

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ МИКРОРАЗРУШЕНИЯ  
ТОНКИХ ПЛЕНОК МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ АМОРФНО-  
НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ  
МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ**

**И. В. Ушаков<sup>1,2</sup>, А. Ю. Батомункуев<sup>2</sup>**

*Кафедра «Автоматика и компьютерные системы управления»,  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (1); ushakoviv@mail.ru;  
кафедра физики, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский  
технологический университет» «МИСиС», г. Москва (2)*

**Ключевые слова:** аморфно-нанокристаллические металлические сплавы; коэффициент вязкости микроразрушения; пластичность; прочность; трещины.

**Аннотация:** Новые аморфные и аморфно-нанокристаллические материалы обладают комплексом уникальных физических свойств. В ряде случаев такие материалы находят практическое применение. Создание и практическое использование новых материалов неизбежно ставит вопрос о совершенствовании методов контроля их свойств, в том числе механических. Однако в силу специфики новых материалов, традиционные методы механических испытаний не всегда позволяют выполнить корректные испытания. Например, тонкие ленты аморфных и аморфно-нанокристаллических сплавов обладают рядом специфических свойств, которые не позволяют корректно определить пластичность в локальных микрообластях. Проанализированы особенности одного из новых методов механических испытаний тонких и хрупких лент аморфных и аморфно-нанокристаллических металлических сплавов. Отмечены его недостатки и предложен новый метод механических испытаний, позволяющий выявлять вязкость микроразрушения в локальных областях тонких лент хрупких аморфных и аморфно-нанокристаллических металлических сплавов.

---

**Введение**

К настоящему времени используются разнообразные методы определения пластических свойств твердых материалов. Существует возможность выявлять механические свойства образцов, которые могут отличаться формой, материалом (химическим составом), температурным режимом, при котором проводятся испытания и т.д. [1 – 4].

Широко применяются методики выявления свойств образца за счет изгиба и растяжения. При экспериментальном выявлении твердости металлов и сплавов используют методы Роквелла, Бринелля, Виккерса. При этом обычно удается определить пластические свойства материала.

В настоящее время часто применяют методику выявления механических свойств при испытании на изгиб, которая основана на изгибании образца определенных размеров до наступления его разрушения [4]. Следует отметить, что указанная методика позволяет выполнять сравнение образцов материалов, подвергнутых различному термическому воздействию.

Метод заключается в следующем: один край образца (пластины) устанавливается на оправке под определенный угол изгиба, а затем закрепляется в тисках. Другую сторону образца изгибают с приложением постоянной силы вплоть до его разрушения или образования макроскопических (магистральных) трещин. С использованием при испытании определенного угла разрушения возможно рассчитать твердость материала, а также его пластические характеристики.

Существуют способы механических испытаний, основанные на изгибе образца между двумя валиками специально установленного диаметра и/или изгибе в специальной форме под определенный угол. Следует отметить, что экспериментальные данные, полученные в результате применения указанных методов при определении пластических характеристик тонких лент аморфно-нанокристаллических образцов, показали неудовлетворительные результаты. Все стандартные методы имеют не только достоинства, но и определенные недостатки, ограничивающие их использование.

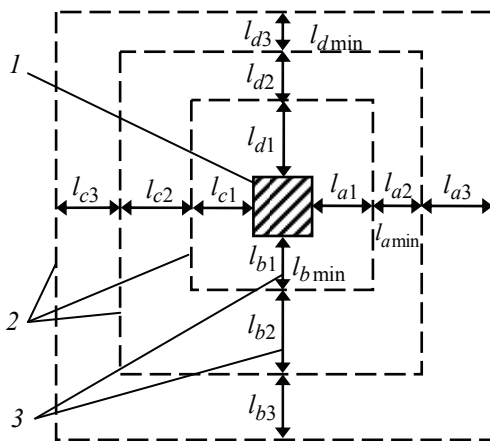
Разработка и практическое применение нового класса материалов (тонкие ленты многокомпонентных аморфно-нанокристаллических сплавов) ставит задачу создания новых и/или совершенствование старых методов механических испытаний, которые оказываются недостаточно информативными при исследовании новых материалов. При экспериментальном выявлении пластических характеристик образцов тонкой ленты многокомпонентного металлического аморфно-нанокристаллического сплава после лазерного воздействия необходимо применять метод, позволяющий получать воспроизводимые и корректные результаты. Традиционные методики выявления пластических свойств твердых материалов не могут быть в полной мере использованы для определения свойств наноматериалов в виде тонких (20...40 мкм) образцов, имеющих локальные милли- и микроразмерные участки лазерной обработки.

