $Y(f)$ ), согласно [2], определяли частоты резонанса выбранной гармоники (первой, третьей или пятой). Частоте резонанса ( $f_r$ ) соответствует максимум действительной части частотной зависимости  $Y(f)$ , при последовательной схеме замещения. Частоте антирезонанса ( $f_a$ ) соответствует минимум  $Y(f)$ , при параллельной схеме замещения. При частоте резонанса также производится измерение сопротивления образца,  $R$ . На частоте 1кГц производили измерения емкости,  $C$ , и тангенса угла диэлектрических потерь,  $\text{tg}\delta$ , при амплитуде измерительного электрического поля 40 мВ.

Для расчета диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик керамик  $0.94 (\text{Na}_{0.5}, \text{K}_{0.5}) (\text{Nb}_{0.94}, \text{Ta}_{0.06}) \text{O}_3 - 0.06 \text{LiSbO}_3 + 0.02 \text{NiO}$  использовалась специализированная программа «Kalipso 2.0.0.27», рабочее окно которой представлено на рис. А2.

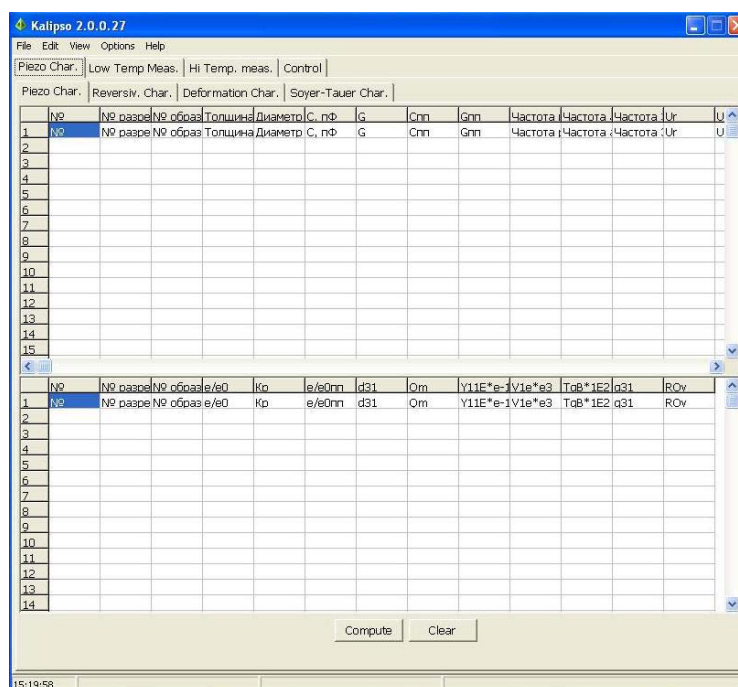


Рисунок А2 – Рабочее окно программы «Kalipso 2.0.0.27»

В соответствующие ячейки рабочего окна вводятся номер экспериментального образца, его геометрические размеры (толщина,  $t$ , и диаметр,  $d$ , в сантиметрах, соответственно), значения диэлектрических параметров до и после поляризации (емкость,  $C$  в пФ и тангенса угла диэлектрических потерь,  $\text{tg}\delta$ ),  $f_r$  (для первой и третьей гармоник),  $f_a$  (для первой гармоники), а также  $R$  и значения  $\rho_{\text{изм.}}$ . Для запуска процесса расчета необходимо нажать на кнопку «compute». Для сохранения полученных результатов необходимо зайти в основное меню программы «Файл», выбрать опцию «Сохранить как», директорию и имя файла, в котором будут сохранены рассчитанные данные (по умолчанию, программа Kalipso 2.0.0.27 сохраняет файлы только в формате Microsoft Office Excel 2007 «xlsx»). Последовательность операций продемонстрирована на рис. А3.

