

эффективность охлаждения, однако ограничивающими факторами остаются увеличение массы, усложнение процессов герметизации и необходимость обслуживания.

Значительное внимание уделяется методам, основанным на фазовых переходах.

Тепловые трубы и испарительные камеры используют скрытую теплоту испарения для переноса энергии от источника к стенкам корпуса. Эти системы отличаются высокой эффективностью и долговечностью, благодаря чему нашли применение в космической технике и телекоммуникационных системах [3]. Вместе с тем они технологически сложны и чувствительны к ориентации устройства в гравитационном поле. Близким по принципу методом является применение фазопереходных материалов, аккумулирующих тепло за счет плавления. Они позволяют сглаживать температурные пики в системах с переменной нагрузкой, но обладают ограниченной теплоемкостью и требуют восстановления исходной фазы.

Активные методы охлаждения находят применение в случаях, когда пассивных решений оказывается недостаточно. Наиболее известными являются термоэлектрические модули Пельтье, используемые в оптоэлектронных комплексах, лазерной аппаратуре и измерительных системах. Их достоинством является точность регулирования температуры, однако недостатками выступают энергопотребление и усложнение конструкции [4]. Другим направлением остаются системы с принудительной циркуляцией жидкого теплоносителя, которые обеспечивают интенсивный отвод тепла. Подобные решения применяются в военной электронике и энергетике, где тепловые потоки предельно высоки, но наличие подвижных элементов и необходимость дополнительного энергоснабжения ограничивают их использование в компактных устройствах.

Следует подчеркнуть, что эффективность охлаждения определяется не только выбранным методом, но и конструктивными решениями. На стадии проектирования используются тепловые расчеты и моделирование, позволяющие прогнозировать распределение температур и оптимизировать размещение компонентов. Такой подход обеспечивает снижение локальных перегревов еще на раннем этапе и повышает общую эффективность системы [5].

Современные разработки направлены на интеграцию интеллектуальных систем управления тепловыми процессами. Датчики температуры, термисторы и микроконтроллеры позволяют в реальном времени отслеживать тепловое состояние устройства и динамически регулировать работу активных элементов. Такой подход открывает возможности для создания адаптивных систем охлаждения, способных подстраиваться под переменные нагрузки и внешние условия, что особенно важно для космических и военных приложений.

Перспективным направлением остается применение новых материалов с уникальными тепловыми свойствами, включая нанокompозиты, графеновые покрытия и сплавы с управляемой анизотропией теплопроводности. Комбинация этих материалов с пассивными и активными методами охлаждения позволяет существенно повысить надежность, продлить ресурс эксплуатации и уменьшить габариты аппаратуры, сохраняя при этом требуемую температурную стабильность.

Таким образом, обеспечение тепловых условий в герметичных электронных устройствах представляет собой комплексную инженерную задачу, требующую сочетания пассивных и активных методов, конструктивной оптимизации и внедрения современных материалов и интеллектуальных систем управления. Комбинированный подход остается наилучшим решением для достижения высокой надежности и долговечности радиоэлектронной аппаратуры в условиях повышенных требований к температурной стабильности, вибропрочности и эксплуатационной надежности.

Литература

1. Булат, Л. П. Термоэлектрические охлаждающие устройства: учеб. пособие / Л. П. Булат, Е. В. Бузин. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 134 с.
2. Дульнев, Г. Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах / Г. Н. Дульнев, Э. М. Семяшкин. – Ленинград: Энергия, 1968. – 152 с.
3. Дульнев, Г. Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры: учебник / Г. Н. Дульнев, Н. Н. Тарновский. – Ленинград: Энергия, 1975. – 200 с.
4. Майданик, Ю. Ф. Контурные тепловые трубы – высокоэффективные теплопередающие устройства для систем охлаждения электроники / Ю. Ф. Майданик // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2005. – № 4. – С. 58–69.
5. Шарков, А. В. Системы охлаждения и термостатирования / А. В. Шарков, В. А. Кораблев, В. В. Герасютенко. – СПб.: Университет ИТМО, 2021. – 216 с.

УДК 530.182

ТОПОЛОГИЧЕСКИ НЕТРИВИАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ В МОДЕЛИ φ^4 С НАРУШЕНИЕМ ЛОРЕНЦ-ИНВАРИАНТНОСТИ И УЧЕТЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИССИПАЦИИ Князев М. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрена модификация нелинейного уравнения в модели φ^4 , в которой одновременно рассматриваются эффект нарушения Лоренц-инвариантности и возможность существования диссипативных процессов в различных пространственных точках системы в один и тот же времени. Построено явное

аналитическое выражение топологически нетривиальное решение нового уравнения. Показано, что в такой системе возможна ситуация, при которой один из параметров решения, а именно ω , оказывается независимым явным образом от коэффициента диссипации.

