

Журнал включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий РФ,
рекомендованных для публикации основных результатов диссертаций
на соискание ученой степени доктора наук»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Известия высших учебных заведений

ПРИКЛАДНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА

научно-технический журнал

издается с 1993 года

Выходит 6 раз в год

Том 22, № 6, 2014, Саратов

СО Д Е Р Ж А Н И Е

*Материалы Школы-конференции
«Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2014»
Саратов, 17–21.10.2014, 26–27.11.2014*

НАУКА – ОБРАЗОВАНИЮ

<i>Богатырев В.А.</i> Лабораторная диагностическая система токсичности наноматериалов	3
<i>Ковылов Н.Б.</i> Кажущиеся парадоксы в гидравлике	15
<i>Ковылов Н.Б.</i> Колесо и рычаг в технике	20
<i>Аникин В.М., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н.</i> Диссертанту о воспринимаемости, числовой оценке и защите научных результатов	25
<i>Петрик А.Г.</i> О механизме формирования сжатого состояния релятивистского электронного пучка в составной трубе дрейфа	35
<i>Жидков А.П.</i> Исследование сверхширокополосного генератора хаоса сантиметрового диапазона на основе ЛБВ	42
<i>Бенедик А.И.</i> Расчет электродинамических характеристик фотонно-кристаллического резонатора	49
<i>Шараевская А.Ю.</i> Особенности формирования запрещенных зон в связанных структурах на основе магнитных кристаллов	59
<i>Туркин Я.В., Купцов П.В.</i> Динамика двух спин-трансферных осцилляторов с полевой связью	69
<i>Круглов В.П.</i> Методика и результаты численной проверки гиперболической природы аттракторов для редуцированных моделей распределенных систем	79
<i>Гулай А.П., Бух А.В.</i> Исследование мультистабильности и вынужденной синхронизации в неавтономной системе двух осцилляторов ван дер Поля с отталкивающим взаимодействием	94

КОНФЕРЕНЦИИ. СЕМИНАРЫ. СИМПОЗИУМЫ. ШКОЛЫ

Школа-конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2014». Россия, Саратов, 17–21.10.2014, 26–27.11.2014	104
---	-----

ИСТОРИЯ. PERSONALIA

<i>Гуслякова О.И., Левин Ю.И.</i> Джеймс Клерк Максвелл: Две знаменательные даты	108
<i>Новик В.К.</i> О «Книге судеб» выпускников физфака МГУ 1952 года	127

КНИЖНАЯ ПОЛКА СТУДЕНТА

<i>Б.П. Безручко, А.А. Короновский, Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов.</i> Путь в синергетику: Экскурс в десяти лекциях	137
<i>Д.И. Трубецков.</i> Наука о сложностях в лицах, датах и судьбах. Как закладывались основы синергетики: Пиршество духа и драма идей	141

C O N T E N T S

Transactions of the Scientific school
«Nonlinear Days in Saratov for Youth – 2014»
Saratov, 17–21.10.2014, 26–27.11.2014

SCIENCE FOR EDUCATION

<i>Bogatyrev V.A.</i> Laboratory diagnostic system of toxicity of nanomaterials	3
<i>Kovylov N.B.</i> Apparent paradoxes in hydraulics	15
<i>Kovylov N.B.</i> Wheel and lever in engineering	20
<i>Anikin V.M., Izmailov I.V., Poizner B.N.</i> About perception, numerical rating and protection of scientific results	25
<i>Petrik A.G.</i> On the mechanism of «compressed»-state formation at relativistic electron beam in two-section drift tube	35
<i>Zhidkov A.P.</i> Research of ultra-wide range S-band chaos generator based on TWT ..	42
<i>Benedik A.I.</i> Numerical calculation of the electrodynamic characteristics of the diode oscillator with photonic crystal resonator	49
<i>Sharaevskaya A.Yu.</i> Features of formation of band gaps in coupled structures based on magnonic crystals	59
<i>Turkin Y.V., Kuptsov P.V.</i> Dynamics of two field-coupled spin-transfer oscillators ...	69
<i>Kruglov V.P.</i> Technique and results of numerical test for hyperbolic nature of attractors for reduced models of distributed systems	79
<i>Gulay A.P., Buh A.V.</i> The study of multistability and external synchronization in nonautonomous system of two coupled van der Pol oscillators with repulsive coupling	94

