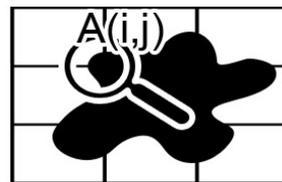


# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ



**Председатели:**

**в.н.с. Плохотников Константин Эдуардович**  
**проф. Голубцов Петр Викторович**

## РЕДУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ К ВИДУ, СВОЙСТВЕННОМУ ИЗМЕРЕНИЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНОСТИ ОБЪЕКТА, ПРИ СУБЪЕКТИВНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЕГО РАЗРЕЖЕННОСТИ В ЗАДАННОМ БАЗИСЕ

Балакин Д.А.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*  
*E-mail: balakin\_d\_a@physics.msu.ru*

При изучении чувствительных к свету объектов важной проблемой является снижение числа фотонов, требуемых для восстановления изображения объекта исследования (ОБИ) приемлемого качества. Кроме ускорения регистрации изображения, актуального при изучении быстро эволюционирующих объектов, это существенно при исследовании необратимо изменяющихся под действием излучения ОБИ. В этой ситуации эффективность математических методов и алгоритмов обработки полученных измерений становится критической, поэтому требуется, чтобы они не только обеспечивали минимальную погрешность, но и позволяли использовать всю доступную модельеру-исследователю (м.-и.) информацию об ОБИ. *Математический метод редукции измерения к виду, свойственному измерению на идеальном измерительном приборе*, и реализующие его алгоритмы позволяют это сделать.

Рассмотрим типичную схему измерений, в которой на входе *измерительного преобразователя* (ИП) формируется (измеряемый) сигнал  $f$ , принадлежащий евклидову пространству  $\mathcal{F}$ , см. [1]. ИП преобразует  $f$  в принадлежащий евклидову пространству  $\mathcal{X}$  сигнал  $\xi = Af + v$ , где  $A: \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{X}$  — оператор, моделирующий физические процессы в ИП, определяющие преобразование  $f$  в сигнал  $Af$ ,  $v$  — погрешность, шум измерения. Результат измерения зависит от характеристик *измеряемого объекта*, взаимодействующего с ИП и искаженного измерением, а м.-и., как правило, интересуют характеристики ОБИ, *не возмущённого измерением*. Их связь моделируется *идеальным ИП*, заданным оператором  $U: \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{U}$ , на вход которого поступает тот же сигнал, что и на вход ИП, преобразующего сигнал  $f$  в  $\xi$ , но на его выходе сигнал  $Uf$  равен характеристике ОБИ. Задача редукции состоит в нахождении оператора редукции  $R_*: \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{U}$ , для которого  $R_*(\xi)$  — *наиболее точная версия*  $Uf$ ; оператор редукции  $R_*$  синтезируется в вычислительном преобразователе.

Если  $f \in \mathcal{F}$  — априори произвольный вектор,  $v$  — *случайный вектор*, принимающий значения в  $\mathcal{X}$ , имеющий математическое ожидание  $\mathbb{E}v = 0$  и невырожденный ковариационный оператор  $\Sigma_v: \forall x \in \mathcal{X} \quad \Sigma_v x = \mathbb{E}v(x, v)$ , то линейный оператор  $R_*: \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{U}$  редукции определяется как минимизирующий максимальную по  $f$  среднеквадратичную (с. к.) погрешность интерпретации  $R\xi$  как  $Uf$ :

$$h(R, U) = \sup_{f \in \mathcal{F}} \mathbb{E} \|R(\xi) - Uf\|^2 \sim \min_{R: \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{U}} .$$

Эта погрешность минимальна [1] при

$R_* = U(\Sigma_v^{-1/2}A)^{-1}\Sigma_v^{-1/2}$  и равна  $h(R_*, U) = \text{tr}U(A^*\Sigma_v^{-1}A)^{-1}U^*$ , где  $^-$  обозначает операцию псевдообращения, если  $U(I - A^-A) = 0$ , и равна бесконечности в противном случае.

Пусть м.-и. интересуется распределение прозрачности ОБИ. Значения прозрачностей пикселей принадлежат единичному отрезку. Это учитывается при редукции измерения проецированием оценки на множество  $[0, 1]^{\text{dim}U}$  [2]. Кроме того, м.-и. известно, что прозрачности соседних пикселей, как правило, отличаются слабо. Эта информация часто формализуется [3] разреженностью распределения прозрачности как вектора в заданном базисе. В [4] предложен алгоритм редукции, позволяющий м.-и. учесть такую информацию при обработке мультиплексированных квантовых фантомных изображений. Алгоритм основан на проверке статистических гипотез о равенстве компонент оценки в выбранном базисе нулю (альтернатива — неравенство). Его результат зависит от параметра алгоритма — уровня используемого в задаче проверки гипотез критерия. Его выбор определяется приемлемым для м.-и. компромиссом между подавлением шума и искажением изображения.

В докладе рассмотрено представление вышеописанной информации и выбор параметра алгоритма средствами *субъективного моделирования*. Субъективная модель определена в [5, 6] как пространство  $(X, \mathcal{P}(X), \text{Pl}^{\tilde{x}}, \text{Bel}^{\tilde{x}})$  с мерами правдоподобия  $\text{Pl}^{\tilde{x}} : \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathcal{L}$  и доверия  $\text{Bel}^{\tilde{x}} : \mathcal{P}(X) \rightarrow \hat{\mathcal{L}}$ , в котором  $X$  — множество возможных значений неизвестного параметра  $x$  модели ОБИ,  $\mathcal{P}(X)$  — класс всех подмножеств  $X$ ,  $\tilde{x}$  — неопределенный элемент (н.э.), моделирующий неизвестный параметр  $x \in X$ .  $\text{Pl}^{\tilde{x}}$  и  $\text{Bel}^{\tilde{x}}$  характеризуют *модальности субъективных суждений* м.-и. об истинности каждого  $x \in X$ : значение  $\text{Pl}^{\tilde{x}}(\tilde{x} = x)$  есть правдоподобие *относительной* (существенна лишь упорядоченность значений мер  $\text{Pl}^{\tilde{x}}$  и  $\text{Bel}^{\tilde{x}}$  и их равенство 0 или 1) истинности утверждения « $\tilde{x} = x$ »,  $\text{Bel}^{\tilde{x}}(\tilde{x} \neq x)$  — доверие к *относительной* истинности утверждения « $\tilde{x} \neq x$ ».  $\mathcal{L} = ([0, 1], \leq, +, \times) = ([0, 1], \leq, \max, \min)$ ,  $\hat{\mathcal{L}} = ([0, 1], \geq, \min, \max)$  суть *шкалы значений мер  $\text{Pl}^{\tilde{x}}$  и  $\text{Bel}^{\tilde{x}}$* .  $\forall E \in \mathcal{P}(X)$

$$\begin{aligned} \text{Pl}^{\tilde{x}}(E) &= \text{Pl}^{\tilde{x}}(\tilde{x} \in E) = \sup\{t^{\tilde{x}}(x) : x \in E\}, E \neq \emptyset, \text{Pl}^{\tilde{x}}(\emptyset) = 0, \text{Pl}^{\tilde{x}}(X) = 1, \\ \text{Bel}^{\tilde{x}}(E) &= \text{Bel}^{\tilde{x}}(\tilde{x} \in E) = \inf\{\hat{t}^{\tilde{x}}(x) : x \in X \setminus E\}, E \neq X, \text{Bel}^{\tilde{x}}(X) = 1, \text{Bel}^{\tilde{x}}(\emptyset) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Согласно (1), функции  $t^{\tilde{x}} : X \rightarrow \mathcal{L} : x \mapsto \text{Pl}^{\tilde{x}}(\tilde{x} = x)$  и  $\hat{t}^{\tilde{x}} : X \rightarrow \hat{\mathcal{L}} : x \mapsto \text{Bel}^{\tilde{x}}(\tilde{x} \neq x)$  определены мерами  $\text{Pl}^{\tilde{x}}$  и  $\text{Bel}^{\tilde{x}}$  и называются *распределениями правдоподобий и доверий значений н.э.  $\tilde{x}$* , значения  $\text{Pl}^{\tilde{x}}(E)$  и  $\text{Bel}^{\tilde{x}}(E)$  суть правдоподобие и доверие истинности включения  $\tilde{x} \in E \in \mathcal{P}(X)$ . С другой стороны, н.э.  $\tilde{x}$ , заданный м.-и. распределениями  $t^{\tilde{x}}$ ,  $\hat{t}^{\tilde{x}}$ , определяет  $\text{Pl}^{\tilde{x}}$  и  $\text{Bel}^{\tilde{x}}$  равенствами (1).

В докладе предлагается способ выбора параметра алгоритма редукции, аналогичный [7] и показана верификация использованной субъективной информации средствами *математического формализма субъективного моделирования*.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю профессору Ю. П. Пытьеву и профессору А. В. Белинскому.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-07-00424 А, 18-01-00598 А.

### Литература

1. Пытьев Ю. П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. 3 изд. М.: Физматлит, 2012.
2. Балакин Д. А., Пытьев Ю. П. Сравнительный анализ качества редукции для вероятностной и возможностной моделей измерения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2017. № 2. С. 3–14.
3. Morris P.A. et al. Imaging with a small number of photons // Nat. Commun. 2015. V. 6, p. 5913.

4. Balakin D. A., Belinsky A. V., Chirkin A. S. Object reconstruction from multiplexed quantum ghost images using reduction technique // Quantum Inf. Process. 2019. V. 18 (3). P. 80.
5. Пытьев Ю. П. Моделирование субъективных суждений модельера-исследователя о модели объекта исследования // Матем. моделирование. 2013. Т. 25(4). С. 102–125.
6. Пытьев Ю. П. Вероятность, возможность и субъективное моделирование в научных исследованиях. М.: Физматлит, 2018. 296 с.
7. Пытьев Ю. П. и др. Математический формализм субъективного моделирования // Машинное обучение и анализ данных. 2018. Т. 4(2). С. 108–121.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОСТОВКОВЫХ НАНОПЛЕНОК НА ОСНОВЕ КЛЕТОЧНОГО АВТОМАТА

Бухаров Д. Н., Кучерик А.О., Осипов А.В., Скрыбин И.О., Новикова О.А.

*ВГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, ИПМиФиИ, Владимир, Россия*

*E-mail: buharovdn@gmail.com*

В данной работе рассмотрены результаты экспериментальных и теоретических исследований электропроводности металлических островковых нанопленок. Исходные пленки были получены методом термодиффузного осаждения систем наночастиц золота и серебра из коллоида. Полученные наноструктуры со средней высотой от 10 до 50 нм впоследствии исследовались с использованием зондовой нанолaborатории Интегра-Аура.[1] Электропроводные свойства полученных нанопленок исследовались путем измерения вольтамперных характеристик с использованием четырехзондовой схемы с линейным расположением контактов [4].

Для моделирования электропроводности применялся клеточный автомат с окрестностью Мура порядка 1 из восьми ближайших соседей [3], который формировал площадку проводимости.

Для случая модели биметаллической пленки из золота и серебра используется два параметра:  $\beta$  — вероятность ячейки быть из золотой,  $\gamma$  — серебряной. Тогда для каждой эпохи  $T$  генерируется случайная величина  $r$ , характеризующая состояние ячейки  $x_{ij}$ : если  $r > \beta$  — ячейка золотая, если  $r > \gamma$  — серебряная иначе это ячейка подложки из стекла. Относительно островковой нанопленки параметры  $\beta$  и  $\gamma$  описывают концентрацию золотых и серебряных ячеек в формируемой площадке проводимости.

Аналогично описывается случай монометаллической пленки для которого используется уже только один параметр, отвечающий за тип ячейки.

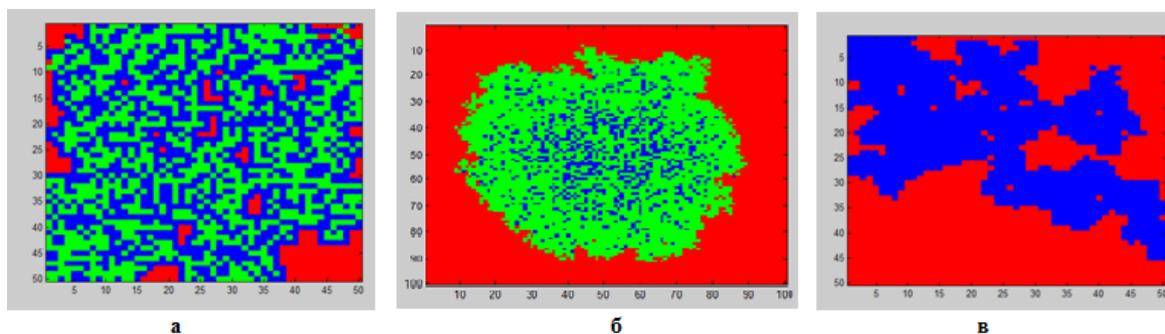


Рис. 1. Площадка проводимости а) распространение начинается по диагонали  $T=100$   $\beta=0.5$   $\gamma=0.5$  б) распространение начинается из центра  $T=100$   $\beta=0.2$   $\gamma=0.8$  в) распространение начинается из левого верхнего угла  $T=3000$   $\beta=0.5$

На рис. 1 изображена площадка проводимости в соответствии с моделью клеточного автомата. Рис 1(а, б) соответствует случаю биметаллической пленки, а 1 (в) — монометаллической. Из рисунков очевидно, что характер проводимости зависит от положения начала распро-

странения. Так, например, при распространении, начиная с диагонали (рис 1 а) границы расчетной области будут соединены дорожками проводимости всего за 100 эпох, в случае же начала распространения из угла расчетной области за 100 эпох будет охвачена только небольшая часть расчетной области и для генерации дорожки проводимости, соединяющей границы необходимо будет уже порядка 3000 эпох.

Предложенная модель позволяет выделить дорожки и площадки проводимости, которые используются для расчета величины сопротивления. Применяя закон Ома с учетом вычисленного сопротивления структуры становится возможным в первом приближении оценить вольт амперные характеристики.[2]

На рис. 2 представлены вольтамперные характеристики биметаллической пленки и монометаллическими пленок из серебра и золота для рис. 5.а при варьировании напряжения от 0.1 до 1 В, отношение концентраций золотых и серебряных ячеек в дорожки проводимости составляло 1:1, абсолютный размер ячейки 10 нм.

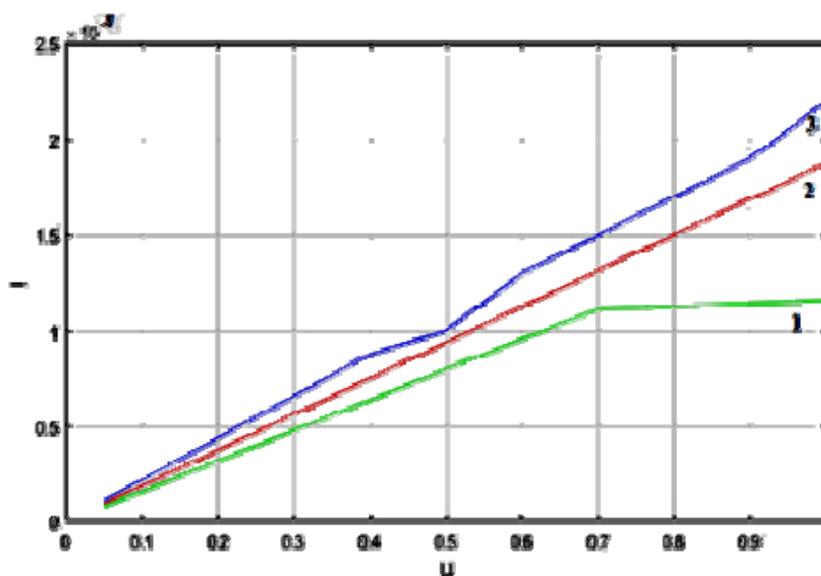


Рис. 2. Вольтамперные характеристики для островковых пленок: 1 — Au, 2 — Ag/Au, 3 — Ag

Предложенный подход позволил в первом приближении смоделировать электропроводность островковых биметаллических пленок и сравнить их с монометаллическими из серебра и золота.

Представленные модели на качественном уровне достаточно верно отображают моделируемые свойства полученных структур.

Работа выполнена в рамках проектной части госзадания 16.1123.2017/4.6.

### Литература

1. Антипов А.А. Осаждение биметаллических кластеров Au/Ag с использованием метода лазерного осаждения наночастиц из коллоидных систем./ А.А. Антипов, С.М. Аракелян, С.В. Кутровская, А.О. Кучерик, Т.А. Вартамян //Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 116. № 2. с. 349–352.
2. Бухаров Д.Н. Перколяционная модель электропроводности биметаллической островковой пленки / Д.Н. Бухаров, А.А. Антипов, С.М. Аракелян, А.В. Истратов, А.Ю. Шагурина // Южно-Сибирский научный вестник.2018. № 4. с. 55–58.
3. А.И. Лобанов Модели клеточных автоматов// Компьютерные исследования моделирование.2010. Т. 2 № 3 с. 273–293.
4. Lü B. et all // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. № 16. P. 163107. 10.1063/1.4900575.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В ЗАДАЧАХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ПОЛЕТА БПЛА

Вьюгина А.О.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*  
*E-mail: v.a.o375@gmail.com*

В настоящее время при решении широкого спектра задач в гражданских областях активно используются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Здесь, прежде всего, следует указать на задачи экологического мониторинга, дистанционного зондирования поверхности Земли, наблюдения за объектами транспортной инфраструктуры и т.п. Целевое функционирование БПЛА «привязано» к земной поверхности, в связи с чем все большую актуальность приобретает задача маршрутизации его полета [4]. Маршрут полета указывает очередность пролета БПЛА над заданными точками земной поверхности.

В самой общей постановке задача планирования маршрута БПЛА сводится к выбору маршрута между заданными реперными точками, которые приводят к математической задаче оптимизации на графе [1]. При решении задачи маршрутизации БПЛА наряду с классическими методами дискретной математики [2] все большее применение находят эволюционные методы оптимизации, в частности, генетические алгоритмы [3]. В докладе рассматривается решение задачи маршрутизации БПЛА, выполняющего автоматический полет по заранее заложенному в память вычислителя полетному заданию для случаев однокритериальной и многокритериальной реализации генетического алгоритма. Показано, что благодаря высокой производительности современных бортовых вычислительных машин реализация сложных алгоритмов маршрутизации при наблюдении наземных объектов с учетом заданного графика полета не вызывает трудностей. На основании результатов моделирования работы алгоритмов проводится сравнительный анализ эффективности их работы.

**Литература**

1. Аллилуева Н.В., Руденко Э.М. Математический метод расчета целевой функции на графах и решение задач маршрутизации// Труды МАИ. 2017. № 96. С. 9.
2. Андерсон Д. Дискретная математика и алгоритмы. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.
3. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И., Теория эволюционных вычислений М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012
4. Михайлин Д.А., Аллилуева Н.В., Руденко Э.М. Сравнительный анализ эффективности генетических алгоритмов маршрутизации полета с учетом их различной вычислительной трудоемкости и многокритериальности решаемых задач// Труды МАИ. 2018. № 98. С. 22.

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АЛГОРИТМА ДВУМЕРНОГО СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА

Григорьев В. И.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*  
*E-mail: work@vrvadimmm.com*

Случайный поиск в настоящее время стал распространенным и эффективным средством решения сложных задач оптимизации и адаптации. В работе рассматривается задача о средней длительности случайного поиска одним объектом другого в зависимости от различных факторов на квадратной решетке.

Учитывались следующие факторы: размерность решетки, начальное положение объектов, взаимное расположение объектов, подвижность одного из объектов.

Для решения задачи было проведено 54 эксперимента, в каждом из которых моделировались случайные блуждания двух точек по квадратной решетке с заданными начальными условиями и правилами перехода, затем замерялась продолжительность поиска одного объекта другим.

В результате построена регрессионная модель, отражающая среднюю длительность случайного поиска объекта в зависимости от четырех рассматриваемых факторов. Среди рассмотренных факторов, влияющих на среднее время поиска, определены наиболее значимые. Важным результатом работы стало то, что с помощью модели выявлено качественное и количественное влияние факторов на среднее время продолжительности поиска.

Показано, что начальное соседство объектов не гарантирует быстрый поиск, если каждый из них передвигается. Выявлен экспоненциальный характер роста числа шагов поиска объекта при увеличении размера решетки при остальных фиксированных факторах.

Результаты исследования могут быть использованы в организации деятельности социальных групп, где решение основывается на консенсусе, в том числе деятельности технических комитетов по стандартизации, где требуется консенсус.

### Литература

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
2. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 446 с.
3. Обухов С. П. Случайное блуждание в неоднородной среде // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39, вып. 1.
4. Петросян Л.А., Гарнаев А.Ю. Игры поиска: учеб. пособие. СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 1992. 216 с.
5. Чхартишвили А.Г., Шикин Е.В. Динамический поиск объектов. Геометрический взгляд на проблему // Фундаментальная и прикладная математика. 1995. Т. 1, вып. 4. С. 827–862.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ InGaAs/GaAs

Хазанова С.В., Дегтярев В.Е., Григорьева Н.Н

*НИНГУ им. Н.И.Лобачевского, Нижний Новгород, Россия*

*E-mail: grigorieva\_nn\_27@mail.ru*

Структуры, содержащие квантовые ямы In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs, могут быть использованы при создании источников излучения в среднем и дальнем ИК диапазонах, приборов спинтроники, оптических модуляторов [1]. При этом энергетические характеристики и оптические свойства реальных приборов на основе квантово-размерных структур весьма чувствительны к параметрам роста, геометрии системы а также упругим деформациям вследствие рассогласования решеток. Теоретический расчет спектров фотолуминесценции с учётом технологических особенностей роста позволяет более корректно интерпретировать экспериментальные спектры гетероструктур со сложным профилем состава.

Исследованы гетероструктуры In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs (100), содержащие одиночную и двойную квантовую яму (КЯ) с различным содержанием индия. Для моделирования энергетического спектра используется численное решение стационарного одномерного одноэлектронного уравнения Шрёдингера в приближении эффективной массы. С помощью расчёта положений уровней размерного квантования, оптических матричных

элементов межзонных переходов получены модельные спектры ФЛ КЯ [2]. Исследовано влияние вариации параметров структуры и поперечного электрического поля.

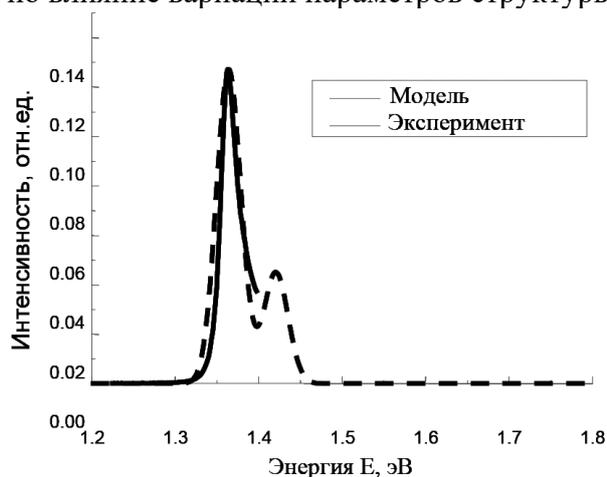


Рис. 1. Экспериментальный и модельный спектр ФЛ для одиночной КЯ с шириной  $d = 9$  нм с концентрацией  $\text{In } x = 0,1$  при  $T = 300$  К

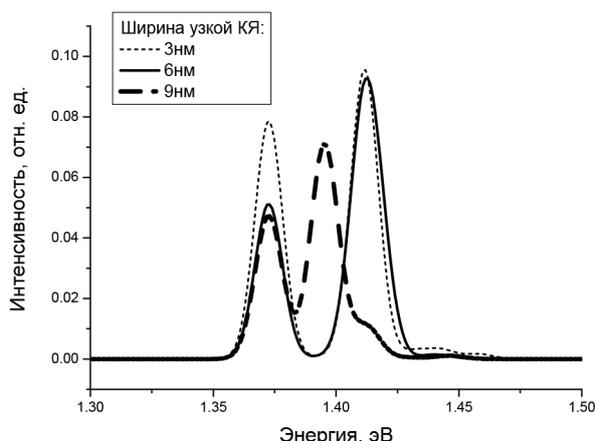


Рис. 2. Спектр ФЛ для двойной КЯ с параметрами  $10/(6)/18$  нм с концентрацией  $\text{In } x = 0,1$  при  $T = 77$  К

Показано (рис. 1), что для одиночных КЯ при небольшом содержании индия ( $x = 0,1-0,12$ ) кривые расчетного и экспериментального спектров ФЛ хорошо согласуются. При этом более интересным объектом исследования являются двойные КЯ. В данной работе показано, что при незначительной вариации ширины барьера (рис. 2), а также при внешнем воздействии электрического поля возможно резкое изменение вероятности оптических межзонных переходов, что приводит к заметному изменению спектра.

### Литература

1. М.С. Буяло, И.М. Гаджиев и др., Письма в ЖТФ, , 41(20), с. 30, (2015).
2. M. Califano and A. Zunger. // PRB, 70, p.165127, (2004).

## АЛГОРИТМЫ СОСТАВЛЕНИЯ ПОРЯДКА ОБСЛУЖИВАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ В ДЕПО

Гришин Е.М., Галахов С.А.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*  
*ИПУ им. В.А.Трапезникова РАН, лаборатория "ТРИДО", Москва, Россия*  
*E-mail: grishin.em16@physics.msu.ru, galakhov.sa16@physics.msu.ru*

Согласно требованиям РЖД, каждый локомотив должен проходить техническое обслуживание (ТО-2) в Пункте Технического Обслуживания Локомотивов (ПТОЛ) через установленный промежуток времени после предыдущего обслуживания. Объем локомотивного парка РЖД таков, что в среднем за сутки через ПТОЛ проходит от 50 до 100 локомотивов. По прибытии локомотива в ПТОЛ для прохождения ТО-2 может не оказаться доступных ремонтных позиций и локомотиву придется ждать своей очереди на обслуживание. В силу того, что каждый локомотив и ПТОЛ характеризуется определенными параметрами (серия, количество секций, количество доступных ремонтных позиций и др.) возникает задача планирования работы ПТОЛ.

В работе описаны алгоритмы составления расписания технического обслуживания локомотивов в депо. Представлены алгоритм локального поиска и эвристический алгоритм. Представленная постановка задачи соответствует работе Восточного полигона

РЖД. Для проверки работоспособности были проведены численные эксперименты и проведено сравнение представленных алгоритмов с оптимизатором IBM ILOG CPLEX. Предложенные алгоритмы были протестированы на реальных данных для существующих конфигураций ПТОЛ Восточного полигона Российских железных дорог.

### Литература

1. J. Labetoulle, E.L. Lawler, J.K. Lenstra and A.H.G. RinnooyKan, Preemptive scheduling of uniform machines subject to release dates, Progress in Combinatorial Optimization, Academic Press (1984), pp. 245–261.
2. P. Brucker, Scheduling Algorithms, Springer-Verlag, New York, 2006.
3. P. Hansen, N. Mladenovic, Variable neighborhood search: Principles and application, European Journal of Operational Research (1999), pp. 335–350.
4. R.P. Evers, Algorithms for Scheduling of Train Maintenance, Netherlands, 2010.
5. W.E. Smith, Various optimizers for single-stage production, Naval Res. Logist. Quart.3 (1956), pp. 59–66.
6. Кудяров М. М., Выбор оптимальной организации ремонта локомотивов на полигоне железной дороги}, Известия ПГУПС (2012), стр. 99–103.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОМЕХ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

Краус Д.Г., Гришова Е.А.

*Ульяновский государственный технический университет  
e-mail: kraus\_bak@mail.ru orange225@yandex.ru*

### Аннотация

Рассматриваются преимущества и недостатки виртуальных лабораторных стендов для моделирования помех в среде Matlab Simulink для образовательного процесса студентов-инженеров. Приведен пример математической модели. Сделаны выводы влияния помех на качество обнаружения целей.

