

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА  
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ  
(ГСССД)

УДК 669. /539.5 – 536.6/

**ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

СЕГНЕТОПЬЕЗОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ МЕТАНИОБАТА ЛИТИЯ.  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

**ГСССД 303 – 2015**

(ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, тема [RU.3.013-2018](#))

РАЗРАБОТАНЫ ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» с участием специалистов Научно - исследовательского института физики Южного федерального университета (докт. физ.-мат. наук Л.А. Резниченко, канд. физ.-мат. наук И.А. Вербенко, канд. физ.-мат. наук О.Н. Разумовская, канд. физ.-мат. наук С.И. Дудкина, канд. физ.-мат. наук А.В. Павленко)

РЕКОМЕНДОВАНЫ к утверждению Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия» (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»)

ОДОБРЕНЫ экспертной комиссией в составе:

докт. физ.-мат. наук Е.М. Панченко, докт. физ.-мат. наук Д.Г., канд. физ.-мат. наук А.А. Павленко, 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 **«27» октября 2015 г. (протокол № 3)**

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА  
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

---

**Таблицы стандартных справочных данных**

Сегнетопъезокерамики на основе метаниобата лития.	<b>ГСССД</b>
Диэлектрические и пьезоэлектрические характеристики при комнатной температуре	<b>303 —2015</b>

**Tables of Standard Reference Data**

Segnetopyezokeramik on the basis of lithium metaniobate.	<b>GSSSD</b>
Dielectric and piezoelectric properties at the room temperature	<b>303—2015</b>

---



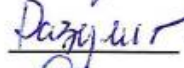
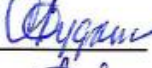

## ДЕПОНИРОВАННАЯ РУКОПИСЬ

УДК 669. /539.5 – 536.6/

Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 303 – 2015.

Сегнетопьезокерамики на основе метаниобата лития. Диэлектрические и пьезоэлектрические характеристики при комнатной температуре / Л.А. Резниченко, И.А. Вербенко, О.Н. Разумовская, А.В. Павленко, С.И. Дудкина; Росс. научн.–технич. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ») – М., – 2015 – 20 с.: Ил. – 2, Библиогр. 4 назв. – Рус. – 4 назв. Депонированы в ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 27.10.2015 г, № 883-2015 кк.

В таблицах представлены стандартные справочные данные о диэлектрических и пьезоэлектрических характеристиках сегнетопьезокерамик на основе метаниобата лития при комнатной температуре.

Авторы :  Л.А. Резниченко  
 И.А. Вербенко  
 О.Н. Разумовская  
 С.И. Дудкина  
 А.В. Павленко

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Основная часть	6
Таблица 1. Стандартные справочные данные диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик сегнетопьезокерамики на основе метаниобата лития при комнатной температуре	8
ПРИЛОЖЕНИЕ А <i>(справочное)</i>	9
Таблица А1. Концентрации компонентов, регламенты синтеза и спекания аттестуемых керамик.	10
2. Метод получения образцов	10
3. Методы и исследования образцов	11
4. Экспериментальные результаты. Обсуждение	16
5. Оценка достоверности данных	18
6. Список литературы	19

## 1. Основная часть

Настоящие таблицы стандартных справочных данных (ССД) являются новыми и распространяются на диэлектрические и пьезоэлектрические характеристики сегнетопьезокерамيك на основе метаниобата лития при комнатной температуре.

Основой для составления таблиц явились данные, приведенные в таблицах А2-А3 приложения А.

Табличные данные рассчитаны согласно ОСТ 11 0444-87 [1] с применением методики ГСССД 183-2011 [2] и ГСССД 184-2011 [3] отображают значения следующих характеристик сегнетопьезокерамик на основе метаниобата лития при комнатной температуре:

1. Относительная диэлектрическая проницаемость ( $\varepsilon/\varepsilon_0$ ) – 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:

$$\varepsilon / \varepsilon_0 = \frac{14.4 \cdot C_0 \cdot d}{t}, \quad (1)$$

где  $C_0$ - емкость образца (Ф);  $d$ - диаметр образца (м);  $t$ - толщина образца (м);  $\varepsilon_0$ - диэлектрическая постоянная, равная  $8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

2. Относительная диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$ , поляризованного образца в форме диска в направлении, параллельном его оси поляризации, в условиях постоянного давления.

3. Тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) – тангенс угла 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 (Гц),  $f_{r3}$  – частота резонанса для третьей гармоники (Гц),  $\sigma$  и  $\eta$  – планарный коэффициент Пуассона и наименьший положительный корень частотного уравнения Бесселя, соответственно, выбирающиеся в соответствие с таблицей 9 ОСТ 11 0444-87 [1].

5. Пьезоэлектрический модуль ( $d_{ij}$ , пКл/Н) – 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/м<sup>3</sup>),  $r$  – радиус образца (м).

$d_{33}$  – измеряли квазистатическим методом с помощью YE2730A d<sub>33</sub> 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 (Ом), измеренное на частоте резонанса первой гармоники.

Таблица 1 – Стандартные справочные данные диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик сегнетопьезокерамики на основе метаниобата лития при комнатной температуре

	<b>LNS-1</b>	<b>LNS-2</b>
<b>Li<sub>2</sub>O, масс %</b>	9.17	9.02
<b>Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, масс %</b>	86.77	86.27
<b>SrO, масс %</b>	4.06	4.71
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	50	51
<b>tg<math>\delta</math></b>	0.017	0.017
<b><math>K_p</math></b>	0	0
<b><math>K_t</math></b>	0.32	0.35
<b> <math>d_{31}</math> , пКл/Н</b>	0	0
<b><math>d_{33}</math>, пКл/Н</b>	18	20
<b><math>Q_m</math></b>	< 100	< 100
<b>T<sub>раб.</sub></b>	1400	1400



## ПРИЛОЖЕНИЕ А.

### *(справочное)*

Практически вся современная мировая пьезотехническая промышленность базируются на свинецсодержащих материалах. В связи с тем, что начиная с 2003 года Евросоюзом было принято новое Положение о защите окружающей среды (Директива 2002/95/ЕС Европейского парламента с пересмотром от 27 января 2003 года об использовании опасных материалов в электронике и электронных приборах), огромное внимание в современном материаловедении уделяется поиску и созданию нетоксичных многофункциональных сегнетопьезоэлектрических материалов, которые могут использоваться (в том числе и заменить используемые Pb-содержащие материалы) в различных сферах современной техники. Одними из наиболее перспективных основ для создания подобных структур являются ниобаты натрия, калия а так же метаниобат лития. Представленные таблицы являются обобщением работ, проводимых в отделе интеллектуальных материалов и нанотехнологии научно-исследовательского института физики Южного федерального университета, по созданию и подготовке справочных данных диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик новых бессвинцовых керамик на основе метаниобата лития. Данные материалы могут эксплуатироваться в широком рабочем интервале температур (верхний предел рабочих температур,  $T_{\text{раб.}}=1400$  К) и обладают бесконечной анизотропией пьезосвойств, а также высокими пьезоэлектрическими характеристиками и могут найти применение, в частности, в устройствах дефектоскопического контроля оборудования, работающего при экстремальных температурных условиях. Однако на данный момент для них отсутствуют аттестованные справочные данные при комнатной температуре.

В НИИ физики ЮФУ были проведены обширные исследования свойств керамик на основе метаниобата лития в соответствии с ОСТ 11 0444-87 [1] с использованием аттестованных методик ГСССД МЭ 183-2011 [2] и ГСССД МЭ

184-2011 [3]. Для разработки ССД были отобраны результаты исследований характеристик семи керамических образцов каждого из аттестуемых составов, полученных с использованием одинаковых регламентов синтеза и спекания (температура, Т, время,  $\tau$ ) (таблица А1).

