

## КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ КОНВЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАНО- И МИКРОЖИДКОСТЯХ И МИКРОФЛЮИДИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ: АНАЛИЗ И КОНТРОЛЬ\*

Б.С. Марышев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.А. Алабужев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

И.А. Бабушин, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*

А.Ф. Глухов, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*

В.А. Демин, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*

Б.И. Мызникова, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Е.А. Попов, *ОАО «Авиадвигатель»*

И.С. Файзрахманова, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

И.Н. Черепанов, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*

С.В. Шкляев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Приведены результаты работы по проекту, направленному на экспериментальное и теоретическое изучение сложных конвективных явлений в неизотермических наножидкостях и в тонких пленках. Общим атрибутом рассматриваемых систем является наличие колебательной моды неустойчивости их основного состояния или первого критического режима. Динамика рассматриваемых систем в периодических внешних условиях представляет значительный интерес в силу (1) сложной и к настоящему времени не полностью объясненной кинетики; (2) богатой бифуркационной картины и (3) технологической необходимости в управлении устойчивостью и нелинейными режимами макроскопических течений наножидкостей и микрофлюидических течений.

**Ключевые слова:** *наножидкости, микрофлюидика, конвекция, пористые среды, тонкие пленки, колебательные моды, вибрации.*

### Введение

Одним из основных объектов предлагаемых исследований (как экспериментальных, так и теоретических) является суспензия микро- и наночастиц в неизотермических условиях. Характерный размер частиц, от 10 мкм до 10 нм, позволяет называть такие среды наносуспензиями или наножидкостями. Слож-

ный состав смеси и перераспределение ее компонентов оказывают существенное влияние на динамику таких сред в неизотермических условиях. В частности, важными представляются оценки влияния таких эффектов, как седиментация частиц, их термофорез и термодиффузия в несущей жидкости.

Другой важной проблемой, рассмат-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Пермского края (грант № 13-01-96010).

риваемой в рамках проекта, является динамика нано- и микрожидкостей в переменных внешних полях и управление поведением этих систем. Такое управление позволит получать режимы нужной пространственной симметрии, в том числе со сложным распределением микро- и наночастиц, обеспечивать эффективное перемешивание примеси и ее транспорт при наличии режимов бегущих волн. Эти и другие практические задачи востребованы множеством приложений – от бытовых нужд до разработки современных материалов. Отдельный интерес в рамках этой проблемы представляет фильтрация наножидкостей в переменных внешних условиях при учете разделения примеси на связанную и свободную фазы и изучении кинетики перехода между этими фазами.

Наконец, в ходе выполнения проекта теоретически рассматривались процессы, происходящие в тонкой пленке, подверженной внешнему периодическому воздействию. Учтены деформация свободной поверхности (поверхности раздела), проскальзывание жидкости вдоль твердой поверхности и межмолекулярное взаимодействие жидкости с подложкой. Управление такими пленками с помощью внешних воздействий является одной из основных задач микрофлюидики с многочисленными приложениями в микроэлектронике, биоинженерии, разработке современных материалов и химической технологии.

#### **Основные результаты, полученные в ходе выполнения проекта**

Теоретически и экспериментально изучены процессы переноса в многокомпонентных смесях, как молекулярных, так и суспензиях с учетом седиментации частиц. Аналитически решена задача об оседании наночастиц в однородной несущей жидкости, заполняющей вертикальный канал с учетом эффекта термодиффузии [5]. Продемонстрировано качественное различие действия термодиффузии разных знаков на поведение коллоид-

да. Изучена конвекция суспензии с большими положительными значениями параметра  $Co$ . Построены бифуркационные диаграммы для колебательных и монотонных течений [9, 12, 17]. Найдена область параметров, в которой существует устойчивый режим в виде бегущих волн. Проведено прямое 3D численное моделирование движений в ячейке Хеле-Шоу, заполненной двухкомпонентной молекулярной жидкостью с наноразмерными коллоидными частицами [6, 8]. Исследованы течения суспензии в наклонных полостях с учетом термодиффузии и гравитационной стратификации. Получены бифуркационные диаграммы, установлены границы существования течений, а также проведен частотный анализ колебательных режимов.

