



## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 218–224  
*Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 218–224  
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-218-224>, EDN: WGPPMC

Научная статья  
УДК 538.956

### Диэлектрические и тепловые свойства композитов на основе бромида диизопропиламмония и микрочастиц меди

А. Ю. Милинский<sup>✉</sup>, С. В. Барышников

Благовещенский государственный педагогический университет, Россия, 675000, г. Благовещенск,  
ул. Ленина, д. 104

Милинский Алексей Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физического и математического образования, [a.milinskiy@mail.ru](mailto:a.milinskiy@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7525-4396>, AuthorID: 662231

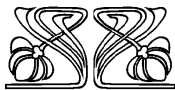
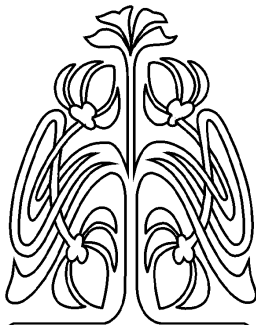
Барышников Сергей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физического и математического образования, [svbar2003@list.ru](mailto:svbar2003@list.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3362-8975>, AuthorID: 186300

**Аннотация.** В работе исследованы диэлектрические и тепловые свойства композитов на основе органического сегнетоэлектрика бромид диизопропиламмония с добавлением 2 объемных процентов частиц меди размером около 1 мкм. Актуальность исследования обусловлена возрастающим интересом к композитным системам на основе сегнетоэлектриков с добавлением металлических частиц, в которых проводящие включения способны существенно изменять термодинамический потенциал и параметры фазовых переходов сегнетоэлектрической матрицы. В отличие от хорошо изученных неорганических систем, влияние металлических частиц на свойства органических сегнетоэлектриков исследовано недостаточно. Образцы бромид диизопропиламмония и микрочастиц меди были получены методом механического смешения порошков с последующим прессованием. Морфология образца и распределение меди анализировались методом сканирующей электронной микроскопии. Диэлектрические свойства исследованы в диапазоне температур 30–170°C, а фазовые переходы дополнительно изучены методом дифференциального термического анализа. Для чистого бромид диизопропиламмония подтвержден сегнетоэлектрический фазовый переход первого рода при 153°C с характерным температурным гистерезисом. В композитах обнаружено существенное снижение температуры Кюри и расщепление фазового перехода на два при температурах 120 и 133°C. Появление двойного перехода интерпретируется как следствие микроскопической неоднородности системы и формирования областей бромид диизопропиламмония с различными граничными условиями вблизи межфазных границ с медью. Полученные результаты согласуются с феноменологическим подходом Ландау–Гинзбурга с учетом поверхностного вклада в свободную энергию. Показано, что металлические частицы меди эффективно модифицируют сегнетоэлектрическое состояние бромид диизопропиламмония, приводя к изменению эффективной температуры фазового перехода.

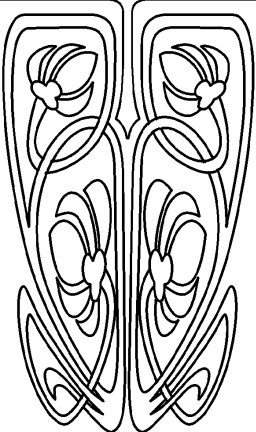
**Ключевые слова:** бромид диизопропиламмония, частицы меди, сегнетоэлектрик, композит, фазовые переходы, диэлектрическая проницаемость

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Благовещенского государственного педагогического университета.

© Милинский А. Ю., Барышников С. В., 2026



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ





**Для цитирования:** Милинский А. Ю., Барышников С. В. Диэлектрические и тепловые свойства композитов на основе бромид диизопропиламмония и микрочастиц меди // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 218–224. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-218-224>, EDN: WGPPMC

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

## Dielectric and thermal properties of composites based on diisopropylammonium bromide and copper microparticles

A. Yu. Milinskiy<sup>✉</sup>, S. V. Baryshnikov

Blagoveshchensk State Pedagogical University, 104 Lenina St., Blagoveshchensk 675000, Russia

Alexey Yu. Milinsky, a.milinskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7525-4396>, AuthorID: 662231

Sergey V. Baryshnikov, svbar2003@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3362-8975>, AuthorID: 186300