Таблица А1 – Концентрации компонентов, регламенты синтеза и спекания аттестуемых керамик

Состав	Состав. масс. %			Т <sub>синт.1</sub> , К $\tau_{\text{синт.1}}$ , с.	Т <sub>синт.2</sub> , К $\tau_{\text{синт.2}}$ , с.	Т <sub>спек1.</sub> , К $\tau_{\text{спек1.}}$ , с Р, МПа	Т <sub>спек2.</sub> , К $\tau_{\text{спек1.}}$ , с.
	Li <sub>2</sub> O	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrO				
LNS-1	9.17	86.77	4.06	1070 ÷ 1120 14.4*10 <sup>3</sup>	1120 ÷ 1170 14.4*10 <sup>3</sup>	1220÷1250 0.3*10 <sup>3</sup> 10	1300 ÷ 1400 3.6*10 <sup>3</sup> ÷7.2*10 <sup>3</sup>
LNS-2	9.02	86.27	4.71	1070 ÷ 1120 14.4*10 <sup>3</sup>	1120 ÷ 1170 14.4*10 <sup>3</sup>	1220÷1250 0.3*10 <sup>3</sup> 10	1300 ÷ 1400 3.6*10 <sup>3</sup> ÷7.2*10 <sup>3</sup>

## 2. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

### *Регламенты синтеза и спекания*

В качестве исходных компонентов использованы оксиды и карбонаты следующих квалификаций: Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – «хч», Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – «Нбо-Пт», SrO – «чда». Материалы изготавливались следующим образом. Синтез осуществляется путем двукратных обжигов смеси Li<sub>2</sub>O, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SrCO<sub>3</sub> с промежуточным помолом синтезированного продукта. Температуры обжигов  $T_{\text{синт.1}} = 1070 \text{ К} \div 1120 \text{ К}$ ,  $T_{\text{синт.2}} = 1120 \text{ К} \div 1170 \text{ К}$ , длительности изотермических выдержек  $\tau_1 = \tau_2 = 14.4 \cdot 10^3 \text{ с}$ .

Спекание образцов диаметром 12÷15 мм, высотой 3÷5 мм осуществлялось двукратными обжигами, при этом первый обжиг при  $T = 1220 \text{ К} \div 1250 \text{ К}$  производили под давлением 10 МПа в течение  $0.3 \cdot 10^3 \text{ с}$ , а второй – без

давления при  $T = 1300 \text{ K} \div 1400 \text{ K}$  в течение  $3.6 \cdot 10^3 \div 7.2 \cdot 10^3 \text{ с}$  (интервалы технологических регламентов указаны в зависимости от состава материала).

#### *Механическая обработка, металлизация и поляризация*

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. Электроды наносили двукратным вжиганием серебросодержащей пасты при температуре 1070 К в течение 0.5 час. Образцы поляризовали в полиэтиленсилоксановой жидкости при температуре 430-450 К в течение  $(1,8-2,4) \cdot 10^3 \text{ с}$  в постоянном электрическом поле напряженностью 60-70 кВ/см.

### **3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ**

#### *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 - Brentano). 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 и пьезоэлектрических и упругих характеристик при комнатной температуре*

Измерения диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик проводили в соответствии с методикой ГСССД МЭ 183-2011 [3] с помощью разработанного измерительного комплекса (ИК) на базе прецизионного анализатора импеданса Wayne Kerr 6500 В. На рис. А1 представлена Блок-схема ИК.