Целью данной работы является «развитие» метода выявления пластических свойств тонких лент многокомпонентных аморфно-нанокристаллических металлических сплавов, подвергнутых локальной лазерной обработке.

### **Результаты и обсуждение**

Развитие методов экспериментального определения вязкости разрушения тонких пленок многокомпонентных аморфно-нанокристаллических металлических сплавов после термической обработки, при которых данные сплавы приобретают требуемые свойства, представляют интерес для фундаментальной и прикладной науки. Известны методики определения механических характеристик аморфных лент. Однако при исследовании тонких наноструктурных пленок, имеющих в своем составе нанокристаллы, у традиционных методик механических испытаний проявляются определенные недостатки. Например, измерения пластичности дают околонулевые значения [2]. Кроме того, невозможно исследование локальных неоднородных областей; отмечается низкая чувствительность, а также большой расход образцов и времени.

Ранее предложен способ определения пластичности тонких пленок аморфно-нанокристаллических металлических сплавов микроиндентированием на подложках с применением пирамидки Виккерса [2, 5]. При использовании данного способа, предварительно отожженный и охлажденный до комнатной температуры



**Рис. 1. Схема трещин**

**после воздействия пирамидки:**

- 1 – область воздействия пирамидки; 2 – трещины;  
3 – расстояния между трещинами, используемые  
для расчета коэффициента пластичности

образец исследуемого материала помещают на металлическую подложку, на которую со стороны исследуемого образца наносится слой полимерного композитного материала. Затем, нагружая исследуемый образец четырехгранной пирамидкой, подбирают усилия воздействия, скорость касания поверхности исследуемого материала и время воздействия на образец таким образом, чтобы в месте воздействия (проникновения) пирамидки 1 образовалась группа трещин в виде фигур, близких к вложенным квадратам 2 (рис. 1).

Для определения коэффициента пластичности используют выражение

$$\varepsilon = (d - h)/h, \quad (1)$$

где  $h$  – толщина исследуемого образца, мкм;  $d$  – диаметр приведенной полуокружности (достроенной по результатам измерения фигуры, образованной группой трещин после воздействия на образец четырехгранной пирамидкой), мкм.

Возможно использование эмпирических коэффициентов, умножаемых на величину «ступени» отпечатка от индентора, то есть на расстояние между соседними трещинами, образующими фигуру из вложенных квадратов.

Недостатком данного способа является относительно низкая точность расчета коэффициента пластичности  $\varepsilon$  вследствие ошибок при определении приведенного диаметра полуокружности и эмпирических коэффициентов.

В работе [5] для расчета величины  $d$  в формуле (1) предложено использовать выражение

$$d = 2(l_{cp} + l_{cp\min}), \quad (2)$$

где  $l_{cp}$ ,  $l_{cp\min}$  – среднее и минимальное среднее расстояния между соседними трещинами соответствующих сторон фигуры, образованной трещинами в форме вложенных квадратов после воздействия на образец индентора соответственно, мкм.

При этом учитываются только те трещины, которые относительно параллельны соответствующим сторонам квадрата и образуют характерную фигуру в виде вложенных квадратов (см. рис. 1). Расчеты  $l_{cp}$  производят путем измерения всех расстояний между соседними трещинами во всех сторонах образованной ими фигуры, при необходимости достраивая незамкнутые квадраты до замкнутых:

$$l_{cp} = ((l_{a1} + l_{a2} + \dots + l_{an})/n + (l_{b1} + l_{b2} + \dots + l_{bn})/n + (l_{c1} + l_{c2} + \dots + l_{cn})/n + (l_{d1} + l_{d2} + \dots + l_{dn})/n)/4. \quad (3)$$

Аналогично рассчитываем  $l_{cp\min}$ , но вместо всех расстояний между соседними трещинами берем только минимальное расстояние между соседними трещинами в каждой из сторон фигуры ими образованной (см. рис. 1).