Лабораторные работы являются важным этапом в образовательном процессе, поскольку закрепляют у студентов-инженеров полученные теоретические знания. Для их выполнения очень часто используют стенды лабораторных работ, которые, как правило, создаются на основе натуральных изделий и систем. Оборудование данных стендов является затратным для образовательных и научно-исследовательских учреждений, поскольку эксплуатация данных стендов сопровождается большими расходами запасных частей, электроэнергии, расходных материалов, а их размещение требует больших учебно-производственных площадей.

Разрешить проблему, изложенную выше, можно путем применения современных информационных технологий, позволяющих выполнить замену всех элементов лабораторного стенда программно имитационными моделями [1].

Главной целью данной работы является создание виртуального лабораторного стенда для моделирования помех в среде Matlab Simulink.

В настоящее время существует множество программных средств, позволяющих создавать виртуальные лабораторные стенды, для проведения экспериментов, одной из популярных является программа Matlab Simulink. Особенно привлекательной выглядит возможность построения трехмерных поверхностей и фигур. По сравнению с системой, например, Mathcad построение трехмерных фигур средствами Matlab происходит намного быстрее. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которыми пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты [4].

Была разработана математическая модель, реализованная в среде Matlab Simulink. Основными помехами, влияющими на качество обнаружения при работе радиолокационных систем (РЛС) по надводным целям являлись отражения зондирующего сигнала от взволнованной морской поверхности. Для этого были заданы значения параметров

модели, используемые при расчете, а именно: параметры сигнала, параметры РЛС и размеры моделируемого участка морской поверхности, а также две цели, которые различались дальностью обнаружения, скоростью и ЭПР.

Анализ результатов моделирования позволил сделать следующие выводы. При малых скоростях ветра  $<$  или  $= 2$  м/с (до 2 баллов по шкале Бофорта) амплитуда помех, создаваемых взволнованной морской поверхностью достаточно мала по сравнению с амплитудой сигнала цели, что дает возможность обнаруживать неподвижные и малоскоростные цели. При больших скоростях  $>$  или  $= 7$  м/с (более 4 баллов) амплитуда создаваемых помех значительно возрастает и обнаружение неподвижных и малоскоростных целей РЛС (скорость  $< 1$  м/с) становится невозможным [3]. Если скорость ветра будет находиться в пределах от 2 до 7 м/с, качество обнаружения цели будет зависеть от величины ЭПР.

Таким образом, при создании виртуального лабораторного стенда мы можем наблюдать изменение качества обнаружения целей при различных скоростях ветра. Можно также рассмотреть и другие формы помех, описав математически данный эффект. В процессе моделирования мы можем наблюдать за процессами, происходящими в среде, с помощью специальных средств наблюдения, которые входят в состав библиотеки программы.

Виртуальные лабораторные стенды, для проведения экспериментов, позволяют преподавателям контролировать усвоение знаний студентами-инженерами, а им в свою очередь моделировать процессы, с применением компьютерных эффектов, что в свою очередь, позволяет уменьшить затраты времени на проведение лабораторных исследований [2].

Во время эксплуатации, из-за недостаточности навыков студентов или неопытности, возможны поломки деталей стендов, что вызывает дополнительные расходы на приобретение запасных деталей, монтаж и перенастройку. Применяя виртуальные лабораторные стенды, мы сможем избежать этих расходов, что приведет к экономии финансовых ресурсов.

### Литература

1. Ашанин В.Н., Мельников А.А. Микропроцессорный лабораторный стенд для исследования систем энергоснабжения автомобиля // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовки кадров: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ»;
2. Горбачев И.В. Виртуальный лабораторный стенд для имитационного моделирования радиолокационных систем / Горбачев И.В., Бужерак Ю.Э., Краус Д.Г. / Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 12. Т. 15. С. 20–23;
3. Минаков Е.И., Мешков А.В., Польшинкин А.В. Моделирование отражения радиолокационного сигнала от морской поверхности / Е. И. Минаков // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2016. вып. 12(2);
4. Наместников А. А. Разработка имитационных моделей в среде MATLAB: учебное пособие/ А. М. Наместников – Ульяновск: УлГТУ, 2004.- 123 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЙВАЮЩИХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ ПО ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Горбачев И.В., Краус Д.Г., Гришова М.А.

Ульяновский государственный технический университет  
e-mail: kraus\_bak@mail.ru giv.uln@gmail.com mashagrishova@yandex.ru

### Аннотация

Исследование рассеивающих свойств простейших объектов при проведении натурных исследований и по имитационному моделированию. Приведены преимущества и

недостатки виртуальных лабораторных стендов при обучении студентов инженеров. Сделаны выводы.

В современных реалиях с развитием информационных технологий возникла необходимость внедрения современных технологий в процесс обучения, одна из актуальных проблем это переход с натуральных экспериментов на виртуальные лабораторные стенды [1].

Главной целью данной работы является создание виртуального лабораторного стенда для студентов инженерных специальностей, который будет исследовать рассеивающие свойства для начала простейших объектов.

Физическое моделирование технологического процесса даже в упрощенном виде, означает серьезные финансовые затраты на создание стендов и их поддержку в работоспособном состоянии [2]. Виртуальные лабораторные стенды для проведения экспериментов имеют больше преимуществ по сравнению с реальными установками которые заключаются в существенном сокращении материальных и временных затрат на создание, тиражирование и поддержание в рабочем состоянии смоделированного лабораторного стенда.

Недостатки заключаются в отсутствии практических навыков работы с оборудованием, что не маловажно при обучении студентов инженерных специальностей, отсутствие предметной наглядности [3].

Сегодня существует великое множество программных средств для реализации виртуальных лабораторных стендов. Одним из самых популярных является MatLAB — многофункциональная среда программирования численных расчетов и визуализации результатов [4].

Требуется разработать виртуальный лабораторный стенд для исследования рассеивающих свойств простейших объектов.

Было проведено натурное испытание. Измерена эффективная площадь рассеяния некоторых простых объектов — куба и цилиндра. Измерялась угловая зависимость ЭПР объектов. В результате экспериментов были получены следующие результаты: в угловой зависимости интенсивности отраженного сигнала на графике наблюдаем резкое увеличение значений при попадании на боковую зеркальную поверхность куба и снижение — на ребро куба. При облучении цилиндра со всех сторон сигнал рассеивается одинаково — угловая зависимость отсутствует [5].

Отсюда можно сделать вывод, что проводя испытания на виртуальном лабораторном стенде, студент сможет выбрать более широкий диапазон объектов исследования, исследовать другие параметры процесса, а так же при изменении входных параметров гораздо оперативнее получить и увидеть выходной результат.

Анализируя плюсы и минусы виртуальных лабораторных стендов, можно выделить, что их внедрение в процесс обучения позволит сделать процесс более познавательным и интересным. Это повысит уровень не только профессиональные компетенции, но и опыт работы в интерактивной среде MatLAB.

### Литература

1. Горбачев И.В. Виртуальный лабораторный стенд для имитационного моделирования радиолокационных систем / Горбачев И.В., Бужерак Ю.Э., Краус Д.Г. / Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 12. Т.15. С. 20–23.
2. Трухин А.В. Об использовании виртуальных лабораторий в образовании// Открытое и дистанционное образование. 2002. № 4(8). с. 70–72.
3. Дубровин В.С., Никулин В.В. Роль виртуальных лабораторных работ в повышении качества подготовки бакалавров по направлению подготовки "Информационные технологии связи"//Интеграция образования. 2014. № 1. с. 109–115.
4. MatLAB высокоуровневый язык. [Электронный ресурс] - режим доступа <http://www.matlab.ru/products/matlab> (дата обращения 01.02.2019).

5. Черевко А.Г., Кубарев В.В. Рассеяние терагерцовых волн объектами сложной конфигурации с использованием Новосибирского лазера на свободных электронах// Вестник СибГУТИ.2016. № 3. с. 204–213.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ GEANT РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО УСКОРЕНИЮ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛОТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Заворотный А.Ю.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*  
*E-mail: akimzav@gmail.com*

В настоящее время возможно получение мощных (до петаватт) лазерных импульсов малой (от 10 до 100 фс) длительности, имеющих интенсивность более  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>, в установках масштаба настольных лабораторных систем. Такие импульсы при взаимодействии с веществом создают плазму, в которой, в силу различных физических процессов, происходит ускорение электронов.

Из-за относительной простоты устройства и использования, компактности, а также в силу невысокой в сравнении с традиционными ускорителями стоимостью, задача исследования механизмов ускорения, оптимизации подобных систем имеет важное прикладное значение.

Одна из сложностей оптимизации заключается в необходимости интерпретации данных эксперимента, учёта реальной геометрии установки, в условиях одновременного протекания многих физических процессов (тормозное излучение, комптоновское рассеяние, поглощение и т. д.), конструкции детектора, иначе говоря – определение «аппаратной функции» установки.

В настоящей работе для решения этой задачи была использована платформа симуляции Geant4, основанная на методе Монте-Карло с разделением на уровне частиц. Исходный код платформы был изучен и модифицирован под нужды экспериментов, проводящихся лаборатории релятивистской лазерной плазмы физического факультета МГУ.

Были успешно решены следующие задачи: предсказание количества нейтронов в эксперименте по их получению из бериллиевой мишени гамма-квантами тормозного излучения из плазмы, определение оптимального угла наблюдения (а также оценки количества) позитронов, получаемых из вольфрамовой мишени при облучении электронами из плазмы, расчёт корректировки алгоритма обработки данных спектрометра электронов при изменении его конструкции, определение передаточной функции реальной установки. Подготовлена программная база для решения задачи определения источника шумов в экспериментальной установке.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ КИСЛОРОДА И УГЛЕРОДА В ЯДЕРНОМ НИТРИДНОМ ТОПЛИВЕ

Задорожный А.В.

*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,*  
*Москва, Россия*  
*E-mail: anton\_zadorozhnyy@ibrae.ac.ru*

Согласно федеральной целевой программе «Ядерные технологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года» в нашей стране провозгла-

шен курс на создание замкнутого ядерного топливного цикла (ЯТЦ) с использованием реакторов на быстрых нейтронах. Один из вариантов замыкания ЯТЦ предполагает использование смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) ядерного топлива, которое в настоящее время является перспективным топливом для быстрых реакторов. СНУП топливо обладает рядом преимуществ: большая плотность делящихся элементов (U, Pu); высокая теплопроводность; хорошая совместимость топлива с теплоносителем [1].

В настоящее время основным методом промышленного получения смешанных монокристаллических нитридов урана и плутония является реакция карботермического синтеза, состоящая в восстановлении диоксида урана и плутония углеродом в атмосфере азота при температурах 1750–2100 К [1]. Таким образом, при изготовлении нитридного топлива неизбежным является наличие в нём примесей кислорода и углерода, обычно, на уровне ~0,1–0,2 % по массе. Наличие примесей O и C существенно сказывается на эксплуатационных свойствах СНУП топлива, влияя как на его распухание в процессе облучения, так и поведение продуктов деления (ПД), их распределение по связанным состояниям и, в конечном счёте, на выход из топлива.

В зависимости от температуры и концентрации кислород может быть растворён в кристаллической матрице или выделяться в виде отдельной оксидной фазы [2]. Растворимость кислорода в UN мала и составляет ~3 ат.% при  $T = 1200$  К. Карбиды урана и плутония растворимы в монокристаллическом нитриде и образуют твёрдый раствор типа  $(U, Pu)N_{1-x}C_x$  как минимум до концентраций ~10 ат.% [3].

Для описания поведения ядерного топлива под облучением в ИБРАЭ РАН разработан компьютерный код MFPR [4], основу которого составляет комплекс моделей описывающих генерацию и перенос ПД, эволюцию микроструктуры и фазового состава топлива, в частности, термохимические процессы, сопровождающие взаимодействие компонентов топлива.

Модель СНУП топлива с примесями кислорода и углерода формулируется следующим образом:

- считается, что в исходном составе топлива, помимо  $(U, Pu)N$ , присутствует некоторое заданное количество  $(U, Pu)O_2$  и  $(U, Pu)C$  в твёрдом растворе с монокристаллическим нитридом;
- в процессе облучения и радиоактивных распадов «высвободившиеся» кислород и углерод, а также образовавшиеся ПД диффундируют к границам топливных зёрен;
- на границе зерна кислород участвует в формировании двух оксидных фаз: твёрдого раствора продуктов деления Ba, Sr, Zr, La, Ce, Ce и Nd в  $(U, Pu)O_2$  и оксидной фазы тройных соединений типа  $(Cs_2, Ba, Sr)(U, Mo, Zr)O_4$ ; углерод образует фазу твёрдого раствора из карбидов U и Pu с примесями Zr, Ce, Ba и Mo; кроме того, происходит испарение ПД и соединений O и C в зернограничные газовые пузыри с последующим выходом газов из топлива. Наличие оксидных и карбидных фаз даёт вклад в твердотельное распухание топлива, рис. 1;

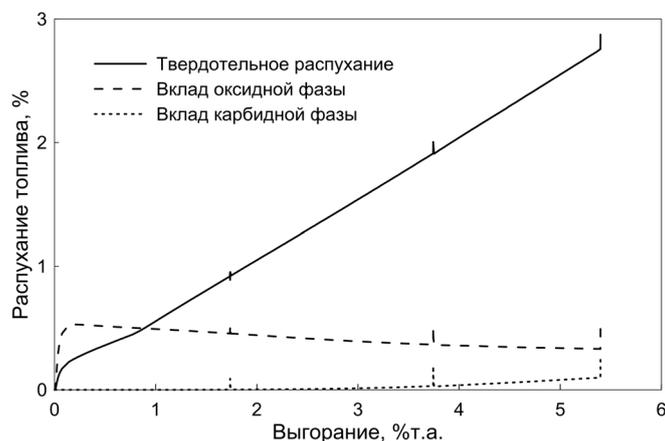


Рис. 1. Вклад оксидной и карбидной фаз в твердотельное распухание топлива

- граничные условия для задачи диффузии определяются условиями локального термодимического равновесия на границе фаз «твёрдый раствор  $(U, Pu)N$  — преципитаты — газовая фаза»;
- поскольку плотность дополнительных твёрдых фаз — преципитатов — ниже плотности  $(U, Pu)N$ , их формирование определяет твердотельную часть распухания топлива. На рис. 2 представлены типы распухания топлива в зависимости от выгорания.

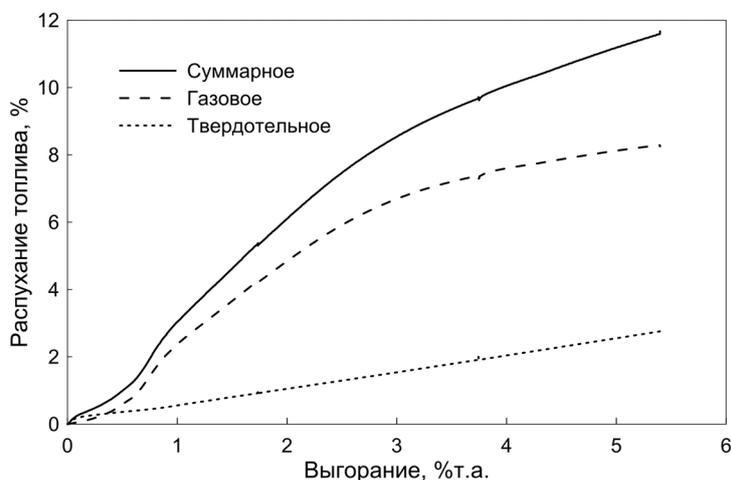


Рис. 2. Распухание топлива

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю В. Д. Озрину.

### Литература

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Нитридное топливо для ядерной энергетики. Москва: Техносфера, 2013. – 240 с.
2. Любимов Д.Ю., Дерябин И.А., Булатов Г.С., Гедговд К.Н. Термодинамическое моделирование фазового состава смешанного уран–плутониевого мононитрида с примесью кислорода при облучении быстрыми нейтронами выгораний в 140 ГВт д/т и температуре 900–1400 К. – Атомная энергия, 2015, т. 118, вып. 1, с. 24–29.
3. R. Agarwal, V. Venugopal, Chemical states of fission products in irradiated  $(U_{0.3}Pu_{0.7})C_{1+x}$  fuel at high burn-ups, Journal of Nuclear Materials, 2006, v. 359, p. 122–131.
4. M.S. Veshchunov, V.D. Ozrin, V.E. Shestak, V.I. Tarasov, R. Dubourg and G. Nicaise, Development of mechanistic code MFPR for modelling fission product release from irradiated  $UO_2$  fuel. Nucl. Eng. Design, 2006, v. 236, p. 179–200.

## ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ

Илюхина А.А.

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

E-mail: [ilanna\\_a@mail.ru](mailto:ilanna_a@mail.ru)

В настоящее время технологии гидроабразивной обработки (ГАО) находят широкое применение, как в машиностроительных, так и в других отраслях промышленности. Традиционно, с помощью ГАО реализуют очистку поверхностей различных изделий сложной формы, а также разделение элементов конструкций из различных материалов, включая их размерную обработку, например, под сварку. Однако, с развитием данных технологий, появляются новые возможности их применения, в частности, для решения

прикладных задач освоения пространств мирового океана. В этом плане интерес представляет развитие ГАО в целях добычи полезных ископаемых с использованием высокоскоростной струи жидкости; обслуживания все возрастающего количества техногенноопасных объектов, например, газопроводов; решения специальных задач по линии МЧС РФ.

Экспериментальных исследований по изучению подводной ГАО отличаются высокой стоимостью и сложностью их проведения в связи с разнообразием условий реализации данного процесса (различная глубина проведения работ и широкий спектр обрабатываемых материалов). Поэтому существует необходимость развития методов математического моделирования процессов ГАО в целях их адаптации под конкретные условия работы. Путем предварительного математического моделирования процесса можно оптимизировать параметры системы подачи гидроабразивной суспензии, в частности процентное содержание абразива в суспензии и давление в гидросистеме, и геометрические параметры струеформирующего тракта.

В настоящей работе на примере численного решения двумерной осесимметричной задачи прошивки отверстий гидроабразивной струей в деталях из различных материалов разработана физико-математическая модель процесса, базирующаяся на уравнении состояния гидроабразивной суспензии и критериальных зависимостях, описывающих разрушение обрабатываемого материала. Выявлено влияние кинематических параметров гидроабразивной струи и физико-механических параметров обрабатываемого материала на характер протекания процесса. Проведено сравнение результатов численного моделирования и натурного эксперимента.

*Примечание. Выражаю благодарность своему научному руководителю Колпакову Владимиру Ивановичу за оказанную помощь при планировании и проведении исследования и за ценные рекомендации по оформлению работы.*

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕГРАЛА ЛЕБЕГА ПРИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ РЕШЕНИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Калинин В.А

*Московский политехнический университет, Москва, Россия*

*E-mail: vasia00698@mail.ru*

Многие реальные физические процессы (схлопывание пузырьков в пузырьковой жидкости, взаимодействие волн в упругих средах, оптимизация систем автоматического управления и т. д.) приводят к необходимости рассмотрения нелинейных систем дифференциальных уравнений с разрывной правой частью [1–3]. Однако на практике в ряде случаев (малые колебания, небольшие возмущения и т. д.) нелинейностью можно пренебречь или описать рассматриваемый процесс или его часть линеаризованной (приведенной к линейному виду) неоднородной системой дифференциальных уравнений [4], в которой правая часть при помощи интеграла Лебега сводится к интегральной характеристике, учитывающей разрывность правой части системы дифференциальных уравнений на бесконечном множестве точек разрыва первого рода [5]. В этом случае полученная линейная система дифференциальных уравнений является упрощенной математической моделью для описания реальных физических процессов, в которых внутренние характеристики непрерывны и связаны между собой линейными функциональными зависимостями.

### Литература

1. Бидерман В. И. Элементы теории функций действительного переменного – Хабаровск: Из-во Тихоокеанского гос. Ун-та, 2011. – 195с.

2. Кулиев В. Д., Лепявин С. И. Задачи по функциональному анализу – М.: Университет машиностроения, 2014. – 33с.
3. Погребной В. Д. Теория функций действительной переменной – Суммы: Сумской государственной университет, 2012. – 239с.
4. Смирнов В. И. Курс высшей математики, т. 2 – М.: Из-во «Наука», 1974. – 479с.
5. Шуликовская В. В. Элементы теории меры. Интеграл Лебега. – Ижевск, 2015. – 54с.

## ПРОЗРАЧНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ БЕЗОПАСНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Калмыков Л.В.

*Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, Пущино*  
*E-mail: lev.kalmykov@gmail.com*

На конференции «Ломоносов-2016» мы докладывали решении давней проблемы теоретической экологии — парадокса биоразнообразия [1–3]. Математические подходы, которые ранее использовались при решении этой проблемы относились к типам «черный ящик» и «серый ящик». Все они не позволяют прямо моделировать поведение подсистем моделируемой системы и, следовательно, не позволяли строго исследовать подлежащие механизмы. Это связано с тем, что методы дифференциальных уравнений, вероятностные и матричные подходы не позволяют отслеживать локальные взаимодействия подсистем моделируемой системы. Найденный нами подход позволяет создавать строго прозрачные математические модели типа «белый ящик». Этот подход основан на логических клеточных автоматах и является аксиоматическим моделированием. Логические клеточные автоматы в этом подходе важны, но центральную роль играют роль играет система аксиом общей теории предметной области моделируемого объекта. Создание такой аксиоматической теории требует глубокого философского подхода к изучаемой проблеме, что не позволяет превратить найденный нами инструмент моделирования в чисто техническую процедуру. Наибольшие перспективы в применении найденного модельного подхода мы связываем с открывающейся возможностью реализации старой мечты о создании метода GOFAI — метода «старого доброго искусственного интеллекта», так как он реализует автоматический гиперлогический вывод, так как каждый отдельный шаг итерационной эволюции клеточного автомата является результатом множества логических операций, одновременно реализующихся на микроуровне, мезоуровне и макроуровне сложной системы, то есть на всех трёх уровнях её организации.

Из-за ограничений математических методов моделирования сложных динамических систем создаваемые сегодня автоматизированные системы имеют опасный непрозрачный характер. Зачастую они основаны на самообучающихся нейронных сетях. При этом заранее неизвестно, чему конкретно обучилась такая система и как она поведет себя в реальной обстановке. Угроза такого непрозрачного искусственного интеллекта признана повсеместно. С другой стороны, глубокая философия человека, основанная на интуиции и эстетическом чувстве, является скорее недостижимой для машин. Мы считаем, что взаимодополнительность человека, генерирующего системы аксиом и умной машины, функционирующей на основе этих аксиом является основой их сотрудничества, а не вражды.

Выражаю благодарность Калмыкову В.Л. за участие в выполнении данной работы.

### Литература

1. Kalmykov L.V., Kalmykov V.L. A Solution to the Biodiversity Paradox by Logical Deterministic Cellular Automata // Acta Biotheoretica. 2015. V. 63. № 2. P. 203–221.
2. Kalmykov L.V., Kalmykov V.L. A white-box model of S-shaped and double S-shaped single-species population growth // PeerJ. 2015. V. 3. № e948. P. 1–16.

3. Kalmykov V.L., Kalmykov, L.V. On ecological modelling problems in the context of resolving the biodiversity paradox // Ecological Modelling. 2016. V. 329, P. 1–4.

ИНДУЦИРОВАННЫЕ ОДНОРОДНЫМ СДВИГОМ ПРОЦЕССЫ  
РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ  
НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ И ТИТАНА

Камалов А.Р.

*Казанский (Приволжский) ФУ, Институт физики, Казань, Россия*  
*E-mail: alen.kamalov@gmail.com*

В последнее время большое внимание уделяется исследованию поведения металлических сплавов на основе Fe, Ti, Ni, Al и т.д. при деформации однородным сдвигом. Сплавы этих металлов проявляют способность к рекристаллизации под сдвигом и высоким давлением, циклически переходя из кристаллической фазы в аморфное состояние. На эксперименте исследовано большое количество различных сплавов этих металлов [1]. Однако полноценное объяснение процессов циклической рекристаллизации на данный момент отсутствует.

В данной работе исследуется процесс рекристаллизации нитинола (сплав NiTi). Рассматриваемая система состоит из 2000 частиц Ti и Ni, расположенных в кубической симуляционной ячейке. На ячейку накладываются периодические граничные условия во всех направлениях. Характер взаимодействия частиц задается MEAM потенциалом, предложенным Ко и др. [2]. Начальное состояние системы соответствует кристаллической фазе при температуре 300К и давлением 4ГПа. Далее система подвергается деформации сдвигом с различными скоростями.

Для идентификации упорядоченных структур, например, кристаллических, формирующихся в процессе рекристаллизации, проводится кластерный и структурный анализ. Для этого выполняется анализ конфигурационных данных, получаемых из моделирования, через расчет функции парного распределения частиц

$$g(r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \delta(r - r_{ij})$$

и значения параметра локального ориентационного порядка  $q_6(l)$ , согласно методу Стейнхарда и др. [3]

$$q_6(l) = \left( \frac{4\pi}{15} \sum_{m=-6}^6 \left| \frac{1}{n_b^{(i)}} \sum_{j=1}^{n_b^{(i)}} Y_{6m}(\theta_{ij}, \varphi_{ij}) \right|^2 \right)^{1/2}$$

Здесь  $n_b^{(i)}$  — число соседей  $i$ -ой частицы  $Y_{6m}(\theta_{ij}, \varphi_{ij})$  — сферические гармоники.

На рисунке 1(а) представлен мгновенный снимок начальной конфигурации системы в отсутствии деформации. Система находится в кристаллическом состоянии. Это подтверждается рассчитанными функциями радиального распределения частиц, которые имеют множество максимумов, соответствующих объемно-центрированной кубической решетке (см. рисунок 1(б)). Далее, кристаллических образец подвергается однородному сдвигу со скоростями: 0.005, 0.01, 0.02, 0.05 и 0.1 пс<sup>-1</sup>. При воздействии сдвигом и внешним давлением кристаллическая структура разрушается, и система переходит в аморфное состояние. Это подтверждают результаты структурного анализа, а именно, рассчитанные кривые  $g(r)$ , имеющие вид осциллирующей функции (см. рисунок 2). Таким образом, полученные нами результаты показывают, что нитинол при воздействии

сдвигом может перейти в аморфное состояние с последующей кристаллизацией. Это подтверждается результатами кластерного анализа.

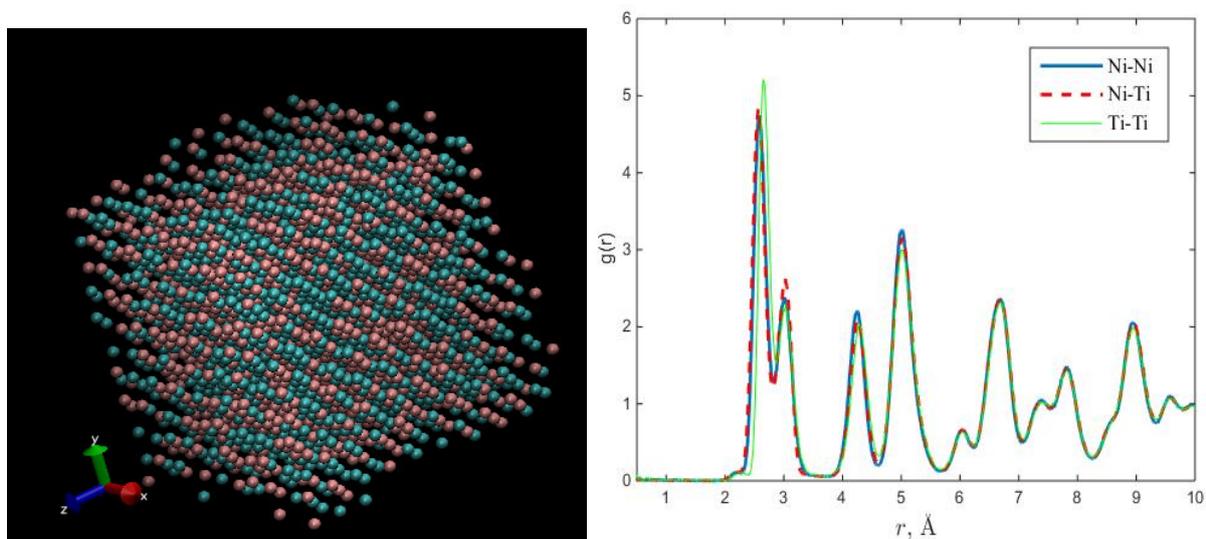


Рис. 1. (а) — Мгновенный снимок конфигурации системы в отсутствии деформации. Здесь красные шары обозначают атомы Ni, а синие шары — атомы Ti. (б) — функции  $g(r)$ , полученные для различных пар атомов в отсутствии деформации.