Ключевые слова: Кинк, модель ϕ^4 , нарушение Лоренц-инвариантности, метод Хироты.

TOPOLOGICALLY NON-TRIVIAL SOLUTION IN ϕ^4 MODEL WITH LORENTZ-INVARIANCE VIOLATION AND SPATIAL DISSIPATION Knyazev M. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The modification of nonlinear equation of motion in ϕ^4 – model with violation of the Lorentz-invariance and spartial dissipation at the same moment of time is considered. An explicit analytical expression for topologically nontrivial solution of this equation is constructed. A possibility when one of the parameters of solution does not depend on the coefficient of dissipation is demonstrated.

Keywords: Kink, model ϕ^4 , Lorentz-invariant violation, Hirota method.

*Адрес для переписки: Князев М. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: maknyazev@bntu.by*

В современной физике требование инвариантности уравнений движения относительно преобразований Лоренца является общепринятым. Однако существует и достаточное количество процессов, которые, как следует из экспериментальных исследований, протекают с нарушением этого требования. В работе [1] кратко приводится перечень таких проблем.

Модель ϕ^4 теории поля относится к числу наиболее распространенных методов теоретикополевого описания явлений в различных областях исследований [2–4]. Уравнение движения в этой модели является Лоренц-инвариантным. Однако, в последнее время появляются работы, в которых учитывается возможность нарушения Лоренц-инвариантности в уравнении движения модели ϕ^4 . Так, в работе [5] рассмотрена простейшая модификация этого уравнения в виде

$$\phi_{tt} - \phi_{xx} + 2\beta\phi_{xt} - \phi + \phi^3 = 0, \quad (1)$$

где $\phi_{xx} = \partial^2\phi/\partial x^2$ и т.п. Параметр β является положительной константой и описывает нарушение Лоренц-инвариантности. В работе [5] показано, это уравнение инвариантно относительно преобразования

$$x' = \gamma(x_0 - ut),$$

где $\gamma = 1/\sqrt{1 - u^2 + 2\beta u}$, а его топологически нетривиальное решение имеет вид

$$\phi(x, t) = \tanh[\gamma(x - ut - x_0)].$$

Вопрос о возможности построения связанных состояний кинков и/или антикинков в настоящее время является открытым.

Дальнейшие исследования нарушения Лоренц-инвариантности в модели ϕ^4 могут быть связаны с обобщением вида потенциала путем учета более высоких порядков или деформирования известного потенциала. Значительный интерес представляет также такая модификация уравнения (1), при которой вид потенциала сохраняется неизменным и одновременно учитываются и процессы диссипации.

В работе [1] рассмотрена модификация уравнения (1) вида

$$\phi_{tt} - \phi_{xx} + \alpha\phi_t + 2\beta\phi_{xt} - \phi + \phi^3 = 0, \quad (2)$$

учитывающая диссипативные процессы, и построено в явном виде аналитическое решение данного уравнения. Решение этого уравнения имеет вид

$$\phi(x, t) = \frac{k}{2} \left[1 + \tanh\left(\frac{kx - \omega t + \eta_0}{2}\right) \right], \quad (3)$$

где $k = -\frac{3}{4\alpha\beta^2}$, $\omega = -\frac{3}{2\alpha}$, а параметр η_0 характеризует начальное положение решения.

В настоящей работе рассмотрена модификация уравнения (1) следующего вида

$$\phi_{tt} - \phi_{xx} + \gamma\phi_x + 2\beta\phi_{xt} - \phi + \phi^3 = 0, \quad (4)$$

где параметр γ является положительной константой и характеризует возможность существования диссипативных процессов в различных пространственных точках системы в один и тот же момент времени. Для решения уравнения (4) использовалась модификация прямого метода Хироты решения нелинейных уравнений в частных производных, предложенная в работе [7].

Формально решение уравнения (4) имеет такой же внешний вид, как и решение (3) уравнения (2). Однако параметры решения принимают другие значения. Согласно использованному методу при построении решения типа одиночного кинка параметры k и ω решения определяются через уравнения вида

$$k\omega^2 - k^3 + \gamma k^2 - 2\beta k^2\omega - k = 0,$$

$$\omega^2 - 2\beta k\omega - k^2 + \gamma k = 0.$$

Используя два последние алгебраические уравнения, можно показать, что

$$\omega = \frac{1 - 2k^2}{2(4\beta k + 2)},$$

При этом параметр k может принимать произвольное значение. Хотя коэффициенты γ и β модели

явно определяют параметр решения k , параметр решения ω зависит непосредственно только от β . Зависимость параметра ω от γ представлена только опосредствовано. Таким образом, возможна ситуация, в которой состояние, описываемое топологически нетривиальным решением уравнения (4), не будет зависеть от того, как протекают диссипативные процессы в пространстве.