В данном случае  $d$  рассматривается как расстояние между параллельными пластинами в случае испытания на изгиб, а не как приведенный диаметр полуокружности в способе испытания на подложках. Это позволяет, сохранив преимуще-

щества метода испытания на подложках, повысить точность расчетов и отказаться от использования эмпирических коэффициентов, что дополнительно сокращает время, необходимое для испытаний новых сплавов аналогичного состава.

Таким образом, в работах [2, 5] предложен и апробирован новый способ механических испытаний. Однако очевидно, что любые методы механических испытаний имеют свои преимущества и недостатки, которые необходимо выявить и устранить.

Использование термина «пластические характеристики» для предложенной характеристики материалов не совсем корректно. Действительно, пластические свойства материалов связаны с остаточными деформациями после нагружения (скольжение дислокаций, двойникование и пр.). В работе [5] в формулах для «характеристики пластичности» косвенно используются понятия количества и длин микротрещин, образующихся в материалах. Появление трещин характеризуется, в основном, предельными характеристиками материала, а распространение трещин – поверхностной энергией разрушения и энергией деформации, включая пластические деформации в вершине трещины. Таким образом, коэффициент  $\varepsilon$  можно называть «параметром вязкости микроразрушения  $\varepsilon''$ ».

Метод, предложенный в работе [5], имеет следующие недостатки: ребра индентора являются концентраторами напряжения, что вносит искажения в формирование трещин в исследуемом образце; возникающие из-за воздействия ребер трещины разрушают материал, блокируют развитие трещин, ориентированных параллельно граням индентора; при индентировании образуется большое число мелких отколов, которые не позволяют определить начальную ориентацию основных трещин из-за их сдвигов. Данный недостаток может быть устранен, если вместо пирамидки Виккерса использовать индентор другой формы (не создающий концентраторы механических напряжений в вершине пирамидки и областях касания образца ее ребрами).

В предлагаемом способе выявления коэффициента  $\varepsilon''$  вязкости микроразрушения тонких лент из многокомпонентных аморфно-нанокристаллических металлических сплавов, размещаемых на подложке, вместо пирамидки Виккерса используется стальной шарик. Это дает возможность исследовать самые хрупкие образцы наноструктурных материалов.

Так как при изучении образцов с использованием шарика возникает два вида трещин, то систему координат для определения расстояний между трещинами строят исходя из особенностей системы трещин. Первая система трещин, наблюдаемая после воздействия на индентор, образует фигуры в виде вложенных окружностей. Пример построения показан на рис. 2, где 1 – отпечаток от индентора; 2 – система замкнутых трещин; 3 – незамкнутые трещины. Оси, по которым определяют расстояния, будут иметь литерные обозначения (A, B, C, D и т.д.). Расстояния обозначаются с использо-

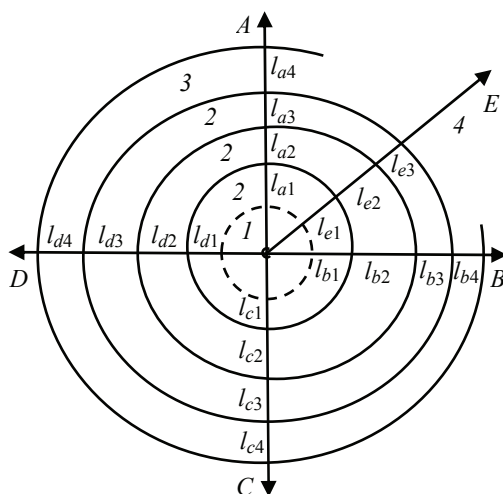


Рис. 2. Построение системы координат для расчета коэффициента вязкости микроразрушения для случая вложенных окружностей