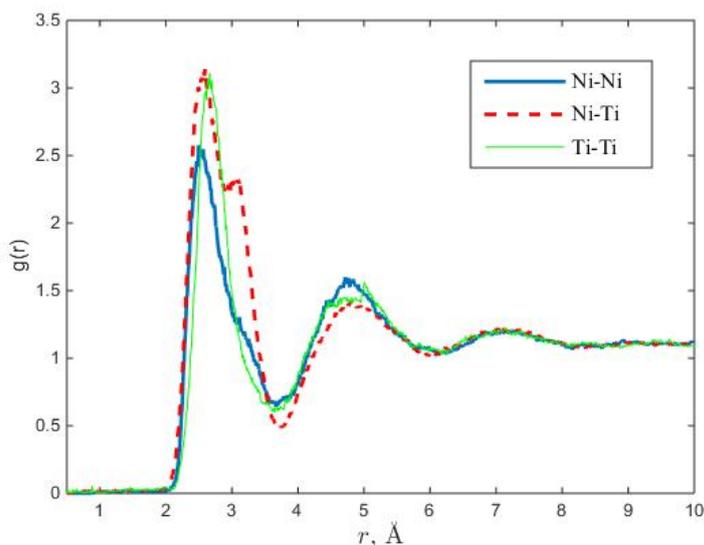


Рис. 2. Функции  $g(r)$ , соответствующие аморфному состоянию, полученные после воздействия однородным сдвигом.

### Литература

1. Глезер А.М., Сундеев Р.В., Шалимова А.В., Phase transformations «amorphization  $\leftrightarrow$  crystallization» in metallic materials induced by severe plastic deformation // *Rev. Adv. Mater. Sci.*, V. 54. 2018. P.
2. Ko W.S., Grabowski B., Neugebauer J., Development and application of a Ni-Ti interatomic potential with high predictive accuracy of the martensitic phase transition // *Phys. Rev. B.*, V. 92. 2015.
3. Steinhardt P.J., Nelson D.R., Ronchetti M., Bond-Orientational Order in Liquids and Glasses // *Phys. Rev. B.*, V. 28. 1983. P. 784.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ФАЗОВЫХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ

Каюкова А.В

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

*E-mail: akayukova16@gmail.com*

В настоящее время математическое моделирование широко применяется в нефтедобывающей отрасли, в том числе для оценки целесообразности с экономической точки зрения конкретного проекта разработки месторождения. Математическое моделирование также является обоснованием для принятия стратегических решений в процессе разработки. Отклонение реальных данных от расчетов, полученных путем моделирования, могут привести к непоправимым последствиям для разработки месторождения, поэтому задачи оценки ошибки в результатах моделирования крайне актуальны [1, 2].

Моделирование процесса нефтедобычи всегда сопряжено с неопределенностью в значениях параметров физической системы, так как эти параметры определяются на основе ограниченного числа образцов флюидов и керна, изучаемых в лаборатории, а также в результате интерпретации полевых геофизических данных. В лаборатории крайне сложно воспроизвести пластовые условия в широком диапазоне, поэтому для математического описания элементов реальной системы применяют интерполяцию лабораторных данных. Применение различных способов интерполяции влияет на конечные результаты моделирования и их точность [1]. В данной работе оценивается влияние выбора метода интерполяции фазовых проницаемостей пластовых флюидов на результаты моделирования трехфазного течения внутри пласта в процессе добычи.

Фазовая проницаемость флюида, как правило, является функцией насыщенностей всех участвующих в фильтрации фаз. Лабораторные эксперименты по определению точного вида этих функций весьма трудоемки, поэтому на практике фазовые проницаемости для трехфазной системы получают с помощью интерполяции двухфазных зависимостей, определяемых экспериментально. В ходе исследования построена математическая модель трехфазного течения по однородному квазиодномерному пласту. Для поставленной начально-краевой задачи применена явная консервативная разностная схема, на основе которой реализован программный комплекс, позволяющий выбирать при расчетах различные модели фазовых проницаемостей флюидов и способы их интерполяции. В работе изучены наиболее часто применяемые способы интерполяции, а именно I и II модели Стоуна, а также модель Лейка и модель Кори [1, 3-6]. В серии численных экспериментов рассмотрена эволюция во времени основных характеристик процесса нефтеизвлечения в зависимости от выбора наборов фазовых проницаемостей флюидов и способов их интерполяции.

### Литература

1. Каневская Р.Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов. Ижевск: ИКИ, 2002.
2. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. Ижевск: ИКИ, 2004.
3. Богачев К.Ю. Эффективное решение задачи фильтрации вязкой сжимаемой многофазной многокомпонентной смеси на параллельных ЭВМ // Москва. 2012. С. 54–74.
4. Stone H. L. et al. Estimation of three-phase relative permeability and residual oil data // Journal of Canadian Petroleum Technology. 1973. Т. 12. №. 04.
5. Stone H. L. et al. Probability model for estimating three-phase relative permeability // Journal of Petroleum Technology. 1970. Т. 22. №. 02. С. 214–218.
6. Corey A. T. et al. Three-phase relative permeability // Journal of Petroleum Technology. – 1956. Т. 8. №. 11. С. 63–65.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКОМПОЗИТОВ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ

Ким Р.П., Корчагин С.А.

СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия  
kimrp1988@gmail.com

Разработка новых нанокompозитных материалов с заданными электрическими свойствами является одной из актуальных задач в области материаловедения, поскольку нанокompозиты находят широкое применение в различных направлениях прикладного характера [1]. Потребность в таких материалах обусловлена необходимостью улучшения электрофизических характеристик при разработке элементов устройств связи, для авиационной и космической промышленности (поглощающие, селективные, радиационно-стойких нанокompозиты), физических средств защиты информации и пр. [2].

В работе ставится задача разработки метода прогнозирования электрических свойств (например, диэлектрическая проницаемость) слоистого нанокompозита, в зависимости от его геометрических параметров, компонент, входящих в состав нанокompозита и частоты электромагнитного излучения. Объектом исследования является нанокompозит, имеющий слоистую структуру и состоящих из двух материалов.

Для решения поставленной задачи было предложено построить нейронную сеть. На первом этапе моделирования проводится подготовка входных данных. В рамках поставленной задачи, для уменьшения величины обучающей выборки, а также увеличения сходимости нейронной сети, мы ограничивались четырьмя параметрами: частота электромагнитного поля; диэлектрическая проницаемость исходных материалов; объемная доля одного из материалов, заполняющих структуру. Для задачи прогнозирования использовался рекуррентный тип нейронной сети. Обучение нейронной сети происходило на основе следующих данных:

- результаты работы [3], в которой приведены экспериментально полученные значения диэлектрической проницаемости исходных компонент;
- диэлектрическая проницаемость компонент нанокompозита, для которых отсутствовали экспериментальные значения, рассчитывались квантово-механическим методом (подход Аграновича-Гинзбурга);
- диэлектрическая проницаемость прогнозируемого нанокompозита рассчитывалась с использованием модели эффективной среды;
- зависимости диэлектрической проницаемости и объемной доли компонент от длины волны внешнего электромагнитного излучения были получены посредством вычислительного эксперимента и разработанного программного комплекса [4].

Размер обучающей выборки брался в количестве 10000 записей. Анализ точности нейронной сети сводится к определению функции ошибки. В настоящем исследовании использовалось нахождение значения среднеквадратической ошибки. Результатом прогнозирования нейронной сети является определение состава нанокompозита: материалы, входящие в нанокompозит и их объемные доли.

**Литература**

1. Mutiso R. M., Winey K. I. Electrical properties of polymer nanocomposites containing rod-like nanofillers // *Progress in Polymer Science*. 2015. Т. 40. С. 63–84.
2. A.S. Nikitin. Prospects for the use of composite materials // *Economy and life*. 2012. № 4, 6 p.
3. E.D. Palik. Handbook of optical constants of solids, Academic Press, San Diego, 1997, 999 p.
4. С.А. Корчагин, Ю.В. Клинаев, Д.В. Терин, С.П. Романчук. Свидетельство № 2016615354 Российская Федерация. Программный комплекс для моделирования не-

линейных свойств композитных сред "NPC Modeling": свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612851; заявл. 23.03.2016; зарегистр. 20.05.2016.

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВИБРОГАСЯЩЕГО ЦОКОЛЯ

Кожевников С. В.

*Филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»,  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Институт транспортных систем,  
г. Нижний Новгород, Россия  
E-mail: sergei.v.kozhevnikov@rambler.ru*

В связи с развитием и усложнением оборудования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) актуальной задачей является повышение надежности и уменьшение вероятности отказов оборудования путем снижения перегрузок на электро-радио изделия (ЭРИ). Достигнуть таких результатов возможно при использовании виброгасящих элементов (виброизолирующие материалы и виброгасители).

В настоящее время большинство оборудования АСУ ТП устанавливаются на жесткие основания. Такой способ установки оборудования незначительно снижает уровень перегрузок, приходящих на ЭРИ при механических внешних воздействующих факторах (ВВФ). Таким образом, объектом исследования в разработке являлась система демпфирования для виброзащиты электронных модулей оборудования АСУ ТП. В процессе работы проводились экспериментальные и расчетные исследования на подтверждение требований к прочности оборудования АСУ ТП при механических (ВВФ).

САЕ-моделирования конструкции виброгасящего цоколя проводилось итерационным методом. На каждой итерации выполнялись оптимизация конструкции цоколя и расчетные исследования в САПР Siemens NX NASTRAN цоколя и конструкции оборудования АСУ ТП (установленного на виброгасящий цоколь) в целом для определения перегрузок на ЭРИ.

По результатам САЕ-моделирования был изготовлен опытный образец и проведены натурные испытания виброгасящего цоколя с установленным на него оборудованием АСУ ТП.

Для сравнения результатов САЕ-моделирования и испытаний были получены спектры ответа в контрольных узлах и точках замеров спектров ответа по осям X, Y, Z (места установки датчиков натурной модели совпадали с контрольными узлами расчетной модели). При сравнении спектров ответа САЕ-моделирования и испытаний констатируем, что экстремумы спектров имеют совпадения на частотах 35 Гц и 55 Гц (по совпадению частот результаты испытаний показали хорошую корреляцию с расчетными исследованиями и имеют допустимую погрешность не более 10%; уровень амплитуды отклика на данных частотах в расчетных исследованиях в основном превышает уровень амплитуды отклика, полученный в результате испытаний – это свидетельствует о введенных в расчетную модель допущениях в безопасную сторону).

Основные отличия конструкции от существующих аналогов:

- применение в качестве основного демпфирующего материала не сетчатой структуры;
- возможность настройки виброгасителя в зависимости от массы объекта виброгашения и частотного диапазона работы;
- возможность создания нелинейного демпфирования, как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях за счет комбинации различных типов виброгасящего материала;

- отсутствие каких-либо жидких элементов в конструкции виброгасителя;
- отсутствие требований к смазке элементов конструкции, требований к замене технических жидкостей и т.п.;
- увеличенный ресурс конструкции за счет использования не сетчатых виброизолирующих.

Из результатов проведенных исследований сейсмостойкости объекта в виде конструкций оборудования АСУ ТП следует, что конструкция является прочной при установке на виброгасящий цоколь. Уровень напряжений и перемещений виброгасящего цоколя соответствует нормативным требованиям прочности конструкционных материалов.

В рамках разработки были проведены патентные исследования, в которых рассмотрены существующие аналоги и выявлены их недостатки в сравнении с предлагаемой конструкцией. В результате проведенных патентных исследований отправлена в Федеральную службу по интеллектуальной собственности (ФИПС) заявка на изобретение «Виброгасящий цоколь».

Разработанная конструкция виброгасящего цоколя, с применением виброизолирующих материалов, соответствует заявленным характеристикам для использования в оборудовании АСУ ТП АЭС. По результатам расчетных исследований уровень перегрузок на ЭРИ при установке оборудования на разработанный виброгасящий цоколь ниже на 46–48% по сравнению со случаем установки оборудования на жесткое основание.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРУЖИНЫ КРУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Кондрашов В.О.

*Тульский ГУ, механико-математический факультет, Тула, Россия*

*Email: kondrashov071@gmail.com*

Пружина издавна известная и повсеместно используемая деталь, которая применяется для накапливания или поглощения механической энергии за счет упругой деформации под влиянием нагрузки в разнообразных устройствах от «грубой» шариковой ручки до выверенной космической техники. Данная работа является первым этапом нашего исследования, т.к. в ней представлен математический метод-модель, позволяющий определить поведения пружины кручения (геометрические характеристики) в процессе эксплуатации пружины при статической нагрузке [1]. Исходными данными для проведения статического расчета являются следующие величины:

- наружный диаметр пружины кручения;
- диаметр проволоки;
- угол изготовления пружины;
- угол предварительного, рабочего и максимального закручивания пружины кручения;
- количество витков;
- длины концов пружины кручения.

При использовании данного метода-модели возможно определение следующих вариаций геометрических величин пружины кручения в процессе ее нагружения (точность зависит от величины заданного угла закрутки, шаг  $1^\circ$ ):

- рабочей длины проволоки;
- количества витков;
- межвиткового шага;

- ширины пружины;
- максимальных напряжений.

Точность вышеперечисленных характеристики пружины является необходимым параметром для определения долговечности использования пружины.

### Литература

1. Пономарёв С.Д. Расчеты на прочность в 3-х томах. Том 1. М.: Машгиз. 1956

## МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЙ ЗРАЧКОВ ГЛАЗ В ИЗОБРАЖЕНИИ ЛИЦА

Кузнецов И.Д., Морозова А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: smitid@yandex.com, annamorozova28@outlook.com

**Введение:** Расстояние между Зрачками Глаз (ЗГ) в изображении лица лежит в основе методов распознавания лиц, определения индивидуальных антропометрических характеристик человека, направления его взгляда, степени его эмоционального возбуждения [1].

**Актуальность:** Разработка математических моделей локализации зрачков глаз в изображении лица.

В качестве исходного возьмем для иллюстрации изображение глаза Альберта Эйнштейна.

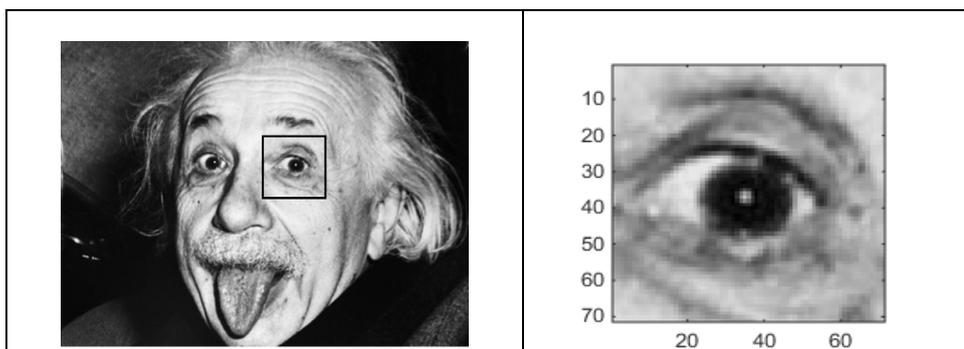


Рис. 1. Снимок А. Эйнштейна и выделенный участок с глазом.

### Общая схема метода определения положения зрачка глаза.

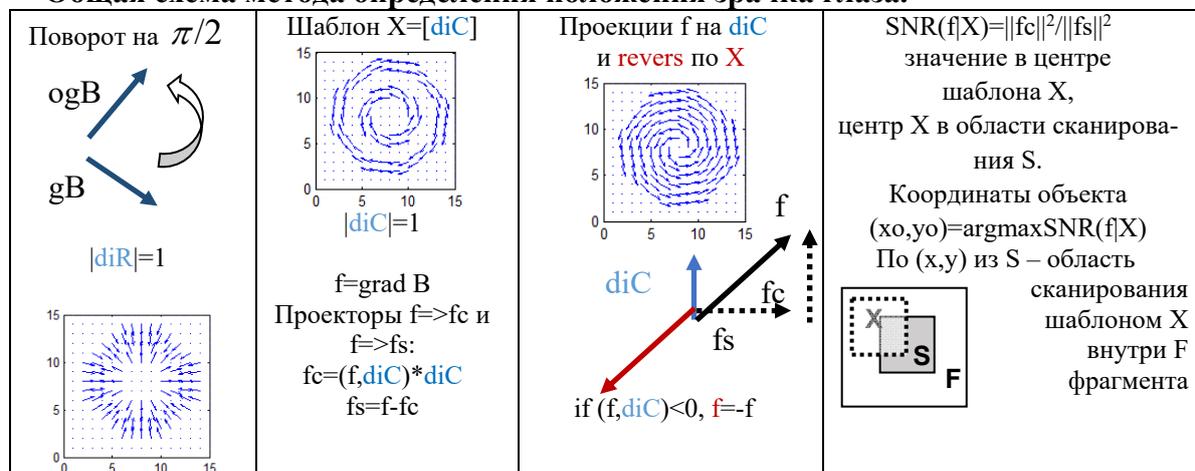


Рис. 2. Операции над векторными полями, шаблоны, проекции, функция SNR.

В основе метода лежит Конечно Мерная Теорема Отсчетов (КМТО) [2], которая позволяет вычислять градиенты от массивов чисел  $f = \text{grad } B$ . В данной реализации мы использовали шаблон направлений  $diC$  – направления перпендикулярно радиусу.

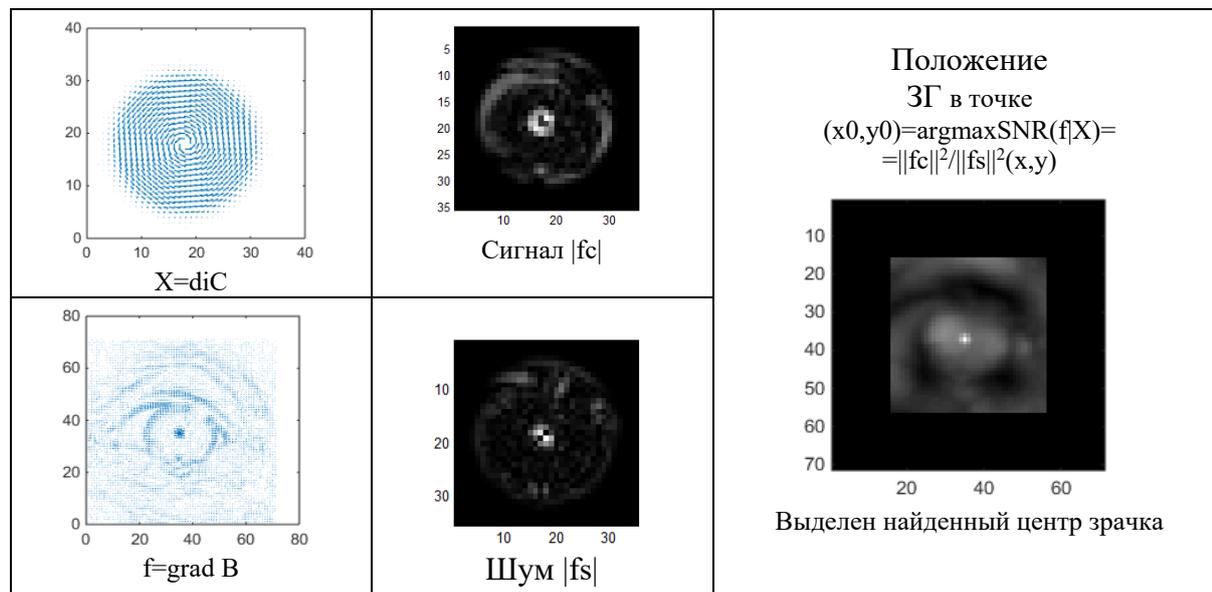


Рис. 3. Решение задачи локализации зрачка глаза

**Заключение:** Разработана математическая модель локализации ЗГ. Использованы КМТО [2] и применены векторные операции с градиентным полем и с векторными шаблонами [3] для точной индикации локального объекта — ЗГ.

Реализация метода - основа дипломной работы, задача поставлена научным руководителем старшим преподавателем Е.Н. Терентьевым на кафедре ММИ.

#### Литература

2. Н.П. Гришенкова, Д.Н. Лавров. Обзор методов идентификации человека по радужной оболочке глаза. Журнал “Математические структуры и моделирование”, 2014.
3. Е.Н. Терентьев, Н.Е. Терентьев, И.И. Фаршакова. Конечномерные теоремы отсчетов в моделировании вихрей. Труды школы-семинара <<Волны-2017>>. Математическое моделирование в радиофизике и оптике, 2017.
4. Е. Н. Терентьев, N.E. Shilin–Terentyev, И. Н. Приходько, И. И. Фаршакова. Векторные операции в точной индикации локальных объектов в изображениях. Ученые записки физического факультета Московского Университета, (5):1850308–10, 2018.

#### ПОЛУЧЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АПВVI ПОЛУПРОВОДНИКОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ ГРУППЫ ЖЕЛЕЗА, МЕТОДОМ ПРЯМОГО МАТРИЧНОГО АНАЛИЗА

Курчатов И.С.<sup>2</sup>, Булычев Н.А.<sup>3,2</sup>, Колесник С.А.<sup>2</sup>,  
Кустов Е.Ф.<sup>1</sup>, Муравьев Э.Н.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>НИУ «МЭИ», <sup>2</sup>МАИ (НИУ), <sup>3</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева  
РАН, Москва, Россия, <sup>4</sup>Академия инженерных наук им. Прохорова  
E-mail: kurchatovivan@mail.ru

Требования к пропускным способностям волоконно-оптических линий связи непрерывно растут. Тем не менее, существуют фундаментальные ограничения на скорость передачи данных с использованием любой фиксированной частоты. Увеличить пропускающую способность волоконной линии связи можно, увеличив число частот, передающих сигнал. Таким образом, поиск источников света в спектральном диапазоне

1.7–3.5 мкм и удвоенной частоты излучения на 0.85–1.75 мкм, особенно имеющих частоты, отличные от уже используемых в существующих устройствах, имеет большое практическое значение. Молекулярные структуры с ионами группы железа в проводниках  $A^{II}B^{VI}$  ( $A=Zn, Cd; B=O, S, Se, Te$ ) имеют ИК люминесценцию и лазерную генерацию в диапазоне прозрачности оптических волокон 1.5–3 мкм и были выбраны в качестве материала исследования. Кроме уже упомянутых способов применения, мощные источники света в спектральном диапазоне 1.7–3.5 мкм и удвоенной частоты излучения на 0.85–1.75 мкм широко востребованы для научных, технологических и медицинских целей. [1].

С разработкой общей теории лигандной структуры окружения ионов группы железа ( $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  и  $Fe^{2+}$ ) [2, 3] появилась возможность рассчитать весь набор параметров областей люминесценции ионов группы железа в полупроводниках  $A^{II}B^{VI}$ .

Целью работы является расчёт параметров массива областей люминесценции в ионах  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  и  $Fe^{2+}$ , введённых в полупроводники  $A^{II}B^{VI}$  в диапазоне длин волн (1,5–3) мкм и сравнение результатов расчёта с результатами экспериментальных исследований других авторов [4].

С использованием нового способа аппроксимационной параметризации матриц для легированных  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  и  $Fe^{2+}$  материалов  $A^{II}B^{VI}$ , определены спектральные области люминесценции, силы осцилляторов и времена жизни для каждого перехода в ионах  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  и  $Fe^{2+}$  в массиве  $ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe, CdTe$  [5].

Таблица 1. Положение полос поглощения, полученное теоретическим и экспериментальным методом, приведенное в нанометрах

Ион $Co^{2+}$ в ZnS		Ион $Co^{2+}$ в ZnSe		Ион $Co^{2+}$ ZnTe	
эксперимент	теория	эксперимент	Теория	эксперимент	теория
200–400	250–400	200–500	250–550	200–1000	250–900
650–800	500–750	700–800	700–850	1600–1800	1800–2000
1400–1550	1500–1700	1550–1700	1600–1800	1850–3100	3200–3400
2700–2850	2700–2900	1900–3050	3000–3150		

Разница границ полос поглощения полученных теоретическим и экспериментальным методом колеблется в пределах 50–100нм, что примерно соответствует погрешности данных полученных из экспериментальных источников.

### Литература

1. Гоголева Н.Г. Применение лазеров в науке, технике и медицине, Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007.
2. Кустов Е.Ф., Басиева И.Т. Матрицы энергии и сил осцилляторов электро-дипольных переходов в ионах  $3dn$  ( $n = 2,3,4,6,7,8$ ) конфигураций ( $Cr^{2+}, Co^{2+}, Fe^{2+}, Ni^{2+}$ ) в кристаллических полях любой симметрии. Реестр базы данных №2012621086 от 19.10.2012.
3. Кустов Е.Ф., Басиева И.Т. Расчет оптических спектров ионов  $Cr^{2+}, Cr^{3+}, Cr^{4+}, Co^{2+}, Co^{3+}, Fe^{2+}, Ni^{2+}$  в полупроводниках  $A^{II}B^{VI}, A^{III}B^V$ . Реестр программ для ЭВМ № 2012619507 от 19.10.2012.
4. DeLoach L. D. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy and laser demonstration of a new class of gain media / L. D. DeLoach, R. H. Page, G. D. Wilke, S. A. Payne, W. F. Krupke // IEEE J. Quantum Electron. – 1996. – Vol. 32. – P. 885–895.
5. Курчатова И.С., Матричный расчет спектральных характеристик АПВVI полупроводников, легированных ионами группы железа / Курчатова И.С., Кустов Е.Ф. // Физика и Техника Полупроводников. – 2018. – № 7. – С. 679–685.

ВЛИЯНИЕ СИЛЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕТРА  
НА ФОРМИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛН В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ

Лапонин В.С.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, ВМК, Москва, Россия**E-mail: lap@cs.msu.ru*

Ветровые волны исследуются уже давно, например [1–6]. Многие вопросы до сих пор остаются весьма актуальными. В данный момент не так хорошо изучены как экспериментально, так и теоретически условия образования устойчивых ветровых волн [5] на поверхности жидкости. По этой причине данная работа посвящена изучению влияния силы и температуры ветра на формирование ветровых волн с помощью математического моделирования [1].

Известно, что движение частиц воды в гравитационной волне складывается из интенсивного орбитального и небольшого поступательного движения в направлении распространения волны, в результате происходит перенос воды в направлении распространения волны [6]. При наличии ветрового воздействия на водную поверхность этот перенос усиливается, вследствие чего изменяется профиль волны: наветренный склон становится более пологим, а подветренный круче.

Данная работа посвящена двухфазному (вода–воздух) моделированию формирования нелинейных волн на поверхности воды в зависимости от силы и температуры ветра. Рассматривается внутренняя структура волны и ее вихревые особенности [3]. Природным аналогом данного процесса является формирование цунами. Предлагаемая математическая модель основана на трехмерной системе нелинейных дифференциальных уравнений газогидродинамики [4]. Исследование полноценной трехмерной математической модели стало возможно только благодаря эффективному использованию параллельных вычислительных средств и современным численным методам [2–4]. Полученные численные результаты соответствуют экспериментальным наблюдениям.