Изучены течения бинарной смеси в слое с модуляцией теплопотока через границу, получены нелинейные уравнения для амплитуд возмущений субгармонической моды. Их анализ показал, что такие структуры, как валы и квадраты, всегда неустойчивы, а возникновение гексагональных структур описывается транскритической бифуркацией, и они устойчивы во всей области параметров своего существования [11]. Проведены опыты по исследованию воздействия горизонтальных и вертикальных вибраций на устойчивость равновесия и движение смесей с положительной термодиффузией [2]. Отдельно изучено влияние седиментации на возбуждение конвекции. Опыты показали, что за счет эффекта осаждения вибрации повышают порог устойчивости равновесия. Экспериментально и теоретически изучено явление термодиффузионного разделения сложных по составу жидкостей в тонких каналах при самопроизвольном остывании [3, 4].

Исследована динамика взвеси наночастиц в пористой среде с учетом иммобилизации примеси. Решены задачи о 2D- и 3D-конвекции в слое пористой среды при заданном вертикальном градиенте концентрации частиц в навязанном горизонтальном фильтрационном потоке.

Линейный анализ устойчивости выявил возможность параметрического возбуждения конвекции и управления распределением частиц в слое с помощью изменения характеристик внешнего потока [13]. Проведен слабонелинейный анализ, на основе которого описана эволюция течения. Численно произведен расчет нелинейных уравнений и получены карты устойчивости структур [7]. Трехмерный анализ выявил, что возникающее течение имеет форму валов, оси которых ориентированы по направлению внешнего потока [14]. Выполнен слабонелинейный анализ 3D-возмущений на ромбовидной решетке, который показал, что управление 3D-течением в неограниченном слое с помощью характеристик внешнего потока невозможно. Обнаружено, что подобное управление возможно только в канале, ограниченном в двух направлениях.

Описана динамика неизотермических пленок толщиной 10 нм–10 мкм. Проведен отбор структур конвекции Марангони в слое бинарной смеси при наличии модуляции теплопотока на нижней границе [15]. Устойчивыми оказались гексагоны с подъемным течением в центре ячейки и квадраты. На основе осредненного амплитудного уравнения описана динамика пленки на теплопроводной подложке [10]. Установлен эффект ее стабилизации вибрациями высокой частоты. В противоположном низкочастотном пределе показано, что возникает режим стоячих волн, который может подавить разрыв пленки. Изучено влияние вибраций низкой частоты на устойчивость подогреваемой снизу системы двух жидкостей с деформируемой поверхностью раздела. Определено влияние вертикальных вибраций с частотами ниже акустических на конвекцию Марангони в пленке жидкости на твердой подложке [16]. Используя метод малого параметра, удалось разделить два механизма неустойчивости: конвекцию Марангони и неустойчивость Фарадея. Акустические вибрации тонкой пленки выявили эффект подавления коротковолновой неустойчиво-

сти и увеличение области притяжения плоской недеформированной поверхности раздела [1].

### **О влиянии термодиффузии на перераспределение примеси при остывании столба бинарной жидкости**

Изучается явление термодиффузионного разделения сложных по составу жидкостей в тонких каналах при самопроизвольном остывании; сопоставляется действие различных механизмов переноса – кратковременной тепловой конвекции, диффузии и термодиффузии на процессы перераспределения компонентов в водно-солевых растворах, заключенных в узких полостях [4, 8].

Показано, что тепловая конвекция, диффузия и сильная положительная термодиффузия, характерная для водно-солевых растворов, могут привести к заметному продольному разделению жидких смесей в тонких вертикальных каналах при самопроизвольном остывании и последующем замерзании (рис. 1). В основе объяснения неожиданно сильного перераспределения компонентов лежит совместное синхронное действие двух специфических механизмов: термодиффузионного вытеснения примеси в пограничные слои к боковым стенкам столба жидкости и медленного крупномасштабного продольного конвективного течения. Подобные явления могут иметь место в искусственных гидрологических системах, реальных геологических процессах и технологических приложениях. Предпринятое исследование было выполнено для объяснения возникновения существенной вертикальной стратификации разных по плотности компонентов смеси, что для водно-солевых растворов дает заметное изменение солёности среды по высоте канала.

