

УДК 536.37

Электрокалорический микроохладитель для термоупругого фотоприемника*

М. Т. БУЙ¹, *д-р техн. наук* И. В. БАРАНОВ¹, *д-р техн. наук* О. В. ПАХОМОВ¹, А. В. ЕСЬКОВ^{1,2},
А. С. АНОХИН¹, А. А. СЕМЕНОВ², П. Ю. БЕЛЯВСКИЙ^{1,2}

¹ Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

² СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 197376, Санкт-Петербург, Россия

buiinhtuan2809@gmail.com

Одним из недостатков фотоприемников, работающих на основе термоупругого эффекта, является их температурная нестабильность, снижающая чувствительность фотоприемников и ограничивающая область их практического применения. В работе предложено использование термостабилизирующей системы, основанной на электрокалорическом эффекте, которая способна обеспечить достаточно точное поддержание температуры фотоприемника. Разработана модель малогабаритного энергоэффективного охлаждающего устройства на основе электрокалорического эффекта, состоящего из многослойных емкостных структур на основе сегнетоэлектрических материалов и не требующего использования дополнительных систем отвода тепла. Теоретически исследован процесс релаксации теплового поля термоупругого фотоприемника при различной интенсивности принимаемого излучения, обеспечивающего удельные мощности: $P_1 = 1 \text{ Вт/см}^2$, $P_2 = 2 \text{ Вт/см}^2$, $P_3 = 3 \text{ Вт/см}^2$. Так же в работе выполнено моделирование процесса температурной стабилизации фотоприемника, показано, что предложенная система термостабилизации обеспечивает поддержание температуры на заданном уровне с точностью $\pm 0,1 \text{ К}$.

Ключевые слова: электрокалорический эффект, микроохладитель, твердотельное охлаждение, фотоприемник, термоупругий эффект.

Информация о статье

Поступила в редакцию 26.09.2016, принята к печати 24.10.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-15-4-63-67

Ссылка для цитирования

Буй М. Т., Баранов И. В., Пахомов О. В., Еськов А. В., Анохин А. С., Семенов А. А., Белявский П. Ю. Электрокалорический микроохладитель для термоупругого фотоприемника // Вестник Международной академии холода. 2016. № 4. С. 63–67.

Electrocaloric microcooler for thermoelastic detector

M. T. BUY¹, *D. Sc.* I. V. BARANOV¹, *D. Sc.* O. V. PAKHOMOV¹, A. V. ESKOV^{1,2},

A. S. ANOKHIN¹, A. A. SEMENOV², P. Yu. BELYAVSKY^{1,2}

¹ ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

² Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia

Temperature instability is one of the major disadvantages of detectors based on the thermoelastic effect, which reduces their responsivity and limits their application fields. The article deals with a thermostabilizing system based on electrocaloric effect able to maintain the temperature with an accuracy given. A model for energy efficient microcooler based on electrocaloric effect was developed. The device is made of multilayer capacitors and does not require an additional system of heat removal. Thermal filed relaxation process of thermoelastic sensor is analyzed at different intensity of received radiation with the following specific power: $P_1 = 1 \text{ W/sm}^2$, $P_2 = 2 \text{ W/sm}^2$, $P_3 = 3 \text{ W/sm}^2$. The simulation of sensor thermal stabilization is carried out. The thermal stabilization system is shown to maintain necessary temperature within the accuracy of $\pm 0.1 \text{ K}$.

Keywords: electrocaloric effect, microcooler, solid state cooling, detector, thermoelastic effect.

Охлаждение фотоприемника на термоупругом эффекте

Для обработки материалов в настоящее время активно используются лазеры при полиимпульсном ре-

жиме. Это позволяет произвести обработку локального участка материала без нарушения его структуры и свойств, что приводит к минимальному короблению деталей. Для обеспечения качества технологических процессов необходимо контролировать нагрев и ох-

* Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук МК-6229.2015.8.

лаждение обрабатываемого объема материала. Очевидна необходимость исследования характеристик процесса релаксации теплового поля по сечениям полупространства путем использования приемников оптического излучения и, в частности, приемников на основе термоупругого эффекта в кристаллическом кварце. Под термоупругим эффектом понимают возникновение упругих напряжений под действием теплового поля. В качестве приемного элемента приемников в оптико-электронном приборостроении используется кристаллический кварц. Преобразование упругих напряжений в электрический сигнал осуществляется вследствие пьезоэффекта [1].

