

УДК 629.7.02

## ДИАГНОСТИКА АВИАЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2014 Н.С. Балбекин<sup>1</sup>, П.В. Павлов<sup>2</sup>, В.Г. Беспалов<sup>1</sup>, Н.В. Петров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского  
и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж

Поступила в редакцию 09.09.2014

Терагерцовая спектроскопия с разрешением во времени (ТГц СРВ) предложена в качестве метода неразрушающего контроля авиационных композиционных материалов. Были изучены такие повреждения как расслоения и повреждения высокой температурой. Измерение свойств материала в образцах с локализованным тепловым повреждением показало, что плавление не изменило значительно показатель преломления или коэффициент поглощения. Расслоения были обнаружены при помощи технологичной визуализации основанных на СРВ в режиме на отражение.

Ключевые слова: *композитный материал, диагностика, неразрушающий контроль, спектроскопия*

В мировом авиастроении реализуются качественно новые технологические решения, направленные на обеспечение не только безопасности полетов, но и максимальной экономической эффективности эксплуатации воздушных судов. В значительной степени это достигается все большим использованием композиционных материалов в конструкции авиационных судов. Композитные материалы из стекловолокна, эпоксидной смолы и углеродного волокна используются в качестве элементов конструкций все шире, из-за их высокого соотношения прочность / вес, улучшенных аэродинамических характеристик, надежности, а также пониженной коррозионности по сравнению с другими конструкционными материалами. Состав и, следовательно, свойства таких материалов варьируются в зависимости от требуемых значений прочности, жаропрочности, модуля упругости, абразивной стойкости, а также различаются их магнитные, диэлектрические, радиопоглощающие и другие специальные свойства. Однако из-за сильного термического воздействия (например, от турбин) или из-за различных деформаций материала от внешних воздействий (таких как неудачная посадка судна или попадание пули) в

процессе эксплуатации возможны различные изменения структуры композита. Также возможен износ материала, связанный с длительным периодом эксплуатации. Широкое применение композитов требует новых подходов не только к проектированию и изготовлению авиатехники, но и к ее техническому обслуживанию и ремонту, в том числе обеспечению качественной диагностики.

Как правило, наиболее распространенными методами являются ультразвук, термография и шерография [1]. Однако ультразвуковая система контроля на основе лазера, включающая две лазерные системы и интерферометр, достаточно дорогая в сравнении с традиционными трансдукторными системами. Кроме того, чувствительность ультразвуковой лазерной техники может быть проблемой [2]. Термография тоже является относительно дорогостоящей с учетом современных технологий, которые требуют высокочувствительных тепловизионных камер и внешних источников тепла [3, 4]. Поскольку шерография измеряет непосредственно поверхностные деформационные аномалии, успех в обнаружении повреждения зависит от его размера и расположения. Такой метод может быть менее чувствителен к дефектам находящимся в глубине толстых слоистых материалов [5].

В последние несколько лет системы ТГц спектроскопии тоже стали исследоваться как техники и технологии для бесконтактной диагностики композитных материалов [6]. Практически беспрепятственное прохождение через дым, одежду и бумагу, древесину и пластмассу, керамические поверхности и другие материалы открывает огромные возможности интравидения с

*Балбекин Николай Сергеевич, инженер-исследователь. E-mail: Godnikolay@yandex.ru*

*Павлов Павел Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель. E-mail: rashok8208@mail.ru*

*Беспалов Виктор Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор. E-mail: victorbespaloff@gmail.com*

*Петров Николай Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. E-mail: Nickolai.petrov@gmail.com*