Эффект обнаружен экспериментально, данные экспериментов отражены в таблице.

Было произведено численное моделирование задачи, результаты представлены на рис. 2.

Таблица

Средняя концентрация водно-солевого раствора ( $C_0$ )	Относительный перепад концентраций в столбе бинарной жидкости ( $(C_s - C_n)/C_0$ )
0,114	0,011
0,146	0,061
0,140	0,068

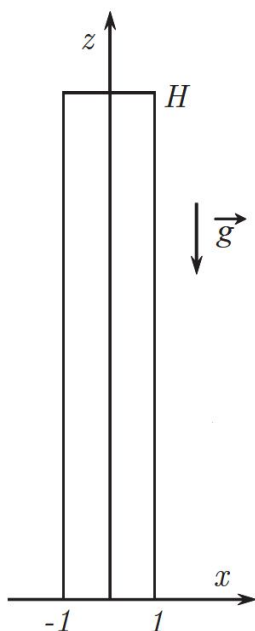


Рис. 1. Конфигурация задачи

### Устойчивость потока наножидкости в пористой среде с учетом иммобилизации

При течении смеси в пористой среде частицы примеси могут оседать на твердый скелет среды – иммобилизовываться. В работе [13] рассмотрена концентрационная конвекция в слое пористой среды с учетом такого прилипания наночастиц примеси. Течение однородного потока смеси в горизонтальном слое при заданном перепаде концентрации между границами становится неустойчивым при достаточно больших перепадах концентрации. Возникают колебания, которые порождают периодическое вдоль слоя распределение концентрации с определенным волновым числом.

В случае стационарного внешнего потока показано, что при учете иммобилизации увеличение интенсивности внешнего потока приводит к увеличению критического значения перепада концентрации между границами. Получены уравнения,

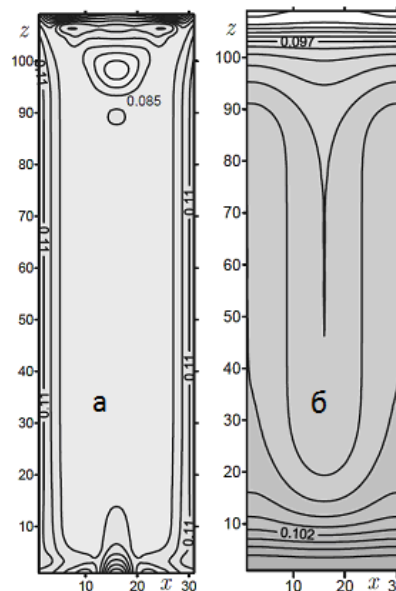


Рис. 2. Поля концентрации в моменты времени: а)  $t=8$ ; б)  $t=75$  (1 расчетная единица времени равна 36 с)

определяющие частоту возникающих колебаний и волновое число возникающей периодической структуры.

В случае пульсирующего внешнего потока получено линейное дифференциальное уравнение с зависящими от времени коэффициентами, определяющее динамику системы. Показано, что введение пульсаций приводит к дополнительному повышению критического значения перепада концентрации между границами. Численно исследовано параметрическое возбуждение конвекции в широком диапазоне параметров, показана возможность управления возникающими режимами конвекции с помощью частоты и интенсивности внешнего потока.

Показано, что распределение концентрации при конвекции в слое представляет собой периодическую структуру (рис. 3). Возможность управлять периодом такой структуры (получать желаемое волновое число) (рис. 4) позволяет получать пористые материалы с заданным пе-

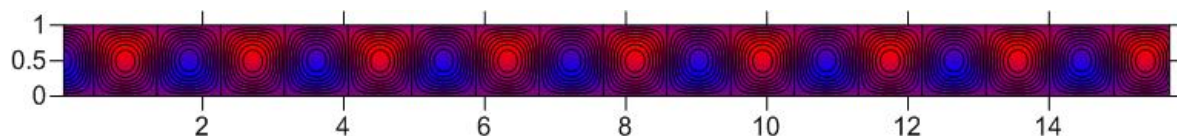


Рис. 3. Структура поля концентрации (цвет) и течения (изолинии) при конвекции в пористой среде