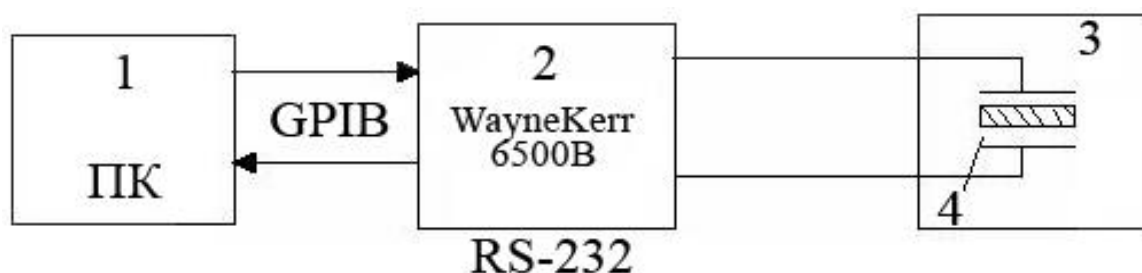


Рисунок А1 – Схема измерительного комплекса для измерения диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик различных пьезокерамических материалов.

- 1 – блок управления (персональный компьютер с программным обеспечением);
- 2 - прецизионный анализатор импеданса Wayne Kerr 6500 В;
- 3 – измерительная камера;
- 4 – измерительный образец.

Исследуемый образец (4) помещали в измерительную камеру (3). На него подавали переменное электрическое измерительное поле амплитудой 40÷60 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 [3], 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÷60 мВ.

Для обработки и расчета необходимых диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик аттестуемых керамических образцов использовалась специализированная программа «Kalipso 2.0.0.27», рабочее окно которой представлено на рис. А2.