CONFERENCES. MEETINGS. SYMPOSIA. SCIENTIFIC SCHOOLS

Scientific school «Nonlinear Days in Saratov for Youth – 2014», Saratov, 17–21.10.2014, 26–27.11.2014	104
---	-----

HISTORY. PERSONALIA

<i>Guslyakova O.I., Levin Yu.I.</i> James Clerk Maxwell: Two remarkable dates	108
<i>Novik V.K.</i> About the «Book of Destinies» of Physics Faculty MSU graduating students 1952	127

STUDENT'S BOOKSHELF

B.P. Bezruchko, A.A. Koronovskii, D.I. Trubetskov, A.E. Hramov. Route to Synergetics: Excursus in Ten Lectures	137
D.I. Trubetskov. The Science about Complexities is Presented in Persons, Dates and Destinies. How the Synergetic Principles were Layed down: The Spirit's Feast and the Idea's Drama	141



ЛАБОРАТОРНАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТОКСИЧНОСТИ НАНОМАТЕРИАЛОВ*

В. А. Богатырев

Институт биологии и физиологии растений и микроорганизмов РАН

Изложены результаты экспериментальной работы студентов и аспирантов базовой кафедры биофизики ФНП СГУ и лаборатории нанобиотехнологии ИБФРМ РАН по выявлению потенциальной опасности применения плазмонно-резонансных наноматериалов в медико-биологических исследованиях. Исследования проводились на разработанном в рамках данной темы программно-приборном комплексе спектрофотометрических и микроскопических измерений, позволяющих оценить жизнеспособность микроводорослей *Dunaliella salina* и определить токсичность компонентов инкубационной среды.

Ключевые слова: Нанотоксикология, наночастицы, спектрофотометрия, флуоресцентная микроскопия.

1. Физические основы эксперимента

Первоначально результаты этой работы были представлены на научной конференции «Нанотоксикология: достижения, проблемы и перспективы» 23–24 сентября 2014 г. в Волгограде, организованной научно-исследовательским институтом гигиены, токсикологии и профпатологии Федерального медико-биологического агентства. Конференция по нанотоксикологии проводилась в этом профильном институте на подобную тему впервые.

Нанотоксикология – достаточно молодая наука, которая занимается изучением рисков для здоровья человека, других живых организмов и окружающей среды, связанных с производством и применением нанотехнологической продукции – наноматериалов. Под наноматериалами принято понимать объекты, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении попадают в диапазон 1...100 нм. Строго говоря, под это определение подпадает поверхность всех объектов как таковая, поскольку она имеет «толщину» нанометровых размеров и свойства атомов и молекул поверхностного слоя отличаются от таковых в глубинных слоях. Объяснить причину этого различия достаточно просто – поверхностные молекулы взаимодействуют как с молекулами внутренних слоев, так и с окружающим пространством. Эти различия тем сильнее, чем больше разница свойств материала и окружения. Поэтому

*Статья написана по материалам лекции, прочитанной на Школе «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2014». Саратов, 17–21.10.2014, 26–27.11.2014