**Литература**

1. Р.Н. Кузьмин, В.С. Лапонин, Н.П. Савенкова, С.А. Складчиков. Математическое моделирование формирования уединенной волны на поверхности жидкости // Инженерная физика. 2014, № 8, с. 19–24.
2. Laponin V.S., Savenkova N.P., Il'utko V.P. Numerical method for soliton solutions // Computational Mathematics and Modeling, 2012, Vol. 23, no. 3, p. 254–265.
3. U. Yusupaliyev, N.P. Savenkova, S.A. Shuteyev et al. Computer simulation of vortex self-maintenance and amplification // Moscow University Physics Bulletin, 2013, Vol. 68, no. 4, p. 317–319.
4. N.P. Savenkova, S.V. Anpilov, R.N. Kuzmin et al. Reduction cell multiphase 3-d model // Applied Physics, 2012, No. 3, p. 111–115.
5. Юэн Г., Лэйк Б. Нелинейная динамика гравитационных волн на глубокой воде. М.: Мир, 1987.
6. Степанянц Ю.А., Фабрикант А.Л. Распространение волн в сдвиговых потоках. Современные проблемы физики. М.: Физматлит, 1996.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИГРЫ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ  
НЕЛИНЕЙНЫМ НЕОПРЕДЕЛЕННЫМ ОБЪЕКТОМ

Матвеева Н.А.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия**E-mail: matveeva.natalija@physics.msu.ru*

Проблема оптимального управления для класса нелинейных объектов с неконтролируемыми ограниченными возмущениями формулируется в ключе дифференциальной

игры. Рассматривается детерминированная нелинейная система описывается обыкновенным дифференциальным уравнением

$$\frac{d}{dt}x(t) = f(x) + g_1(x)w(t) + g_2(x)u(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad y(t) = Cx(t).$$

Здесь  $x(\cdot) = \{x(t) \in R^n, t \in [t_0, t_f]\}$  состояние системы;  $x(\cdot) \in \Omega_x, X_0 \in \Omega_x$  — множество возможных начальных условий системы;  $y(t) \in R^m, m \leq n$  — выход системы;  $u(\cdot) = \{u(t) \in R^r, t \in [t_0, t_f]\}$ , — управление;  $w(\cdot) = \{w(t) \in R^k, t \in [t_0, t_f]\}$ , — возмущение как действие некоторого игрока противодействующему успешному выполнению задачи управления,  $f(x), g_1(x), g_2(x)$  — непрерывные матрицы-функции:  $f(\cdot) \in C^1(\Omega_x)$  и  $g_1(\cdot), g_2(\cdot) \in C^0(\Omega_x)$  [1].

На управляющие воздействия  $u(t)$  и  $w(t)$  наложены ограничения вида

$$\int_{t_0}^{t_f} \|u(t)\|_{R^*}^2 dt \leq E_u, \quad \int_{t_0}^{t_f} \|w(t)\|_{P^*}^2 dt \leq E_w, \quad E_u - E_w > 0$$

Функционал качества дифференциальной игры

$$J(x(\cdot), u(\cdot), w(\cdot)) = K(x(t_f)) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \{y^T(t)Qy(t) + u^T(t)Ru(t) - w^T(t)Pw(t)\} dt.$$

Для задачи с квадратическим функционалом качества и интегральными ограничениями на управляющие воздействия, задача поиска оптимальных управлений сводится к необходимости нахождения решений скалярного уравнения в частных производных Гамильтона-Якоби-Айзекса [2, 4]:

$$\frac{\partial V(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} f(x) - \frac{1}{2} \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \Pi(x) \left\{ \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \right\}^T + \frac{1}{2} x^T(t) C^T Q C x(t) = 0,$$

$$V(t_f, x(t_f)) = K(x(t_f)),$$

Оптимальные управления определяются соотношениями

$$u(t) = -R^{-1} g_2^T(x) \left\{ \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \right\}^T, \quad w(t) = P^{-1} g_1^T(x) \left\{ \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \right\}^T.$$

где

$$\Pi(x) = g_2(x)R^{-1}g_2^T(x) - g_1(x)P^{-1}g_1^T(x).$$

Условия существования оптимального решения поставленной задачи определяются свойствами матрицы  $\Pi(x)$  [1].

**Теорема.** Исходная система после подстановки матрицы  $\Pi(x)$  равномерно асимптотически устойчива, если и только если

$$\frac{dV(t, x)}{dt} \leq -\frac{1}{2} \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \Pi(x) \left\{ \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \right\}^T, \quad \forall x \neq 0,$$

где  $\Pi(x) = g_2(x)R^{-1}g_2^T(x) - g_1(x)P^{-1}g_1^T(x)$  — по крайней мере, положительно полуопределенная матрица.

Для поиска управляющих воздействий используем метод расширенной линеаризации, который предполагает введение следующих предположений:  $t \in [t_0, t_f], t_f \rightarrow \infty, K(x(t_f)) = 0, f(0_n) = 0_n$  и, кроме того, выполнения свойства управляемости и наблюдаемости матриц состояний [3].

Нахождение решения уравнения Гамильтона-Якоби-Айзекса основывается на использовании функции допустимых значений управляющих воздействий (гамильтониана), исходя из утверждения о том, что гамильтониан на оптимальной траектории принимает определенное значение.

Изложенные алгоритмы были опробованы на нелинейной модели неопределенного объекта второго порядка, результаты вычислений приводятся на рисунке 1.

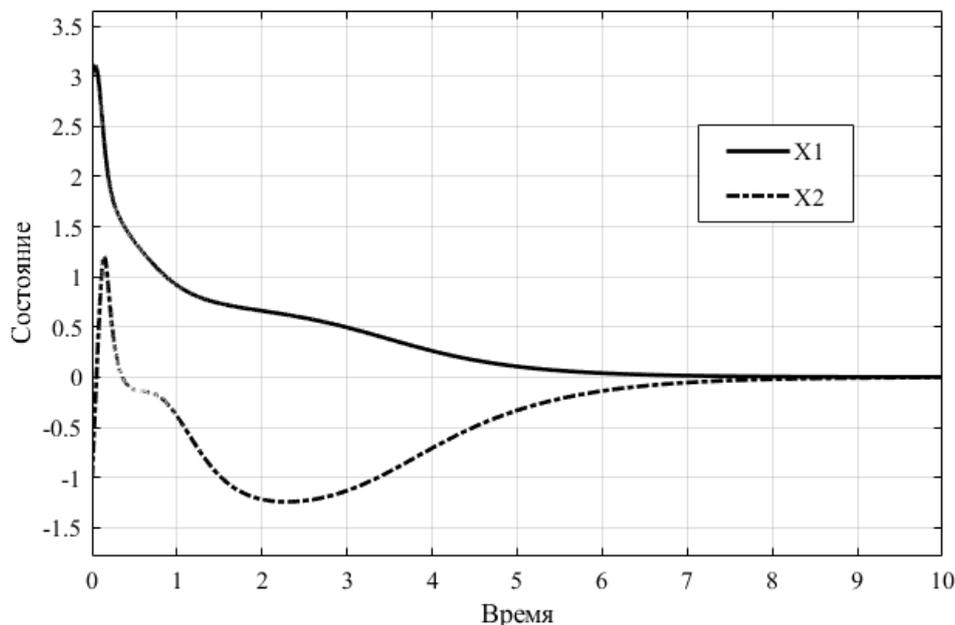


Рис. 1

### Литература

1. Афанасьев В.Н. Управление нелинейными неопределенными динамическими объектами. М.: ЛЕНАНД, 2015. – 224 с.
2. Bellman R. Dynamic programming. – Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1957
3. Cimen T. D. State-Dependent Riccati Equation (SDRE) Control: A Survey // Proc. 17th World Conf. IFAC, Seoul, Korea, 2008, pp. 3771–3775.
4. Isaacs R. Differential Games. John Wiley and Sons. New York. 1965.

### WEAK MULTIPLEXING IN NEURAL NETWORKS: SWITCHING BETWEEN CHIMERA AND SOLITARY STATES

Mikhailenko M.D.<sup>1</sup>, Ramlow L.<sup>2</sup>, Jalan S.<sup>3</sup>, Zakharova A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lab. of Solution Chemistry of Advanced Materials and Technologies, ITMO

<sup>2</sup>Institut für Theoretische Physik, Technische Universität Berlin

<sup>3</sup>Complex Systems Lab, Discipline of Physics, Indian Inst. of Technology Indore

E-mail: mikhailenko@scamt-itmo.ru

Multiplexing is an important concept used in computational modelling of networks, which allows us to study layer-to-layer interactions. By using the model FitzHugh-Nagumo of a biological neuron, we created a two-layer system with nonlocal coupling in the oscillatory regime (Fig.1). Each layer of the system consisted of 300 oscillators, coupled identically. By investigating such system, we were able to study the effect of weak multiplexing, i.e., when the coupling between the layers is smaller than that within the layers, on the existence of chimera states. We demonstrate new strategies of control for such spatial-temporal patterns, where desired patterns in one layer can be achieved without changing the parameters of the other layer. These phenomena are shown not only for a case of weak multiplexing between

the layers, but also for the strong coupling case, when the interlayer coupling strength is equal to intralayer.

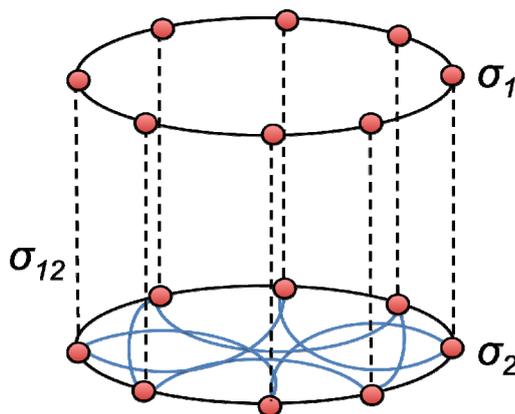


Fig. 1. Schematic model of the system

It has been observed that in the case of coupling range mismatch between the layers, weak multiplexing leads to the appearance of chimera states, which exhibit different shapes of the mean velocity profile for parameter ranges where they do not exist in isolation. Moreover, we show that introducing coupling strength mismatch between the layers can in some cases suppress chimera states and induce various other regimes such as in-phase synchronization or two-headed chimeras. Interestingly, small intra-layer coupling strength leads to the appearance solitary states throughout the whole network.

This work was supported by the German Academic Exchange Service (DAAD) and the Department of Science and Technology of India (DST) within the PPP project (Grant No. INT/FRG/DAAD/P-06/2018) and by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (German Research Foundation) (Project No. 163436311-SFB 910).

#### Literature

1. M.Kivelä et al. Multilayer networks // Journal of Complex Networks. 2014. V.2 (3). P. 2406–2420.
2. M. Mikhailenko, L.Ramlow, S.Jalan, A. Zakharova. Weak multiplexing in neural networks: Switching between chimera and solitary state// Chaos. 2019. V. 29 (023122).

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОЛОЛЕДО- И ТУМАНООБРАЗОВАНИЯ НА ПЛОЩАДКЕ БЕЛОРУССКОЙ АЭС ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ ВЫБРОСОВ ИЗ ГРАДИРЕН

Михайлюк М.Л.

ОИЭиЯИ – Сосны, г. Минск, Республика Беларусь  
marinanixie@gmail.com

Работающая градирня выбрасывает в атмосферу нагретый до 35–45 °С насыщенный водяными парами воздух. Паровоздушная струя, которая образуется в процессе работы градирни подымается на высоту до 150–300 м, постепенно перемешивается с окружающей атмосферой и распространяется в направлении ветра на 2–10 км. Когда происходит охлаждение паровоздушного факела, могут возникать условия для конденсации водяного пара в струе с высвобождением тепловой энергии. Сконденсировавшаяся влага распространяется в атмосфере в районе градирен и осажается на почву, водную поверхность гидрологических объектов, а также близрасположенные сооружения.

В осенний и зимний период, при температуре воздуха от 0 до –15°С за счет испарений из градирни, в районе предприятия может формироваться местный микроклимат,

характеризующийся повышенной влажностью атмосферного воздуха и сопровождающийся такими природными явлениями как туманы, морось, изморозь и гололед.

Туманы образуются вследствие охлаждения тёплого влажного воздуха при его движении над более холодной поверхностью суши и скопления в воздухе мельчайших продуктов конденсации водяного пара. Их интенсивность зависит от разности температур между воздухом и подстилающей поверхностью и от влагосодержания воздуха. Переохлажденные капли тумана при соприкосновении с поверхностью, имеющей отрицательную температуру, смерзаются и образуется гололед.

Время замерзания переохлажденных капель воды различного размера, образующих отложения на каком-либо объекте, определяется температурой поверхности этого объекта и температурой воздуха, а также размером самих капель. Нарастание гололёда продолжается столько, сколько длятся переохлаждённые осадки. Сохранение отложившегося гололёда может продолжаться несколько суток.

В общем случае моделирование процессов тумано- и гололедообразования представляет собой решение задачи тепломассопереноса в многокомпонентной среде воздух – пар – капельная влага и задачи осаждения компонентов парогазовой смеси на поверхностях в пределах площадки АЭС.

На основании проведенного анализа ключевых моделей и методов исследования гололедо- и туманообразования был разработан единый алгоритм, который позволяет провести моделирование процессов динамики влагосодержащих выбросов из градирни с учетом влагосодержания окружающей среды и процессов гололедообразования. Данный алгоритм включает следующие отдельные этапы: расчет процессов переноса дисперсной фазы, неразрывной фазы, вблизи дисперсной частицы, а также расчет процессов перехода дисперсной фазы в твердую поверхность.

Полная математическая модель, способная описать данные процессы представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих основные законы сохранения. Такая система включает уравнение неразрывности, уравнение количества движения (Навье–Стокса) и энергии. Для описания турбулентных течений применяется модель осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS) и метод крупных вихрей LES.

Инструментом моделирования динамики технологических выбросов из градирни с учетом влагосодержания окружающей среды и обледенения поверхностей является COMSOL Multiphysic. В качестве примера, иллюстрирующего возможности данного программного пакета для решения задач обледенения тел, рассматривалась задача обтекания цилиндра потоком воздуха.

Направлением дальнейших исследований будет расчет процессов туманообразования на площадке АЭС в трехмерной области. А также проведение цикла расчетов по определению неблагоприятных погодных условий с точки зрения гололедообразования на территории площадки.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Можайко А.А.

*С-Пб ПУ Петра Великого, ИФНиТК, Санкт-Петербург, Россия*

*E-mail: annaanna-1996@mail.ru*

В настоящее время важной технической задачей является своевременная диагностика повреждений труднодоступных сварных соединений и металлоконструкций опасных производственных объектов в промышленности, энергетике и жилищно-

коммунальном хозяйстве [3]. В большинстве современных ультразвуковых дефектоскопах для возбуждения звуковой волны используются пьезоэлектрические преобразователи. Основным недостатком таких преобразователей является необходимость обеспечения хорошего механического контакта между датчиком и поверхностью исследуемого элемента. Альтернативным подходом в разработке ультразвуковых дефектоскопов является использование электромагнитно-акустических преобразователей, позволяющих возбуждать и детектировать ультразвуковую волну бесконтактным методом, с зазором между поверхностью металла и датчиком до 3 мм [1]. Применение электромагнитно-акустических преобразователей позволяет проводить измерения дефектов сварных швов и основного металла трубопроводов без применения контактной жидкости и зачистки защитного покрытия.

Основным преимуществом многоэлементных преобразователей является возможность фокусировки и углового сканирования ультразвукового луча, что позволяет проводить исследования труднодоступных областей объекта контроля [2]. К таким многоэлементным преобразователям относятся рассматриваемые в данной работе бесконтактные электромагнитно-акустические преобразователи, которые могут быть представлены в виде фазированных решеток отдельных катушек с током.

Применение компьютерного моделирования для исследования процесса образования ультразвукового пучка в электромагнитно-акустических преобразователях является эффективным современным способом экономии финансовых и временных ресурсов, необходимых для изготовления большого числа прототипных образцов электромагнитно-акустических преобразователей и проведения физического моделирования. Компьютерное моделирование позволяет определить оптимальные конфигурации единичных элементов фазированной решетки электромагнитно-акустического преобразователя, которые обеспечивают наиболее равномерную диаграмму направленности при наивысшей рабочей частоте и при максимальном рабочем зазоре. В качестве основного инструмента расчета электромагнитно-акустических полей выбран конечно-элементный пакет COMSOL Multiphysics.

Расчет акустического поля проводился на стальном полусферическом образце диаметром 110 мм для волн типов SV и SH и на плоскопараллельном образце для волн типа SH Guided. На рисунке 1 показано распространение поперечных волн в стальном полусферическом образце.

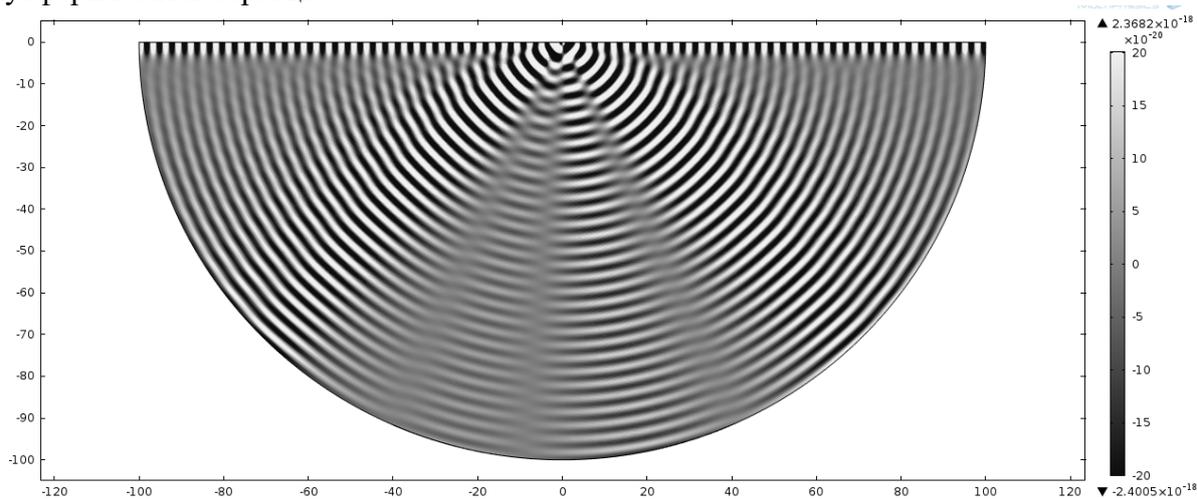


Рис. 1. Распространение поперечных волн в стальном полусферическом образце.

На рисунках 2 и 3 в качестве примера приведены диаграммы направленности поперечной волны для зазора между поверхностью металла и датчиком 0,5 мм и 1 мм соответственно на расстоянии 60 мм от верхней границы образца.

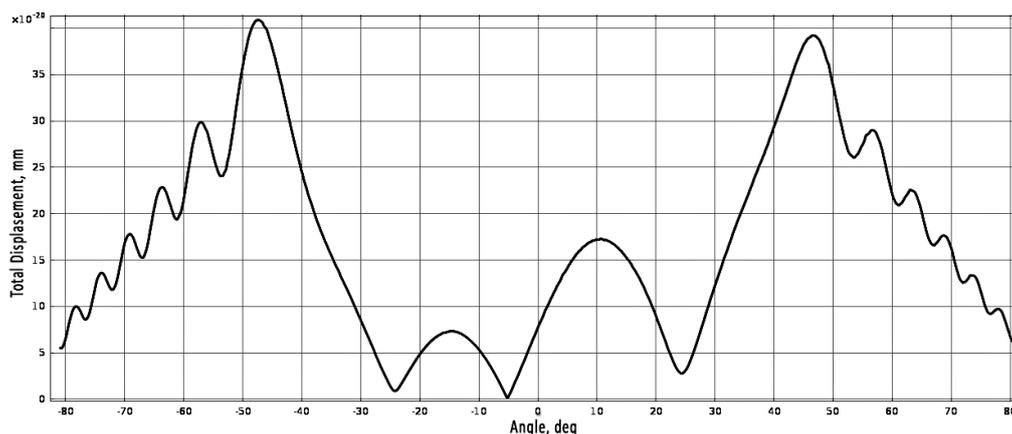


Рис. 2. Диаграмма направленности поперечной волны (зазор 0,5 мм)

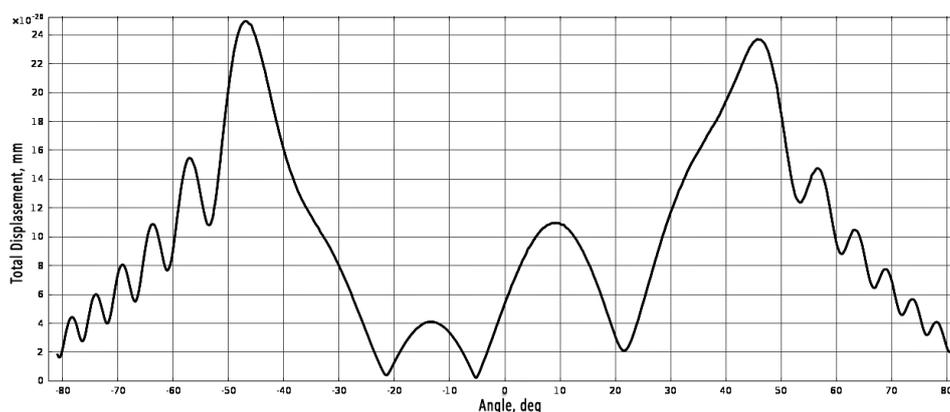


Рис. 3. Диаграмма направленности поперечной волны (зазор 1 мм)

На основании полученных расчетов может быть выбрана оптимальная конфигурация единичного элемента электромагнитно-акустической фазированной антенной решетки SV-волн, которая обеспечит при наивысшей рабочей частоте и при максимальном рабочем зазоре, наиболее равномерную характеристику направленности.

### Литература

1. Васильев А.Н. Электромагнитное возбуждение звука в металлах. Челябинск; М., 2001.
2. Воронков В.А. О применимости технологии антенных решеток в решении задач УЗК опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. No. 1(51). С. 64–70.
3. Осипов Л.В. Ультразвуковые диагностические приборы. Практическое руководство для пользователей. М., 1999.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ И КРИТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ФРУСТРИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ГЕЙЗЕНБЕРГА НА ОБЪЕМНО-ЦЕНТРИРОВАННОЙ КУБИЧЕСКОЙ РЕШЕТКЕ

Муртазаев А.К.<sup>1</sup>, Рамазанов М.К.<sup>1</sup>, Бадиев М.К.<sup>1</sup>, Курбанова Д.Р.<sup>1</sup>,  
Муртазаев К.Ш.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФБГУН Институт физики им. Х.И. Амирханова ДНЦ РАН,

<sup>2</sup>Дагестанский ГУ, Махачкала, Россия

E-mail: 5kurban@mail.ru

Ученные в области физики конденсированного состояния в последние годы усердно изучают магнитные состояния, фазовые переходы (ФП) и критические свойства в

фрустрированных спиновых системах. Это связано с тем, что указанные системы проявляют поведение, отличное от поведения соответствующих нефрустрированных систем. [1–2]. Это отличие выражается в богатом разнообразии фаз и ФП, что обусловлено сильным вырождением и высокой чувствительностью фрустрированных систем к различного рода возмущающим взаимодействиям. Поэтому в настоящее время продолжают интенсивные исследования природы ФП, тепловых, магнитных и критических свойств фрустрированных спиновых систем [3–6].

Гамильтониан модели Гейзенберга имеет вид:

$$H = -J_1 \sum_{\langle i,j \rangle} (\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j) - J_2 \sum_{\langle i,l \rangle} (\vec{S}_i \cdot \vec{S}_l) \quad (1)$$

где  $|\vec{S}_i|$  — трехкомпонентный единичный вектор  $\vec{S}_i = (S_i^x, S_i^y, S_i^z)$ . Первый член в формуле (1) учитывает обменное взаимодействие ближайших соседей  $J_1 < 0$ , а второй — вторых ближайших соседей  $J_2 < 0$ .  $k = J_2/J_1$  — величина обменного взаимодействия первых и вторых ближайших соседей.

Исследование критических свойств фрустрированных спиновых систем традиционными теоретическими и численными методами сталкиваются с рядом проблем. Для фрустрированных систем характерна проблема многочисленных долин локальных минимумов энергии. Строго и последовательно на основе микроскопических гамильтонианов такие системы могут быть изучены методами Монте-Карло (МК) [7,8]. Методы МК позволяют исследовать термодинамические свойства спиновых систем практически любой сложности. Наиболее мощными и эффективными в исследовании ФП и критических явлений (КЯ) в фрустрированных системах оказались репличные алгоритмы метода МК. Поэтому в данном исследовании был использован высокоэффективный репличный обменный алгоритм метода МК. [9]

Для определения критической температуры  $T_N$ , мы использовали метод кумулянтов Биндера  $U_L$  четвертого порядка, который имеет вид [10]:

$$U_L = 1 - \frac{\langle m^4 \rangle_L}{3 \langle m^2 \rangle_L^2}, \quad (2)$$

Для наблюдения за температурным ходом теплоемкости и восприимчивости были использованы флуктуационные соотношения [11]:

$$C = (NK^2) (\langle U^2 \rangle - \langle U \rangle^2), \quad (3)$$

$$\chi = \begin{cases} (NK) (\langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2), & T < T_N \\ (NK) \langle m^2 \rangle, & T \geq T_N \end{cases} \quad (4)$$

где  $K = |J|/k_B T$ ,  $N$  — число частиц,  $U$  — внутренняя энергия,  $m$  — параметр порядка,  $T$  — температура (температура дана в единицах  $|J_1|/k_B$ ).

Параметр порядка определялся по формуле:

$$\vec{m} = 3\vec{m}_1 - \vec{m}_2 - \vec{m}_3 - \vec{m}_4, \quad (5)$$

где  $m$  — параметр порядка,  $\vec{m}_1, \vec{m}_2, \vec{m}_3, \vec{m}_4$  — параметры порядка по подрешеткам.

Для исследования характера фазовых переходов и рода фазовых переходов был использован гистограммный метод анализа данных метода МК для различных соотношений величины  $k$ .

На рисунке 1 приведена фазовая диаграмма зависимости критической температуры  $T_N$  от величины взаимодействия вторых ближайших соседей  $k$ . На диаграмме видно, что вблизи точки  $k = 2/3$  пересекаются три различные фазы: AF1 — антиферромагнитная

фаза 1-го типа, PM — парамагнитная фаза и AF2 — антиферромагнитная фаза 2-го типа.

Результаты нашей работы показывают, что в интервалах значений обменного взаимодействия  $0.0 \leq k \leq 0.6$  и  $0.8 \leq k \leq 1.0$  наблюдается ФП второго рода. В узкой области значений  $2/3 < k \leq 0.75$  переход из антиферромагнитной фазы в парамагнитную является переходом первого рода.

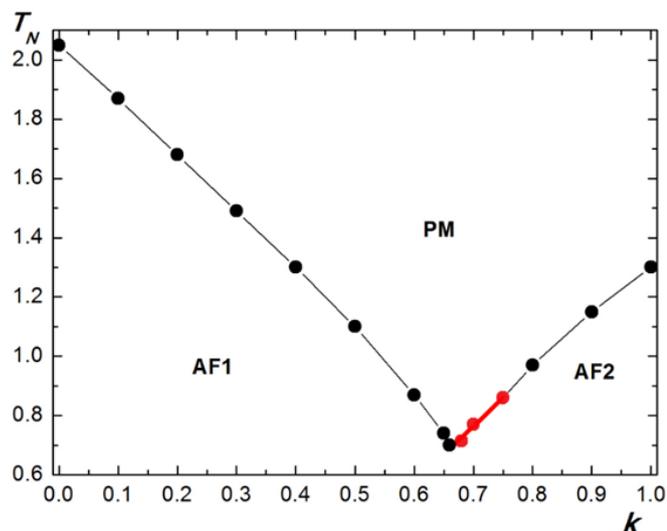


Рис. 1 Фазовая диаграмма зависимости критической температуры от величины взаимодействия вторых ближайших соседей.