**Abstract. Background and Objectives:** Composite systems based on molecular ferroelectrics and metallic inclusions attract considerable attention due to the possibility of controlled modification of phase transition parameters and dielectric response. In contrast to extensively studied inorganic ferroelectric–metal composites, the influence of metallic microparticles on organic ferroelectrics remains insufficiently explored. Diisopropylammonium bromide is a promising organic ferroelectric characterized by a first-order phase transition and a relatively high spontaneous polarization. The aim of this work is to investigate the effect of 2 vol.% copper microparticles on the dielectric and thermal properties, Curie temperature, and phase transition behavior of diisopropylammonium bromide-based composites. **Materials and Methods:** Composite samples were prepared by mechanical mixing of diisopropylammonium bromide powder with Cu microparticles ( $\approx 1 \mu\text{m}$ ) followed by pressing into pellets. Morphology and elemental distribution were examined by scanning electron microscopy. Dielectric permittivity was measured in the temperature range 30–170°C. Phase transitions were analyzed using differential thermal analysis. **Results:** Pure diisopropylammonium bromide exhibits a first-order ferroelectric–paraelectric transition at 426 K with thermal hysteresis. In the composite, a pronounced decrease in the Curie temperature and splitting of the phase transition into two peaks ( $\approx 120$  and 133°C) have been observed. The splitting is attributed to microstructural heterogeneity and the formation of diisopropylammonium bromide regions with different interfacial boundary conditions in contact with Cu particles. **Conclusion:** Copper microparticles significantly modify the thermodynamic potential of the ferroelectric matrix due to interfacial screening and surface energy contributions. The observed reduction and splitting of the phase transition are consistent with the Landau–Ginzburg.

**Keywords:** ferroelectric, composite, phase transitions, third harmonic coefficient, permittivity

**Acknowledgements:** The work was supported by the Blagoveshchensk State Pedagogical University.

**For citation:** Milinskiy A. Yu., Baryshnikov S. V. Dielectric and thermal properties of composites based on diisopropylammonium bromide and copper microparticles. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 218–224 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-218-224>, EDN: WGPPMC

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

В последние годы композитные материалы на основе сегнетоэлектриков с добавлением металлических частиц привлекают внимание исследователей в связи с возможностью целенаправленной модификации их электрических и термодинамических свойств [1, 2]. Введение проводящих включений в сегнетоэлектрическую матрицу позволяет изменять характер межфазных взаимодействий, экранирующие поля, доменную структуру и, как следствие, параметры фазовых переходов, включая температуру Кюри, диэлектрическую проницаемость и величину спонтанной поляризации. Подобные системы активно изучаются как экспериментально [3, 4], так и в рамках теоретических моделей [5], описывающих влияние металлических частиц на свободную энергию и поляризационное состояние сегнетоэлектрических материалов.

Наиболее подробно исследованы композиты на основе классических неорганических сегнетоэлектриков, прежде всего титаната бария [2–4]. Показано, что введение металлических частиц, таких как никель или медь, может приводить к заметному смещению температуры сегнетоэлектрического фазового перехода и изменению диэлектрического отклика материала. Эти эффекты связывают с перераспределением локальных электрических полей и усилением роли межфазных границ.

На этом фоне особый интерес представляет изучение органических сегнетоэлектриков, которые, в отличие от неорганических, обладают меньшей плотностью, технологичностью обработки и высокой чувствительностью к внешним воздействиям. Одним из перспективных представителей данного класса является бромид диизопропиламмония (diisopropylammonium bromide, DIPAB), известный своими сегнетоэлектрически-



ми свойствами [6, 7]. DIPAB характеризуется высокой величиной спонтанной поляризации ( $23 \text{ мкКл/см}^2$ ). Это делает его привлекательным для применения в функциональных элементах электроники [8, 9].

Несмотря на значительный интерес к объемным кристаллам DIPAB, влияние металлических частиц на его сегнетоэлектрические свойства до настоящего времени не исследованы. В то же время, учитывая полярную природу DIPAB и его чувствительность к электрическим полям, можно ожидать, что включение металлических частиц приведёт к существенным изменениям его физических свойств, как это наблюдалось для иодида диизопропиламмония [10].