в определение наноматериалов вводится уточнение, что под этим термином следует понимать такие объекты, которые из-за размеров нанометрового диапазона имеют принципиально новые качества. По сути основным отличием наноразмерных объектов от массивных (объемных) является соотношение общей массы и суммарной поверхности, называемое удельной поверхностью. Так, например, удельная поверхность наночастиц золота достигает полутора сотен м²/г, при том что плотность золота почти в 20 раз больше, чем у воды. Это очевидно, поскольку при измельчении (диспергировании) с уменьшением размера частиц суммарная поверхность прямолинейно возрастает, так как поверхность и объем каждой частицы убывают как квадрат и куб линейного размера соответственно, а количество частиц возрастает в третьей степени. Подробно о свойствах золотых наночастиц можно прочитать в монографии авторов [1]. Не будем подробно останавливаться на механизмах формирования таких наночастиц и технологиях их производства, заметим лишь, что зачастую технологический процесс включает использование весьма токсичных материалов. Одним из таких веществ, придающих анизотропию формы стержневым или звездообразным частицам, является катионное поверхностно-активное вещество (ПАВ) – цетилтриметиламмонийбромид (ЦТАБ). Цетил – это тривиальное название додецильного (12-звенного) линейного алифатического радикала. С другой стороны, наночастицы часто используют как носители лекарственных соединений, предназначенных подавлять злокачественные образования, по возможности не затрагивая нормальные клетки.

Суть метода «тест-системы» заключается в выращивании (культивировании) микроводорослей в 96 луночных планшетах в средах с переменными рядами концентраций токсикантов – продуктов нанотехнологического производства. Токсичность оценивается как изменение скорости роста популяции микроорганизмов относительно контроля (без загрязнителя), измеряемое по поглощению света (абсорбции) с помощью планшетного спектрофотометра (ридера). Адекватность фотометрических измерений подтверждается подсчетом живых и мертвых клеток на флуоресцентных микроскопических изображениях.

2. Эксперимент

Необходимость проведения научно-исследовательских работ токсикологического направления возникла в ходе выполнения основной темы «Многофункциональные наноматериалы на основе металлических и композитных наночастиц: синтез, характеристика и биомедицинские применения» лаборатории нанобиотехнологии ИБФРМ РАН.

2.1. Экспериментальные материалы. На рис. 1 [2] приведены примеры различных наночастиц, синтезируемых в ИБФРМ РАН. Они уже сейчас активно используются во многих научных лабораториях России и за рубежом. Наибольшее распространение получили наночастицы коллоидного золота различных форм, размеров и поверхностной функционализации, вследствие простоты получения, низкой собственной токсичности золота и возможности настройки положения плазмонного резонанса¹. Особый интерес в нанотоксикологии представляет серебро, как вещество с существенно большей, чем у золота, растворимостью, заметно увеличивающейся

¹Плазмонный резонанс – оптическое свойство благородных металлов, обусловленное коллективным движением электронов проводимости.