### Литература

1. Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. Наука, М. 1982. 380 с.
2. Ма Ш. Современная теория критических явлений. Мир, М. 1980.
3. Гехт Р.С. УФН **159**, 261 1989.
4. Katsumata K., Aruga Katori H., Kimura S., Narumi Y., Hagiwara M., Kindo K. // *Phys. Rev. B* **82**, 104402 2010.
5. Murtazaev A. K., Kamilov I.K., Ramazanov M. K. // *Low Temp. Phys.* **32**, 241 2006.
6. Murtazaev A. K., Ramazanov M. K., Badiiev M.K. // *Low Temp. Phys.* **35**, 521 2009.
7. Муртазаев А. К., Рамазанов М. К., Кассан-Оглы Ф. А., Курбанова Д. Р. // *ЖЭТФ* **147**, 127 2015.
8. Муртазаев А. К., Рамазанов М. К., Бадиев М.К. // *ЖЭТФ* **144**, 1239 2013.
9. Wang F., Landau D. P. // *Phys. Rev. Lett.* **86**, 2050 2001.
10. Murtazaev A. K., Ramazanov M. K., Badiiev M.K. // *Physica B: Condensed Matter* **476**, 1 2015.
11. Binder K. Wang J.-Sh., // *Stat. Phys.* **55**, 87 1989.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЖИДКИХ СРЕД МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В СЛАБОМ ПОЛЕ

Мязин Н.С., Рукин Е.В.

*С-Пб ПУ Петра Великого, Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций, Санкт-Петербург, Россия*  
E-mail: myazin.n@list.ru, rugin.egor@gmail.com

В настоящее время одной из актуальных задач прикладной физики является разработка быстрых и надёжных методов экспресс-контроля состояния конденсированных сред [1]. Основным требованием, которое сейчас предъявляется к методам экспресс-контроля, является то, что проводимые исследования или измерения этими методами не должны вносить изменений в физическую структуру и химический состав исследуемой среды.

Многочисленные эксперименты показали, что метод на основе явления ядерного магнитного резонанса (ЯМР) является единственным методом, который при исследованиях не вносит необратимых изменений в структуру и химический состав различных конденсированных сред, в отличие от оптических, ультразвуковых, рентгеновских, электромагнитных и других. За последние полвека было предложено множество методик, использующих явление ЯМР для контроля состояния сред. Для этих методик на основе решения уравнений Блоха были предложены способы измерения времен продольной  $T_1$  и поперечной  $T_2$  релаксации конденсированной среды. Измеренные значения  $T_1$  и  $T_2$  позволяют однозначно установить наличие отклонения от стандартного состояния в исследуемой среде [1].

Результаты исследований, проведенных нами, показали, что реализовать экспресс-контроль с помощью приборов, основанных на импульсной методике, крайне сложно по причине больших массогабаритных характеристик таких приборов. Поэтому нами была разработана конструкция малогабаритного ЯМР-релаксометра (вес прибора с источниками питания не превышает 6 кг). Для регистрации сигнала ЯМР слабом магнитном поле с  $B$  менее 0.15 Тл в этом приборе использовалась модуляционная методика. Проведенные нами исследования подтвердили возможности использования малогабаритного ЯМР-релаксометра для экспресс-контроля состояния среды.

В то же время опыт эксплуатации малогабаритных ЯМР-релаксометров показал, что в ряде случаев (например, экологический мониторинг) измеренных значений  $T_1$  и  $T_2$  для эффективного экспресс-контроля этого недостаточно. В этом случае для принятия обоснованного решения по дальнейшему использованию среды необходимо установить причину, вызвавшую данное отклонение от стандартного.

Одним из возможных вариантов решения данной задачи может быть расшифровка структуры сигнала ЯМР с дальнейшим анализом. В случае регистрации сигнала ЯМР в слабом магнитном поле с помощью модуляционной методики он формируется из сигналов поглощения и дисперсии [2]. Теория этих сигналов хорошо описана для импульсных методов с помощью уравнений Блоха. Но для этого сделано множество приближений, большая часть которых не соответствует условиям регистрации сигнала ЯМР с использованием модуляционной методики в слабом магнитном поле.

Отсутствие теоретической модели, позволяющей в соответствии с экспериментом описать формирование сигнала ЯМР в слабом магнитном поле, существенно снижает эффективность исследований конденсированных сред. Поэтому цель нашей работы — дополнение этого раздела теории ЯМР новыми знаниями, которые позволят воспроизводить форму линии регистрируемого сигнала ЯМР в условиях модуляции слабого магнитного поля в межполюсном пространстве ЯМР-релаксометра, с учётом установленных ранее нами особенностей его регистрации [2].

На рис. 1 (а, б) представлен зарегистрированный сигнал ЯМР от воды с различными способами его аппроксимации. Анализ формы линии зарегистрированного сигнала ЯМР (рис. 1.а, график 1) показывает, что он спадает несимметрично, что связано с наличием нестационарных процессов при работе автодинного детектора в начальный момент прохождения через резонанс. Представленный на рис 1а результат расчета (график 2), полученный из уравнений Блоха, сильно отличается от эксперимента (график 1).

Поэтому нами был предложен вариант «зажать» график 1 (рис. 1.б) между двумя экспонентами (график 3 и 4), которые имеют разные коэффициенты затухания. В соответствии с теорией физического эксперимента формула для описания функции с различными огибающими может быть представлена в следующем виде:

$$u(t) = \frac{\text{env}_{\text{upper}}(t) + \text{env}_{\text{lower}}(t)}{2} + f_{\text{osc}}(t) \frac{\text{env}_{\text{upper}}(t) - \text{env}_{\text{lower}}(t)}{2} \quad (1)$$

где  $\text{env}_{\text{upper}}(t)$  и  $\text{env}_{\text{lower}}(t)$  — верхняя и нижняя огибающие соответственно,  $f_{\text{osc}}(t)$  — функция, описывающая колебательный процесс.

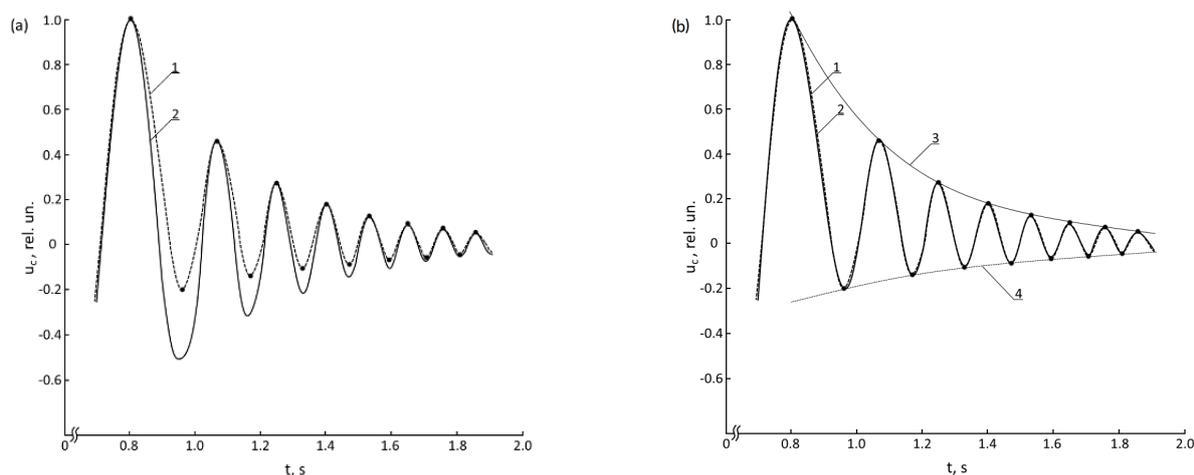


Рис. 3. Формы линий сигнала ЯМР от воды при температуре  $T = 291.4$  К. График 1 соответствует эксперименту. График 2 — теоретический расчет формы линии. Графики 3 и 4 — огибающие формы линии экспериментального сигнала.

На основе ранее полученных нами экспериментальных результатов, а также данных о исследованиях проведенными другими учёными в области ЯМР выражения для огибающих, а также функцию  $f_{\text{osc}}(t)$  в (1) можно представить в следующем виде:

$$u(t) = \frac{a \exp(-b t) + c \exp(-d t)}{2} + \cos(g(t - f) + h(t - f)^2) \cdot \frac{a \exp(-b t) - c \exp(-d t)}{2}, \quad (2)$$

где  $a, c$  — безразмерные параметры,  $b, d$  — коэффициенты затухания ( $b \sim 1/T_2$ ,  $d$  учитывает неоднородность магнитного поля  $H_0$ ),  $g$  (Гц) — учитывает частоту резонанса  $\omega_0$ ,  $h$  ( $1/\text{сек}^2$ ) — учитывает модуляцию поля,  $f$  — параметр, имеющий размерность времени, необходим чтобы откорректировать аппроксимацию по оси времени, потому что первый пик реального сигнала не всегда установлен в 0.

Предложенный метод описания сигнала ЯМР с использованием разработанной нами аппроксимации позволил получить хорошее совпадение теории с экспериментом до 5 пика включительно. Это показывает, что предложенную модель можно использовать для экспресс-контроля конденсированных сред.

### Литература

1. Myazin N. S. et al. New nondestructive method for determining the composition of components in biological objects in express mode // *J. of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2017. – Т. 917. – №. 4. – С. 042017.
2. Давыдов В. В., Мязин Н. С., Величко Е. Н. Некоторые особенности регистрации спектра конденсированной среды методом ядерного магнитного резонанса в слабом поле // *Письма в Журнал Технической Физики*. 2017. Т.43, № 13. С. 34–42.

## ПОЛУЧЕНИЕ АМОРФНОГО НИТИНОЛА С ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ БЫСТРЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ПЕРЕГРЕТОГО РАСПЛАВА

Никифоров Г.А.

Казанский (Приволжский) ФУ, Институт физики, Казань, Россия

E-mail: nikiforov121998@mail.ru

На сегодняшний день нитинол (NiTi) активно применяется в медицине в качестве имплантатов благодаря уникальным физико-механическим свойствам, приближенным к свойствам костных тканей. Также известно, что костные имплантаты на основе пори-

стых структур лучше интегрируются в организм [1]. Кроме того, нитинол является перспективным материалом для аэрокосмической отрасли, где важна легкость материала в сочетании с прочностью, что может быть достигнута применением пористых материалов.

В настоящей работе, мы изучаем особенности формирования пористой структуры в нитиноле при быстром охлаждении перегретого расплава. Для этого применяется метод моделирования атомарной динамики и модифицированный потенциал ЕАМ-типа для металлов [2]. Система состоит из более 130000 атомов. Получена зависимость плотности нитинола от температуры (рис. 1. левая панель).

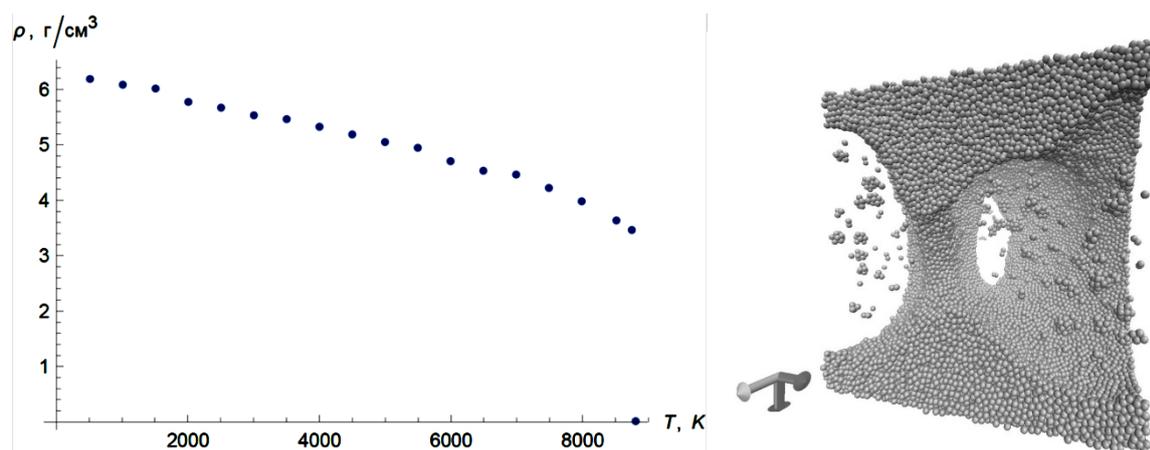


Рис. 1. (левая панель) График зависимости плотности нитинола от температуры. (правая панель) Нитинол с пористой структурой (линейные размеры пор порядка 6 нм).

Перегретые образцы с температурой 8750 К были охлаждены со скоростью порядка  $10^{13}$  К/с до температуры 300 К. Получены образцы со стабильной пористой структурой (рис. 1. правая панель). Показано, что на размеры пор влияет как скорость охлаждения, так и температура перегретого расплава.

### Литература

1. Kapoor D., Nitinol for Medical Applications: A Brief Introduction to the Properties and Processing of Nickel Titanium Shape Memory Alloys and their Use in Stents // Johnson Matthey Technol. Rev., V. 61. 2017. P. 66.
2. Ko W.S., Grabowski B. and Neugebauer J. Development and application of Ni-Ti Interatomic potential with high predictive accuracy of the martensitic phase transition // Phys. Rev. B, V. 92. 2015. P. 134107.

## ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ МОДЕЛЬ РЕЕСТРА УЧЕТА ТОВАРОВ ДЛЯ ГАРАНТИИ ИХ ПОДЛИННОСТИ В МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ЦЕПОЧКЕ ПОСТАВОК НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН

Печеркин А.А.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

*E-mail: aa.pecherkin@yandex.ru*

В настоящее время активно исследуются преимущества и способы применения технологии блокчейн в области логистики и сложных цепочек поставок, для надежного хранения данных о товаре в распределенном реестре и выстраивания системы взаимодействия участников мультиагентной системы между друг другом. Технология блокчейн позволяет установить прозрачное взаимодействие агентов системы между собой и обеспечить сохранность принятых решений, записанных в реестр. Несколько компа-

ний (например, Skuchain, Provenance, Walmart, Everledger) используют решения на основе blockchain для повышения эффективности решений по управлению цепочками поставок. Также технология blockchain прокладывает путь к цепочке спроса, вместо цепочек поставок, где предприятия выиграют от большей гибкости во взаимодействии с различными рынками и балансировании ценовых рисков. [1, 2].

В цепочке поставок при доставке товаров от производителя до конечного потребителя участвует много агентов в виде распределительных центров, складских систем, транспортных компаний, контролирующих органов, каждый из которых должен доверять другим, чтобы обеспечить подлинность товара конечному агенту — покупателю. Для обеспечения и гарантии прозрачности ведения дел применяются различные обязательства по ведению документов на товары и проверка соблюдения требований по хранению товара. Однако, все эти процессы являются трудозатратными и занимают много времени по причине отсутствия доверия между агентами. Также, часто проявляются сбои в системе в виде подмена информации, подделки документов и товаров, договоренности между агентами, что в конечном итоге ведет к сложности гарантии подлинности товара при его доставке от производителя до конечного потребителя. [3, 4, 5] В данной работе предлагается модель системы на блокчейне, позволяющей объединить всех агентов в единую систему взаимодействия и гарантировать сохранность и выполнение принятых решений между агентами для гарантии оригинальности продукта при доставке от производителя до потребителя и экономии трудозатрат на документооборот между агентами.

Для гарантии оригинальности каждого товара на каждом пункте в мультиагентной системе поставок, необходимо единственным образом верифицировать продукт и помещать надежные данные о текущем состоянии системы в распределенный реестр. Существуют различные методы маркировки продукции и их связь с распределенным реестром. Каждый тип обладает разной степенью надежности и стоимости за единицу продукции. В ходе исследования предложен алгоритм надежной верификации продукции и помещения информации в распределенный реестр на основе NFC-меток.

Для демонстрации работоспособности системы, выполнен прототип, представляющий программный продукт для производителя товара с функционалом привязки ID продукта к системе, записи информации о каждом продукте в распределенный реестр тестовой сети Ethereum - Rinkeby. [6] А также мобильное приложение, работающее по алгоритму, позволяющее каждому агенту системы, используя NFC чип верифицировать товар и внести запись о текущем состоянии. В конечном итоге покупатель сможет убедиться в подлинности товара, а производитель отслеживать весь логистический путь доставки и проверок товара. В работе изучены преимущества и недостатки от применения данной системы, приведен анализ и сравнение с аналогичными системами и предложены методы дальнейшего изучения и доработки системы.

### Литература

1. Roberto Casado-Vara, Javier Prieto, Fernando De la Prieta, Juan M. Corchado. How blockchain improves the supply chain: case study alimentary supply chain. 2018
2. Henry M. Kim, Marek Laskowski. Towards an Ontology-Driven Blockchain Design for Supply Chain Provenance. // Toronto, 2018
3. Arman Jabbari, Philip Kaminsky. Blockchain and Supply Chain Management // Department of Industrial Engineering and Operations Research University of California, Berkeley, 2018
4. Naif Alzahrani, Nirupama Bulusu. Block-Supply Chain: A New Anti-Counterfeiting Supply Chain Using NFC and Blockchain. // Portland State University - 2018
5. Claudio Di Ciccio, Alessio Cecconi, Jan Mendling, Dominik Felix, Dominik Haas, Daniel Lilek, Florian Riel, Andreas Rumpl, and Philipp Uhlig. Blockchain-based Traceability of Inter-organisational Business Processes // Vienna University of Economics and Business, Vienna, Austria
6. Wood G. «Ethereum White Paper», available from: <https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf>

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ИЗВЕСТНОЙ ФОРМЫ КАК ЛОЖНЫХ ВИХРЕЙ

Приходько И.Н.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: prikhodko\_in@mail.ru

Локализация объектов относится к одной из основных задач компьютерного зрения. Анализ вихревых структур принципиально отличается от поиска простых объектов тем, что вихрь не имеет четкого определения и формы, что подробно описано в статье [1]. Изображение в градациях серого  $B$  можно рассматривать как скалярное поле. Тогда, согласно работе [2], на основе конечномерных теорем отчета (КМТО) можно получить векторное поле изображения  $gB = \text{grad}B$  без использования конечноразностных схем.

Для поиска вихря в изображении  $F$ , мы используем метод скользящего окна (см. предыдущую работу [3]). Согласно нему, мы сканируем фрагмент  $B$  шаблоном  $X$ , получая результат для области сканирования  $S \subset B$ , ограниченный рамкой, габариты которой зависят от размера шаблона. Базовые формы шаблонов направлений  $X$  представлены на рис. 1. Они являются полями векторов, как и анализируемое изображение  $gB = \text{grad}B$ . Для совместимости с представленными шаблонами будем рассматривать ортогональное векторное поле  $f = OgB$ , где  $O$  — оператор поворота векторов градиентного поля  $gB$  на  $\pi/2$ .

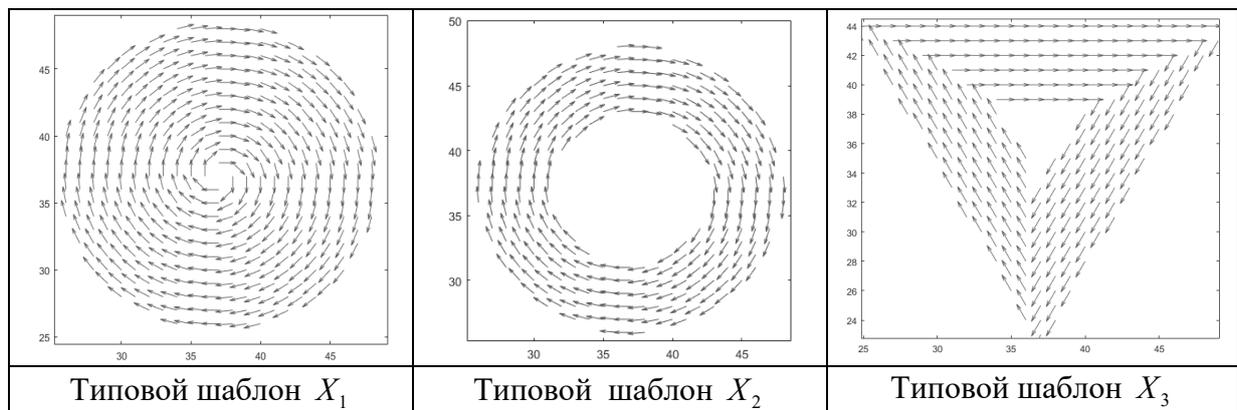


Рис. 1. Набор типовых шаблонов малого масштаба.

Определим отношение сигнала к шуму при сканировании. Сигнальную часть можно задать как  $f_c = (f, X) * X$ , а шумовую  $f_s = f - f_c$ . Тогда отношение сигнала к шуму (Signal to Noise) будет задано в виде  $\text{StoN}(f | X) = |f_c|^2 / |f_s|^2$ . А значит, можно поставить задачу поиска центра вихря как задачу на максимум:

$$(x_0, y_0) = \operatorname{argmax}_{(x, y) \in S \subset B} \text{StoN}(f | X) \quad \text{по всем } (x, y) \in S \subset B. \quad (1)$$

На рис. 2. представлены результаты локализации близкорасположенных вихрей в атмосфере Юпитера, что согласно обзору [4], является сложным аспектом для многих существующих методов анализа вихревых структур. Также этот рис. 2 наглядно показывает возможность метода разделять ложные вихри и реальные: ложный вихрь отмечен на поверхности  $\text{StoN}$  небольшим, но выраженным «горбиком» на заднем плане.

Использование возможности метода выделять ложные вихри, позволяет локализовать объекты простой формы, что представлено на рис. 3. Что выглядит многообещающе, т.к. используемый метод, согласно [3], является помехозащищенным.

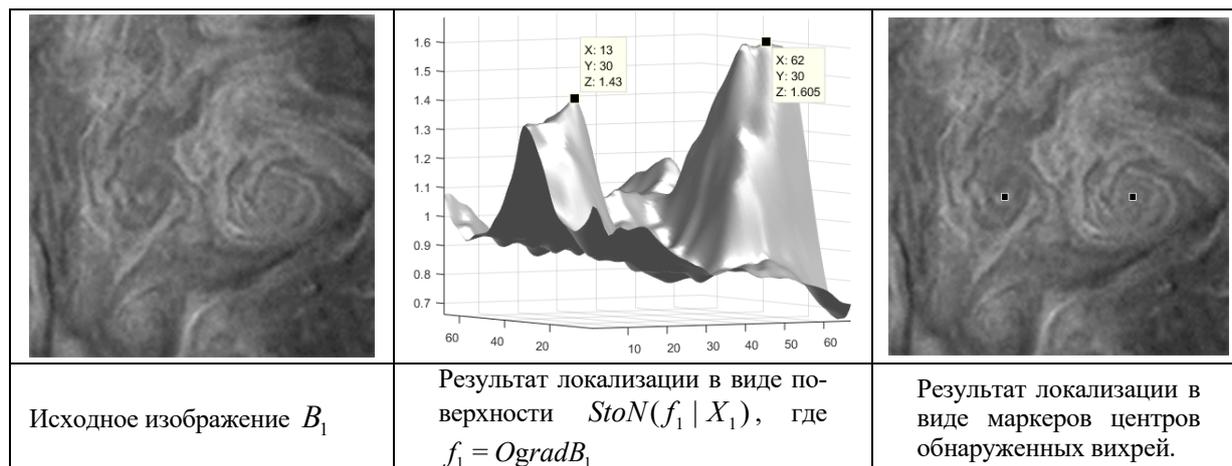


Рис. 2. Локализация вихрей в изображении атмосферы Юпитера с использованием шаблона типа  $X_1$ .

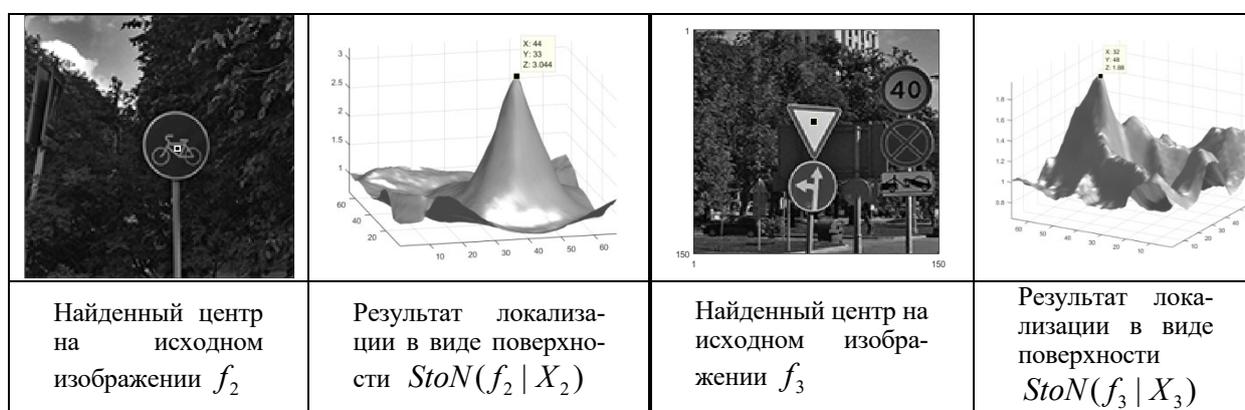


Рис. 3. Локализация дорожных знаков как ложных вихрей с использованием шаблонов  $X_2$  и  $X_3$ .

### Литература

1. Stuart Pollock, Stephen Mann. Vortex Detection in Vector Fields Using Geometric Algebra. Advances in Applied Clifford Algebras. 2014.
2. Е.Н. Терентьев, Н.Е. Терентьев, И.И. Фаршакова. Конечномерные теоремы отсчетов в моделировании вихрей. Труды школы-семинара <<Волны-2017>>. Математическое моделирование в радиофизике и оптике, 2017
3. Е.Н. Терентьев, N. E. Shilin–Terentyev, И.Н. Приходько, И.И. Фаршакова. Векторные операции в точной индикации локальных объектов в изображениях. Ученые записки физического факультета Московского Университета, (5):1850308–10, 2018.
4. Ming Jiang, Raghu Machiraju, David Thompson. Detection and Visualization of Vortices. The Visualization Handbook. Butterworth-Heinemann, 2005, p. 295–309.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛАЧНОСТИ НЕБОСВОДА НА ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ЗДАНИЙ

Ранько А.П., Гужов С.В.

НИУ «МЭИ», Кафедра ТМПУ, Москва, Россия  
 E-mail: [aleksey.ranko@mail.ru](mailto:aleksey.ranko@mail.ru), [guzhovsv@yandex.ru](mailto:guzhovsv@yandex.ru)

Для оценки влияния заоблачности небосвода на теплотери излучением необходимо определить температуру наружных поверхностей ограждающих конструкций здания. Для расчёта был выбран дом типовой конструкции 111–121 с наружными стенами из железобетонных панелей толщиной 300 мм и пластиковыми окнами.

Расчет был произведен для температуры наружного воздуха, равной +1,7 °С.