Чувствительный элемент термоупругого преобразователя состоит из тонкой пластинки размером пластинки $10 \times 10 \times 10$ мм из монокристаллического кварца (X -срез, перпендикулярный кристаллофизической оси X и используется для возбуждения продольного пьезоэффекта; плотность 2625 кг/м³; удельная теплоемкость 750 Дж/(кг·К); теплопроводность $\lambda_T = 2,1$ Вт/(м·К), припаянной к теплоотводящему медному демпферу размером $10 \times 10 \times 10$ мм. На переднюю поверхность кварцевой пластинки наносится никелевый электрод и платиновая чернь (имеющая высокую поглощающую способность) для минимизации отражения. Чувствительная мощность фотоприемника составляет 82%.

Разность потенциалов на пластинке при ее облучении гармонически модулированным потоком излучения определяется выражением

$$V_{XX}(\omega) = \frac{k_{my} k_n \Phi}{h C_0 \omega} A(\omega) \sin[\omega t + \varphi],$$

где k_{my} — коэффициент термоупругого преобразования; k_n — коэффициент поглощения; Φ — поток излучения; h — толщина, C_0 — емкость ТУП; $A(\omega)$ — коэффициент амплитудных искажений приемника; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота модуляции падающего на приемник потока излучения.

Свойства кварца, в том числе модули упругости и константы гибкости, сильно зависят от температуры [2]. Температурные характеристики упругих постоянных α -кварца являются непрерывными вплоть до точки $\alpha \leftrightarrow \beta$ -перехода. Это приводит к изменению чувствительности в зависимости от температуры, что сказывается при высокой выделяемой мощности. При импульсном режиме работы нестационарные и стационарные составляющие теплового поля представляют собой величины одного порядка, что может привести к возникновению нелинейности чувствительности приемника излучения. Коэффициент теплового расширения кварца с повышением температуры возрастает, претерпевая скачок в точке $\alpha \leftrightarrow \beta$ -перехода (при 573 °С) и плавно уменьшается при дальнейшем повышении температуры. Кроме того, в работе [3] установлено, что в термоупругом фотоприемнике при полиимпульсном воздействии средняя мощность много больше, чем в одноимпульсном режиме. Это вызывает нагрев полупространства и может оказывать влияние на работу приемника. Таким образом, термостабилизация фотоприемников на основе термоупругого эффекта является актуальной задачей.

Термодинамический цикл электрокалорического охладителя

Системы термостабилизации термоупругих фотоприемников должны соответствовать требованиям: малые габаритные размеры; способность работать при комнатной температуре; достаточно высокая объемная мощность отводимого тепла. Этим требованиям в полной мере отвечают твердотельные термостабилизирующие системы на основе электрокалорического эффекта [4, 5]. Такие системы обладают малым размером, вследствие высокой объемной плотности энтропии активных материалов (~ 7 раз больше по сравнению с газами), а также не требуют использования дополнительных устройств отвода тепла [6–9].

Электрокалорический эффект заключается в изменении температуры тела при изменении напряженности внешнего электрического поля. Принцип работы предлагаемой термостабилизирующей системы основан на разнице величин изменения температуры вследствие электрокалорического эффекта при поляризации и деполяризации сегнетоэлектрического образца [10], что связано с нелинейностью температурной зависимости поляризации. Величина разницы температурного отклика для твердого раствора $Ba_{0,65}Sr_{0,35}TiO_3$ может достигать $dT \approx 5$ мК при комнатной температуре [11].

Плотность твердого раствора $Ba_{0,65}Sr_{0,35}TiO_3$

$$\begin{aligned} \rho &= 0,65 \cdot \rho_{BaTiO_3} + 0,35 \rho_{SrTiO_3} = \\ &= 0,65 \cdot 6,02 + 0,35 \cdot 4,81 = 5596,5 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Принимая во внимания типичные значения для теплоемкости 527 Дж/(кг·К) твердых растворов титаната бария стронция, получим величину поглощенной энергии

$$A = m \cdot C \cdot dT;$$

$$A = M \cdot N \cdot V_3 \cdot \rho \cdot C \cdot dT,$$

где M — число охлаждающих блоков; N — число электрокалорических элементов в одном блоке; V_3 — объем одного электрокалорического элемента; C — теплопроводность материала электрокалорического элемента.

$$A = 5 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-2} \cdot 5596,5 \cdot 527 \cdot 0,005 = 37 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