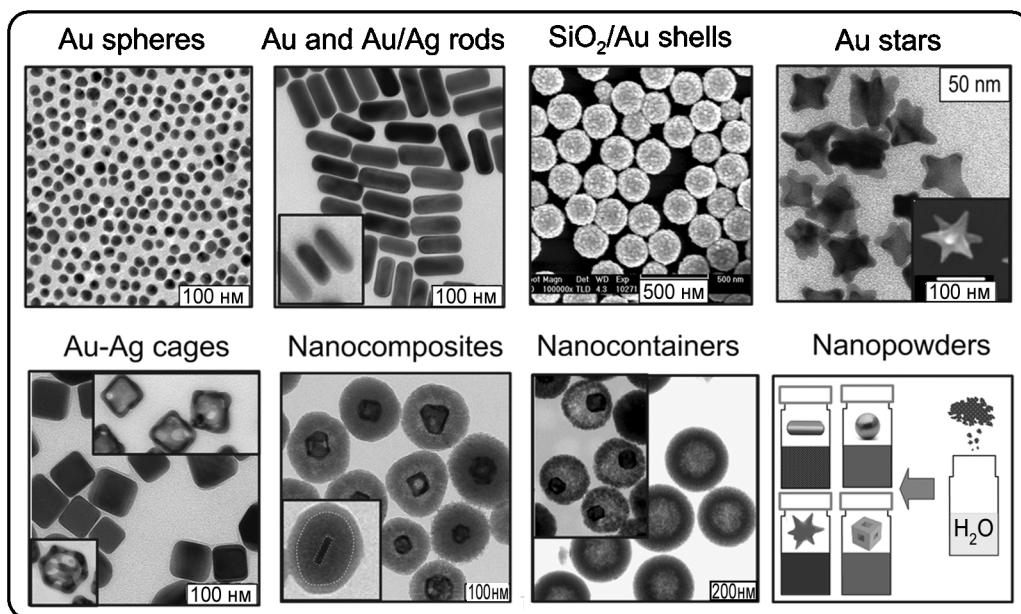


Рис. 1. Примеры плазмонных наночастиц [2]: 16-нм частицы коллоидного золота; золотые наностержни и золотые наностержни с серебряным покрытием (на вставке); SiO₂/Au нанооболочки; золотые нанозвезды; серебряные нанокубики и золотосеребряные наноклетки (на вставке); наноклетки, содержащие плазмонное ядро и мезопористую оболочку; полые мезопористые силикатные сферы и нанопогремушки, содержащие плазмонные наночастицы в полости; плазмонные нанопорошки различных типов частиц

при попадании в виде наночастиц в клетку в условиях кислой среды лизосом². Благодаря этому свойству серебряные наночастицы проявляют так называемый эффект «тroyанского коня».

Полное название разрабатываемой нами темы нанотоксикологического направления – «Колориметрическая тест-система определения жизнеспособности микроводорослей *Dunaliella salina* при воздействии токсикантов нанотехнологического производства». Почему именно *D. salina* была выбрана в качестве тест объекта для выявления токсичности наноматериалов, предназначенных для медико-биологических применений? *D. salina* или дуналиелла солоноводная – вид одноклеточных зеленых водорослей, обитающих в гиперсоленых водоемах. Это единственное растение, не имеющее плотной клеточной стенки и схожее в этом отношении с клетками животных. Чрезвычайно интересна история открытия, изучения и современного использования этих микроводорослей, вызывающих красное цветение воды. Настоятельно рекомендую ознакомиться с этим вопросом самостоятельно [3].

2.2. Тест-система. На рис. 2 показаны элементы тест-системы. Весь эксперимент проводят в специальном микропланшете с 96 (12 × 8) цилиндрическими лунками объемом 400 мкл каждая (рис. 2, а). Первоначально создается концентрационный ряд токсикантов, как правило, из 5 или 11 последовательных разведений. Последние в ряду лунки без токсиканта используют как контрольные. Для статистического учета разброса данных ряды дублируют или триплицируют. Затем во все лунки вносят одинаковое количество водорослей и измеряют начальную оптическую плотность (D_0) суспензии на специальном планшетном спектрофотометре –

²Лизосомы – органониды клетки, главной функцией которых является внутриклеточное пищеварение.