Температура внутри помещения принималась равной 20 °С [1]

Для расчета теплопотерь излучением воспользуемся законом Стефана-Больцмана [2]:

Для реального тела плотность потока излучения равна:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (1.1)$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  — постоянная Стефана-Больцмана,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ ;  $T$  — температура тела, К;  $\varepsilon$  — степень черноты тела

Поскольку излучение происходит от любого тела, результирующий тепловой поток будет равен разности тепловых потоков здания и небосвода:

$$E_{\text{рез}} = E_{\text{зд}} - E_{\text{н}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (1.2)$$

Таким образом суммарные тепловые потери излучением с поверхности здания будут равны сумме произведений удельных тепловых потоков на площадь поверхности, соответствующей им и тепловых потерь излучением, проходящих через стекло [3]:

$$Q_{\text{изл}} = E_{\text{рез,ст}} \cdot F_{\text{ст}} + E_{\text{рез,ок}} \cdot F_{\text{ок}} + E_{\text{рез,кр}} \cdot F_{\text{кр}} + Q_{\text{ок}}, \text{Вт} \quad (1.3)$$

где  $Q_{\text{ок}}$  — теплопотери излучением от внутренних стен помещения через окна.

Поскольку световой поток имеет ту же природу, что и излучение, было принято допущение, что отношение светового потока, приходящегося на окно к суммарному потоку от всех стен равно отношению потока излучения:

$$\psi = \frac{E_{\text{изл,ок}}}{E_{\text{изл,ст}}} \quad (2.1)$$

Количество теплоты от излучения, приходящегося на окно:

$$Q_{\text{в,ок}} = E_{\text{рез,в,ок}} \cdot \psi \cdot T \cdot \Sigma F_{\text{пом}} \cdot n, \text{Вт}; \quad (2.2)$$

Где  $E_{\text{рез,в,ок}}$  — результирующий тепловой поток от внутренних стен к облакам, согласно формуле (1.3);  $T$  — коэффициент направленного пропускания света, равный 0,72;  $\Sigma F_{\text{пом}}$  — суммарная площадь всех стен помещения, за исключением той, в которую вмонтировано окно;  $n$  — количество окон в здании; Удельный тепловой поток от стен через окно:

$$q_{\text{через окно}} = E_{\text{в,ок}} \cdot \psi \cdot T \quad (2.3)$$

Для учета потерь излучения, поглощенных частицами влаги, находящимися в воздухе была принята относительная влажность 60%. В абсолютном значении это составит 0,014 кг/м<sup>3</sup> [5]. Чтобы узнать долю влагосодержания необходимо привести отношение к одинаковым величинам. Доля влаги, содержащейся в воздухе:

$$\Psi = \frac{f}{\rho_{\text{воздк}}} = \frac{0,014}{1000} = 1,4 \cdot 10^{-5} \quad (2.4)$$

где  $f$  — абсолютная влажность, кг/м<sup>3</sup>

Количество поглощенного влагой излучения, содержащейся в воздухе можно определить, вычислив интеграл по высоте от потерь:

$$\Delta E_t = \int_0^{H_t} E_t \cdot \Psi \, dH \quad (2.5)$$

где  $H_t$  — высота, м.

Суммарные тепловые потери от здания излучением будут равны:

$$Q_{\text{изл}} = q_{\text{ст}} \cdot F_{\text{ст}} + q_{\text{ок}} \cdot F_{\text{ок}} + q_{\text{кр}} \cdot F_{\text{кр}} + q_{\text{через окно}} \cdot \Sigma F_{\text{пом}} \cdot n, \text{Вт}; \quad (3.1)$$

Где

$$q_t = E_{\text{рез,t}} - \Delta E_t, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (3.2)$$

Подставляя в уравнение (3.1) уравнения (3.2), (2.3), (2.2), получим:

$$Q_{\text{инт}} = \sigma_0 \cdot \left\{ \left[ (\varepsilon_{\text{ст}} \cdot T_{\text{ст}}^4 - \varepsilon_0 \cdot T_{\text{H}}^4) - \int_0^H (\varepsilon_{\text{ст}} \cdot T_{\text{ст}}^4 - \varepsilon_0 \cdot T_{\text{H}}^4) \cdot \Psi \, dH \right] \cdot F_{\text{ст}} + \left[ (\varepsilon_{\text{ок}} \cdot T_{\text{ок}}^4 - \varepsilon_0 \cdot T_{\text{H}}^4) - \int_0^H (\varepsilon_{\text{ок}} \cdot T_{\text{ок}}^4 - \varepsilon_0 \cdot T_{\text{H}}^4) \cdot \Psi \, dH \right] \cdot F_{\text{ок}} + \left[ (\varepsilon_{\text{кр}} \cdot T_{\text{кр}}^4 - \varepsilon_0 \cdot T_{\text{H}}^4) - \int_0^H (\varepsilon_{\text{кр}} \cdot T_{\text{кр}}^4 - \varepsilon_0 \cdot T_{\text{H}}^4) \cdot \Psi \, dH \right] \cdot F_{\text{кр}} + \left[ (\varepsilon_{\text{вн.ст}} \cdot T_{\text{вн.ст}}^4 - \varepsilon_0 \cdot T_{\text{H}}^4) - \int_0^H (\varepsilon_{\text{вн.ст}} \cdot T_{\text{вн.ст}}^4 - \varepsilon_0 \cdot T_{\text{H}}^4) \cdot \Psi \, dH \right] \cdot \psi \cdot T \cdot \Sigma F_{\text{пом}} \cdot n \right\}, \text{ Вт}; \quad (3.3)$$

где  $\varepsilon_{\text{ст}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ок}}$ ,  $\varepsilon_{\text{кр}}$ ,  $\varepsilon_{\text{вн.ст}}$ ,  $\varepsilon_0$  — степень черноты наружных стен, окон, крыши, внутренних стен и облака соответственно;  $T_{\text{вн.ст}}$  — температура поверхности внутренних стен, К;  $T_{\text{ст}}$ ,  $T_{\text{ок}}$ ,  $T_{\text{кр}}$  — температура наружной поверхности стен, окон и крыши соответственно, К;  $T_{\text{H}}$  — температура воздуха на высоте расположения облака, К;  $H$  — высота расположения облака, м;  $F_{\text{ст}}$ ,  $F_{\text{ок}}$ ,  $F_{\text{кр}}$  — суммарная площадь наружных стен здания (за исключением оконных проемов), остекления и крыши здания соответственно, м<sup>2</sup>;  $T$  — коэффициент направленного пропускания света через стекло;  $\Sigma F_{\text{пом}}$  — суммарная площадь всех стен помещения, за исключением той, в которую вмонтировано окно;  $n$  — количество окон в здании;  $\Psi$  — абсолютная влажность воздуха,  $\frac{\text{кг} \text{ в} \text{ о} \text{ з} \text{ д}}{\text{кг} \text{ в} \text{ о} \text{ з} \text{ д}}$

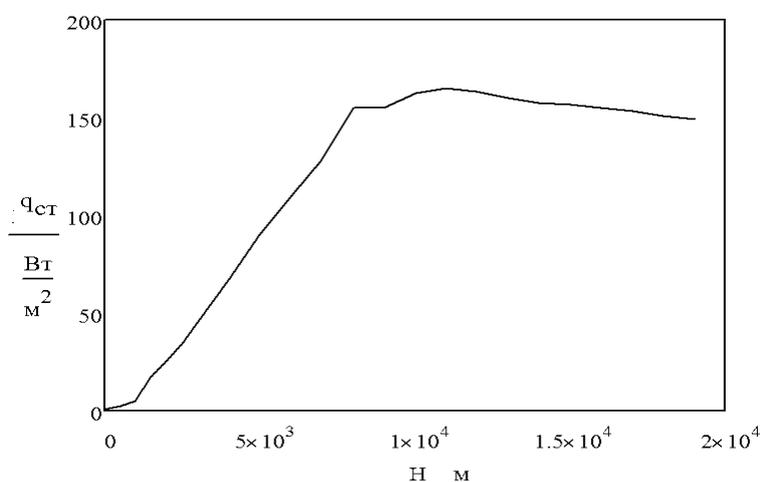


Рис. 1. Зависимость удельных теплотерь стен от высоты объекта поглощения энергии

Анализируя график (рис. 1) можно наблюдать точку перегиба, которая соответствует высоте 11 км. В этой точке прирост теплотерь равен поглощению излучения при прохождении через воздух.

**Заключение:** для принятых в расчёте условий высота 11 км характеризует максимально возможные теплотери излучением от здания. Следует отметить, что зависимость удельных теплотерь от высоты облака носит нелинейный характер — на высотах до 1 км и от 8 до 11 км повышение теплотерь происходит менее значительно. В первом случае это связано с малой разницей температур на поверхности земли и на высоте 1 км. Во втором случае это характеризуется менее значительным изменением температуры воздуха по высоте в силу её приближения к своему наименьшему значению в тропосфере.

### Литература

1. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
2. Цветков Ф.Ф., Керимов Р.В., Величко В.И. Задачник по тепломассообмену. М.: Изд-во МЭИ, 2008.
3. Смыков А.А. Особенности тепловых потерь излучением через светопрозрачные ограждающие конструкции. Нижний Новгород: Изд-во НГАСУ, 2017.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Сердечный Д.В., Томашевский Ю.Б.

СГТУ им. Гагарина Ю.А., ИнЭТМ, Саратов, Россия

E-mail: serdechnyy@sstu.ru

Сравнительный анализ различных типов первичных и вторичных химических источников тока показал перспективность использования в многоэлементных накопителях для современного электротранспорта литий-ионного аккумулятора, в основе безопасного применения которых лежит непрерывный контроль основных параметров. При помощи разработанной компьютерной модели системы контроля и управления (СКУ) многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи удалось осуществить окончательный выбор параметров накопителя, а также определить диапазоны их изменения для реальных режимов эксплуатации объектов автономного электротранспорта [1]. Результаты экспериментальных испытаний алгоритмов зарядного процесса многоэлементного литий-ионного аккумулятора совпадают с результатами моделирования на уровне 6–8% [2].

Одна из основных функций СКУ литий-ионной батареи является определение текущего уровня ее заряда - SOC. Именно этот параметр в конечном итоге визуализируется для пользователя, и неправильная его интерпретация может привести к непредвиденным ситуациям в процессе эксплуатации электротранспорта [3]. СКУ определяет величину состояния заряда путем вычисления разницы фактической емкости аккумулятора, указываемой производителем, и емкости полученной в процессе разряда, которая определяется интегрированием токов через многоэлементную батарею в процессе разряда.

В процессе длительной эксплуатации многоэлементного литий-ионного накопителя возможно значительное расхождение значения состояния уровня заряда, измеренного при помощи алгоритмов СКУ —  $SOC_{bms}$ , и фактического значения SOC. Это может быть обусловлено погрешностью датчиков измерительной подсистемы, а также процессом «старения» литий-ионных ячеек, в результате которого происходит снижение емкости аккумулятора  $C_{акк}$ . Таким образом, при разработке алгоритмов контроля и вычисления параметров батареи необходимо предусмотреть процедуру корректировки состояния уровня заряда.

Разработанная методика направлена на корректировку вычисленного значения состояния уровня заряда при отклонении от реального значения в большую или меньшую сторону. Рисунок 1. поясняет принцип работы методики: вычисленное значение SOC1 скорректировано до значения SOC2, время работы до отображения нулевого уровня заряда увеличилось с  $t_1$  до  $t_2$ .

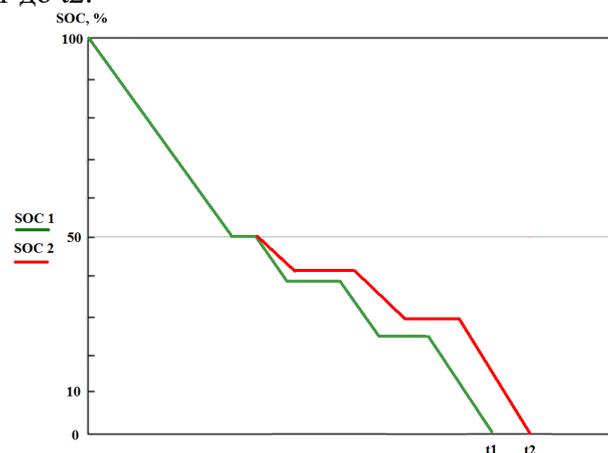


Рис. 1. Корректировка измеренного значения SOC

Алгоритм моделирования с использованием разработанной нечеткой модели (НМ) заключается в ее совместном использовании алгоритмами разрабатываемой системы обеспечения функционирования или моделью системы в среде MATLAB. На основе полученных данных формируются значения ЛП «SOC» в НМ. Другие входные переменные НМ задаются пользователем на основе прямых измерений или расчетных данных.

Результаты компьютерного моделирования в среде MATLAB с использованием представленной методики показывают, что точность измерения величины SOC повысилась на 5–7% [4].

В исследовании решена актуальная задача повышения эффективности и удобства эксплуатации многоэлементного литий-ионного накопителя, используемого в объектах автономного электротранспорта.

### Литература

1. Сердечный, Д.В. Моделирование многоэлементных литий-ионных батарей в энергообеспечивающих комплексах автономных объектов / Д.В. Сердечный, Ю.Б. Томашевский // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. 2017. № 3. С. 86–94.
2. Сердечный, Д.В. Управление процессом заряда многоэлементных литий-ионных аккумуляторных батарей / Д.В. Сердечный, Ю.Б. Томашевский // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3. С. 115–123.
3. Сердечный, Д.В. Повышение эффективности многоэлементных литий-ионных батарей для мобильных систем / Д.В. Сердечный, Е.О. Смурыгин, Ю.Б. Томашевский // Динамика сложных сетей и их применение в интеллектуальной робототехнике: сб. материалов I Междунар. шк.-конф. молодых ученых. – Саратов: ООО «Издательство «Научная книга»», 2017. С. 76–77.
4. Serdechnyy, D.V. Improving accuracy of determining the state of charge level of a lithium-ion energy storage device / D.V. Serdechnyy, Y.B. Tomashevskiy, E.O. Smurygin // 2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC): Conference Proceeding, Turin, Oct. 7–11, 2018. P.1–3.

## СВЕТОВЫЕ ПУЛИ В ПЛАНАРНОМ ГРАДИЕНТНОМ ВОЛНОВОДЕ С КВАДРАТИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Соболев Б.Д.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*  
*E-mail: sobolev1812@mail.ru*

Пространственно-временные солитоны (световые пули) являются объектом как теоретических, так и экспериментальных исследований [1, 2, 3]. В [4, 5] представлена теория формирования и распространения «дышащих» световых пуль в микродисперсных средах с квадратичной нелинейностью. Методом усредненного Лагранжиана в этих работах получены приближенные аналитические решения в виде двухкомпонентных пространственно-временных солитонов.

Известно, что устойчивые многокомпонентные оптические солитоны при квадратичной нелинейности обычно наблюдаются при аномальной дисперсии. Включив в рассмотрение случай нормальной дисперсии, можно увеличить диапазон частот, при которых происходит локализация волн. Известно, что волноводы обладают свойством поддерживать солитонные структуры [5]. Волноводная геометрия может быть выбрана так, чтобы играть фокусирующую или дефокусирующую роль.

В настоящей работе процесс исследуется на основе системы уравнений в квазиоптическом приближении, описывающей распространение импульсов-пучков в градиентных волноводах. Разработан численный метод прямого моделирования системы.

Проведено численное моделирование для широкого набора физических параметров. Поскольку световые пули при аномальной дисперсии формируются и распространяются и без волновода, интересно исследование волновода при нормальной дисперсии групповой скорости. Изучены влияние фазовой расстройки, а также различные типы волноводных профилей. Отдельно рассмотрен случай, когда волновод находится только на основной частоте. При этом наблюдается образование солитоноподобных структур, которые, однако, быстро затухают. Проведенное моделирование показало возможность существования оптических пульс и квази-солитонных решений при наличии нормальной дисперсии в квадратично-нелинейных волноводах.

#### Литература

1. Kivshar YS, Agrawal G. Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals: Academic press; 2003.
2. Malomed BA, Drummond P, He H et al. Spatiotemporal solitons in multidimensional optical media with a quadratic nonlinearity. Phys. Rev. E. 1997; 56: 4725.
3. Skryabin DV, Firth WJ. Generation and stability of optical bullets in quadratic nonlinear media Opt. Commun. 1998; 148: 79.
4. Sazonov SV, Mamaikin MS, Komissarova MV, Zakharova IG. Planar light bullets under conditions of second-harmonic generation. Phys.Rev. E. 2017; 96: 022208.
5. Sazonov SV, Mamaikin MS, Zakharova IG, Komissarova MV. Planar spatiotemporal solitons in a quadratic nonlinear medium. Physics of Wave Phenomena. 2017; 25: 83.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИФфуЗИОННОГО И НЕСТАЦИОНАРНОГО ШНУРОВОГО ТОКОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ХАЛЬКОГЕНИДНОМ СТЕКЛООБРАЗНОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ

Совтус Н.В. Мынбаев К.Д.

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, лаб. фотоэлектрических явлений в полупроводниках,  
Санкт-Петербург, Россия  
E-mail:spnick93@mail.ru*

На сегодняшний день халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП) представляют большой интерес из-за наблюдающегося в них эффекта памяти: явления, при котором полупроводник может переходить многократно из состояния с высоким электрическим сопротивлением в состояние с низким сопротивлением [1]. Благодаря этому свойству, ХСП могут использоваться в качестве носителей информации и в скором времени сменить нынешнее поколение носителей памяти Flash Nand. Однако при изучении электрофизических характеристик ХСП неминуемо приходится столкнуться со шнурованием тока — процессом собирания протекающего тока в узкой области [2],[3]. Поскольку плотность тока в образующемся канале многократно возрастает, это может привести к необратимому пробое полупроводника. Знание как можно большего количества характеристик шнурового тока является необходимым при проектировании как элементов памяти на основе ХСП, так и полупроводниковых тиристоров, поскольку неоднородное распределение тока может повлечь за собой разрушение системы.

В рамках представляемой работы нами была разработана простая аналитическая модель для описания температуры шнурового тока с учётом зависимости от времени и координаты, а также оценен масштаб возникающего при этом диффузионного тока, перпендикулярного шнуровому. Параметры для решения уравнения теплопроводности в ХСП были взяты для плёнки толщиной 1 мкм системы GST (Ge-Sb-Te), считающейся наиболее перспективной при создании элементов памяти [4]. Результатом решения стала функция, описывающая распределение тепла в цилиндрическом полупроводнике при постоянном электрическом поле, как для однородного нагрева, так и для неоднородного нагрева по координате (шнур тока). Уже при временах порядка 1 мкс распре-

деление температуры можно считать стационарным, она при этом убывает экспоненциально в зависимости от расстояния от центра. Было показано, что диффузионный ток не способен внести какой-либо весомый вклад в разрушение шнурового тока, так как максимальная величина диффузионного тока не превышает единиц наноампер и на несколько порядков ниже величины тока в шнуре, которая составляет сотни микроампер. Таким образом, было установлено, что возникновение боковых каналов токового шнура, грозящих материалу повреждениями, крайне маловероятно.

### Литература

1. M. Nardone, M. Simon, I.V. Karpov, V.G. Karpov. J. Appl. Phys. 112 (2012) 071101.
2. Б.Л. Гельмонт, К.Д. Цэндин. ФТП 10 (1976) 1119.
3. N. Bogoslovskiy, K. Tsendin. Sol.State Electron. 129 (2017) 10.
4. G.W. Burr, M.J. Brightsky, et al. IEEE J. Em. Sel. Top. C. 6(2) (2016) 146.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОТВЕРДЫХ/МАГНИТОМЯГКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Тааев Т.А., Хизриев К.Ш., Муртазаев А.К., Хизриев Ш.К., Исаева М.М.

*ИФ им. Х.И. Амирханова Дагестанского НЦ РАН, Махачкала, Россия*

*E-mail: taaev89@mail.ru*

Впервые изготовление магнитотвердых/магнитомягких гетероструктур было предложено в работе Кнеллера и Хавига 1991 году [1]. Такие материалы получили название обменно-связанных или обменно-упругих магнитов. Благодаря обменному взаимодействию между магнитомягким слоем, характеризующимся большим значением намагниченности насыщения, и магнитотвердым слоем, обладающим анизотропией типа «легкая ось», данные структуры открывают возможность для увеличения энергетического произведения  $(BH)_{max}$ , и в них возникает ряд необычных явлений, таких как формирование во внешнем магнитном поле одномерной гетерофазной спиновой пружины [2]. Также большие надежды возлагаются на магнитотвердые/магнитомягкие гетероструктуры в свете их практического применения: из-за возможности интегрирования в различные электронные устройства.

Для исследования магнитных свойств магнитотвердых/магнитомягких гетероструктур под действием внешнего магнитного поля была использована модель [2-5], обобщающая стандартную XY-модель. Магнитные моменты атомов магнитомягкого и магнитотвердого слоев расположены в узлах простой кубической решетки.

Гамильтониан модели был представлен в виде:

$$H = -\frac{1}{2} \sum_{i,j} J(S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y) - \sum_i K(S_i^x)^2 - g\mu \sum_i (H_0^x S_i^x + H_0^y S_i^y) \quad (1)$$

где первая сумма учитывает обменное взаимодействие каждого магнитного атома с ближайшими соседями внутри слоев с обменов  $J = J_{hard}$  и  $J = J_{soft}$  в магнитотвердом и магнитомягком слоях соответственно, и межслойное взаимодействие с параметром  $J = J_{int}$ ; вторая сумма учитывает вклад анизотропии в энергию системы,  $K = K_{hard}$  и  $K = K_{soft}$  — соответственно константы анизотропии магнитотвердого и магнитомягкого слоев; третья сумма — вклад внешнего магнитного поля в энергию системы,  $g \approx 2$  — фактор Ланде,  $\mu$  — магнетон Бора,  $H_0^{x,y}$  — проекции внешнего магнитного поля  $\mathbf{H}_0$ ,  $S_i^{x,y}$  — проекции спина  $\mathbf{S}_i$ , локализованного на узле  $i$ ,  $|\mathbf{S}_i| = 1$ .

Расчеты проводились стандартным алгоритмом Метрополиса метода Монте-Карло для систем с линейными размерами  $Lx \times Ly \times Lz$  при температуре  $T$  намного ниже  $T_c$  [2]. По осям  $x$  и  $y$  линейные размеры системы были фиксированы ( $Lx = Ly = 50$ ), а по оси  $z$

принимали различные значения, в зависимости от толщины магнитотвердого и магнитомягкого слоев.

Мы исследовали полевые зависимости общей намагниченности, намагниченности магнитотвердого и магнитомягкого слоев модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя, а также их продольных и поперечных составляющих. Изучили влияние толщины магнитотвердого и магнитомягкого слоев на процессы перемагничивания монослоев для данной модели.

Кроме того, нами было исследовано влияние на процессы перемагничивания значений внутрислойного обменного взаимодействия магнитотвердого  $J_h$ , магнитомягкого  $J_s$  слоев и межслойного обменного взаимодействия  $J_i$ . Мы показали, что поведение нашей модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя во внешнем магнитном поле хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями. Впервые получили фазовые диаграммы магнитного бислоя в зависимости от значений обменных параметров.

Для магнитотвердых/магнитомягких гетероструктур существуют два характеристических значения внешнего магнитного поля  $H_{ex}$  и  $H_{irr}$ . Величина  $H_{ex}$  — значение магнитного поля, при котором магнитные моменты атомов магнитомягкого слоя начинают вращаться под воздействием внешнего магнитного поля, как в стенке Блоха. Чем выше значение  $H_{ex}$ , тем более выпуклая будет кривая размагничивания и, соответственно, тем больше будет значения энергетического произведения  $(BH)_{max}$ .  $H_{irr}$  — критическое значение магнитного поля, выше которого спиновая пружина разрушается, и все магнитные моменты атомов становятся параллельны направлению внешнего магнитного поля. Участок на кривой перемагничивания в интервале  $H_{ex} \leq H_0 \leq H_{irr}$  является обратимым, и на этом участке образуется спиновая пружина.

На рис. 1. приведены кривые перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя при различных значениях обменного параметра магнитомягкого слоя  $J_{soft}$ . Значения обменных констант магнитотвердого слоя и межслойного взаимодействия принимали фиксированные значения  $J_{hard} = 0.4$  и  $J_{int} = 0.6$ , соответственно.

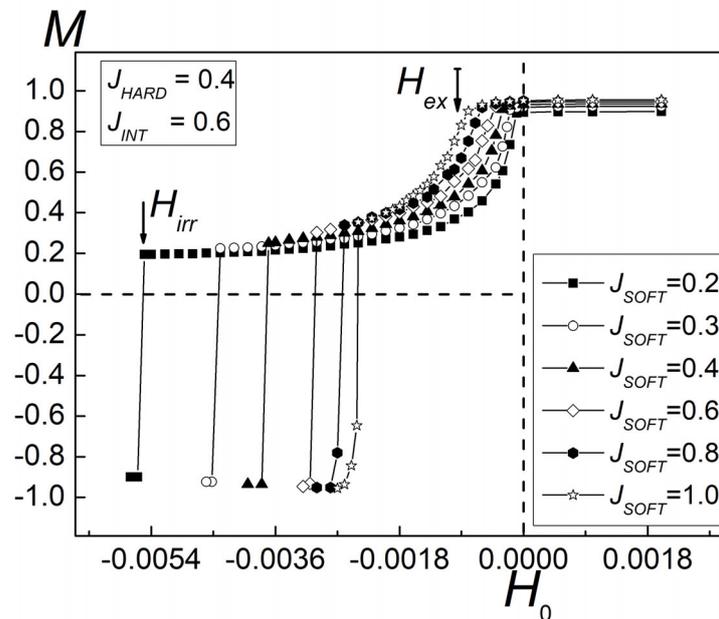


Рис. 1. Кривые перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя при различных значениях константы обменного параметра  $J_{soft}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-32-00526)

### Литература

1. Kneller E. F., Hawig R. The exchange-spring magnet: a new material principle for permanent magnets // IEEE Trans. Magn. 1991. Vol. 27. p. 3588–3600.

2. Тааев Т.А., Хизриев К.Ш., Муртазаев А.К. Исследование процессов перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя методом Монте-Карло // ЖЭТФ. 2017. Т. 151. С. 1084–1091.
3. Тааев Т.А., Khizriev K.Sh., Murtazaev A.K., Uzdin V.M. Investigation of critical phenomena of the hard/soft magnetic bilayer model by the Monte-Carlo method // J. Alloys and Comp. 2016. Vol. 678. p. 167–170.
4. Тааев Т.А., Khizriev K.Sh., Murtazaev A.K. Thermodynamic properties of a hard/soft-magnetic bilayer model // ЖЭТФ. 2016. Vol. 122. p. 883–889.
5. Тааев Т.А., Khizriev K.Sh., Murtazaev A.K., Uzdin V.M. Magnetization reversal of hard/soft magnetic bilayer // J. Alloys and Comp. 2019. Vol. 785. p. 1253–1256.

## ВИЗУАЛЬНЫЙ КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

Тинтул М.А.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

*E-mail: maksim.tintul@mail.ru*

Метод Монте-Карло используется во многих задачах физики, химии, экономики и т.д. Он предполагает использование последовательности случайных чисел. Однако нахождение источников настоящих случайных чисел и их реализация на ЭВМ является крайне трудной задачей, поэтому вместо них используются псевдослучайные числа - последовательности чисел, элементы которых почти независимы друг от друга и подчиняются заданному распределению. Возникает вопрос о правомерности использования псевдослучайных чисел вместо чисел случайных. К решению этого вопроса можно подходить как с теоретической стороны, так и эмпирической.

Теоретическое исследование генераторов псевдослучайных чисел (ГПСЧ) в большинстве случаев включает определение его периода и доказательство равномерности распределения генерируемых случайных чисел на периоде. Под равномерностью обычно имеют в виду прохождение ГПСЧ через все его возможные состояния по одному разу в пределах одного периода. Обычно считается, что чем длиннее период, тем лучше статистические свойства ГПСЧ. Однако на практике используется начальный сравнительно небольшой отрезок периода. При этом даже если на всем периоде доказана хорошая равномерность, это не гарантирует хорошей равномерности на начальном участке.