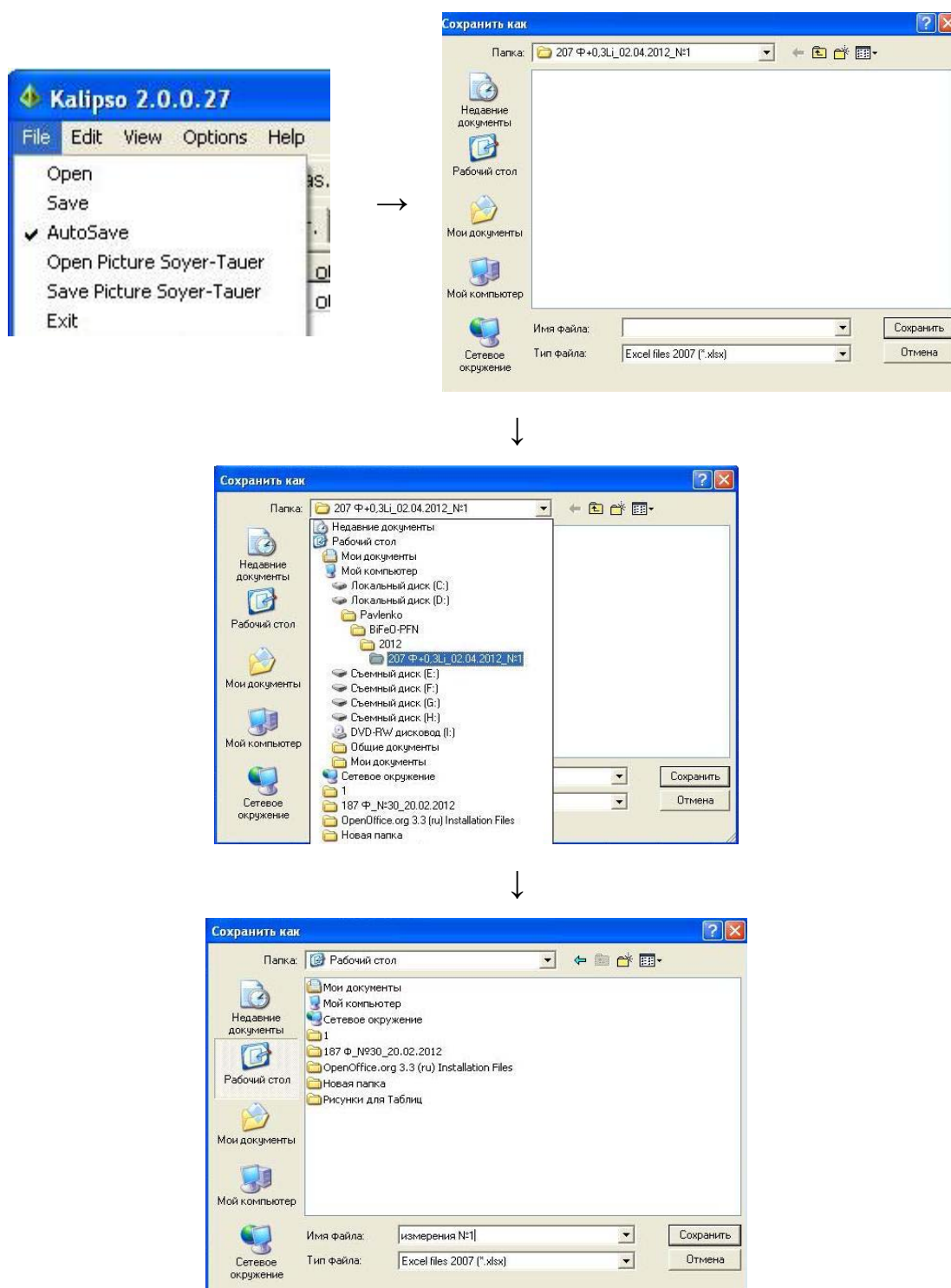


Рисунок А3 – Последовательность операций для сохранения данных.

Применение рентгенофазового контроля на всех стадиях получения

аттестуемых объектов и определение плотностей в совокупности с измерением диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик позволили выбрать оптимальные регламенты синтеза и спекания аттестуемых объектов.

*Измерения диэлектрических характеристик в температурном диапазоне  
(300÷700) K*

Измерения диэлектрических характеристик проводили по методике ГСССД МЭ 184-2011 [3] с помощью разработанного автоматического измерительного комплекса (АИК) на базе прецизионного LCR-метра Agilent 4982A. На рис. А4 представлена Блок- схема АИК.