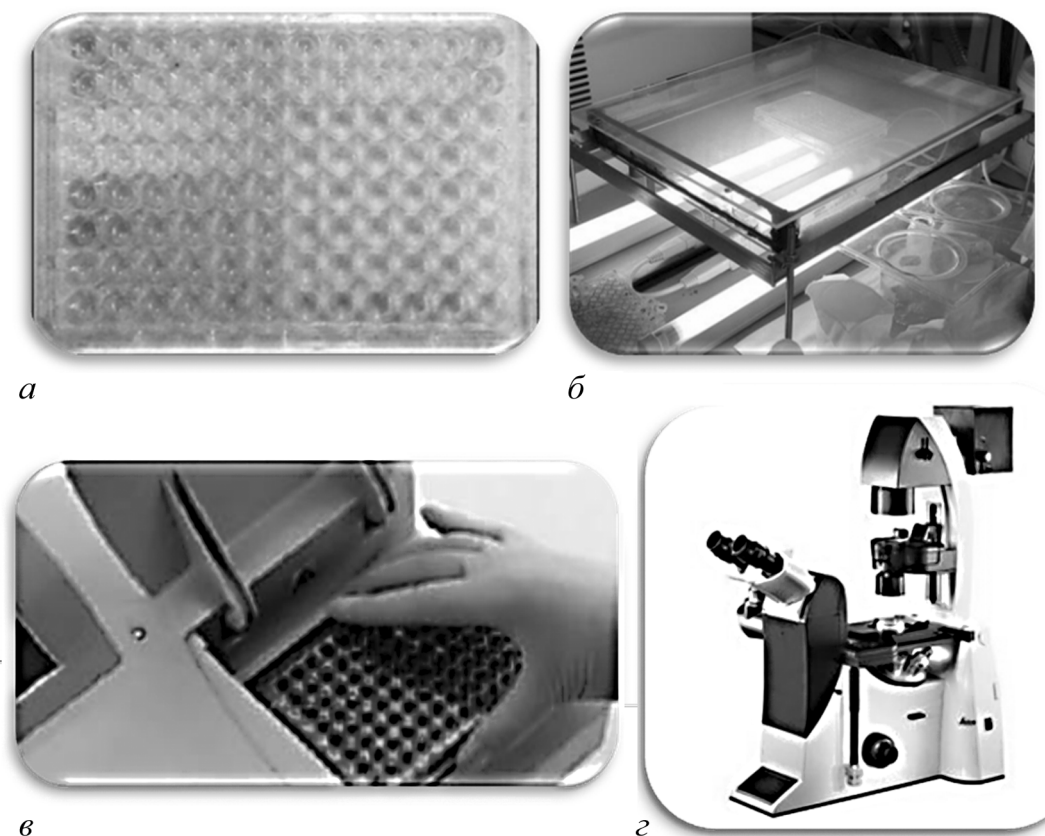


Рис. 2. . Микропланшетная тест-система: *а* – 96-луночный микропланшет, *б* – факторостатная камера, *в* – планшетный спектрофотометр (ридер), *г* – инвертированный флуоресцентный микроскоп ридере (рис. 2, *в*). Ридер имеет набор светофильтров с полосами пропускания во всем видимом диапазоне света.

Затем планшеты помещают в факторостатную камеру (рис. 2, *б*), поддерживающую постоянную температуру и освещение. После 24-часовой инкубации планшеты вынимают из камеры и регистрируют изменение оптической плотности в каждой лунке, записывают их как D_{24} . Вслед за этим планшеты помещают на предметный столик инвертированного микроскопа (рис. 2, *г*) и получают изображения центра дна лунок в режиме флуоресценции. По изображениям подсчитывают количество живых и мертвых клеток. Живые клетки флуоресцируют красным светом, мертвые – голубым. Планшеты возвращают в факторостатную камеру и через 48 ч повторяют фотометрические и микроскопические измерения. В принципе, эксперимент можно проводить сколь угодно долго, однако 48 ч – тот период, когда проявляется так называемая острая токсичность.

Для реализации поставленной задачи необходим объект, который позволял бы оперативно определять потенциальную опасность для клеток человека и животных применения наночастиц, подобных изображенным на рис. 1. Важно, чтобы такое применение не вызывало морфофункциональные изменения клеток. В настоящее время существуют технологии выращивания клеток, тканей и даже органов *in vitro*³.

³In vitro – (лат. «в стекле») это технология выполнения экспериментов, когда опыты проводятся «в пробирке» вне живого организма; in vivo – (лат. «в живом»), то есть «внутри живого организма» или «внутри клетки».

Такие технологии называются «методом культуры клеток и тканей». Поддержание культуры животных клеток – процесс достаточно сложный и дорогой, поскольку необходимо строго соблюдать стерильность и создавать условия среды, близкие к естественным, то есть *in vivo*.

2.3. Методика оценки жизнеспособности микроводорослей. Для оценки жизнеспособности клеток существует несколько стандартных приемов. Они связаны с применением различных красителей, которые либо по-разному (дифференциально) окрашивают живые и мертвые клетки, либо изменяют свой цвет под действием внутриклеточных ферментов. В случае плазмонно-резонансных частиц, которыми являются наночастицы золота и серебра, эти методы также имеют ряд ограничений. Теме применения коллоидного золота в световой микроскопии была посвящена лекция на школе-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2011» [4]. Для примера на рис. 3 приведена микрофотография животных клеток линии SPEV-2, инкубированных с наночастицами серебра довольно высокой концентрации $[Ag] = 50$ мг/л. Темные пятна в цитоплазме клеток – лизосомы с наночастицами серебра.