Существует ряд формальных критериев качества псевдослучайных чисел [3–5]. Однако эти критерии являются опосредованными и не проверяют непосредственно равномерность распределения. Поэтому формальное прохождение этих критериев не гарантирует хорошие статистические свойства ГПСЧ. Мы предлагаем простой визуальный критерий качества. Он заключается в следующем. Пусть  $\{x_i\}$  и  $\{y_i\}$  — наборы равномерно распределенных ПСЧ одинаковой длины. Набросаем точки с координатами  $(x_i, y_i)$  в единичный квадрат. Если точки покрывают квадрат без сгущений и «проплешин», то последовательность можно с хорошей точностью считать равномерной. В качестве количественной характеристики качества можно использовать отношение площади проплешин ко всей площади прямоугольника.

Для генерирования равномерно распределенных ПСЧ широко используется линейный конгруэнтный метод, предложенный Д. Г. Леммером в 1949 году [6]. Напомним суть этого метода. Очередное псевдослучайное число  $X_{n+1}$  вычисляется через предыдущее  $X_n$  по правилу

$$X_{n+1} = (a X_n + c) \bmod m,$$

где  $m$  — натуральное число,  $m \geq 2$ ;  $a$ -множитель ( $0 \leq a < m$ );  $c$ -приращение ( $0 \leq c < m$ );  $X_0$  — начальное значение ( $0 \leq X_0 < m$ ). Линейная конгруэнтная последовательность, определенная числами  $m, a, c$  и  $X_0$  имеет период, не превышающий  $m$ . При этом длина периода равна  $m$  тогда и только тогда, когда:

1. Числа  $c$  и  $m$  взаимно простые;
2.  $b = a - 1$  кратно  $p$  для каждого простого  $p$ , являющегося делителем  $m$ ;
3.  $b$  кратно 4, если  $m$  кратно 4.

Линейный конгруэнтный метод реализован во многих языках программирования (в частности, C/C++). Мы применили предложенный визуальный критерий качества к

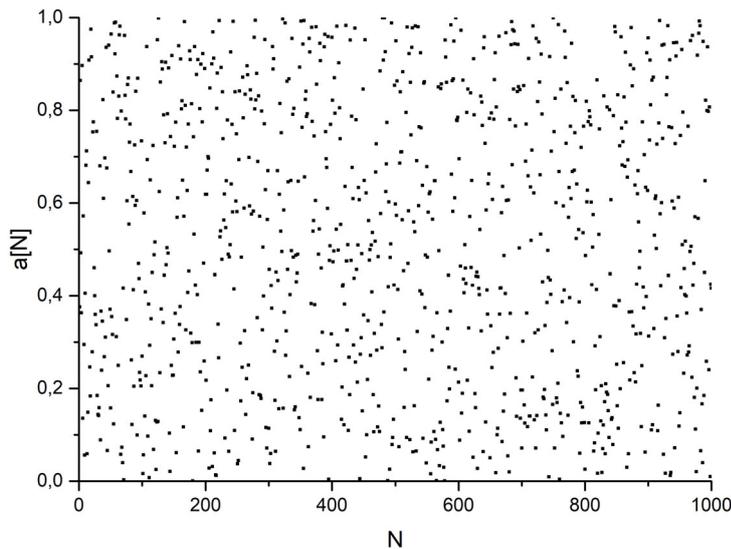


Рис. 1.

этой реализации линейного конгруэнтного метода. Результаты приведены на рис. 1. На них изображены зависимости псевдослучайного числа  $a_n$  от его номера  $N$  для  $N = 1000$ . Из графиков видно, что точки не равномерно покрывают всю координатную плоскость, есть области сгущения точек, а есть "белые пятна" — области, где точек практически нет. Таким образом, равномерность данной последовательности не очень хорошая.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-01-00175.

Научные руководители: А.А. Белов, Н.Н. Калиткин

### Литература

1. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М. 1973.
2. Е.А. Цветков, Эмпирическое исследование статистических свойств некоторых генераторов псевдослучайных чисел // Матем. моделирование, 2011, том 23, № 5, р. 81–94.
3. The Marsaglia Random Number CDROM including the Diehard Battery of Tests of Randomness [Электронный ресурс]. — URL <http://stat.fsu.edu/pub/diehard/>
4. L'Ecuyer P. TestU01: A C library for empirical testing of random number generators / P. L'Ecuyer, R. Simard // ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), v. 33, issue 4, August 2007.
5. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications / Rukhin, A., Soto J., Nechvatal. J. — National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 800-22, Revision 1, Revised: August 2008.
6. URL [https://ru.wikipedia.org/wiki/Линейный\\_конгруэнтный\\_метод](https://ru.wikipedia.org/wiki/Линейный_конгруэнтный_метод)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ЦЕПИ ЧУА

Трифонов А.С., Бутковский О.Я.

ВГУ им А.Г и Н.Г Столетовых, ИПМФУИ, Владимир, Россия

E-mail: [Antrser@yandex.ru](mailto:Antrser@yandex.ru) [OYButkovskiy@fa.ru](mailto:OYButkovskiy@fa.ru)

Одним из малоизученных явлений в динамике систем с хаотическим поведением является явление перемешивания в фазовом пространстве. В работах [1,2] на основе

разработанных алгоритмов вычисления локальной степени перемешивания и скорости  $M(t)$  перемешивания была показана связь степени перемешивания с временем предсказуемости и степенью хаотичности. В работе [3] установлена связь степени перемешивания и Колмогоровской энтропией. В данной работе с помощью программы в системе Matlab проведены исследования с целью установления связи динамики степени перемешивания при бифуркационных переходах в особенности в точках бифуркаций, которые по Хакену соответствуют фазовым переходам. Исследования проводились на моделях Стюарта–Ландау[4] и системе Чуа.

Алгоритмы разрабатывались из математического определения понятия перемешивания которое можно определить следующим образом [1]: для этого рассмотрим аттрактор  $G$  некоторой хаотической системы, на котором задан оператор эволюции системы  $S(G)$  и инвариантная мера  $\mu$ . Выберем на аттракторе  $G$  две произвольные области  $B$  и  $W$ . Отношение меры точек из области  $B$ , которые через  $n$  итераций оператора эволюции  $S$  попали в область  $W$  по отношению к мере самой области  $W$  можно записать следующим образом:

$$D_n = \frac{\mu(S^n(B) \cap W)}{\mu(W)} \quad (1)$$

Оператор  $S$  является перемешивающим, если при  $n \rightarrow \infty$  значение  $D_n$  не зависит от конкретного выбора области  $W$  а определяется отношением  $\mu(B)/\mu(G)$ .

В качестве меры степени перемешивания в системе, меры ее хаотичности, используют относительную метрическую энтропию, учитывающую добавку к энтропии Колмогорова системы без шума [2,3], которая тем больше, чем больше интенсивность шумового воздействия.

Для проверки реализованного алгоритма рассматривается явление перемешивания для модельной системы Лоренца-Хакена. Исследовалась связь скорости перемешивания и управляющего параметра, связанного с накачкой. Показан рост степени перемешивания с ростом накачки. Получено, что на зависимости кривой скорость перемешивания – уровень накачки наблюдается провал в области начала генерации, что соответствует по Г.Хакену фазовому переходу в лазерах (рисунок 1)[4].

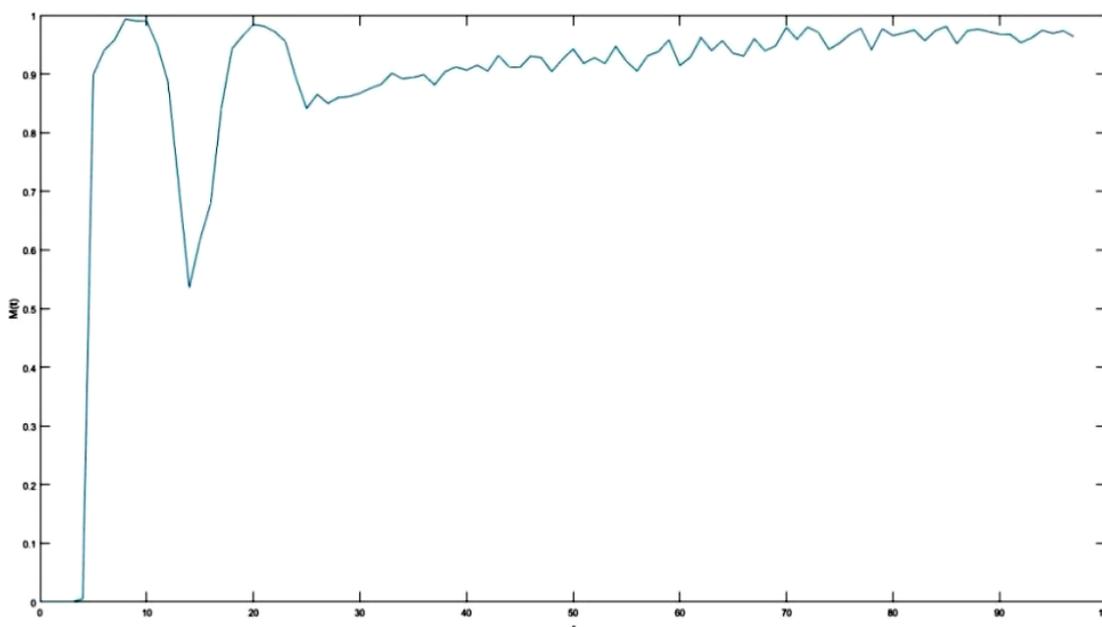


Рис. 1. Зависимость средней степени перемешивания  $M(t)$  от параметра накачки  $r$ .

Другим объектом моделирования была выбрана система Чуа [5]. Интерес к данной модели вызван сложностью динамики в фазовом пространстве и возможностью создания реального электронного аналога модели [Письма в ЖТФ Пономаренко].

В результате была проведена проверка разработанных алгоритмов вычисления степени перемешивания хаотических систем и показано что в точках бифуркаций происходит резкое уменьшение степени перемешивания (провалы) (рисунок 2).

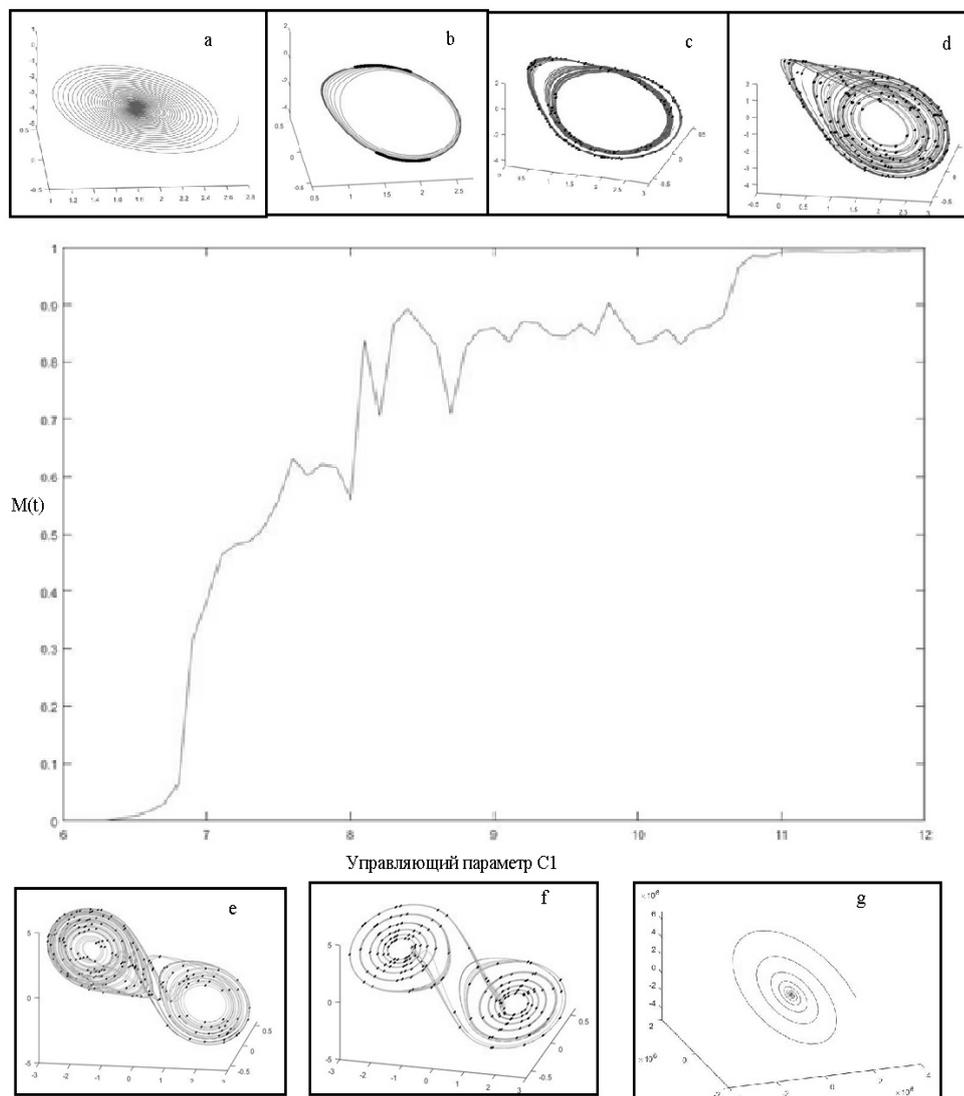


Рис. 2. Зависимость средней степени перемешивания от управляющего параметра  $C1$ ; а) устойчивая точка равновесия  $C1 = 6.5$ ,  $M(t) = 0$ ; б) цикл периода 1  $C1 = 7.1$ ,  $M(t) = 0.46$ ; в) цикл периода 2  $C1 = 8$ ,  $M(t) = 0.56$ ; д) аттрактор Рёсслера  $C1 = 8.1$ ,  $M(t) = 0.84$  е) аттрактор типа double scroll  $C1 = 8.3$ ,  $M(t) = 0.87$ ; ф) аттрактор типа double scroll  $C1 = 8.7$ ,  $M(t) = 0.71$ ; г) фазовая траектория стремится к бесконечности  $C1 = 10.7$ ,  $M(t) = 0.96$ . На фазовых портретах точками указаны места, где степень перемешивания больше 0.5.

### Литература

1. Логунов М.Ю., Бутковский О.Я.. Перемешивание и ляпуновские показатели хаотических систем. / Журнал технической физики, 2008, том 78, вып. 8.
2. Логунов М.Ю., Бутковский О.Я.. Оценка скорости перемешивания в хаотических системах / Изв. вузов «ПНД», т. 16, № 4, 2008.
3. Анищенко В.С., Астахов С.В. Относительная энтропия как мера степени перемешивания зашумленных систем Письма в ЖТФ, 2007, том 33, вып 21., С. 1–8.
4. Дни науки студентов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых : сб. материалов науч.-практ. конф. 12 марта–6 апр. 2018 г., г. Владимир [Электронный ресурс] / Владим. гос.ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2018. – 3907 с. – ISBN 978-5-9984-0891-5, стр.1226–1236.
5. Бугаевский М.Ю., Пономаренко В.И. Исследование поведения цепи Чуа. Учебно-методическое пособие, Саратов: Издательство ГосУНЦ «Колледж», 1998. 29 с.

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ ЧЕРНОГО МОРЯ

Фаршакова И.И.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия  
E-mail: irinafarshakova@gmail.com

**Введение.** Мониторинг атмосферных и морских течений по космическим изображениям лежит в основе методов предсказания погоды, образования тайфунов [1].

**Актуальность:** Разработка математических моделей локализации атмосферных и морских вихревых течений по космическим изображениям.

Аналізу вихревых течений в Черном море посвящено много публикаций [1]. В качестве исходного возьмем изображение Черного моря со спутника NASA, см. Рис. 1. Течение у запада Крыма разделяется на течение северо-западного направления (к Одессе) и юго-западного направления (к Варне), которое и называется Крымским течением.

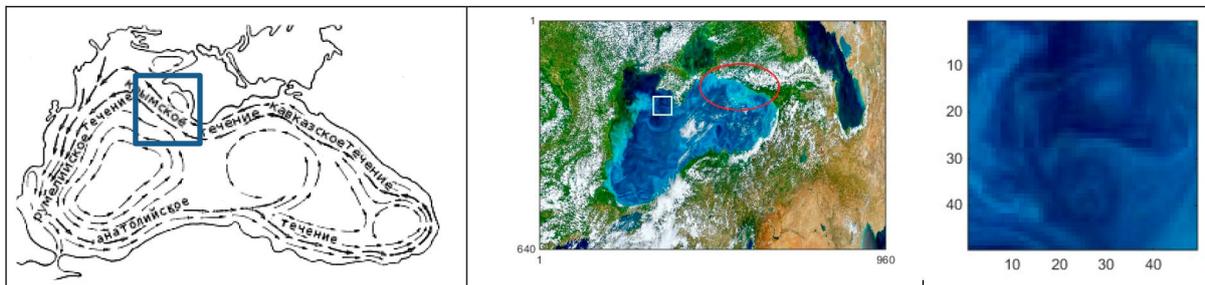


Рис. 1. Карта течений Черного моря, снимок NASA и выделенный В (blue) участок Крымского течения с вихрем.

### Общая схема метода ложного вихря.

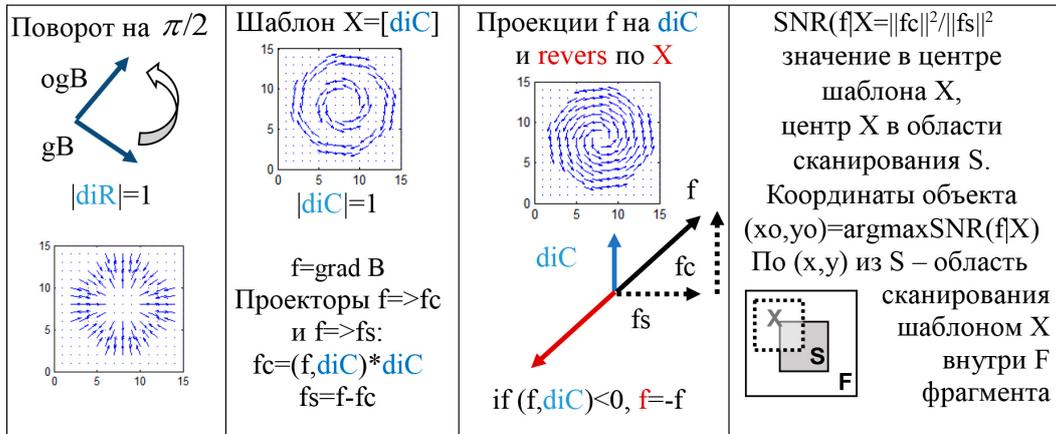


Рис. 2. Операции над векторными полями, шаблоны, проекции, функция SNR.

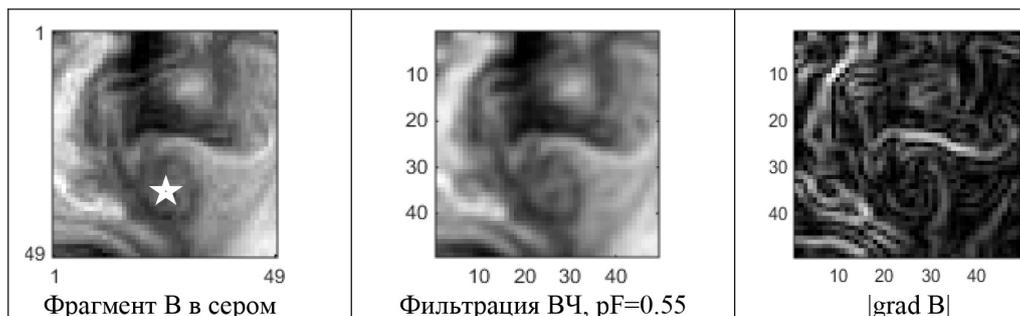


Рис. 3. Обнуление Высоких Частот и вычисление градиента

В основе метода лежит Конечно Мерная Теорема Отсчетов (КМТО) [2], которая позволяет вычислять градиенты от массивов чисел  $f=grad\ B$ . В данной реализации мы

использовали шаблон направлений  $\text{diR}$  – направления по радиусу, поэтому поворот векторов на  $\pi/2$  (см. Рис. 2 в Общей схеме ... слева) нам не потребовался.

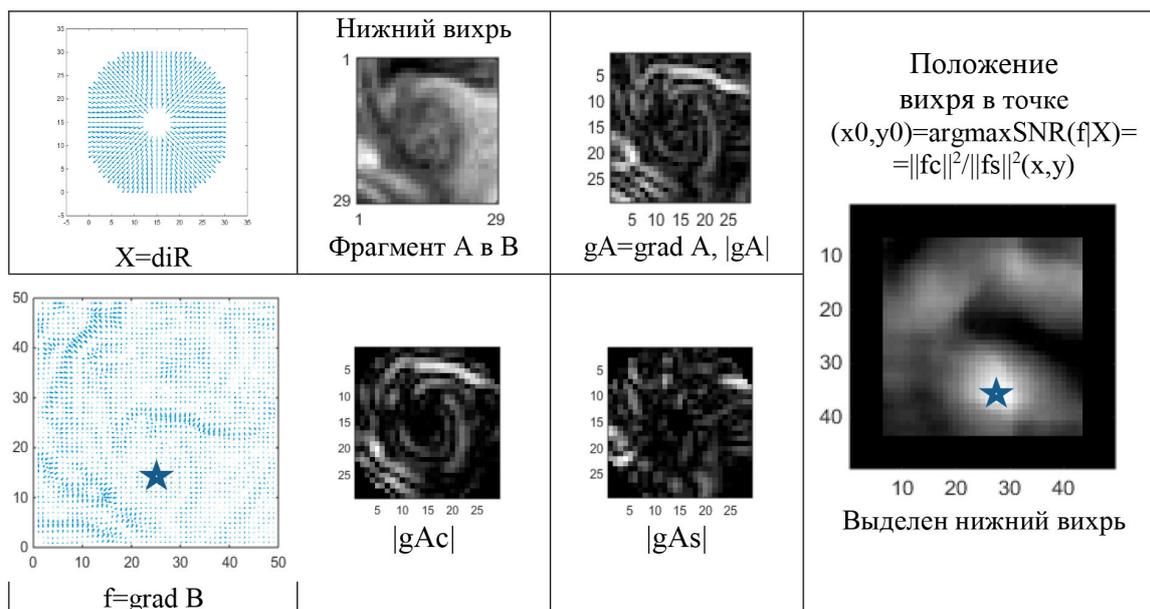


Рис. 4. Решение задачи локализации вихря в Крымском течении Черного моря

**Заключение:** Представлена реализация метода ложного вихря [2,3] к решению актуальной задачи для автоматизации мониторинга атмосферных и морских вихревых течений по космическим изображениям Земли [1].

Реализация метода - основа дипломной работы, задача поставлена научным руководителем старшим преподавателем Е.Н. Терентьевым на кафедре ММИ.

#### Литература

1. Гинзбург А.И., ...//Антициклонические вихри в глубоководной восточной части Черного моря летом-осенью 1999 г., Исследование Земли из космоса, 2001. №5.
2. Е.Н. Терентьев, Н.Е. Терентьев, И.И. Фаршакова. Конечномерные теоремы отсчетов в моделировании вихрей. Труды школы-семинара <<Волны-2017>>. Математическое моделирование в радиофизике и оптике, 2017
3. Е.Н. Терентьев, N. E. Shilin–Terentyev, И. Н. Приходько, И. И. Фаршакова. Векторные операции в точной индикации локальных объектов в изображениях. Ученые записки физического факультета Московского Университета, (5):1850308–10, 2018.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СТАДИЙНОГО СЖИГАНИЯ С ВВОДОМ ВТОРИЧНОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Хабарова М.А., Тринченко А.А.

*С-Пб ПУ Петра Великого, институт энергетики и транспортных систем,  
Санкт-Петербург, Россия*

*E-mail: maria.khabarova.politeh@yandex.ru*

Экологическая безопасность работы угольных электростанций определяет необходимость модернизации существующих котельных агрегатов, внедрения современных методов повышения экологических показателей реконструируемых угольных котлов. Вопросу моделирования топочных процессов при различных технологиях сжигания твердого топлива посвящено множество работ [1–5 и др.]. Существует ряд конструкций, позволяющих снизить эмиссию токсичных компонентов дымовых газов, среди ко-

торых наименьших капитальных затрат требует метод стадийного сжигания с вводом вторичного топлива.

На основе математического моделирования физико-химических процессов перехода химически связанной энергии топлива в тепловую при его горении [1], проведено исследование топочного процесса стадийного сжигания с вводом вторичного топлива применительно к энергетическому котлу, работающему на пыли донецкого каменного угля марки Д. Для решения задачи выполнены расчеты уровня температур дымовых газов по высоте котла и аэродинамики топочной камеры. Результаты обработки гранулометрических характеристик сжигаемого угля, позволили решить уравнение движения горящих частиц с учетом генерации и разложения оксидов азота на вторичном топливе. С использованием современных подходов диффузионно-кинетической теории горения разработаны алгоритм, математическая модель и компьютерная программа расчета горения твердого топлива полифракционного состава с учетом стадийности сжигания и ввода вторичного топлива. Результаты работы подтверждают эффективность ввода вторичного топлива и могут быть использованы как при реконструкции существующих агрегатов, так и на стадии проектирования новых установок.

### Литература

1. Kadyrov M.R., Khabarova M.A., Khabarov A.A., Trinchenko A.A. Simulating combustion processes based on digital technologies // SHS Web of Conferences, Vol. 44, 00043 (2018) doi.org/10.1051/shsconf/20184400043.
2. Trinchenko A.A. Research of nitrogen oxides generation during low-temperature swirl fuel combustion // MATEC Web of Conferences, Vol. 193, 03054 (2018) doi.org/10.1051/mateconf/201819303054.
3. Хабарова М.А., Кадыров М.Р. Модель процесса горения твердого топлива в пылеугольном факеле // Нефть и газ - 2018. сборник трудов 72-й Международной молодежной научной конференции. 2018. С. 306-313.
4. Хабарова М.А., Кадыров М.Р., Тринченко А.А., Урванцев В.Г., Парамонов А.П. Численное исследование экологических показателей метода низкотемпературного вихревого сжигания // Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Лучшие доклады. 2018. С. 3–8.
5. Numerical research of reburning-process of burning of coal-dust torch Trinchenko A., Paramonov A., Kadyrov M., Koryabkin A. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 19. Сер. "Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport, EMMFT 2017" 2017. С. 012012.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ МЕЖЧАСТИЧНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ

Хабибуллин Р.А.

*Казанский (Приволжский) ФУ, институт физики, Казань, Россия*

*E-mail: [roman.khabibullin@outlook.com](mailto:roman.khabibullin@outlook.com)*

Как известно, для воспроизведения практически всех физических свойств многочастичной системы требуется знать ее гамильтониан или часть гамильтониана, которая определяет характер межчастичного взаимодействия. Для простых модельных систем потенциал взаимодействия обычно является известным. К таким системам относятся инертные газы, где межчастичное взаимодействие воспроизводится потенциалом Леннарда-Джонса, зарядовые системы с межчастичным взаимодействием кулоновского типа и т.д. Однако для подавляющего большинства реальных физических систем приходится решать задачу нахождения энергии взаимодействия частиц.

Существует большое разнообразие различных подходов для решения данной задачи. В большинстве этих подходов потенциал конструируется на основе известных экс-

периментальных данных по структуре системы. К таким методам относится реверсивное Монте-Карло моделирование и его модификации. Однако при использовании этих методов возникают сложности, связанные с усложнением расчетов в случае, если система характеризуется сложной, неупорядоченной структурой (как, например, в случае молекулярных жидкостей и аморфных твердых тел).

В настоящей работе предлагается оригинальный метод по восстановлению потенциалов межчастичного взаимодействия, который реализуется на основе эволюционных алгоритмов [1]. В качестве входной информации используются экспериментальные данные по дифракции нейтронов и рентгеновских лучей [2]. В частности, в рамках данного метода удается получить интересные результаты для конденсированных многочастичных систем, где межчастичное взаимодействие носит преимущественно сферически-симметричный характер. Также нами рассматривается задача о воссоздании потенциала взаимодействия молекул воды (жидкая фаза вблизи плавления) [3, 4].