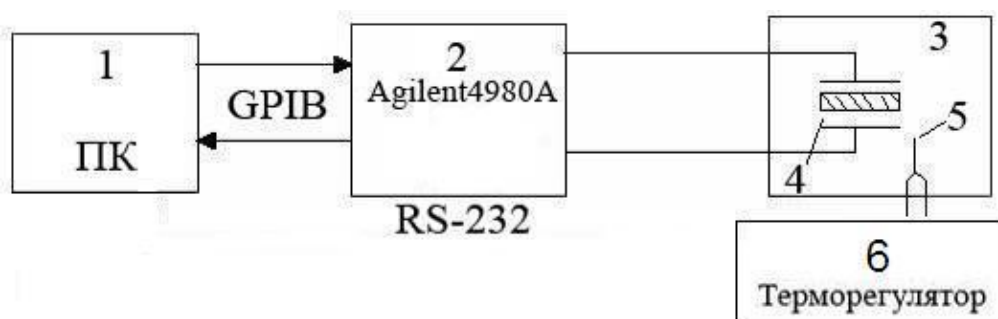


Рисунок А4 – Схема автоматического измерительного комплекса для измерения диэлектрических характеристик различных пьезокерамических материалов.

- 1 – блок управления (персональный компьютер с программным обеспечением);
- 2 - прецизионный LCR-метр Agilent 4982A;
- 3 – измерительная камера;
- 4 – измерительный образец;
- 5 – термопара;
- 6 – терморегулятор для измерения и контроля температуры.



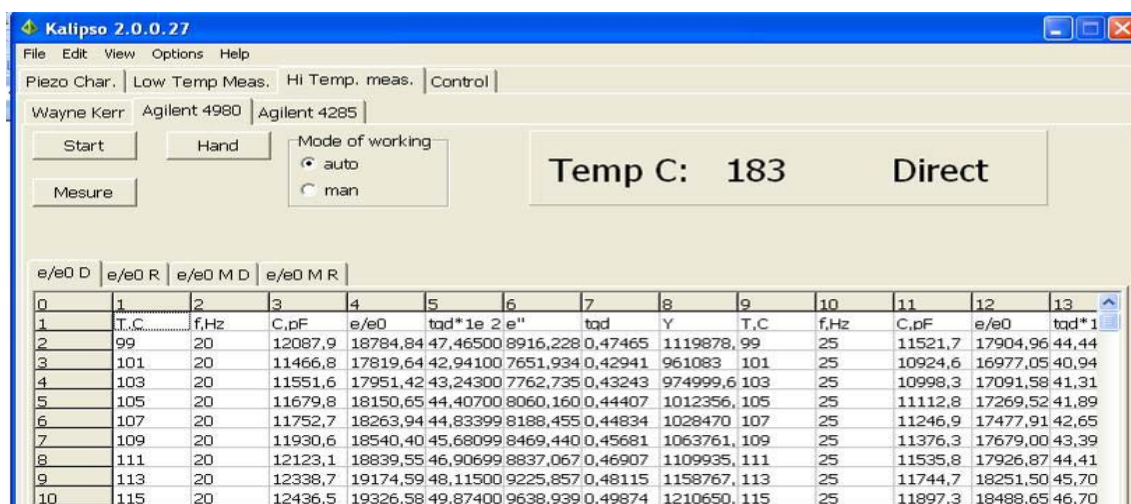


Рисунок А5 – Рабочее окно программы «Kalipso 2.0.0.27»

При достижении нужной температуры на терморегуляторе (6) с помощью программы “Kalipso 2.0.0.27” (рабочее окно представлено на рис. А5) на образец (4) подается переменное измерительное поле заданной амплитуды и  $f$ , производится автоматическое измерение, данные с (2) передаются в (1), где происходит их дальнейшая обработка и запись. Далее, происходит изменение  $f$  и процедура измерения повторяется. Этот цикл запускается через установленный температурный шаг.

Полученные данные выводятся на экран в виде таблицы (рис. А5). Процедура сохранения данных представлена на рис. А3. После обработки полученных данных, по максимуму  $\varepsilon/\varepsilon_0(T)$  определяется температура Кюри ( $T_C$ ).

### Экспериментальные результаты

По данным рентгенофазового анализа установлено, что получены беспримесные образцы состава  $0.94 (\text{Na}_{0.5}, \text{K}_{0.5}) (\text{Nb}_{0.94}, \text{Ta}_{0.06}) \text{O}_3 - 0.06 \text{LiSbO}_3 + 0.02 \text{NiO}$  с перовскитовой структурой. При этом  $\rho_{\text{изм.}} = 4.52 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{\text{отн.}} = 95 \%$ . Результаты измерения диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих

характеристик керамик этого состава приведены в таблицах А2-А11, а на рисунке А6, в качестве примера, приведены температурные зависимости  $\varepsilon/\varepsilon_0$  и  $\text{tg } \delta$  на частоте 1 кГц образца №1.