В связи с этим целью настоящей работы является исследование диэлектрических и тепловых свойств композитов  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$  на основе бромид диизопропиламмония с добавлением 2 об.% частиц меди размером 1 мкм (частицы меди занимают 2% от всего объема).

## 1. Объекты и методы исследования

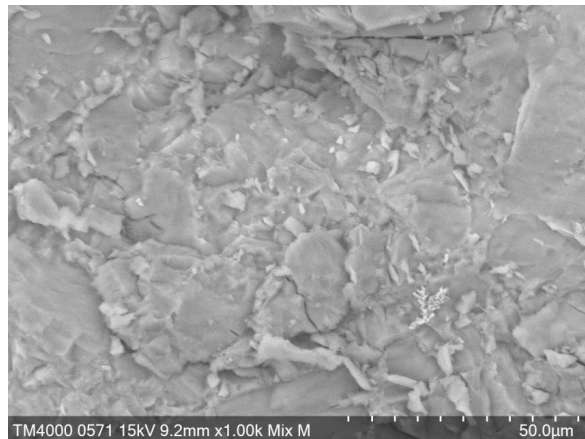
При комнатной температуре бромид диизопропиламмония кристаллизуется в сегнетоэлектрической фазе моноклинной сингонии. При нагревании до температуры порядка  $152^\circ\text{C}$  в системе реализуется структурный фазовый переход в неполярную моноклинную фазу. Установлено, что сегнетоэлектрический фазовый переход в DIPAB носит характер перехода первого рода [6].

Синтез бромид диизопропиламмония осуществлялся в соответствии с методикой, описанной в работе [11]. Композитные образцы состава  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$  изготавливались путем совместного механического перемешивания порошкообразного DIPAB и медного порошка с характерным размером частиц около 2 и 1 мкм соответственно. Частицы меди относятся к кубической сингонии. Процесс смешивания проводился на вибрационной мельнице MM500 Control (Retsch GmbH, Германия) в течение 30 мин при частоте 30 Гц.

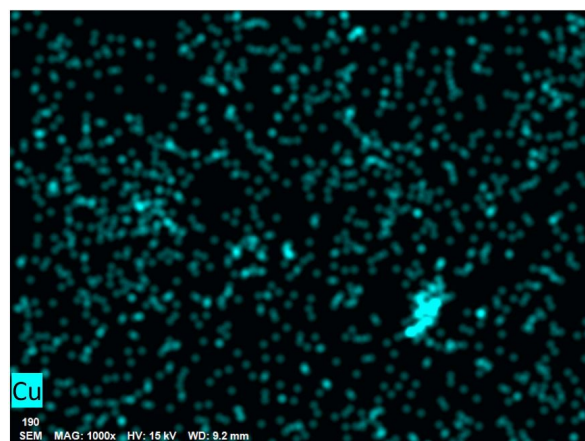
Исследование диэлектрических свойств осуществлялось с использованием измерителя E7-25 (МНИПИ, Беларусь). Нелинейные диэлектрические свойства исследовались при помощи авторской установки, описанной в [12, 13]. Для исследования методом дифференциального термического анализа (ДТА) применялся прибор

СТА РТ 1600 (Linseis, Германия). Исследования проводились в температурном интервале  $30\text{--}170^\circ\text{C}$ .

Для проведения экспериментальных измерений образцы DIPAB и композитов  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$  прессовались под давлением  $6000\text{--}7000 \text{ кг/см}^2$  в виде таблеток диаметром 12 мм и толщиной приблизительно 1 мм. Перед исследованием свойств композитов  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$ , тщательно исследовалась морфология и распределение элементов в них при помощи электронного микроскопа TM4000 Plus (Hitachi, Япония). На рис. 1 показано СЭМ-изображение композита и распределения частиц меди в нем. По данным [14] частицы меди в микромасштабе в композитных средах часто распределялись неравномерно, подобно «заснеженным сосновым ветвям», что наблюдалось для наших образцов.



a/a



b/b

Рис. 1. Изображение поверхности композита  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$  (a) и распределение в нем частиц меди (б)

Fig. 1. Image of the surface of the composite  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$  (a) and the distribution of copper particles in it (b)



## 2. Результаты и их обсуждение

Температурные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  для образцов DIPAB приведены на рис. 2. На кривых  $\epsilon'(T)$  при нагреве наблюдается выраженный максимум при температуре 153°C, что соответствует структурному фазовому переходу типа  $P2_1 \rightarrow P2_1/m$  [6]. При охлаждении положение максимума  $\epsilon'$  наблюдается при 150°C.