Работа поддержана грантом РФФИ 18-02-00407.

### Литература

1. R. Storn, K. Price, *Journal of Global Optimization* 11: 341 (1997).
2. A.K. Soper, *Chemical Physics* 258 121–137 (2000).
3. R.E. Ryltsev, N. M. Chtchelkatchev, and V. N. Ryzhov, *Phys. Rev. Lett.* 110, 025701 (2013).
4. A.V. de Oliveira, G. Franzese, P. A. Netz, M. C. Barbosa, *J. Chem. Phys.* 128, 064901 (2008).

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В АЭРОТЕНКЕ ПРИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД

Химченко Д.Г.

*Донецкий НУ, физико-технический факультет, Донецк, ДНР  
e-mail: darya.him4enko@yandex.ua*

В современных условиях развития науки и техники комплексное исследование объекта становится возможным благодаря новым методам и технологиям научных исследований, одним из которых является применение ЭВМ в математическом моделировании. Математическое моделирование позволяет прогнозировать необходимые процессы с высокой точностью за сравнительно короткое время, уменьшая финансовые и технические затраты [1].

Так, с помощью математического моделирования стало возможным изучение влияния инженерных параметров на происходящие в аэротенке гидродинамические процессы. Аэротенк является основным сооружением, в котором происходит биологическая очистка сточных вод. Такая очистка подразумевает несколько этапов, которые характеризуются использованием различных процессов. Биологический этап является одним из важнейших, так как позволяет удалить из жидкости растворённые и органические элементы. Гидродинамический этап включает применение механических или пневматических устройств для лучшего растворения кислорода в сточных водах и обеспечения их замкнутой циркуляции по всему объему. Оптимизация двух данных этапов позволяет достигнуть максимальной окислительной мощности аэротенка [2].

Целью настоящей работы является разработка математической модели движения газожидкостного потока в аэротенке с учетом влияния газовой фазы. Для этого рассматривается цилиндрическая область, соответствующая геометрическим параметрам натурального аэротенка, заполненного водой (рис.1). В этот объем устанавливается цилиндрическая колонна, жидкость в которой отделена от жидкости в объеме боковыми гранями.

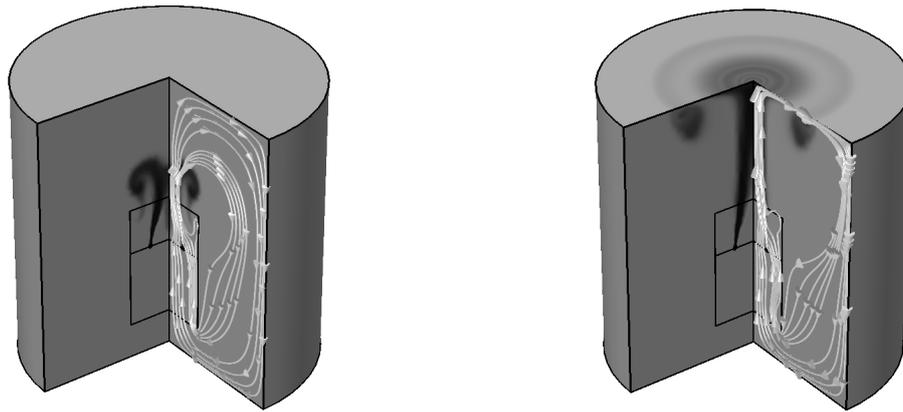


Рис. 1. Амплитуда скорости газовых пузырьков и линии тока жидкости через 6 и 12 секунд после начала.

При решении задачи предполагается: процесс нестационарный; жидкость считается изотермической и несжимаемой; физические характеристики считаются однородными и изотропными; процессы в установке считаются симметричными относительно оси; задача решается в двумерной плоскости (2D) [2].

Для построения компьютерной модели используются уравнения [3]:

$$\frac{\partial v_{1r}}{\partial r} + \frac{\partial v_{1z}}{\partial z} + \frac{v_{1r}}{r} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_{1r}}{\partial t} + v_{1r} \frac{\partial v_{1z}}{\partial r} + v_{1z} \frac{\partial v_{1r}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \nabla^2 v_{1r} - \frac{v_{1r}}{r^2} \right) - \frac{1}{\rho} F_{12r}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_{1z}}{\partial t} + v_{1r} \frac{\partial v_{1z}}{\partial r} + v_{1z} \frac{\partial v_{1r}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 v_{1z} - \frac{1}{\rho} F_{12z}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (v_{2r} r N)}{\partial r} + \frac{\partial (v_{2z} N)}{\partial z} = f_N, \quad (4)$$

$$v_{2r} = v_{1r} + v_{21r}, v_{2z} = v_{1z} + v_{21z}, \quad (5)$$

где  $v_{1r}, v_{1z}, v_{21r}, v_{21z}, v_{2r}, v_{2z}$  — проекции на оси  $r$  и  $z$  векторов скорости течения жидкости, скорости движения газовой фазы относительно жидкости и скорости переноса газовой фазы в объеме азотенка;  $p$  — давление, Па;  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>,

$N$  — количество пузырей в единице объема, 1/м<sup>3</sup>;  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}$ .

Приведенная сила трения  $\bar{F}_{12}$  может быть определена из соотношения  $\bar{F}_{12} = NC_\mu S \frac{\rho_1 v_{12}^2}{2} \frac{\bar{v}_{12}}{v_{12}}$ ; здесь  $C_\mu$  — коэффициент гидродинамического сопротивления;

$S$  — площадь поперечного сечения пузыря;  $\bar{v}_{12} = v_{21} \frac{\bar{g}}{g}$ .

Взаимодействие жидкой и газовой фаз описывается источниковым членом вида:

$$f_N = \frac{Q}{\frac{4}{3} \pi r^3 V_N}, \quad (6)$$

где  $Q$  — объемный расход газа;  $r$  — радиус пузырька;  $V_N$  — объем зоны, в которую поступает газ. Для области вне зоны попадания пузырьков  $f_N = 0$ .

Численное моделирование проводилось с помощью пакета Comsol Multiphysics 5.4 в модуле вычислительной гидродинамики CFD.

Эффективность биореакторов зависит от продолжительности контакта пузырьков воздуха с жидкостью. Качественно построенная модель позволит определить гидродинамические параметры потока жидкости в аэротенке, а также интенсивность аэрации для обеспечения необходимых скоростей на входе в аэрационно-циркуляционную колонну, а полученные расчетные данные можно использовать при создании моделей промышленных очистных сооружений биологической очистки сточных вод.

### Литература

1. Пахомова Н.А. Методика формирования понятия “Вычислительный эксперимент / Н.А. Пахомова. – М.: Наука, 2001. – 176 с.
2. Bezkrovna, M. Recommendation of sewage treatment facilities and improvement of their efficiency / M. Bezkrovna, O. Kazak, A. Luchyna // *Interdisciplinary Integration of Science in Technology, Education and Economy. Monograph: edited by Shalapko J. and Zołowski B. Poland, 2013. P. 122–127.*
3. Бакакин, А.В. Математическая модель тепломас-собоменных процессов в ковше при обработке металла инертным газом Текст. / А.В. Бакакин, В.О. Хорошилов, Г.С. Гальперин, В.Е. Кельманов // *Известия ВУЗов. Черная металлургия, 1985. № 9. – С. 51–54.*

## ПОСТРОЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ 1А ГРУППЫ

Цыганков А.А.

*Казанский (Приволжский) ФУ, институт физики, Казань, Россия*

*E-mail: tsigankov.artiom@yandex.ru*

Потенциал межатомного взаимодействия определяет очень многие свойства вещества. Зная его, можно определить теплоёмкость, скорость распространения упругих волн в нём, критическую и тройную точки и так далее. В связи с этим были предложены множество видов потенциалов – таких, например, как Леннард – Джонса, Джугутова, Юкавы. Но оказалось, что они воспроизводят только часть свойств вещества. В нашем случае производится попытка построить потенциал для семейства щелочных металлов 1А группы (натрий, калий, рубидий и цезий). Строится он на основе потенциала Гонзалеза для лития [3], при этом предполагается, что он имеет такую же форму для остальных металлов. Вводятся два параметра: эффективный диаметр атома (его реальный диаметр) и его энергия связи (температура плавления, выраженная в энергетических единицах), по этим параметрам производится масштабное преобразование потенциала для лития для остальных металлов. После чего полученные потенциалы проверяются по следующим критериям: радиальная функция распределения, статический [1, 9] и динамический структурный факторы, скорость звука [2, 4, 5, 6, 7], коэффициент самодиффузии [8]. В результате анализа полученных зависимостей было установлено, что предложенным семейством потенциалов можно описывать с достаточно хорошей точностью статические свойства веществ и часть динамических.

### Литература

1. Галимзянов Б. Н., Мокшин А. В. Молекулярная динамика при структурных трансформациях и фазовых переходах в неупорядоченных системах. Казань, 2017.
2. И.И. Новиков, Ю. С. Трелин, Т. А. Цыганова. Скорость звука в жидком цезии // ТВТ, 1970. вып. 2.
3. L E Gonzalez, D J Gonzalez and J M Lopez. Pseudopotentials for the calculation of dynamic properties of liquids // *J. Phys.: Condens. Matter, 2001.*
4. T. Scopigno, U. Balucani, G. Ruocco and F. Sette. Inelastic x-ray scattering study of the collective dynamics in liquid sodium. // *Physical Review E. 2002, № 65.*
5. A. Monaco, T. Scopigno, P. Benassi, A. Giugni, G. Monaco, M. Nardone, G. Ruocco, and M. Sampoli. Collective dynamics in molten potassium: an inelastic x-ray scattering study. // *The Journal of Chemical Physics. 2004.*

6. J. R. D. Copley, J. M. Rowe. Short-wavelength collective excitations in liquid rubidium observed by coherent neutron scattering. // Physical Review Letters. 1974, № 32.
7. Bodensteiner T. Collective dynamics in liquid cesium near the the melting point // Phys. Rev. A.-1992.-№458.-P.5709-5720.
8. Takamichi Iida, Roderick I. L. Guthrie. The thermophysical properties of metallic liquids. Volume 2: Predictive models. - 2015, P.489–495.
9. <http://res.tagen.tohoku.ac.jp/~waseda/scm/index.html> (База экспериментальных данных Юшио Васеды).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА,  
ИМИТИРУЮЩЕГО УСЛОВИЯ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ,  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОДА ASTEC

Чурилович Д.А.

*НУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований -  
Сосны» НАН РБ, Минск, Республика Беларусь  
E-mail: daracuricdan@gmail.com*

Целью работы является моделирование натурального эксперимента, имитирующего условия протекания тяжелой аварии для реакторов, с использованием интегрального кода ASTEC. Данное программное средство позволяет воспроизвести последовательность тяжелой аварии от первоначальных событий вплоть до выхода радионуклидов за пределы защитной оболочки. Код ASTEC имеет модульную структуру, где каждый из модулей описывает тот или иной набор физических процессов в зоне реактора. При моделировании в данной работе использовался модуль ICARE, способный задать теплогидравлику, учесть передачу тепла между физическими объектами установки, продемонстрировать поведение продуктов деления и конструкционных материалов, механическое поведение системы, также есть возможность учесть химические реакции, протекающие в реакторе [1].

Для моделирования был выбран эксперимент QUENCH-12, который посвящен изучению поведения оболочек топливных элементов, в частности, окисления и охрупчивания, при их перегреве и резком охлаждении, что является одним из возможных вариантов протекания тяжелой аварии с потерей теплоносителя. Также данный эксперимент используется для изучения вопроса генерации водорода. Эксперимент QUENCH-12 примечателен тем, что тестовая установка выполнена для реактора типа ВВЭР.

Экспериментальная установка представляет собой пучок стержней (имитаторы твэлов), 18 из которых нагреваются электрически, а 13 – ненагреваемые. По условиям эксперимента QUENCH-12 происходит разогрев стержней до максимально возможной температуры, а затем резкий залив воды в исследуемый пучок.

В результате эксперимента общее количество образовавшегося водорода составило 58 г. Также в момент залива водой экспериментального пучка наблюдалась максимальная температура на высоте от 850 до 1050 мм, что стало причиной локального плавления оболочки тестовой установки [2].

В интегральном коде ASTEC была построена модель пучка эксперимента QUENCH-12, заданы начальные и граничные условия, учтена парациркониевая реакция.

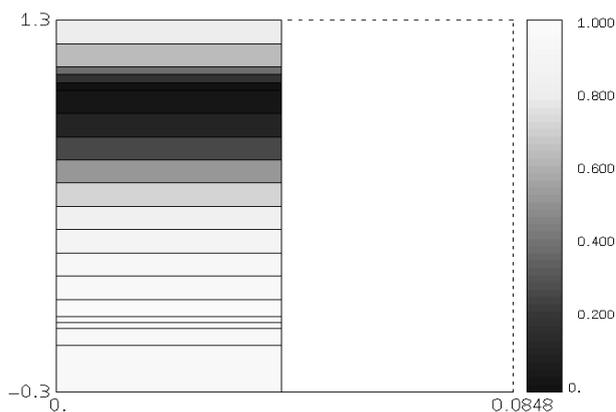


Рис. 1. Распределение циркония в пучке.

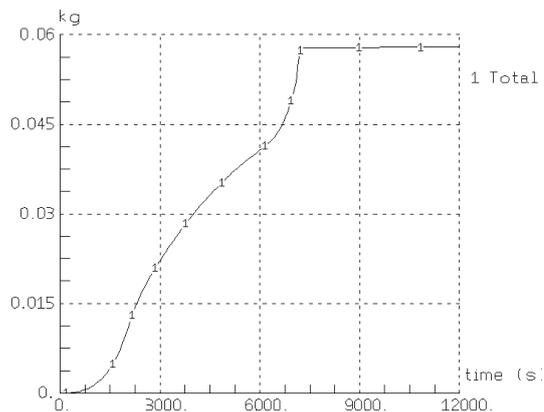


Рис. 2. Общее количество выделившегося водорода.

При моделировании был получен следующий результат распределения циркония по высоте пучка, представленный на рисунке 1. Как видно из данного рисунка, образовалась область с полным отсутствием циркония на оболочке, т.е. это говорит о том, что произошло разрушение оболочки испытательного пучка. Количество образовавшегося водорода составило 57,9 г, что представлено на рисунке 2.

Хорошая согласованность такого важного параметра, как общая генерация водорода за время эксперимента, а также демонстрация наличия разрушения оболочки пучка при моделировании является результатом адекватной работы кода, и, что немаловажно, достаточно хорошо построенной модели. Отсюда можно сделать вывод, что данный код пригоден для изучения вопросов генерации водорода и поведения оболочек в активной зоне при тяжелой аварии с потерей теплоносителя для реакторов типа ВВЭР.

### Литература

1. G. Guillard, C. Seropian, A. Bentaib and others. User's Guidelines for the integral code ASTEC V2.0. Project reference ASTEC-V2/DOC/09-07.
2. J. Stuckert, A. Goryachev, M. Heck. Results of the QUENCH-12 experiment on reflood of a VVER-type Bundle. KIT, Scientific reports FZKA 7307, 2008 -248 p.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ РАССЕЯНИЯ ПРОТЯЖЕННОГО ТЕЛА НА ОСНОВЕ УСЕЧЕННЫХ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Шитикова К.М.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

*E-mail:shitikova.ks@gmail.com*

Нахождение радиолокационных характеристик объектов необходимы в связи как с задачами радиолокации, так и с задачами маскировки объектов, в частности, летательных аппаратов. Одной из основных характеристик рассматриваемых объектов является диаграмма рассеяния [1]. На практике часто требуется получать двухпозиционные диаграммы рассеяния объектов: приёмная и передающая антенны разнесены в пространстве [1]. Для этого можно использовать сканер, предназначенный для измерения поля в ближней зоне с последующим восстановлением поля в дальней зоне [2–4].

В данной работе рассматривается случай использования цилиндрического сканера для определения диаграммы рассеяния. Важным является вопрос минимизации затрат, связанных с измерениями, для этого желательно иметь возможность измерять поле на цилиндрической поверхности, усечённой по угловой переменной [2, 3]. Кроме того, сканер при измерениях не должен создавать дополнительных искажений падающего

поля, поэтому участок поверхности сканирования, на котором сканер располагается между источником и рассеивателем, желательно исключить.

В работе рассматривается модельная задача о восстановлении поля в дальней зоне, рассеянного бесконечным идеально проводящим круговым цилиндром, при помощи значений поля, заданных в ближней зоне на усечённой цилиндрической поверхности. Конфигурация рассматриваемой задачи представлена на рисунке 1.

Как известно [5–8], задачу дифракции на протяжённых телах можно рассматривать как две двумерные задачи для поиска компонент поля  $E_z$  и  $H_z$ , где  $OZ$  — ось декартовой системы координат, направленная вдоль образующей цилиндрического тела. В работе рассматривается задача дифракции полей электрического типа. Обозначим  $E_z = U$ . Тогда решение стационарной задачи дифракции на идеально проводящем круговом цилиндре при временной зависимости  $e^{-i\omega t}$  будет иметь вид [8]:

$$U(r, \varphi) = U_0 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left( -(-i)^n J_n(ka) \right) \frac{H_n^{(1)}(kr)}{H_n^{(1)}(ka)} e^{in\varphi},$$

где  $k = \frac{\omega}{c}$  — волновое число,  $U_0 = e^{-ikx}$ ,  $J_n$  и  $H_n^{(1)}$  — соответственно функции Бесселя и Ханкеля.

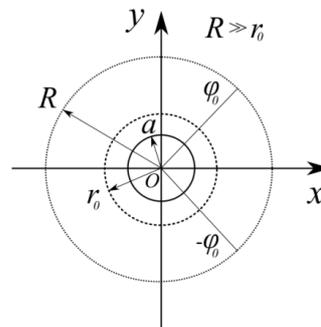


Рис. 4. Конфигурация рассматриваемой задачи

Предположим, что нам известны значения решения для указанной задачи лишь в некотором наборе точек на секторе  $\varphi \in [\varphi_0; 2\pi - \varphi_0]$  круга радиуса  $r_0$ . Задача состоит в отыскании значений поля в дальней зоне — на секторе  $\varphi \in [\varphi_1; 2\pi - \varphi_1]$  окружности радиуса  $R \rightarrow +\infty$ , при условии, что  $\varphi_1 \leq \varphi_0$ . Классический подход к решению таких задач состоит в следующем. Исходя из данных, полученных на поверхности сканирования, строится разложение поля по расходящимся цилиндрическим волнам. Затем диаграмма рассеяния определяется при помощи найденных коэффициентов разложения [2–4]. Однако, в случае использования данных сканирования на усечённой цилиндрической поверхности такой подход даёт приемлемые результаты лишь в случае достаточно больших радиусов этой поверхности [2]. В работе [3] рассматривается способ снижения ошибок, связанных с усечением поверхности, при помощи разложения поля в ближней зоне по специальным образом сконструированному набору функций, ортогональных на участке поверхности сканирования. Далее полученное разложение можно применить для отыскания приближённого значения искомого в классическом случае коэффициентов разложения по цилиндрическим волнам [3]. В работе [3] этот подход применяется к случаю дифракции на диэлектрическом цилиндре. Целью данной работы является применение выводов работы [3] в случае дифракции на идеально проводящем цилиндре. На рис. 2 представлен пример расчётов диаграмм рассеяния двумя способами — классическим и представленным в работе [3]. Нетрудно заметить, что результаты, полученные вторым способом, прекрасно согласуются с данными, полученными прямым вычисле-

нием во всём секторе сканирования, чего нельзя сказать про данные, полученные классическим методом.

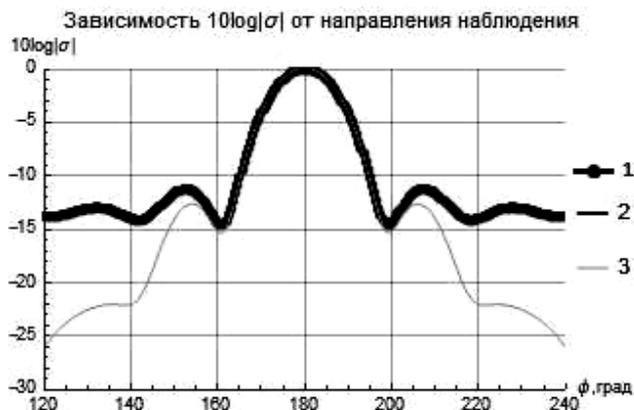


Рис. 5. Пример расчёта поля в дальней зоне. 1 – аналитическое решение, 2 – решение, полученное классическим способом, 3 – решение, полученное способом, представленным в [3]

### Литература

1. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. М.: Наука, 2007.
2. Hansen T.B., Marr R.A., Lammers U.H.W., Tanigawa T.J., McGahan R.V. Bistatic RCS calculations from cylindrical near-field measurements—Part I: Theory //IEEE transactions on antennas and propagation. 2006. Т. 54. №. 12. С. 3846–3856.
3. Kim K. T. Truncation-error reduction in 2D cylindrical/spherical near-field scanning //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2010. Т. 58. №. 6. С. 2153–2158.
4. Бахрах Л. Д. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне. – Изд-во "Наука", Ленинградское отд-ние, 1985.
5. Ильинский А.С., Кравцов В.В., Свешников А.Г. Математические модели электродинамики [Учеб. пособие для вузов]. – Высш. шк, 1991.
6. Свешников А.Г., Могилевский И.Е. Математические задачи теории дифракции. – М.: Физический факультет МГУ, 2010.
7. Галишников Т.Н., Ильинский А.С. Численные методы в задачах дифракции. – МГУ, 1987.
8. Хёнл Х., Мауэ А., Вестпфаль К. Теория дифракции. – 1964.

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Редукция изображений к виду, свойственному измерению распределения прозрачности объекта, при субъективной информации о его разреженности в заданном базисе .....	261
Балакин Д.А.	
Моделирование электропроводности металлических остовковых нанопленок на основе клеточного автомата .....	263
Бухаров Д. Н., Кучерик А.О., Осипов А.В., Скрябин И.О., Новикова О.А.	
Исследование эффективности генетических алгоритмов в задачах многокритериальной маршрутизации полета БПЛА .....	265
Вьюгина А.О.	
Статистический факторный анализ быстродействия алгоритма двумерного случайного поиска .....	265
Григорьев В. И.	
Исследование энергетического спектра в гетероструктурах с квантовыми ямами InGaAs/GaAs.....	266
Хазанова С.В., Дегтярев В.Е., Григорьева Н.Н.	
Алгоритмы составления порядка обслуживания локомотивов в депо.....	267
Гришин Е.М., Галахов С.А.	
Моделирование помех в среде Matlab Simulink .....	268
Краус Д.Г., Гришова Е.А.	
Исследование рассеивающих свойств объектов по имитационной модели .....	269
Горбачев И.В., Краус Д.Г., Гришова М.А.	
Моделирование в среде GEANT результатов экспериментов по ускорению электронов в плотной лазерной плазме.....	271
Заворотный А.Ю.	
Моделирование поведения примесей кислорода и углерода в ядерном нитридном топливе.....	271
Задорожный А.В.	
Особенности математического моделирования разрушения конструкций из различных материалов под действием высокоскоростной гидроабразивной струи.....	273
Илюхина А.А.	
Некоторые особенности применения интеграла Лебега при многопараметрическом анализе решений дифференциальных уравнений .....	274
Калинин В.А.	
Прозрачное моделирование и перспективы безопасного искусственного интеллекта .....	275
Калмыков Л.В.	
Индукцированные однородным сдвигом процессы рекристаллизации в металлических сплавах на основе никеля и титана .....	276
Камалов А.Р.	
Математическое моделирование трехфазного фильтрационного течения при различных методах интерполяции фазовых проницаемостей .....	278
Каюкова А.В.	
Использование нейронной сети в задачах прогнозирования электрических свойств нанокomпозитов слоистой структуры .....	279
Ким Р.П., Корчагин С.А.	
Разработка конструкции виброгасящего цоколя.....	280
Кожевников С. В.	
Математическая модель определения вариаций геометрических характеристик пружины кручения в процессе использования .....	281
Кондрашов В.О.	
Метод оценивания положений зрачков глаз в изображении лица .....	282
Кузнецов И.Д., Морозова А.	
Получение спектральных характеристик АПВVI полупроводников, легированных ионами группы железа, методом прямого матричного анализа .....	283
Курчатов И.С., Булычев Н.А., Колесник С.А., Кустов Е.Ф., Муравьев Э.Н.	
Влияние силы и температуры ветра на формирование нелинейных волн в кольцевом канале.....	285
Лапонин В.С.	

Дифференциальные игры в задаче управления нелинейным неопределенным объектом.....	285
Матвеева Н.А.	
multiplexing in neural networks: Switching between chimera and solitary states.....	287
Mikhailenko M.D., Ramlow L., Jalan S., Zakharova A.	
Моделирование процессов гололедо- и туманообразования на площадке Белорусской АЭС под воздействием влагосодержащих выбросов из градирен.....	288
Михайлюк М.Л.	
Моделирование электромагнитно-акустического преобразователя для бесконтактной дефектоскопии металлических конструкций .....	289
Можайко А.А.	
Исследование фазовых переходов и критических явлений в фрустрированной модели Гейзенберга на объемно-центрированной кубической решетке .....	291
Муртазаев А.К., Рамазанов М.К., Бадиев М.К., Курбанова Д.Р., Муртазаев К.Ш.	
Моделирование нестационарных процессов при исследовании жидких сред методом ядерного магнитного резонанса в слабом поле .....	293
Мязин Н.С., Рукин Е.В.	
Получение аморфного нитинола с пористой структурой быстрым охлаждением перегретого расплава	295
Никифоров Г.А.	
Децентрализованная модель реестра учета товаров для гарантии их подлинности в мультиагентной цепочке поставок на основе технологии блокчейн .....	296
Печеркин А.А.	
Локализация объектов известной формы как ложных вихрей.....	298
Приходько И.Н.	
Исследование влияния облачности небосвода на тепловые потери зданий.....	299
Ранько А.П., Гужов С.В.	
Моделирование систем энергоснабжения автономного электротранспорта.....	302
Сердечный Д.В., Томашевский Ю.Б.	
Световые пули в планарном градиентном волноводе с квадратичной нелинейностью.....	303
Соболев Б.Д.	
Определение параметров диффузионного и нестационарного шнурового токов в цилиндрическом халькогенидном стеклообразном полупроводнике.....	304
Совтус Н.В. Мынбаев К.Д.	
Компьютерное моделирование магнитотвердых/магнитомягких гетероструктур .....	305
Тааев Т.А., Хизриев К.Ш., Муртазаев А.К., Хизриев Ш.К., Исаева М.М.	
Визуальный критерий качества равномерно распределенных последовательностей псевдослучайных чисел.....	307
Тинтул М.А.	
Исследование скорости перемешивания в цепи Чуа .....	308
Трифонов А.С., Бутковский О.Я.	
Локализация вихревых течений в космических изображениях Черного моря.....	311
Фаршакова И.И.	
Математическая модель процесса стадийного сжигания с вводом вторичного твердого топлива.....	312
Хабарова М.А., Тринченко А.А.	
Восстановление потенциалов межчастичного взаимодействия на основе эволюционных алгоритмов...	313
Хабибуллин Р.А.	
Математическое моделирование вертикальных двухфазных течений в аэротенке при биологической очистке сточных вод .....	314
Химченко Д.Г.	
Построение потенциалов щелочных металлов 1А группы .....	316
Цыганков А.А.	
Численное моделирование эксперимента, имитирующего условия тяжелой аварии, с использованием интегрального кода ASTEC.....	317
Чурилович Д.А.	
Математическое моделирование диаграммы рассеяния протяженного тела на основе усеченных данных измерений электромагнитного поля в ближней зоне.....	318
Шитикова К.М.	