Отметим, что в случае учета временных диссипативных процессов (уравнение (2)) или без их учета вовсе (уравнение (1)) такая ситуация не имеет места. И для уравнения (1), и для уравнения (2) параметры решения k и ω однозначно определяются через коэффициенты модели. Вследствие этого вопрос о существовании решения, описывающего связанное состояние хотя бы двух топологически нетривиальных решений, для этих нелинейных уравнений в настоящее время остается открытым. В тоже время произвол при выборе параметра k для решения уравнения (4) предоставляет хорошую возможность, чтобы построить связанное состояние не только двух кинков (антикинов) или кинка и антикинка, но и произвольного числа топологически не тривиальных одиночных объектов.

Все вышесказанное позволяет рассматривать нелинейные уравнения при учете диссипативных процессов как такие уравнения, которые допускают существование решений в виде связанных состояний, т. е. относятся к интегрируемым нелинейным уравнениям [8]. Как известно, решение, описывающее связанное состояние произвольного числа одиночных топологически нетриви-

альных состояний можно построить, если в системе имеет место баланс между нелинейностью и дисперсией. Такой баланс можно установить разными путями. Можно учесть в модели более высокие порядки нелинейности (и не только для потенциала). Однако нам представляется более перспективным по возможности более полный учет диссипативных процессов. Чем больше диссипативных процессов, связанных с переносом энергии, принимаются во внимание в той или иной задаче, тем проще установить баланс, позволяющий построить связанные состояния.

Литература

1. Князев, М. А. Топологически нетривиальное состояние в диссипативной модели ϕ^4 с нарушением Лоренц-инвариантности / М. А. Князев // Вестн. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 347–352.
2. Раджараман, Р. Солитоны и инстантоны в квантовой теории поля / Р. Раджараман. – М.: Мир, 1986. – 416 с.
3. Додд, Д. Солитоны и нелинейные волновые уравнения / Д. Додд, Дж. Эйлбек, Дж. Гиббон, Х. Моррис. – М.: Мир, 1988. – 694 с.
4. Абловиц, М. Солитоны и метод обратной задачи / М. Абловиц, Х. Сигур. – М.: Мир, 1987. – 479 с.
5. Yan, H. Kink-antikink collision in a Lorentz-violating ϕ^4 model / H. Yan, Y. Zhong, Y.-X. Lui, K.-i. Maeda // Physics Letters B. – 2020. – Vol. 807, № 10. – P. 135542.
6. Barreto, M. N. Defect structures in Lorentz and CPT violating scenarios / M. N. Barreto, D. Bazeia, R. Menezes // Physical Review D. – 2006. – Vol. 73, № 6. – P. 065015.
7. Князев, М. А. Кинки в скалярной модели с затуханием / М. А. Князев. – Минск: Тэхналогія, 2003. – 116 с.
8. Инфельд, Э. Нелинейные волны, солитоны и хаос / Э. Инфельд, Дж. Роуланс. – М.: Физматлит, 2005. – 480 с.

УДК 621

ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИОННОЙ КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ ОТ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА

Колонтаева Т. В.¹, Сергиевич О. А.², Гвоздева Н. А.²

¹ Белорусский национальный технический университет

² Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. В результате выполнения исследовательской работы изучены свойства изоляционной композиционной керамики на основе сочетания кристаллических фаз кордиерита ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) и целзьяна ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) в четырехкомпонентной системе $\text{MgO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. Подобраны оптимальные режимы термообработки керамических образцов. Установлено влияние температуры и продолжительности обработки на удельное электросопротивление. Изучен фазовый состав оптимальных составов и микроструктура.

Ключевые слова: кордиерит, целзьян, спекание, электросопротивление, микроструктура.

DEPENDENCE OF THE PROPERTIES OF INSULATING COMPOSITE CERAMICS ON SYNTHESIS PARAMETERS

Kolontaeva T. V.¹, Sergievich O. A.², Gvozdeva N. A.²

¹ Belarusian National Technical University

² Belarusian State Technological University
Minsk, Belarus

Abstract. As a result of the research work, the properties of insulating composite ceramics based on a combination of crystalline phases of cordierite ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) and celzian ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) in the four-component system $\text{MgO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ were studied. The optimal modes of heat treatment of ceramic samples were