Отсюда мы можем получить поглощенную мощность микроохладителя

$$W = A \cdot f = 37 \cdot 10^{-3} f.$$

Пусть на фотоприемник с чувствительностью мощности 82% действует полиимпульсное излучение мощности с $W_1 = 1$ Вт до $W_3 = 3$ Вт. Тогда частота охладителя равна

$$\begin{aligned} f &= \frac{W_1 + W_3}{2} \cdot (100\% - 82\%) / A = \\ &= \frac{1 + 3}{2} \cdot (100\% - 82\%) / \frac{37 \cdot 10^{-3}}{1} \approx 10 \text{ Гц}. \end{aligned}$$

Компьютерная модель электрокалорического микроохладителя для термоупругого фотоприемника

Предлагается численная модель твердотельного охлаждающего устройства, не нуждающаяся в тепловом сбросе, на основе многослойных емкостных структур. В качестве изоляционного теплового контакта был выбран изолирующий карбид кремния, обладающий высокой теплопроводностью. В качестве активных электрокалорических элементов были выбраны слоистые сегнетоэлектрические емкостные структуры на основе $Ba_{0.65}Sr_{0.35}TiO_3$, размером $10 \times 10 \times 1$ мм. Четыре структуры параллельно подключены в одном охлаждающем блоке (рис. 1).

Все активные блоки подключены к одному электроду, одна из обкладок каждого блок-конденсатора граничит с общим заземленным тепловым буфером. Другая обкладка каждого блок-конденсатора граничит с собственным тепловым буфером, через нее идет подача управляющего сигнала. Они подключены, как показано на рис. 2.

Моделирование процесса релаксации теплового поля и процесса термостатирования термоупругого приемника с электрокалорическим микроохладителем

Допустим, что теплопроводность электродов и теплового контакта бесконечно велика. На фотоприемник действует полиимпульсное излучение с периодом $T = 0,01$ с и с различной интенсивностью, обеспечивающей мощности: $P_1 = 1$ Вт/см², $P_2 = 2$ Вт/см², $P_3 = 3$ Вт/см².

Общий вид неоднородного уравнения теплопроводности для медного демпфера выглядит следующим образом

$$\rho_{Cu} C_{Cu} \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda^2 \Delta T = Q.$$

Граничные условия:

$$T = 293 \text{ K}; x = 1 \text{ мм};$$

$$\Delta S = 0; x = 0 \text{ мм}.$$

Решив данное уравнение, получим температурные зависимости от времени на границе демпфера с микроохладителем.

Рассмотрим модель охлаждающей системы, которая показана на рис. 3. Она состоит из 10 электрокалорических элементов, отделенных от окружающей среды теплопроводящими слоями из меди. Будем исследовать двухмерную модель и считать, что температура меняется только вдоль оси x и оси y . Десять границ являются теплоизолированной, а на пять вершинах поддерживается постоянная температура $T = 293$ К, которая равна начальной температуре. Теплоемкость C и теплопроводность λ материала принимаются как постоянные величины в пределах одного участка модели. Тогда распределение температуры $T((x, y), t)$ в границе общего электрода находится в результате решения уравнения теплопроводности [12]

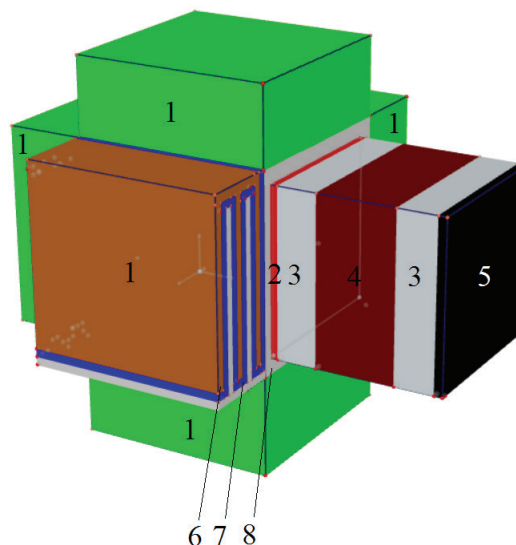


Рис. 1. Термоупругий фотоприемник с электрокалорическим охладителем: 1 — охлаждающие блоки; 2 — изоляционный тепловой контакт; 3 — электроды приемника; 4 — кристаллический кварц; 5 — платиновая чернь; 6 — тепловой буфер охлаждающего блока; 7 — электрокалорический элемент; 8 — общий тепловой буфер