Таблица А2. Образец 1.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon$	$K_p$	$ d_{31} $ , пКл/	$d_{33}'$ ,	$d_{33} / \sqrt{\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0}$	$Q$	$V_1^E \cdot 10^{-3}$	$T_C$ , К	$g_{33}$ мВ·м/
1123	0.42	80	202	6.03	60	4.314	565	20.3

Таблица А3. Образец 2.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon$	$K_p$	$ d_{31} $ , пКл/	$d_{33}'$ ,	$d_{33} / \sqrt{\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0}$	$Q$	$V_1^E \cdot 10^{-3}$	$T_C$ , К	$g_{33}$ мВ·м/
1154	0.43	84	203	6	66	4.29	565	19.9

Таблица А4. Образец 3.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon$	$K_p$	$ d_{31} $ , пКл/	$d_{33}'$ ,	$d_{33} / \sqrt{\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0}$	$Q$	$V_1^E \cdot 10^{-3}$	$T_C$ , К	$g_{33}$ мВ·м/
1151	0.42	81	201	5.9	72	4.28	566	19.7

Таблица А5. Образец 4.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon$	$K_p$	$ d_{31} $ , пКл/	$d_{33}'$ ,	$d_{33} / \sqrt{\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0}$	$Q$	$V_1^E \cdot 10^{-3}$	$T_C$ , К	$g_{33}$ мВ·м/
1141	0.41	79	198	5.86	67	4.3	564	19.6

Таблица А7. Образец 5.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon$	$K_p$	$ d_{31} $ , пКл/	$d_{33}'$ ,	$d_{33} / \sqrt{\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0}$	$Q$	$V_1^E \cdot 10^{-3}$	$T_C$ , К	$g_{33}$ мВ·м/
1095	0.43	85	204	6.1	45	4.28	564	21.0

Таблица А8. Образец 6.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon$	$K_p$	$ d_{31} $ , пКл/	$d_{33}'$ ,	$d_{33} / \sqrt{\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0}$	$Q$	$V_1^E \cdot 10^{-3}$	$T_C$ , К	$g_{33}$ мВ·м/
1097	0.42	84	203	6.1	46	4.29	565	20.9

Таблица А9. Образец 7.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	$K_p$	$ d_{31} $ , пКл/	$d_{33}'$ ,	$d_{33}/\sqrt{\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0}$ , ,	$Q$ М	$V_1^E \cdot 10^{-3}$ , ,	$T_C$ , К	$g_{33}$ мВ·м/
1099	0.43	83	202	6.0	47	4.30	566	20.7

Таблица А10. Образец 8.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	$K_p$	$ d_{31} $ , пКл/	$d_{33}'$ ,	$d_{33}/\sqrt{\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0}$ , ,	$Q$ М	$V_1^E \cdot 10^{-3}$ , ,	$T_C$ , К	$g_{33}$ мВ·м/
1096	0.43	86	204	6.2	46	4.29	565	21.0

Таблица А11. Образец 9.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	$K_p$	$ d_{31} $ , пКл/	$d_{33}'$ ,	$d_{33}/\sqrt{\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0}$ , ,	$Q$ М	$V_1^E \cdot 10^{-3}$ , ,	$T_C$ , К	$g_{33}$ мВ·м/
1098	0.43	82	203	6.0	45	4.29	565	20.9