На рис. 2 также представлены температурные зависимости коэффициента третьей гармоники  $\gamma_{3\omega}$ . В режиме нагрева повышенные значения  $\gamma_{3\omega}$  фиксируются в широком температурном интервале – от комнатной температуры до 153°C, что свидетельствует о наличии сегнетоэлектрического упорядочения. Выше 153°C  $\gamma_{3\omega}$  изменяется слабо, что характерно для параэлектрического состояния вещества. При охлаждении заметный рост  $\gamma_{3\omega}$  начинается при температуре около 149°C.

Результаты ДТА также подтверждают наличие единственного фазового перехода: при нагреве он наблюдается при температуре 153°C, тогда как при охлаждении – при 149°C (см. вставку на рис. 2). Обнаруженный температурный гистерезис согласуется с выводами, сделанными

на основании диэлектрических линейных и нелинейных измерений.

Экспериментальные данные, полученные для композитов  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$  (рис. 3), свидетельствуют о существенном изменении положения фазовых переходов по сравнению с чистым DIPAB. По кривой  $\epsilon'(T)$  установить температуру фазовых переходов проблематично, однако по данным ДТА четко прослеживаются два фазовых перехода при нагреве с максимумом сигнала при 120 и 133°C. Это указывает на снижение температуры Кюри при введении металлических частиц Cu и появлению второго фазового перехода. Оба фазовых перехода являются переходами первого рода, потому что присутствует температурный гистерезис.

Появление двух фазовых переходов можно интерпретировать как следствие микроскопической неоднородности композита. В системе формируются два типа областей DIPAB: частицы, находящиеся в контакте с металлическими частицами, и частицы, непосредственно не контактирующие с частицами меди. Для первого типа частиц сегнетоэлектрический переход происходит при более низкой температуре (~120°C), тогда как для второго типа с косвенным влия-