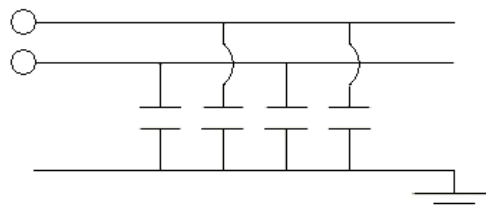


Рис. 2. Электрическая схема подключения одного из 5-ти охлаждающих блоков в модели электрокалорического микроохладителя для термоупругого фотоприемника

$$C \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda^2 \frac{\partial^2 T}{\partial(x, y) \partial t} = Q((x, y), T, t),$$

которое удовлетворяет начальному и граничным условиям, соответственно:

$$T(x, y, 0) = T_0 = 293 \text{ K};$$

$$T((x, y) \in (X_1, Y_1), t) = T_0 = 293 \text{ K};$$

$$\lambda^2 \frac{\partial^2 T}{\partial(x, y) \partial t}((x, y) \in (X_2, Y_2), t) = 0.$$

Функция $Q((x, y), T, t)$ определяет количество теплоты, выделяемое (или поглощаемое) тепловым электрокалорическим источником, и задается в виде [10]

$$Q((x, y), T, t) = [\gamma_0 + \gamma_1(T - T_0)]E \frac{\partial E}{\partial t};$$

$$Q((x, y), T, t) = [aT - b]E \frac{\partial E}{\partial t},$$

где $E = 100$ В/мм — напряженность электрического поля на электрокалорическом элементе с длительностью 250 мкс и периодом 0,1 с; $a = \gamma_1 = 32,5$; $b = \gamma_1 T_0 - \gamma_0 = 9650$ — константы для $Ba_{0.65}Sr_{0.35}TiO_3$, получены в эксперименте.

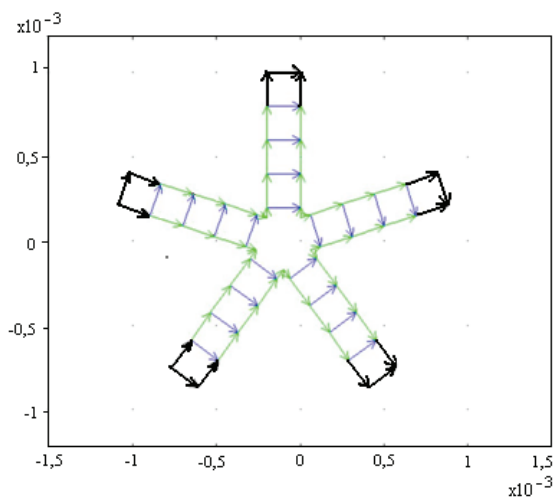


Рис. 3. Граничные условия:
 — X_p, Y_1 (с постоянной температурой);
 — X_2, Y_2 (теплоизоляционные)

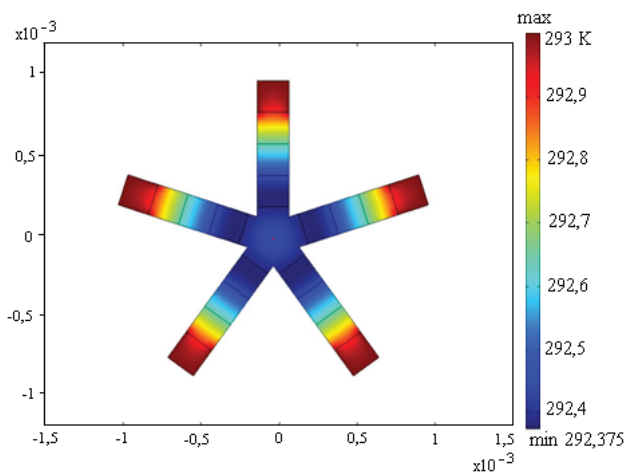


Рис. 4. Тепловое поле во всех блок-конденсаторах и в общем электроде электрокалорического микроохладителя

Тепловое поле во всех блок-конденсаторах и в общем электроде электрокалорического микроохладителя при мощности $P_1 = 1 \text{ Вт/см}^2$ показано на рис. 4.

На рис. 5 приведено температурное поле после 400 импульсов на границе изоляционного теплового контакта без учета электрокалорического микроохладителя и с учетом электрокалорического микроохладителя.