ванием буквы  $l$  с добавлением соответствующего буквенного и цифрового символа, например  $l_{b2}$ . Для увеличения точности и достоверности результатов учитываются только те трещины, которые формируют относительно замкнутую окружность и образуют характерную микрокартину в виде системы вложенных окружностей. Расчеты величин  $l_{cp}$  осуществляют путем определения всех расстояний между всеми соседними трещинами сформированной ими фигуры. В случае необходимости следует добавить в декартову систему координат дополнительные оси. В рассматриваемом случае это ось 4 (см. рис. 2). При этом следует ориентировать оси на плоскости таким образом, чтобы они пересекали характерные области сформированной системой трещин микрокартины. Получим выражение

$$l_{cp} = ((l_{a1} + l_{a2} + \dots + l_{an})/n + (l_{b1} + l_{b2} + \dots + l_{bn})/n + (l_{c1} + l_{c2} + \dots + l_{cn})/n + (l_{d1} + l_{d2} + \dots + l_{dn})/n)/4. \quad (4)$$

Отдельно рассмотрим случай, когда трещина не замкнута. В этом случае возможно два варианта действий, зависящих от особенностей микрокартин разрушения. Если при испытаниях формируются преимущественно замкнутые трещины, то незамкнутые не достраивают и в расчетах учитывают только те трещины, которые пересекаются осями. Если преимущественно формируются незамкнутые трещины, то можно учитывать трещины, если угол, на который надо достроить трещины для формирования замкнутой окружности, не превышает  $90^\circ$ . Аналогично следует рассчитывать  $l_{cp\min}$ . При этом вместо всех расстояний между соседними трещинами используем только минимальные между соседними трещинами.

Особенностью второго случая разрушения образцов является появление одной спиралевидной трещины. Для того чтобы рассчитать  $l_{cp}$  и  $l_{cp\min}$ , следует провести измерение всех расстояний по выбранным направлениям между соседними витками формируемой трещиной спирали. В этом случае угол между осями следует устанавливать в зависимости от характера трещин и особенностей изменения расстояний между соседними витками. В любом случае следует использовать не менее четырех осей. После построения необходимо учитывать число витков спирали вокруг полюса. Минимальное значение – один полный оборот или угловое значение  $360^\circ$ .

Значения коэффициента вязкости микроразрушения, рассчитанные на основе данных, полученных при использовании в качестве индентора стального шарика, имеют меньшее число резких отклонений определяемых величин (что связывается со случайным нахождением в области ребра и вершины пирамидки неоднородных дефектных областей, которые провоцируют появление макротрещин) [6, 7]. Макротрещины блокируют формирование трещин, образующих фигуры, схожие с вложенными квадратами (на основании которых рассчитывается коэффициент  $\epsilon$ ). Таким образом, результаты, полученные при использовании рассматриваемого метода, лучше соответствуют физической сущности определения вязкости микроразрушения тонких наноструктурных образцов. Предложенный метод регистрирует значительное изменение коэффициента вязкости микроразрушения в интервале температур отжига, где метод изгиба [5] дает значения, близкие к погрешностям измерения, а также правильно отображает физическую сущность этих изменений, демонстрируя снижение коэффициента вязкости разрушения с ростом температуры отжига. Поэтому применение предлагаемого способа повышает точность измерений, их достоверность и позволяет исследовать даже самые хрупкие материалы.

## Выводы

1. Создание новых наноструктурных материалов, характеризующихся уникальными механическими свойствами, малой толщиной, специфической и очень сложной зависимостью комплекса свойств от температуры отжига, обуславливает необходимость разработки новых методов механических испытаний или адаптации и развития традиционных. На основании анализа проблемы использования традиционных методов выявления пластических характеристик тонких лент наноструктурных материалов показана необходимость создания новых методов механических испытаний для выявления механических свойств нового класса материалов.