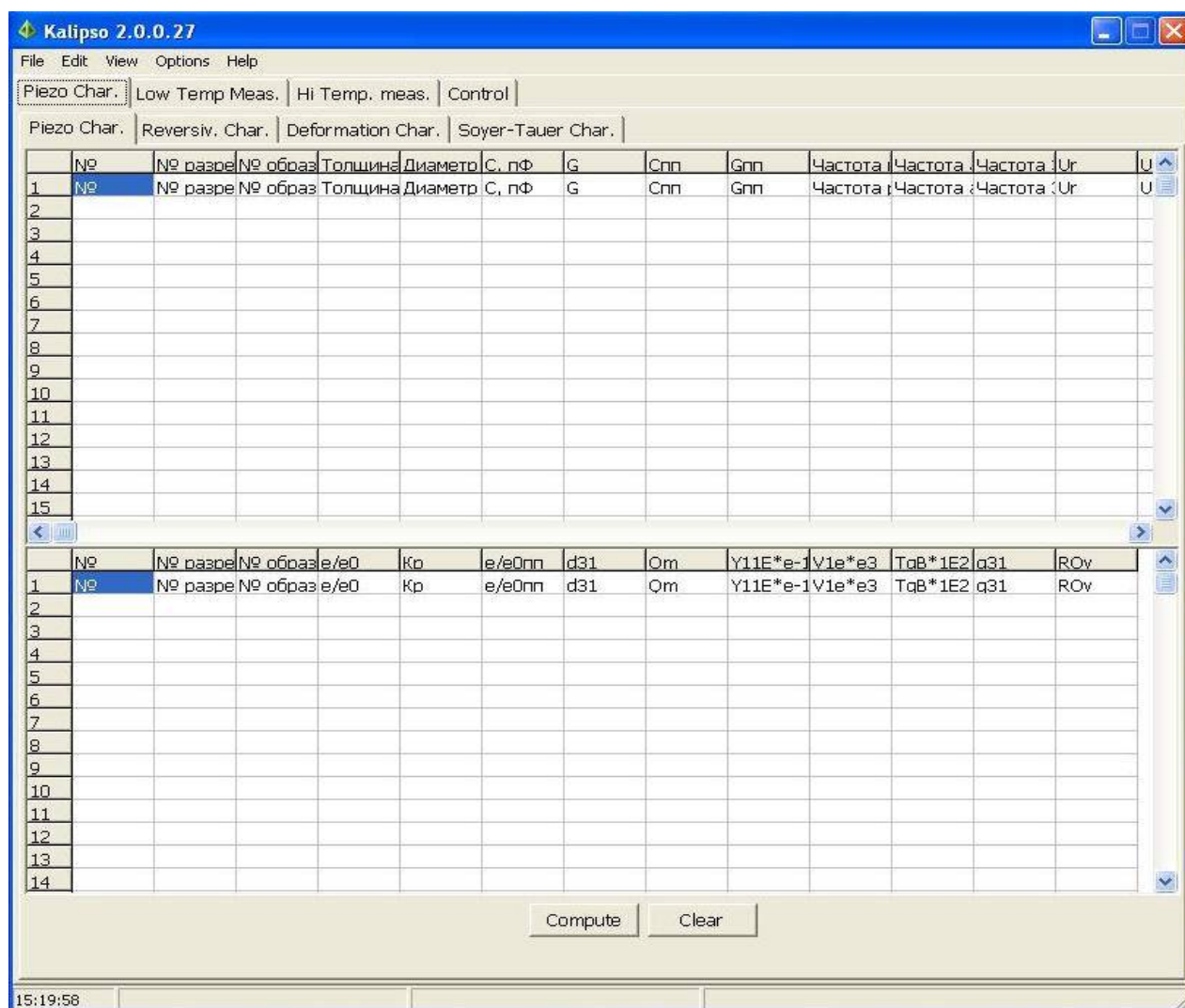


Рисунок А2 – Рабочее окно программы «Kalipso 2.0.0.27»

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 тангенс 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 в формате Microsoft Office Excel 2007 «xlsx» необходимо зайти в основное меню программы «Файл», выбрать опцию «Сохранить как», директорию и имя файла, в котором будут сохранены рассчитанные данные. Последовательность операций продемонстрирована на рис. А3.

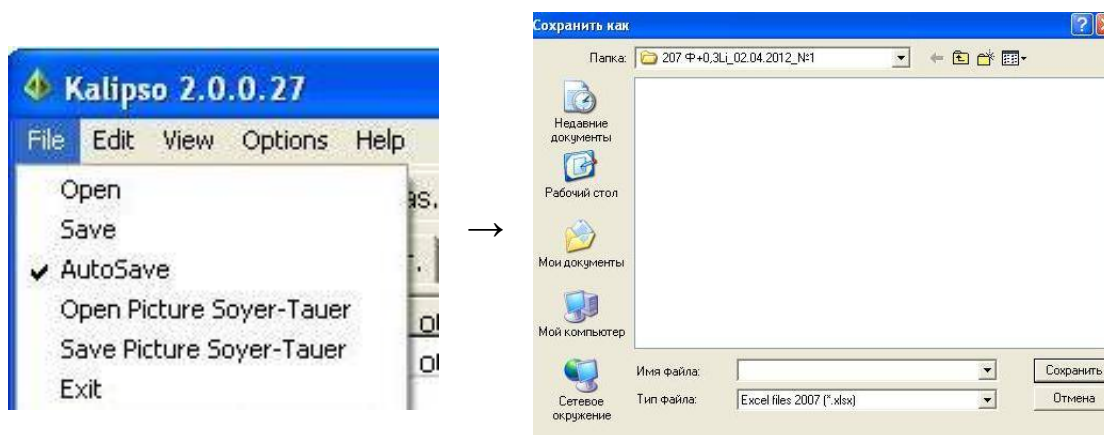


Рисунок А3 – Последовательность операций для сохранения данных.

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.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. ОБСУЖДЕНИЕ

По данным рентгенофазового анализа установлено, что получены беспримесные керамические образцы сегнетопьезокерамик LNS-1 и LNS-2, которым свойственны достаточно высокие значения  $\rho_{\text{отн}}$  (90÷95 %), что приемлемо для материалов, полученных по обычной керамической технологии [4]. Результаты измерения диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик аттестуемых составов LNS-1 и LNS-2 при комнатной температуре приведены в таблицах А2-А3.