Начальная температура составляет 293 К. После 4 с (соответственно 400 импульсов) при мощности излучения $P_1 = 1 \text{ Вт/см}^2$; $P_2 = 2 \text{ Вт/см}^2$; $P_3 = 3 \text{ Вт/см}^2$, граница фотоприемника нагревается соответственно на 0,44 К; 0,88 К; 1,32 К. А когда охладитель включен, через 4 с (40 периодов работы охладителя, когда его частота равна 10 Гц) он поглощает остаточную мощность излучения и температура границы возвращается вниз. Так что, из-

менение средней температуры демпфера приемника составляет соответственно до -0,4 К; -0,1 К; 0,1 К (за 4 с) с точностью 0,1 К.

Заключение

В работе было выполнено численное моделирование тепловых процессов в системе, работающей на основе электрокалорического эффекта. Данная система предназначена для термостатирования фотоприемника на термоупругом эффекте. В результате численного моделирования удалось установить, что предлагаемая система позволяет термостатировать требуемый объект на заданном температурном уровне с точностью $\pm 0,1 \text{ К}$.

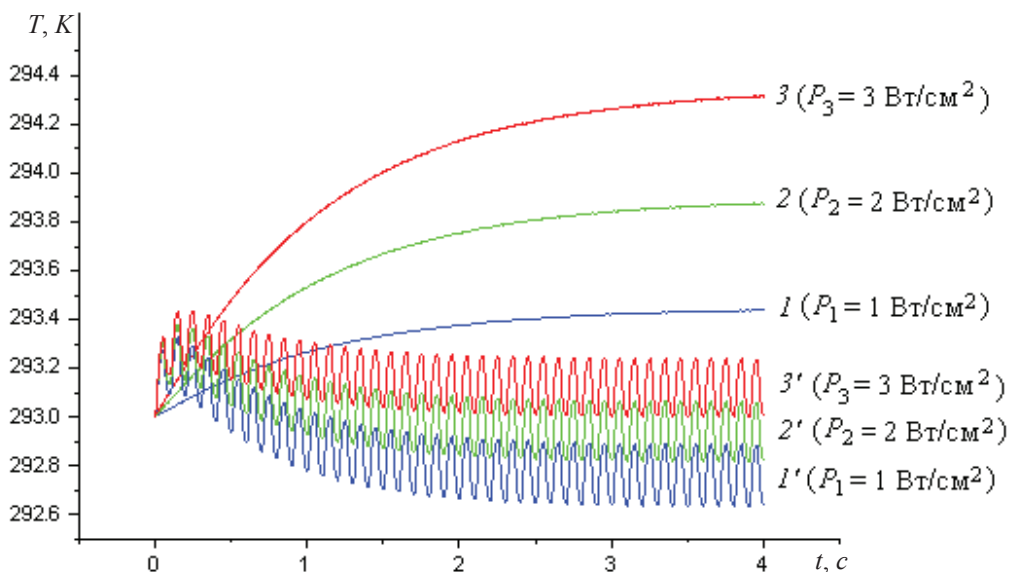


Рис. 5. Тепловое поле на границе изоляционного теплового контакта после 400 импульсов излучения: 1, 2, 3 — без использования электрокалорического микроохладителя; 1', 2', 3' — с использованием электрокалорического микроохладителя