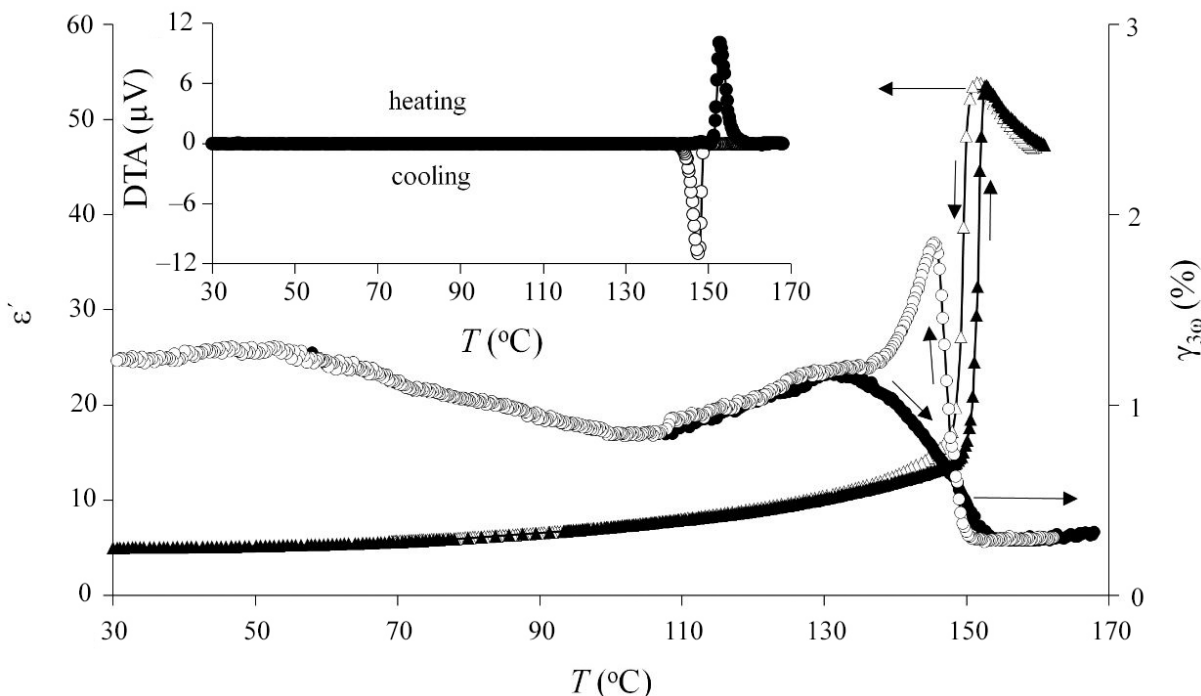


Рис. 2. Зависимости  $\epsilon'(T)$  (левая ось) и  $\gamma_{3\omega}(T)$  (правая ось) для DIPAB.  
 На вставке – зависимость сигнала ДТА от температуры для DIPAB  
 Fig. 2. Dependences  $\epsilon'(T)$  (left axis) and  $\gamma_{3\omega}(T)$  (right axis) for DIPAB.  
 The inset shows the dependence of the DTA signal on temperature for DIPAB

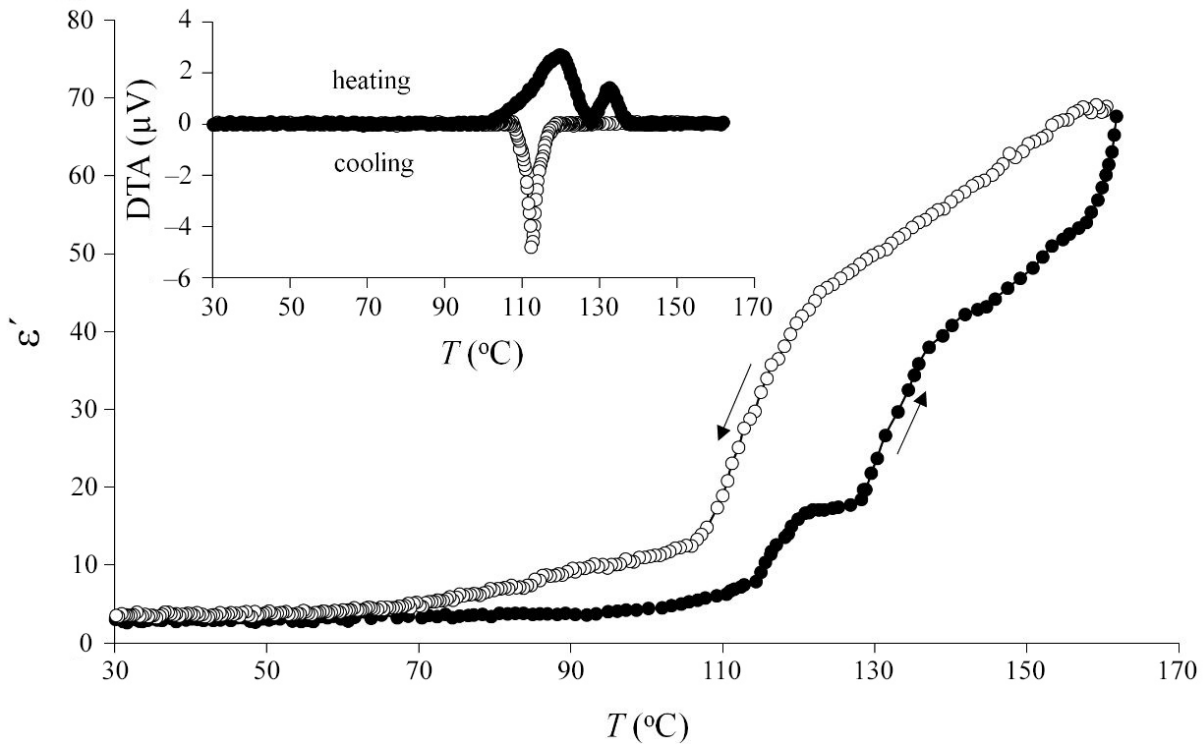


Рис. 3. Зависимости  $\epsilon'(T)$  (левая ось) для  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$ .  
 На вставке – зависимость сигнала ДТА от температуры для  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$   
 Fig. 3. Dependences  $\epsilon'(T)$  (left axis) for  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$ .  
 The inset shows the dependence of the DTA signal on temperature for  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$

янием он смещается в область более высоких температур ( $\sim 133^\circ\text{C}$ ). По результатам эксперимента фиксируется расщепление фазового перехода. Подобное ранее наблюдалось для композитов на основе иодида диизопропиламмония  $(\text{DIPAI})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$  [10].