Кроме очень высокого накопления серебра в цитоплазме клеток, никаких патологических изменений формы и состава клеток в этом эксперименте не наблюдается. Таким образом, нам нужен был объект, который без дополнительных красителей сам бы сообщал о своем «самочувствии» каким-либо легко регистрируемым изменением. На рис. 4 приведены микрофотографии клеток водоросли *D. salina* в различных режимах микроскопирования. На передней (апикальной) части клетки видны два жгутика, благодаря которым дуналиелла активно передвигается (рис. 4, а).

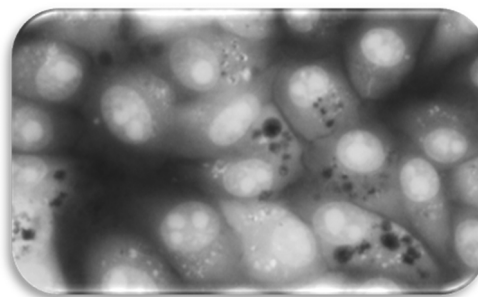
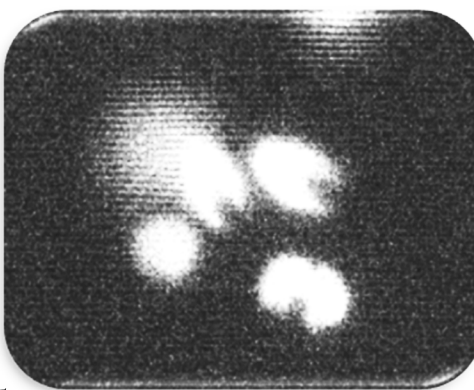


Рис. 3. Микрофотография животных клеток SPEV-2, инкубированных с наночастицами серебра $[Ag] = 50$ мг/л. Флуоресцентная микроскопия, окраска акридиновым оранжевым



а



б

Рис. 4. Микрофотография микроводоросли *D. salina* в проходящем свете (а) и при флуоресцентном освещении (б)

В принципе, подвижность клеток – важный физиологический показатель, который

вполне может быть использован как токсикометрическая характеристика [5]. Однако в данной работе нас больше интересует изменение цвета, поскольку эта характеристика качественно может быть оценена вообще без применения приборов.

Хорошо известно, что зеленый цвет растений обусловлен фотосинтетическим пигментом хлорофиллом. При освещении синим светом хлорофилл флуоресцирует красным, поэтому на флуоресцентных микрофотографиях мы видим яркие пятна, занимающие почти весь объем клеток (рис. 4, б). Это бокаловидные хлоропласты. В углублении хлоропласта в апикальной части находится ядро клетки. В нормальных условиях все клетки имеют примерно одинаковые размеры (около 8 мкм в длину) и равное содержание хлорофилла. Поэтому определять количество клеток можно, измеряя поглощение света хлорофиллом (абсорбцию). Стандартно содержание хлорофилла в растениях определяют по абсорбции спиртовых или ацетоновых экстрактов. Можно извлекать хлорофилл другим органическим растворителем – диметилсульфоксидом, в этом случае экстракт менее подвержен окислению и фотодеструкции (обесцвечиванию).

2.4. Результаты спектрографических измерений Спектр поглощения суспензий микроводорослей *D. salina* обусловлен главным образом содержанием хлорофилла А. Пики поглощения хлорофилла А находятся в области 430 и 670 нм. Однако благодаря наличию белково-пигментных комплексов (фотосистем) спектры поглощения зеленых растений значительно уширены и смещены.

На рис. 5 приведены спектры поглощения клеточной суспензии *D. salina* в культуральной среде в конце логарифмической стадии роста и диметилсульфоксидного экстракта этих же клеток. Спектры получены на двух различных приборах – прецизионном двухлучевом спектрофотометре Specord M 40 (Karl Zeiss Jena, Германия) и планшетном ридере Multiskan Ascent (США).