Литература

1. Ишанин Г. Г., Полищиков Г. В. Основы теории приемников на термоупругом эффекте при измерении гармонически модулированных потоков излучения // Известия вузов. Приборостроение. 1985. Т. 28, № 8. С. 72–80.
2. Фам Шон Лам, Буй Минь Туан. Физические основы и принципы построения приемников оптического излучения на термоупругом эффекте в кристаллическом кварце. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 4. С. 15–20.
3. Полищиков Г. В., Фам Шон Лам, Буй Минь Туан. Тепловое поле приемников излучения на термоупругом эффекте в кристаллическом кварце при полиимпульсном воздействии. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 6. С. 14–18.
4. Valant M. Electrocaloric materials for future solid-state refrigeration technologies // Progress in Materials Science. 2012. V. 57 (6). P. 980–1009.
5. Ozbolt M., Kitanovski A., Tusek J., Poredos A. Electrocaloric Refrigeration: Thermodynamics, State of the Art and Future Perspectives. // International Journal of Refrigeration. 2014. V. 40. P. 174–188.
6. Karmanenko S. F., Pakhomov O. V., Prudan A. M., Starkov A. S., Es'kov A. V. Layered ceramic structure based on the electrocaloric elements working as a solid state cooling line // Journal of the European Ceramic Society. 2007. V. 27 (8). P. 3109–3112.
7. Еськов А. В., Карманенко С. Ф., Пахомов О. В., Старков А. С. Моделирование твердотельного охладителя с электрокалорическими элементами // ФТТ. 2009. Т. 51. Вып. 8. С. 1483.
8. Пахомов, О. В., Карманенко, С. Ф., Семенов, А. А., Старков, А. С., Еськов, А. В. Термодинамическая оценка эффективности охлаждения посредством электрокалорической твердотельной линии // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 80–85.
9. Karmanenko S., Semenov A., Dedyk A., Es'kov A., Ivanov A., Belivskiy P., Pakhomov O. New approaches to electrocaloric-based multilayer cooling. In Electrocaloric Materials. // Berlin Heidelberg. Springer. 2014. P. 183–223.
10. Старков А. С., Карманенко С. Ф., Пахомов О. В., Еськов А. В., Семкин Д., Хагберг Ж. Электрокалорический отклик сегнетоэлектрика на воздействие периодического электрического поля // ФТТ. 2009. Т. 51. Вып. 7. С. 1422.
11. Еськов А. В., Белявский П. Ю., Анохин А. С., Пахомов О. В., Семенов А. А., Мылников И. Л., Никитин А. А., Буй М. Т., Черкасский М. А., Плотников В. В. Экспериментальное исследование электрокалорического отклика в сегнетоэлектрических материалах // ЖТФ. 2016, т. 86, вып. 7. с. 151–153.
12. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. — М.: Энергия, (1975). 492 с.

References

1. Ishanin G. G., Polshchikov G. V. Bases of the theory of receivers on thermoelastic effect at measurement of harmoniously modulated radiation streams. *Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye*. 1985. V. 28, No 8. p. 72–80. (in Russian)
2. Fam Shon Lam, Bui Min' Tuan. Physical bases and the principles of creation of receivers of optical radiation on thermoelastic effect in crystal quartz. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*. 2011. No 4. p. 15–20. (in Russian)
3. Pol'shchikov G. V., Fam Shon Lam, Bui Min' Tuan. The thermal field of receivers of radiation on thermoelastic effect in crystal quartz at polypulse influence. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*. 2013. No 6. p. 14–18. (in Russian)
4. Valant M. Electrocaloric materials for future solid-state refrigeration technologies. *Progress in Materials Science*. 2012. V. 57 (6). P. 980–1009.
5. Ozbolt M., Kitanovski A., Tusek J., Poredos A. Electrocaloric Refrigeration: Thermodynamics, State of the Art and Future Perspectives. *International Journal of Refrigeration*. 2014. V. 40. P. 174–188.
6. Karmanenko S. F., Pakhomov O. V., Prudan A. M., Starkov A. S., Es'kov A. V. Layered ceramic structure based on the electrocaloric elements working as a solid state cooling line. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007. V. 27 (8). P. 3109–3112.
7. Es'kov A. V., Karmanenko S. F., Pakhomov O. V., Starkov A. S. Modeling of a solid-state cooling agent with electrocaloric elements. *FTT*. 2009. V. 51. No. 8. p. 1483. (in Russian)
8. Pakhomov, O. V., Karmanenko, S. F., Semenov, A. A., Starkov, A. S., Es'kov, A. V. Thermodynamic efficiency evaluation of chilling by means of the electrocaloric solid-state line. *ZhTF*. 2010. V. 80. No. 8. p. 80–85. (in Russian)
9. Karmanenko S., Semenov A., Dedyk A., Es'kov A., Ivanov A., Belivskiy P., Pakhomov O. New approaches to electrocaloric-based multilayer cooling. In *Electrocaloric Materials. Berlin Heidelberg. Springer*. 2014. P. 183–223.
10. Starkov A. S., Karmanenko S. F., Pakhomov O. V., Es'kov A. V., Semikin D., Hagberg J. Electrocaloric response of a ferroelectric material to influence of periodic electric field. *FTT*. 2009. V. 51. No. 7. p. 1422. (in Russian)
11. Es'kov A. V., Belyavskii P. Yu., Anokhin A. S., Pakhomov O. V., Semenov A. A., Myl'nikov I. L., Nikitin A. A., Bui M. T., Cherkasskii M. A., Plotnikov V. V. Pilot study of an electrocaloric response in the segnetoelektricheskikh materials. *ZhTF*. 2016, V. 86, No. 7. p. 151–153. (in Russian)
12. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Heat transfer. Moscow, Energiya, (1975). 492 p. (in Russian)