Следует отметить, что температурная зависимость коэффициента третьей гармоники  $\gamma_{3\omega}$  для композитных образцов  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$  в настоящей работе не исследовалась. Это связано с тем, что присутствие металлических частиц меди приводит к существенному росту проводимости и диэлектрических потерь, особенно вблизи сегнетоэлектрических фазовых переходов. В таких условиях измеряемый сигнал третьей гармоники формируется не только за счёт нелинейной поляризации сегнетоэлектрической матрицы, но и вследствие токовой нелинейности. Это приводит к смешанному характеру нелинейного отклика и делает невозможной однозначную интерпретацию коэффициента  $\gamma_{3\omega}$ . Кроме того, выявленная микроскопическая неоднородность композита и наличие областей DIPAB с различным локальным окружением и, как следствие, различными температурами фазового перехода,

приводят к наложению вкладов от нескольких подсистем. В результате температурная зависимость  $\gamma_{3\omega}$  для композита не может быть корректно соотнесена с каким-либо одним фазовым переходом.

Для объяснения наблюдаемых эффектов целесообразно обратиться к феноменологической теории Ландау–Гинзбурга сегнетоэлектрических фазовых переходов, которая описывает критическое поведение вблизи температуры фазового перехода  $T_0$  за счёт разложения свободной энергии по параметру порядка [15–19]. В качестве параметра порядка в сегнетоэлектриках выступает поляризация  $P$  и определяемая поляризацией плотность свободной энергии, с учетом поверхностной составляющей  $F_s$ , представляется в виде:

$$F = \frac{\alpha_0}{2}(T - T_0)P^2 + \frac{\beta}{4}P^4 + \frac{\gamma}{6}P^6 + \frac{k}{4}(\text{grad}P)^2 + F_s, \quad (2)$$

где  $\alpha_0$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $k$  – коэффициенты разложения Ландау,  $(\text{grad}P)^2$  – член, учитывающий вклад неоднородности поляризации.

В композитных системах с металлическими частицами существенный вклад в свободную



энергию вносит взаимодействие поляризации сегнетоэлектрических частиц с экранирующими электрическими полями на межфазных границах. Металлические частицы эффективно компенсируют деполяризующие поля, однако одновременно приводят к изменению граничных условий для поляризации и к перераспределению локальных электрических полей. В рамках теории Ландау–Гинзбурга это эквивалентно появлению дополнительного поверхностного вклада в свободную энергию, который может быть записан как [15–19]

$$F_S = \int_S \frac{\sigma}{2} P^2 dS, \quad (3)$$

где  $S$  – суммарная площадь межфазных границ для единицы объема,  $\sigma$  – коэффициент, зависящий от экранирования и граничных условий. С учетом этого вклада эффективная температура  $T_c$  сегнетоэлектрического фазового перехода принимает вид [20]:

$$T_c = T_0 - \frac{\sigma}{\alpha} \frac{s}{V}, \quad (4)$$

где  $s$  и  $V$  – площадь и объем частицы соответственно.

В композитной системе формируются области сегнетоэлектрической матрицы, характеризующиеся различными значениями отношения  $S/V$ . Для частиц, удаленных от металлических частиц, вклад поверхностной энергии мал, и фазовый переход происходит при более высокой температуре. Понижение фазового перехода может быть обусловлено диполь-дипольным взаимодействием контактирующих и не контактирующих с Cu частиц DIPAB [21]. Напротив, в частицах DIPAB, контактирующих с частицами меди, эффективная температура Кюри существенно понижена. В результате макроскопический фазовый переход проявляется в форме двух последовательно реализующихся переходов, соответствующих различным подсистемам внутри композита.