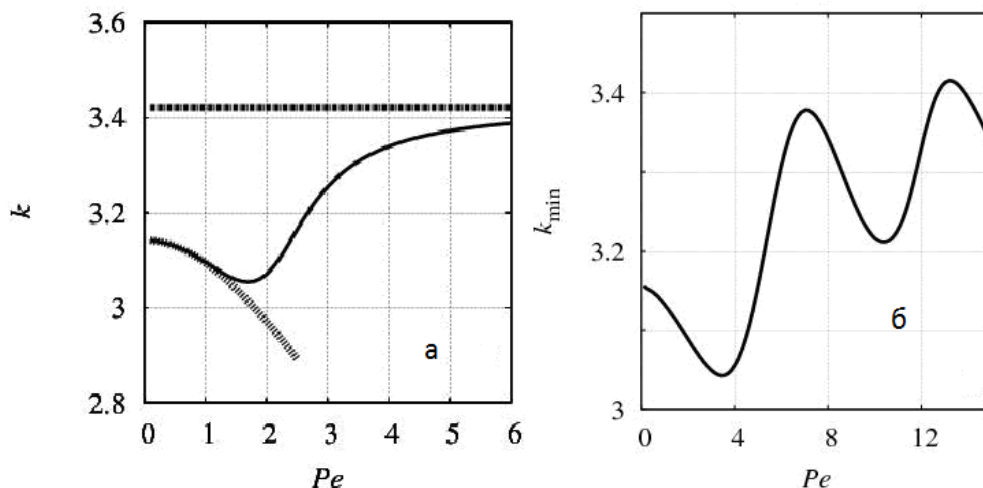


Рис. 4. Зависимость волнового числа от интенсивности внешнего потока: а) для стационарного потока (пунктиром обозначены полученные аналитически пределы для медленного и быстрого потоков); б) для пульсирующего потока

риодическим распределением примеси, что актуально для множества технологических приложений.

### Влияние вибраций на конвекцию Марангони в тонкой пленке

Рассматривается тонкая пленка жидкости, находящаяся в неоднородном поле температуры. Из-за неоднородности температуры поверхностное натяжение на верхней (свободной) границе пленки тоже неоднородно, что является причиной сложного течения жидкости внутри пленки – конвекции Магрангони. Течение внутри пленки может приводить к ее разрыву и образованию сухих пятен. Внешние вибрации могут как подавлять конвекцию, так и усиливать ее. Задача посвящена исследованию этих процессов и выяснению условий, когда вибрации приводят к разрыву пленки и когда позволяют его избежать. Описанные процессы имеют существенное значение при описании пленочного охлаждения по-

верхностей и при распылении различных жидкостей (при окрашивании, например), когда важно избежать наличия сухих пятен.

Таким образом, исследуется влияние вертикальных вибраций на конвекцию Марангони в пленке жидкости на горизонтальной подложке [16]. Подложка подогревается снизу, вся система находится в поле тяжести. Рассмотрено три характерных масштаба частот. Последовательно используя метод малого параметра, удалось разделить два механизма неустойчивости: конвекцию Марангони и неустойчивость Фарадея. Показано, что при ультранизких частотах, период которых сравним со временем эволюции поверхности, более опасной является вибрационная конвекция Марангони. Низкие частоты не оказывают никакого влияния на конвекцию Марангони, высокочастотное воздействие стабилизирует поверхность раздела. Влияние вибраций на толщину пленки показано на рис. 5.