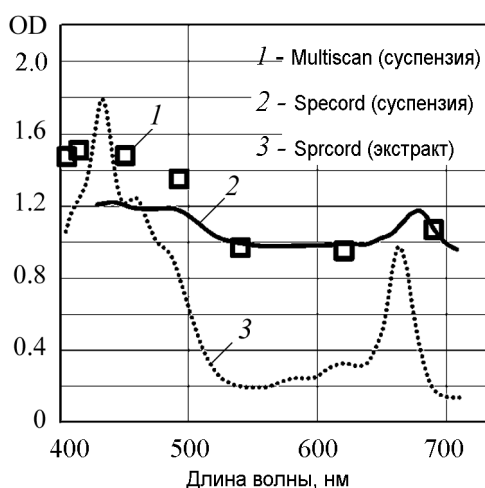


Рис. 5. Спектры поглощения (OD) суспензии *D. salina*, полученные на спектрофотометре Specord M 40 (сплошная линия) и Multiskan Ascent (квадраты); пунктирная линия – диметилсульфоксидный экстракт хлорофилла

Значками (квадратами) показаны значения оптических плотностей планшетного ридера Multiskan в полосах соответствующих светофильтров.

Из рис. 5 следует, что пики поглощения хлорофилла лежат в областях между стандартными светофильтрами планшетного ридера Multiskan Ascent. Наиболее близко к пику поглощения суспензии водорослей находится светофильтр 690 нм. Несмотря на существенные расхождения данных в коротковолновой области спектра, можно отметить, что значения оптических плотностей в полосах пропускания светофильтров 540, 620 и 690 нм, регистрируемые на разных спектрофотометрах, довольно близки. С учетом того, что при увеличении количества лизированных⁴ клеток

⁴Лизис – процесс гибели клеток, сопровождаемый вытеканием наружу внутриклеточного содержимого.

возрастает вклад светорассеяния в общее ослабление света клеточной суспензией, полоса фильтра 690 нм была выбрана как основная для построения графиков зависимости изменения оптической плотности от концентрации токсикантов. В целом наши результаты хорошо согласуются с данными спектроскопических измерений суспензий и ацетоновых экстрактов *D. tetrio* [6].

Планшетный вариант измерения жизнеспособности микроводорослей по изменению оптической плотности суспензии в области красного максимума поглощения хлорофилла позволяет избежать процедуры экстракции этого пигмента и оценивать кинетику его фотодеструкции, сопровождающую гибель клеток. Интактные⁵ клетки сохраняют свою окраску, при этом концентрация зеленого пигмента пропорциональна количеству жизнеспособных клеток. Это позволяет судить о количестве живых организмов и кинетике развития популяции.

Результат гибели клеток, регистрируемый фотометрическим способом, надежно проявляется уже через 24 часа наблюдений. В лунках, где произошла гибель клеток, взвесь обесцвечивается.

2.5. Проверка корректности фотометрических измерений. Корректность фотометрических измерений требует соблюдения условия неизменности спектральных свойств хромофоров⁶ и минимизации неконтролируемого вклада светорассеяния в общее ослабление светового потока. Для проверки микропланшетного способа измерения оптической плотности мы провели серию параллельных измерений одной и той же суспензии *D. salina* в ряду двукратных разведений культуральной средой. Результаты измерений показали практически линейную зависимость оптической плотности от степени разведения суспензии для планшетного ридера.

Для проверки выполнения условия неизменности спектральных характеристик системы были проведены эксперименты с бесцветными токсикантами: формальдегидом и перекисью водорода. Очевидно, что нулевое приращение оптической плотности должно свидетельствовать о стационарном процессе, то есть равенстве скоростей роста и гибели клеток. Превышение контрольных значений в области допороговых концентраций токсикантов (меньших, чем минимально действующие) свидетельствует об эффекте гормезиса – стимулировании роста. И наконец, отрицательные значения изменения оптической плотности свидетельствуют о превышении гибели популяции над ростом. В качестве оценочной характеристики был выбран параметр

$$\overline{\Delta D} = D_t(C) - D_0(C) / D_t(0) - D_0(0),$$

где t – время экспозиции, а C – концентрация токсиканта. По сути, параметр $\overline{\Delta D}$ отображает отношение скоростей роста опыта и контроля (без токсиканта).