Для оценки доли частиц DIPAB, находящихся в непосредственном контакте с частицами Cu, использовалась геометрическая модель случайного пространственного распределения сферических частиц. Предполагалось, что частицы являются жесткими, недеформируемыми и равномерно распределенными в объеме без агломерации. Средний размер используемых в работе частиц DIPAB составлял 2 мкм, а частиц Cu – 1 мкм. Контакт считался реализованным при геометрическом касании частиц. Для массы порошка меди

$m$  с радиусом частиц  $r$  (в предположении того, что частицы меди имеют сферическую форму) площадь межфазных границ оценивалась по формуле (см. [22]):

$$S = 3m/r\rho,$$

где  $\rho$  – плотность меди. В нашем случае доля частиц Cu, находящихся в контакте с DIPAB, составила 69%, а доля частиц Cu, не находящихся в контакте с DIPAB, – 31%. Эти результаты согласуются с результатами ДТА для композита  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$  (см. вставку на рис. 3), согласно которым при низкотемпературном фазовом переходе наблюдается большая интенсивность сигнала ДТА в сравнении с высокотемпературным.

Таким образом, наблюдаемое снижение температуры сегнетоэлектрического фазового перехода и его расщепление в композитах  $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$  находятся в согласии с феноменологической теорией Ландау–Гинзбурга с учетом поверхностных эффектов. Полученные экспериментальные данные подтверждают, что металлические частицы меди выступают в роли эффективного фактора, модифицирующего термодинамический потенциал сегнетоэлектрической матрицы.

## Заключение

Таким образом, в отличие от чистого DIPAB, для которого характерен один сегнетоэлектрический фазовый переход при 153°C, в композите наблюдается расщепление перехода на два. Предполагается, что данный эффект обусловлен микроскопической неоднородностью системы и различными граничными условиями поляризации в областях DIPAB, контактирующих и не контактирующих с металлическими частицами. В рамках феноменологического подхода Ландау–Гинзбурга результаты объясняются вкладом межфазной поверхности в свободную энергию и изменением локальных электрических полей.

## Список литературы / References

1. Lukacs V. A., Padurariu L., Ciomaga C. E., Gheorghiu F., Horchidan N., Giuranno D. Emergent electrical properties in metal-ceramic composites: A critical review. *Ceramics International*, 2025, vol. 51, iss. 25, pp. 43459–43487. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.07.137>
2. Buttlar T., Leipnerb H. S., Ebbinghaus S. G. Magnetoelectric properties of bulk 0-3 Fe/BaTiO<sub>3</sub>-composites. *RSC Adv.*, 2025, vol. 15, pp. 33480–33493. <https://doi.org/10.1039/D5RA03466C>