2. Предложенный метод позволит повысить точность расчета коэффициента вязкости микроразрушения тонких лент аморфно-нанокристаллических металлических сплавов.

### Список литературы

1. Геллер, Ю. А. *Материаловедение* / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт. – М. : *Металлургия*, 1989. – 456 с.

2. Ушаков, И. В. Испытания тонких лент металлического стекла индентором различной геометрической формы / И. В. Ушаков, В. М. Поликарпов // *Завод. лаб. Диагностика материалов*. – 2007. – Т. 73, № 2. – С. 43 – 47.

3. Образцов, Д. В. Исследование прочностных и теплофизических свойств наномодифицированных строительных и теплозащитных материалов / Д. В. Образцов, В. М. Фокин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 1051 – 1061.

4. ГОСТ 14019–2003. *Материалы металлические. Метод испытания на изгиб*. – Взамен ГОСТ 14019–80 ; введ. 2004–09–01. – М. : *Стандартинформ*, 2006. – 8 с.

5. Пат. 2494039 *Российская Федерация, МКП G 01 N 3/42, B 82 Y 32/00. Способ определения пластических характеристик пленок многокомпонентных аморфно-нанокристаллических металлических сплавов* / Ушаков И. В., Сафронов И. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Моск. гос. гор. университет». – № 2012116406/28 ; заявлено 24.04.2012 ; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27. – 6 с.

6. Ушаков, И. В. Компьютерное моделирование специфики залечивания трещин в нанокристаллическом металлическом сплаве под действием наносекундных лазерных импульсов / И. В. Ушаков., А. Ю. Батомункуев // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 356 – 364.

7. Сафронов, И. С. Выявление механизмов формирования механических свойств тонкой ленты металлического сплава при импульсной лазерной обработке : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 / Сафронов Иван Сергеевич. – Великий Новгород, 2013. – 190 с.

---

## Experimental Calculation of Viscosity Parameter of Thin Film Microrupture for Multi-Component Amorphous-Nanocrystalline Metallic Alloys by the Local Stress Method

I. V. Ushakov<sup>1,2</sup>, A. Yu. Batomunkuev<sup>2</sup>

*Department “Automation and Computer Control Systems”, TSTU(1);  
ushakoviv@mail.ru; Department of Physics, National University of Science  
and Technology “MISiS”, Moscow (2)*

**Keywords:** amorphous-nanocrystalline metallic alloys; cracks; plasticity; strength; viscosity parameter of microrupture.



**Abstract:** New amorphous and amorphous-nanocrystalline materials have a unique set of physical properties. In some cases, these materials are used in practice. Creation and usage of new materials demand control for their condition and development of mechanical testing methods. Traditional methods of mechanical testing may be not suitable for correct testing of new materials. For example, thin bands of amorphous and amorphous-nanocrystalline alloys have a specific set of mechanical properties, and as a result, their plasticity in local micro-areas cannot be evaluated. The authors analyzed the specific properties of a new method of mechanical testing of thin and brittle amorphous and amorphous-nanocrystalline metallic alloys by the local stress method. The drawbacks of the method were revealed. A new method of mechanical testing was proposed. It enables to determine viscosity parameters of microrupture in local areas of thin bands of brittle amorphous and amorphous-nanocrystalline metallic alloys.

### References

1. Geller J.A. *Science of materials. Methods of analysis, laboratory exercises and problems* [Rev. from the 1975 (4th) Russ. ed.], Moscow: Mir, 1977, 521 p.
2. Ushakov I.V., Polikarpov V.M. [Tests thin ribbons of metallic glass indenters of various geometric shapes], *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial laboratory. Materials diagnostics], 2007, vol. 73, no. 2, pp. 43-47. (In Russ.)
3. Obraztsov D.V., Fokin V.M. [Study of Strength and Thermal Physical Properties of Nanomodified Construction and Thermal Insulating Materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 1051-1061. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Euro-Asian Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, *GOST 14019–2003. Materialy metallicheskie. Metod ispytaniya na izgib* [Russian Interstate Standard 14019-2003. Metallic materials. Bend test method], Moscow: Standartinform, 2006, 8 p. (In Russ.)
5. Ushakov I.V., Safronov I.S., Moscow State Mining University, *Sposob opredeleniya koeffitsienta plastichnosti tonkikh plenok iz mnogokomponentnykh amorfno-nanokristallicheskikh metallicheskikh splavov* [Method of determining plastic characteristics of films of multicomponent amorphous-nanocrystalline metal alloys], Moscow, RU, 2013, Pat. 2494039. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Ushakov I.V., Batomunkuev A.Yu. [Computer Simulation of Cracks Healing in Nanocrystalline Alloy after Nanosecond Laser Impulse Treatment ], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 356-364. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Safronov I.S. *PhD Dissertation* (Physical and Mathematical Sciences), Velikiy Novgorod, 2013, 190 p.