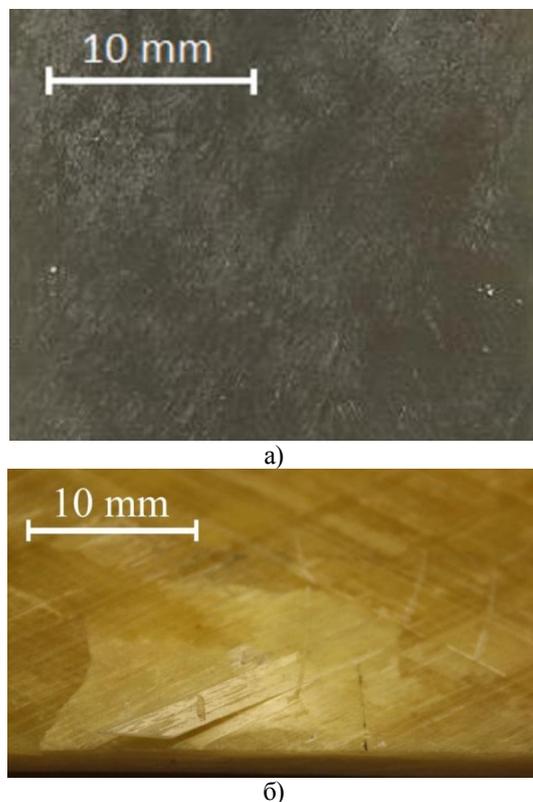
высоким отношением С/Ш. ТГц излучение неионизирующее, обладает меньшим рассеянием и большей глубиной проникновения, чем ИК излучение, рентгеновское и видимого диапазона. Терагерцовое излучение находится между инфракрасным и микроволновым диапазонами электромагнитного спектра. За счет электрооптического (ЭО) детектирования, в ТГц ТДС возможно регистрировать вещественную часть комплексной амплитуды ТГц поля, что позволяет получить информацию не только об амплитуде, но и о фазе ТГц излучения, и тем самым более полно описать / измерить все оптические характеристики. Существует ряд работ, в которых рассматривается рассеяние ТГц излучения композитами, а также моделирование диэлектрических свойств композитов с использованием теории эффективной среды (ТЭС) [7-9]. Так как композит представляет собой неоднородный сплошной материал, состоящий из матрицы (связующего элемента) и армирующих элементов, то, зная физические свойства (ФС) составляющих, при помощи ТЭС можно определить физические свойства самого композита.

ТГц излучение может проникать в композиты и выявлять дефекты, такие как воздушные полости, расслоения, механические повреждения и повреждения от высоких температур. В работе [6] приведены результаты исследований таких дефектов в тонких образцах композитных материалов методом ТГц СВВ в режиме на пропускание. С учетом того, что поверхность композитного материала отражает 30-40% ТГц излучения, а сам материал обладает значительными показателем преломления (2,00-2,20) и коэффициентом поглощения ТГц излучения, данный метод, как и перечисленные выше методы, имеет ограничения в применении связанные с толщиной образца.

Мы предлагаем использование метода ТГц СВВ в режимах на отражение и пропускание для неразрушающего контроля композитных материалов. В этой работе мы исследовали образцы материала лопасти несущего винта вертолета Ми-28Н. На рис. 1 представлены: темный образец «16а» - препрег стеклонить ВМПС 7 со связующим ЭДТ-10П; светлый образец, «17В» - препрег-КМКС-2м.

**Экспериментальная установка.** Для проведения экспериментов использовалась установка, позволяющая генерировать широкополосное импульсное терагерцовое излучение с помощью нелегированного кристалла арсенида индия [10, 11] (находящегося в постоянном магнитном поле 2,4 тесла) [12], при бомбардировке его фемтосекундными импульсами лазера «FL-1» (активная среда - Yb:KYW;  $\lambda=1040$  нм,  $t_i=46$

фс,  $f=70$  МГц,  $P \geq 1$  Вт). Терагерцовое излучение характеризовалось следующими параметрами: спектральный диапазон от 0,1 до 1,5 ТГц, средняя мощность 30 мкВт, мощность импульса 755 мкВт, длительность такого импульса равна 2,7 пс. Схема ТГц спектрометра представлена на рис. 2.



**Рис. 1.** Исследованные образцы композитных материалов:  
а) обожженный образец «16а» и б) образец с расслоением структуры «17В»

Генерируемое излучение проходит через фильтр из тефлона, отсекающего диапазон длин волн, меньших 50 мкм, и далее через образец, обладающий некоторым амплитудно-фазовым пропусканием. Образец фиксируется перпендикулярно оптической оси в фокальной плоскости, и при прохождении сквозь него происходит дифракция ТГц излучения. ЭО детектирование осуществляется с помощью четвертьволновой пластины, призмы Волластона, балансного фотодетектора и синхронного усилителя [13]. Отфильтрованный и усиленный сигнал передавался в компьютер посредством цифрового вольтметра. Величина погрешности определения частоты при измерениях составляет около 10 ГГц [14]. Управление установкой реализовано в программной среде NI LabVIEW, управляющий временной задержкой пробного фс импульса и процессом измерения и позволяющий осуществлять регистрацию временного профиля ТГц импульса.