3. Xu N., Pu Y., Wang B., Wu H., Chen K. Enhanced mechanical and dielectric behavior of BaTiO<sub>3</sub>/Cu composites. *Ceramics International*, 2012, vol. 38, iss. 1, pp. 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.06.048>
4. Sánchez-Jiménez P. E., Pérez-Maqueda L. A., Diánez M. J., Perejón A., Criado J. M. Mechanochemical preparation of BaTiO<sub>3</sub>-Ni nanocomposites with high dielectric constant. *Composite Structures*, 2010, vol. 92, iss. 9, pp. 2236–2240. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.08.011>
5. Udalov O. G., Chtchelkatchev N. M., Glatz A., Beloborodov I. S. Interplay of Coulomb blockade and ferroelectricity in nanosized granular materials. *Phys. Rev. B*, 2014, vol. 89, art. 054203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.054203>
6. Thirimal C., Biswas P. P., Shin Y. J., Noh T. W., Giridharan N. V., Venimadhav A., Murugavel P. Study of ferroelectric characteristics of diisopropylammonium bromide films. *J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 120, iss. 12, art. 124107. <https://doi.org/10.1063/1.4963754>
7. Khatun M., Kabir E. Dielectric relaxation and electrical conductivity in lead-free organic ferroelectric diisopropylammonium bromide (dipaBr). *Solid State Communications*, 2024, vol. 393, art. 115670. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2024.115670>
8. Deswal S., Arab S., He N., Gao W., Lee B., Misra V. Triboelectric nanogenerator based on electrospun molecular ferroelectric composite nanofibers for energy harvesting. *RSC Applied Polymers*, 2024, vol. 2, iss. 4, pp. 634–641. <https://doi.org/10.1039/d4lp00024b>
9. Yang W., Li H., Lin J., Chen G., Wang Y., Wang L., Lu H., Chen L., Lei Q. A novel all-organic DIPAB/PVDF composite film with high dielectric permittivity. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, vol. 28, pp. 9658–9666. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6716-x>
10. Milinskiy A. Yu., Baryshnikov S. V., Stukova E. V. Dielectric and thermal properties of composites based on diisopropylammonium iodide and copper microparticles. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2025, vol. 68, no. 7, pp. 50–56 (in Russian). <https://doi.org/10.17223/00213411/68/7/7>
11. Baryshnikov S. V., Milinskii A. Y., Egorova I. V., Charnaya E. V. Size Effect in Nanocomposites Based on Molecular Ferroelectric Diisopropylammonium Bromide. *Physics of the Solid State*, 2019, vol. 61, iss. 2, pp. 134–138. <https://doi.org/10.1134/S1063783419020057>
12. Milinskii A., Baryshnikov S., Parfenov V., Kozlola S., Thuong N. H. Nonlinear dielectric response of nanocomposites based on potassium dihydrogen phosphate. *Trans. Electr. Electron. Mater.*, 2018, vol. 19, pp. 201–205. <https://doi.org/10.1007/s42341-018-0032-x>
13. Baryshnikov S. V., Milinskii A. Y., Antonov A. A., Charnaya E. V., Bugaev A. S. Phase transitions in the (BaTiO<sub>3</sub>)<sub>x</sub>/(BiFeO<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub> composite ceramics: Dielectric studies. *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 80, pp. 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.05.037>
14. Ribeiro V. F., Cardoso J. E., Simões D. N., Pittol M., Tomacheski D., Santana R. M. C. Use of copper microparticles in SEBS/PP compounds. Pt. 1: Effects on morphology, thermal, physical, mechanical and antibacterial properties. *Mat. Res.*, 2019, vol. 22 (2), art. e20180304. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0304>
15. Bystrov V. S., Fridkin V. M. Two-dimensional ferroelectrics and homogeneous switching. On the 75th anniversary of the Landau – Ginzburg theory of ferroelectricity. *Phys. Usp.*, 2020, vol. 63, pp. 1140–1147. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.09.038841>
16. Segatto M., Lizzit, D., Esseni, D. An LGD model with extrinsic nucleations for polarization dynamics in ferroelectric materials and devices. *Sci. Rep.*, 2025, vol. 15, art. 19619. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03469-8>
17. Ginzburg V. L., Levanyuk A. P., Sobyenin A. A. Comments on the region of applicability of the Landau theory for structural phase transitions. *Ferroelectrics*, 1987, vol. 73, pp. 171–182. <https://doi.org/10.1080/00150198708227916>
18. Levanyuk A. P., Misirlioglu I. B., Okatan M. B. Landau, Ginzburg, Devonshire and others. *Ferroelectrics*, 2020, vol. 569, iss. 1, pp. 310–323. <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1822684>
19. Ginzburg V. L. Phase transitions in ferroelectrics: Some historical remarks. *Ferroelectrics*, 2002, vol. 267, pp. 23–32, <https://doi.org/10.1080/00150190210992>
20. Zhong W. L., Wang Y. G., Zhang P. L., Qu B. D. Phenomenological study of the size effect on phase transitions in ferroelectric particles. *Phys. Rev. B*, 1994, vol. 50, pp. 698–703. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.698>
21. Uskov A. V., Charnaya E. V., Pirozerskii A. L., Bugaev A. S. The transverse Ising model of the ferroelectric phase transition in a system of coupled small particles. *Ferroelectrics*, 2015, vol. 482, pp. 70–81. <https://doi.org/10.1080/00150193.2015.1056708>
22. Stoyan D., Cepuritis R. Estimation of the specific surface area of particle samples. *Metrika*, 2026. <https://doi.org/10.1007/s00184-026-01021-w>

Поступила в редакцию 25.02.2026; одобрена после рецензирования 23.03.2026; принята к публикации 07.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 25.02.2026; approved after reviewing 23.03.2026; accepted for publication 07.04.2026; published 30.06.2026