---

## Experimentale Bestimmung des Koeffizienten der Zähigkeit der Mikrozerstörung der feinen Folien der amorph-nanokristallischen metallischen Mehrelementenlegierungen von der Methode der lokalen Beaufschlagung

**Zusammenfassung:** Die neuen amorphen und amorph-nanokristallischen Materialien verfügen über den Komplex der einzigartigen physikalischen Eigenschaften. Manchmal finden solche Materialien die praktische Anwendung. Die

Bildung und die praktische Nutzung der neuen Materialien stellt die Frage über die Vervollkommnung der Methoden der Kontrolle ihrer Eigenschaften, einschließlich die mechanischen Eigenschaften. Jedoch lassen infolge der Besonderheit der neuen Materialien, die traditionellen Methoden der mechanischen Prüfungen nicht immer zu, die korrekten Prüfungen zu erfüllen. Zum Beispiel, verfügen die feinen Bande der amorphen und amorph-nanokristallischen Legierungen über die Reihe der spezifischen Eigenschaften, die die Plastizität auf den lokalen Mikrogebieten korrekt zu bestimmen nicht erlauben. Es sind die Besonderheiten eine der neuen Methoden der mechanischen Prüfungen der feinen und brüchigen Bande der amorphen und amorph-nanokristallischen metallischen Legierungen analysiert. Es sind ihre Mängel bemerkt und es ist die neue Methode der mechanischen Prüfungen, die die Zähigkeit der Mikrozerstörung auf den lokalen Gebieten der feinen Bande der brüchigen amorphen und amorph-nanokristallischen metallischen Legierungen an den Tag zu bringen zulässt.

---

**Définition expérimentale du coefficient de la viscosité  
de la microdestruction de fines films des alliages métalliques  
multicomposants amorphes nanocristallins  
par la méthode du chargement local**

**Résumé:** De nouveaux matériaux amorphes nanocristallins possèdent un complexe unique de propriétés physiques. Dans certains cas de tels matériaux sont d'un usage pratique. La création et l'utilisation de nouveaux matériaux soulève inévitablement la question de l'amélioration des méthodes de contrôle de leurs propriétés, notamment mécaniques. Cependant, en raison de la spécificité de nouveaux matériaux les méthodes traditionnelles mécaniques ne permettent pas toujours d'effectuer les essais. Par exemple, de fines bandes des alliages amorphes nanocristallins ont un certain nombre de propriétés spécifiques, qui ne permettent pas de déterminer la plasticité dans les micro-domaines. Sont analysées les caractéristiques d'une nouvelle méthode des essais des bandes fines et fragiles des alliages amorphes nanocristallins. Sont marqués leurs inconvénients; est proposée une nouvelle méthode d'essais mécaniques permettant d'identifier la viscosité de la microdestruction de fines films des alliages métalliques multicomposants amorphes nanocristallins.

---

**Авторы:** *Ушаков Иван Владимирович* – кандидат физико-математических наук, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и компьютерные системы управления», ФГБОУ ВПО «ТГТУ», профессор кафедры физики, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; *Батомункуев Амагалан Юрьевич* – аспирант кафедры физики, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва.

**Рецензент:** *Шибков Александр Анатольевич* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина», г. Тамбов.