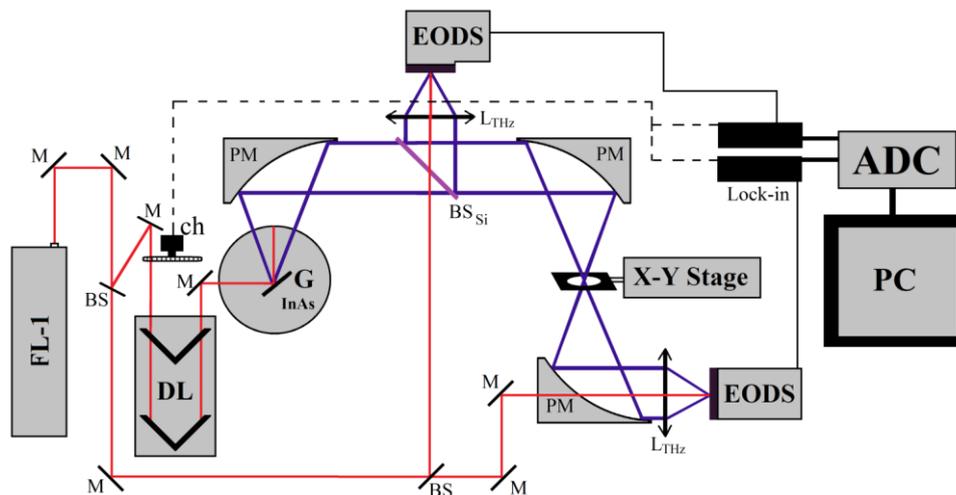


Рис. 2. Схема ТГц спектрометра:

FL-1 – лазер фемтосекундных импульсов; М – зеркала; BS – светоделители; DL – оптическая линия задержки; G – генератор ТГц излучения на основе кристалла InAs; PM – параболические зеркала; ch – модулятор; EODS – электрооптическая система детектирования на основе кристалла CdTe; Lock-in – синхронный усилитель; ADS – аналого-цифровой преобразователь; PC – персональный компьютер

### Обсуждение результатов.

Изменение ФС композита. Изменение показателя преломления и коэффициента поглощения. ЭДТ-10П представляет собой смолу, которая имеет особенность быть очень устойчивой к тепловым нагрузкам, сохраняя свои свойства в течение длительного периода непрерывной эксплуатации при больших температурах. Одной из проблем, связанных с разработкой воздушных судов, является то, что тепло от реактивных двигателей может привести к повреждению внешней конструкции летательного аппарата. ТГц СВВ может быть использована для измерения свойств стекловолоконных композитов воздушных судов, чтобы определить, существенно ли изменился состав материала. Образец композитного материала «16а» (рис. 1а) был приготовлен путем нагревания температурой 570 С в течении 20 минут.

В первую очередь были измерены области образцов композитных материалов без повреждений для получения эталонных временных спектров терагерцового излучения прошедшего через образец и отраженного от образца. Полученные временные профили сравнивались с опорными ТГц импульсами (рис. 3).

По двум полученным комплексным временным спектрам можно вычислить показатель преломления, коэффициент поглощения и дисперсию исследуемой среды [15].

Изменения в ТГц спектре после плавления композита. В качестве объекта был выбран композит «16а» (рис. 1а). Для выявления изменений физических свойств композита после воздействия высоких температур были получены временные профили ТГц импульса в месте, где визуально поверхность исследуемого образца

после повреждения наиболее отличалась от эталона.