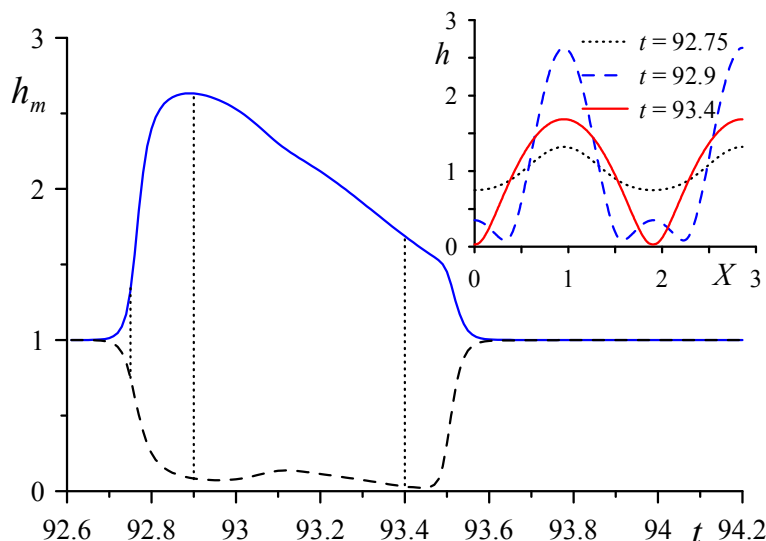


Рис. 5. Временная эволюция максимума (сплошная линия) и минимума (пунктирная) толщины пленки. На вставке – профили поверхности в разные моменты времени

#### Библиографический список

1. Алабужев А.А., Шкляев С.В. Влияние акустических вибраций на динамику тонкой пленки // Тез. докл. XIX Зимней школы по механике сплошных сред. – Пермь, 2015. – С. 20.
2. Бабушкин И.А., Карпунин И.Э. Экспериментальное исследование конвекции бинарной смеси в плоском вертикальном слое // Материалы междунар. конф. «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность». – Звенигород, 2014. – С. 16–19.
3. Глухов А.Ф., Демин В.А. Динамические граничные условия на концентрации частиц в ферроколлоидах при наличии седиментации // Известия ТПУ. Сер. Физика. – 2013. – Т. 323. – № 2. – С. 189–194.
4. Глухов А.Ф., Демин В.А., Третьяков А.В. О влиянии термодиффузии на перераспределение примеси при замерзании столба бинарной жидкости // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 118–127.
5. Демин В.А. Оседание наночастиц в однородной несущей жидкости при наличии термодиффузии // Вест. Перм. ун-та. Сер. Физика. – 2013. – № 1(23). – С. 20–24.
6. Демин В.А., Попов Е.А. Тепловая конвекция коллоида на основе бинарной жидкости // Вест. Перм. ун-та. Сер. Физика. – 2015. – № 3 (31). – С. 74–80.
7. Марышев Б.С. Влияние иммобилизации примеси на устойчивость в концентрационном аналоге задачи Хортон–Роджерса–Лэпвуда: анализ нелинейной задачи // Сб. материалов XIX Зимней школы по механике сплошных сред. – Пермь, 2015. – С. 160–166.
8. Попов Е.А. Трехмерные конвективные эффекты в узких полостях // Автореферат дис. на соискание уч. степ. к. ф.-м. н. – Пермь: Изд. ПГНИУ, 2014. – 16 с.
9. Cherepanov I.N., Smorodin B.L. Convection of a Stratified Colloidal Suspension // Journal of Experimental and Theoretical Physics – 2013. – Vol. 117. – № 5. – P. 963–969.
10. Fayzrakhmanova I.S., Nepomnyashchy A.A. Linear stability analysis of the vibration influence on Marangoni waves in two-layer film // IMA8, 12-16 June, 2016, Bad Honnef (Germany).
11. Fayzrakhmanova I.S., Shklyayev S., Nepomnyashchy A.A. Longwave convection in a layer of binary mixture with modulated heat flux: Weakly nonlinear analysis // Fluid Dynamics Research. – 2014. – Vol. 46. – 41411.
12. Ishutov S.M., Myznikova B.I., Smorodin B.L. Convection of a binary mixture under high-frequency vibrations // Comptes Rendus Mecanique. – 2013. – Vol. 341. – Is. 4-5. – P. 477–482.
13. Maryshev B.S. The Effect of Sorption on Linear Stability for the Solutal Horton–Rogers–Lapwood Problem // Transport in Porous Media. – 2015. – Vol. 109 (1). – P. 747–764.
14. Maryshev B.S. The Forming, Evolution and Stability of Flow Structures within the Solutal Horton–Rogers–Lapwood Problem with Immobilization // The proceedings of international conference «Fluxes and structures in fluids». – Svetlogorsk, 2015. – P. 144–145.