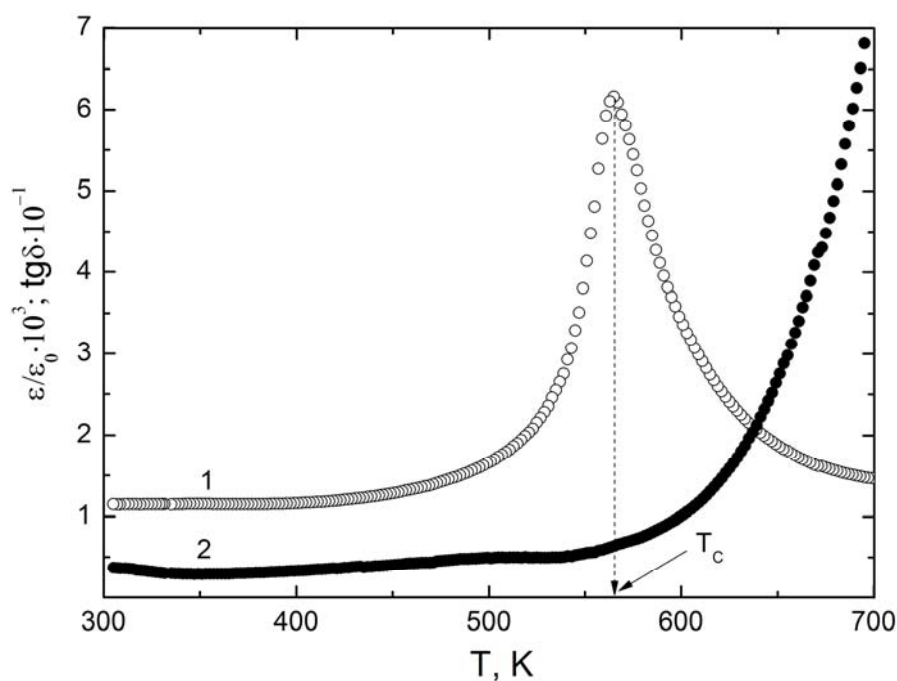


Рис. А6. Температурные зависимости (1)  $\varepsilon/\varepsilon_0$  и (2)  $\text{tg}\delta$  на частоте 1 кГц образца №1

## Оценка достоверности данных

Суммарные погрешности измерений диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик аттестуемых объектов представлены в таблице А12.

Таблица А12 – Суммарные погрешности измерений электрофизических параметров

Параметры		$\Delta A/A, \%$
Наименование	Значение А	
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	250÷5000	1.0
$K_p$	0.2÷0.3	5.0
	0.3÷0.4	2.0
	0.4÷0.5	1.5
	0.5÷0.7	1.0
$ d_{31}  \cdot 10^{12}, \text{ КЛ/Н}$	20÷30	5.0
	30÷40	2.0
$d_{33} \cdot 10^{12}, \text{ КЛ/Н}$	40÷100	3.0
	100÷700	2.0
$g_{33} \cdot 10^3, \text{ В} \cdot \text{м/Н}$	16÷40	2.0
$Q_M$	50÷60	10
	600÷5000	20
$\text{tg} \delta \cdot 10^2$	0.3÷20.0	5.0
$V_1^E \cdot 10^{-3}, \text{ м/с}$	2.6÷4.0	0.3

## Список литературы

1. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. Группа Э10. Введен 01.01.88. -140с.
2. Резниченко Л.А., Андриюшин К.П., Павленко А.В., Дудкина С.И., Вербенко И.А., Павелко А.А., Андриюшина И.Н., Кубрин С.П., Юрасов Ю.И. Методика экспериментального определения пьезоэлектрических и упругих характеристик: пьезомодулей, коэффициентов электромеханической связи, механической добротности, модуля Юнга, скорости звука. пьезоэлектрического коэффициента (пьезочувствительности); – различных сегнетопьезоэлектрических материалов в широком диапазоне температур (10÷1000) К // Аттестат № 183 от 03.05. 2011. Методика ГСССД (зарегистрирована в Рос. н.-т. центре информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия под № ГСССД МЭ 183-2011 ФГУП «Стандартинформ». Гос. служба стандартных справочных данных (ГСССД). Главный научный метрологический центр «Стандартные справочные данные о физических константах и свойствах веществ и материалов» (ГНМЦ «ССД»).
3. Резниченко Л.А., Андриюшин К.П., Андриюшина И.Н., Вербенко И.А., Кубрин С.П., Павелко А.А., Павленко А.В., Юрасов Ю.И. Методика экспериментального определения комплексной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, температуры Кюри диэлектрических материалов в широком диапазоне температур (10÷1000) К, частот ( $10^{-3} \div 15 \cdot 10^6$ ) Гц электрического измерительного поля // Аттестат № 184 от 03.05. 2011. Методика ГСССД (зарегистрирована в Рос. н.-т. центре информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия под № ГСССД МЭ 184-2011 ФГУП «Стандартинформ». Гос. служба стандартных справочных данных (ГСССД). Главный научный метрологический центр «Стандартные справочные данные о физических константах и свойствах веществ и материалов» (ГНМЦ «ССД»).