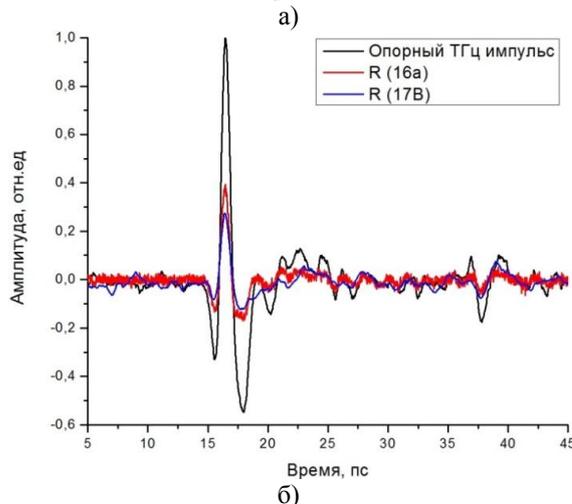
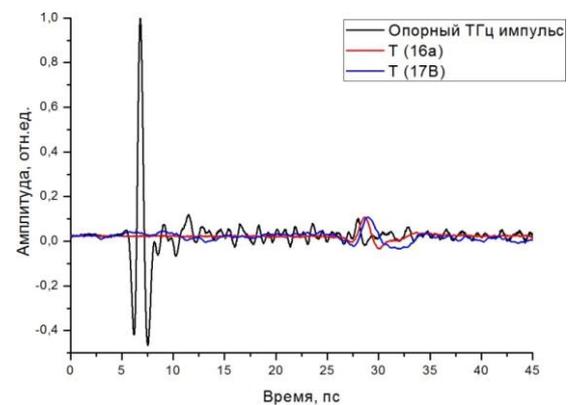
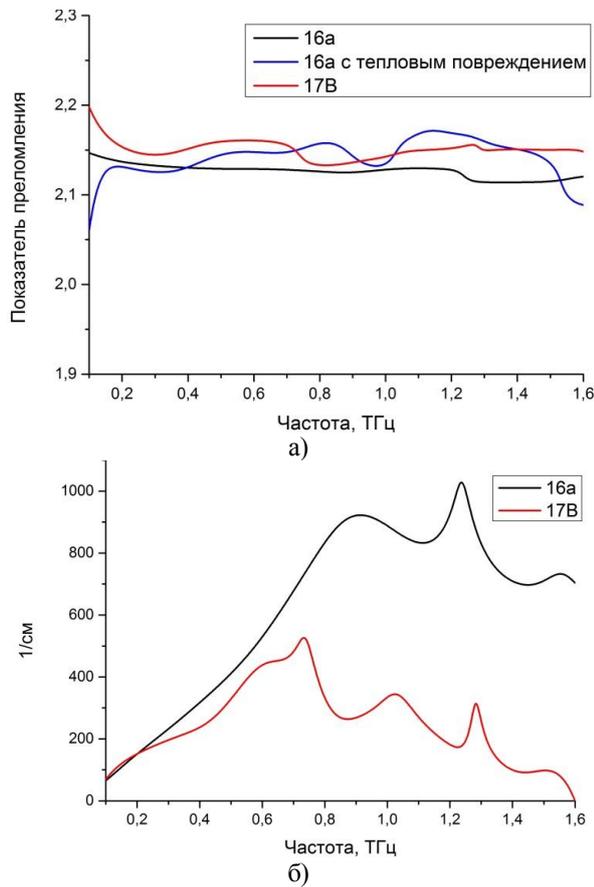