Таблица А2 – Основные электрофизические характеристики керамики LNS-1

№ образца	1	2	3	4	5	6	7
$\text{Li}_2\text{O}$ , масс %	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17
$\text{Nb}_2\text{O}_5$ , масс %	86.77	86.77	86.77	86.77	86.77	86.77	86.77
$\text{SrO}$ , масс %	4.06	4.06	4.06	4.06	4.06	4.06	4.06
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	50	49	50	49	50	50	50
$\text{tg}\delta$	0.017	0.019	0.017	0.017	0.016	0.017	0.016
$K_p$	0	0	0	0	0	0	0
$K_t$	0.32	0.31	0.32	0.32	0.32	0.31	0.32
$K_t/K_p$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
$ d_{31} $ , пКл/Н	0	0	0	0	0	0	0
$d_{33}$ , пКл/Н	18	17	18	18	18	17	18
$d_{33}/ d_{31} $	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
$Q_m$	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
$T_{\text{раб.}}$	~ 1400	~ 1400	~ 1400	~ 1400	~ 1400	~ 1400	~ 1400



Таблица А2 – Основные электрофизические характеристики керамики LNS-2

№ образца	1	2	3	4	5	6	7
$\text{Li}_2\text{O}$ , масс %	9.02	9.02	9.02	9.02	9.02	9.02	9.02
$\text{Nb}_2\text{O}_5$ , масс %	86.27	86.27	86.27	86.27	86.27	86.27	86.27
$\text{SrO}$ , масс %	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	51	51	50	51	50	51	51
$\text{tg}\delta$	0.017	0.016	0.017	0.017	0.015	0.017	0.015
$K_p$	0	0	0	0	0	0	0
$K_t$	0.35	0.34	0.35	0.35	0.35	0.34	0.35
$K_t/K_p$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
$ d_{31} $ , пКл/Н	0	0	0	0	0	0	0
$d_{33}$ , пКл/Н	20	21	20	21	21	21	21
$d_{33}/ d_{31} $	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
$Q_m$	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
$T_{\text{раб.}}$	~ 1400	~ 1400	~ 1400	~ 1400	~ 1400	~ 1400	~ 1400

Указанные параметры материалов LNS-1 и LNS-2 позволяют использовать их в широком диапазоне температур, а бесконечная анизотропия пьезосвойств в сочетании с низкой механической добротностью  $Q_m$  приведёт к повышению отношения сигнал/шум и подавлению паразитных резонансов (ложных колебаний), искажающих форму рабочего сигнала и ухудшающих характеристики изготовленных из этих материалов датчиков. Это благоприятствует повышению разрешающей способности и чувствительности материалов и датчиков. Достижение бесконечной анизотропии пьезосвойств не сопряжено с развитием в керамиках микротрещин, как это имеет место в других высокотемпературных материалах с высокими отношениями  $k_t/k_p$  и

$d_{33}/|d_{31}|$ . Это является следствием качественно-количественного элементного состава предлагаемого материала и особенностей его кристаллической и зёрненной структур. Низкие значения относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$  материала позволяют его использовать в СВЧ-технике, а низкий удельный вес – в устройствах, где весовые характеристики являются решающими.

## 5.ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ДАННЫХ

Суммарные погрешности измерений диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик аттестуемых объектов представлены в таблице А4.

Таблица А4 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} $ , пКл/Н	20÷30	5.0
	30÷40	2.0
$d_{33}$ , пКл/Н	40÷100	3.0
	100÷700	2.0
$g_{33}$ , мВ·м/Н	16÷40	2.0
$Q_M$	50÷60	10
	600÷5000	20
$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^2$	0.3÷20.0	5.0
$V_1^E \cdot 10^{-3}$ , м/с	2.6÷4.0	0.3

## 6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. Группа Э10. Введен 01.01.88. -140с.

2. Резниченко Л.А., Андрюшин К.П., Павленко А.В., Дудкина С.И., Вербенко И.А., Павелко А.А., Андрюшина 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., Андрюшин К.П., Андрюшина 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»).

4. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков. М.«Энергия».1976.336с.