15. *Nepomnyashchy A.A., Shklyayev S.* Nonlinear dynamics of a binary liquid layer heated from above // Abstracts of 66-th Annual Meeting of APS DFD, November 24-26, 2013, Pittsburgh, USA. – P. 103 (Bull. of the Am. Phys. Soc. Vol. 58, № 18. P. 103).
16. *Shklyayev S., Alabuzhev A.A., Khenner M.* Marangoni convection in a thin film on a vertically oscillating plate // Physical Review E. – 2015. – Vol. 92 (1). – 013019.
17. *Smorodin B.I., Myznikova B.I., Ishutov S.M.* Traveling wave convection in binary fluid mixture under high frequency vertical vibrations // Physical Review E. – 2014. – Vol. 89. – 053004.

**OSCILLATORY CONVECTIVE PROCESSES IN NANO- AND MICROFLUIDIC SYSTEMS: ANALYSIS AND CONTROL**

B.S. Maryshev<sup>1</sup>, A.A. Alabuzhev<sup>1</sup>, I.A. Babushkin<sup>2</sup>, A.F. Glukhov<sup>2</sup>, V.A. Demin<sup>2</sup>,  
B.I. Myznikova<sup>1</sup>, E.A. Popov<sup>3</sup>, I.S. Fayzrakhmanova<sup>4</sup>, I.N. Cherepanov<sup>2</sup>,  
S.V. Shklyayev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Continuous Media Mechanics RAS UD*

<sup>2</sup> *Perm State University*

<sup>3</sup> *UEC Aviadvigatel*

<sup>4</sup> *Perm National Research Polytechnic University*

This publication contains the main results of the work on the RFBR project 13-01-96010 r\_ural\_a «Oscillatory convection processes in nano- and microfluidic systems: analysis and control». The aim of this project is an experimental and theoretical study of complex convective phenomena in nonisothermal nanofluids and thin films. A common attribute of the systems under consideration is the presence of an oscillatory mode of instability of their ground state or the first critical mode. The dynamics of the systems under consideration in periodic external conditions is interesting because of (1) complex and not fully explained kinetics; (2) a rich bifurcation picture and (3) the technological necessity in the management of stability and non-linear modes of macroscopic flows of nanofluids and microfluidic flows.

*Keywords:* nanofluids, microfluidics, convection, porous media, thin films, oscillatory modes, vibration.

**Сведения об авторах**

*Марышев Борис Сергеевич*, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник группы «Динамика геологических систем», Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: bmaryshev@mail.ru

*Алабузhev Алексей Анатольевич*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории вычислительной гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: alabuzhev@mail.ru

*Бабушкин Игорь Аркадьевич*, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой общей физики, Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), 6140990, г. Пермь, ул. Букирева 15; e-mail: lapans@yandex.ru

*Глухов Александр Федорович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, ПГНИУ; e-mail: glua@mail.ru

*Демин Виталий Анатольевич*, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой теоретической физики, ПГНИУ; e-mail: demine-vitaly@yandex.ru

*Мызникова Бела Исаковна*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики и механики мягкого вещества, ИМСС УрО РАН; e-mail: myz@icmm.ru

*Попов Евгений Андреевич*, кандидат физико-математических наук, инженер, ОАО «Авиадвигатель», 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 93; e-mail: evjeniy.p@gmail.com

*Файзрахманова Ирина Сергеевна*, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры общей физики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; faizr2@gmail.com

*Черепанов Иван Николаевич*, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры радиоэлектроники и защиты информации, ПГНИУ; e-mail: che-email@yandex.ru

*Шкляев Сергей Викторович*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики и механики мягкого вещества, ИМСС УрО РАН; e-mail: shklyayev@yandex.ru

*Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.*