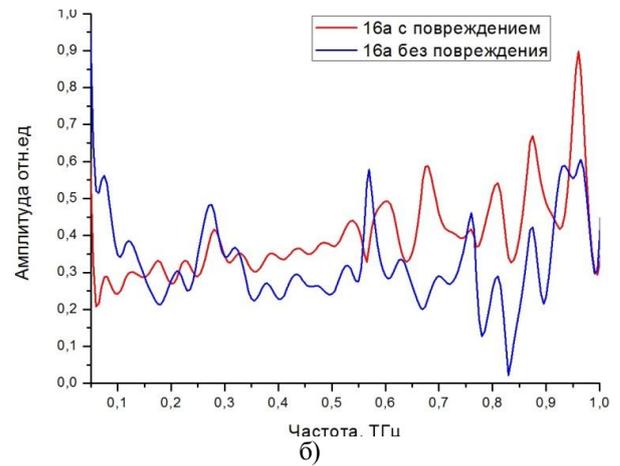
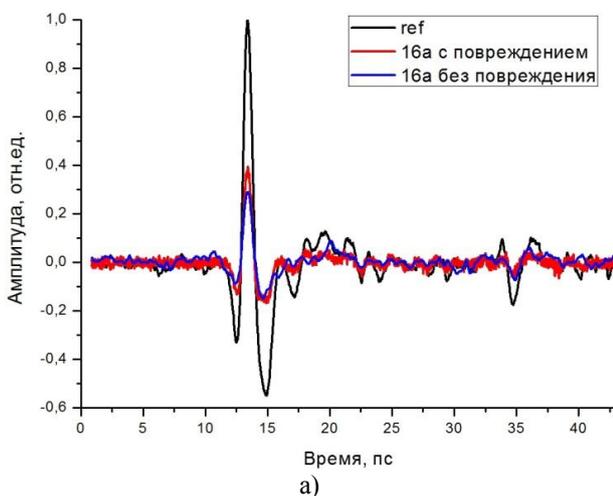
Рис. 3. Зависимость величины напряженности электрического поля ТГц импульса в воздухе (Опорный ТГц импульс), для композитного материала «16а» и композитного материала «17В». а) режим на пропускание, б) режим на отражение



**Рис. 4.** Представлены (а) зависимости показателя преломления образцов композитных материалов «16а», «16а» с тепловым повреждением и «17В» и (б) зависимости коэффициентов поглощения для образцов композитных материалов «16а» и «17В» от частоты ТГц излучения

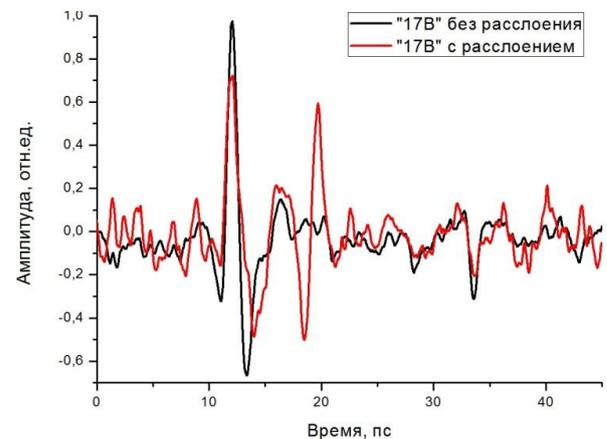
Амплитуда ТГц импульса, отраженного от обожженного композита, больше амплитуды ТГц импульса, отраженного от эталона (рис. 5а). Также заметны изменения в спектре на частотах 0,56 ТГц, 0,6 ТГц, 0,68 ТГц (рис. 5б).

**Расслоение композита.** Мы исследовали отражение терагерцового излучения от области композита со структурой расслоения. В качестве объекта был выбран образец «17В» (рис. 1б).



**Рис. 5.** Сравнение ТГц импульсов: а) отраженных от обожженного и необожженного композита; б) сравнение ТГц спектров обожженного и необожженного композитов

Полученные профили временные были сопоставлены с временными профилями ТГц излучения, отраженного от того же композита в области без расслоений (рис. 6). На рис. 6 видно, что при отражении от дефекта возникает вторая однопериодная структура, в области 18-21 пс, связанная с переходом между средами с разными показателями преломления.



**Рис. 6.** Сравнение ТГц импульсов, отраженных от образца композитного материала без расслоения и с расслоением

**Выводы:** предложено использование метода ТГц ТДС в режимах на отражение и пропускание для неразрушающего контроля композитных материалов. Проведено исследование процессов отражения и пропускания широкополосного ТГц излучения от композитных материалов и показана возможность выявления различных дефектов и изменения свойств материалов из-за вредоносного воздействия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Katnam, K.B.* Bonded repair of composite aircraft structures / *K.B. Katnam, L.F. M. Da Silva, T.M. Young* // A review of scientific challenges and opportunities. Progress in Aerospace Sciences. 2013. 61. P. 26-42.
2. *Castaings, M.* Single-sided inspection of composite materials using air-coupled ultrasound / *M. Castaings, P. Cawley, R. Farlow, G. Hayward* // Journal of Non-destructive Evaluation. 1998. 17. P. 37-45.
3. *Avdelidis, N.P.* Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites / *N.P. Avdelidis, B.C. Hawtin, D.P. Almond* // DT&E International. 2003. 36. P. 433-439.
4. *Hung, Y.Y.* Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation / *Y.Y. Hung, Y.S. Chen, S.P. Ng* et al. // Materials Science and Engineering. 2009. 64. P. 73-112.
5. *Hung, Y.Y.* Applications of digital shearography for testing of composite structures // Composites Part B Engineering. 1999. 30. P. 765-773.
6. *Stoik, C.D.* Nondestructive evaluation of aircraft composites using transmissive terahertz time domain spectroscopy / *C.D. Stoik, M.J. Bohn, J.L. Blackshire* // Optics Express. 2008. 16. P. 17039-17051.
7. *Shen, Y.C.* Elimination of scattering effects in spectral measurement of granulated materials using terahertz time domain spectroscopy / *Y.C. Shen, P.F. Taday, M. Pepper* // Appl. Phys. Lett. 2008. 92. P. 51-103.
8. *Fletcher, J.R.* Propagation of terahertz radiation through random structures: an alternative theoretical approach and experimental validation / *J.R. Fletcher, G.P. Swift, Dai De Chang* et al. // J. Appl. Phys. 2007. 101. P. 13-102.
9. *Wietzke, S.* Determination of additive content in polymeric compounds with terahertz time-domain spectroscopy / *S. Wietzke, C. Jansen, F. Rutz* et al. // Polym. Test. 2007. 26. P. 614-618.
10. *Gurtler, A.* Terahertz pulse propagation in the near field and the far field / *A. Gurtler, C. Winnewisser, H. Helm, P.U. Jepsen* // J. Opt. Soc. Am. 2000. 17. P. 74-83.
11. *Izumida, S.* Spectrum control of THz radiation and frequency chirp of the excitation pulses / *S. Izumida, S. Ono, Z. Liu* et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. 75. P. 451-453.
12. *Mittleman, D.M.* Non-contact semiconductor wafer characterization with the terahertz Hall effect / *D.M. Mittleman, J. Cunningham, M.C. Nuss, M. Geva* // Appl. Phys. Lett. 1997. 71. P. 16-18.
13. *Shik, L.Y.* Principles of terahertz science and technology // Springer Science+Business Media. 2009. LLC, XII.
14. *Chan, W.L.* Imaging with terahertz radiation / *W.L. Chan, J. Deibel, D.M. Mittleman* // Rep. Prog. Phys. 2007. 70. P. 1325-1379.
15. *Grischkowsky, D.* Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors / *D. Grischkowsky, S.R. Keiding, M.P. van Exter, C. Fattinger* // J. Opt. Society Am. 1990. 10. P. 2006-2015.

## DIAGNOSTICS OF AVIATION COMPOSITES BY TERAHERTZ SPECTROSCOPY METHOD

© 2014 N.S. Balbekin<sup>1</sup>, P.V. Pavlov<sup>2</sup>, V.G. Bespalov<sup>1</sup>, N.V. Petrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ITMO University, St. Petersburg

<sup>2</sup> Military Aviation Academy named after professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, Voronezh

The terahertz time domain spectroscopy (THz TDS) is offered as a method of nondestructive control of aviation composite materials. Such damages as stratifications and damages by high temperature were studied. Measurement of material properties in samples with localized thermal damage showed that melting didn't change considerably index of refraction or coefficient of absorption. Stratifications were found by means of visualization technologies based on SRV in the mode on reflection.

Key words: *composite material, diagnostics, nondestructive control, spectroscopy*

---

*Nikolay Balbekin, Research Engineer. E-mail:*

*Godnikolay@yandex.ru*

*Pavel Pavlov, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer.*

*E-mail: pashok8208@mail.ru*

*Viktor Bespalov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.*

*E-mail: victorbespaloff@gmail.com*

*Nikolay Petrov, Candidate of Physics and Mathematics, Senior*

*Research Fellow. E-mail: Nickolai.petrov@gmail.com*