На рис. 6 приведены графики зависимости изменения оптических характеристик суспензии *D. salina* от концентрации перекиси водорода в инкубационной среде при различных временах экспозиции (24 и 48 часов).

Из рис. 6, а видно, что при концентрациях более 30 мг/л приращение оптической плотности при 24- и 48-часовой экспозиции оказывается отрицательным, что говорит о более чем 50% гибели популяции. Анализ микроскопических изображений (рис. 6, б) показывает, что вплоть до концентрации H_2O_2 15 мг/л никаких достоверных отличий от контроля не наблюдается. В точке 20 мг/л отмечается достоверное увеличение количества нормально флуоресцирующих, без видимых морфологических изменений, неподвижных клеток. Следовательно, эту концентрацию

⁵Интактный – (лат. *intactus* нетронутый) неповрежденный, не вовлеченный в какой-либо процесс.

⁶Хромофоры – группы атомов, обуславливающие цвет химического соединения.

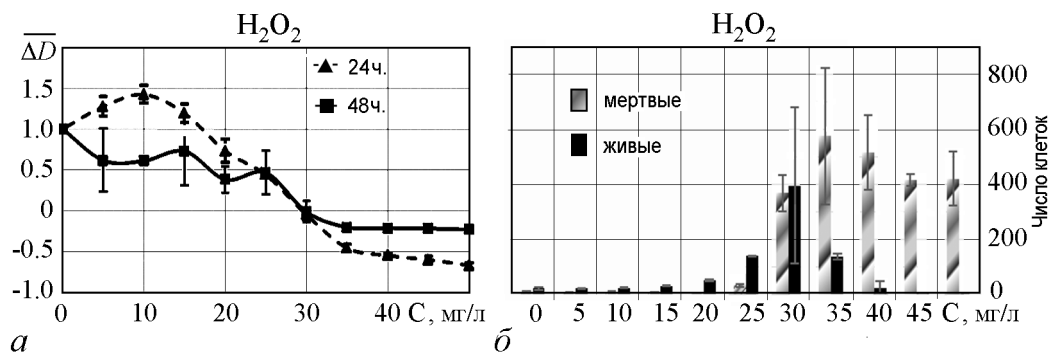


Рис. 6. Изменение относительной оптической плотности $\overline{\Delta D}$ суспензии *D. salina* в концентрационном ряду H_2O_2 (а) и количество клеток в поле зрения флуоресцентного микроскопа в фокальной плоскости дна лунки, светящихся голубым (мертвые) и красным (живые) цветом после 24-часовой экспозиции (б). $D_0 = 0.09$, $D_{24}(0) = 0.12$, $D_{48}(0) = 0.37$. Бары (планки погрешностей) показывают стандартное (среднеквадратическое) отклонение

можно считать минимальной действующей (ЛОЕС)⁷. В следующем столбце триплицированных рядов (25 мг/л) отмечается достоверное увеличение числа мертвых (без красной флуоресценции) клеток, а в лунках с концентрацией H_2O_2 30 мг/л число синих и красных клеток примерно одинаково. Вероятно, эту концентрацию следует считать медианной (LC50)⁸. Изменение оптической плотности в этой точке (см. рис. 6, а) свидетельствует о примерном равенстве скоростей гибели и роста клеток, поскольку нулевое значение приращения оптической плотности сохраняется при 24- и 48-часовой экспозиции. Суммарное количество фиксируемых клеток максимально в этой точке, и при увеличении концентрации токсиканта происходит уменьшение вплоть до полного исчезновения числа жизнеспособных клеток. При концентрации 35 мг/л (см. рис. 6, б) наблюдается максимальное количество нежизнеспособных клеток, которое при дальнейшем увеличении концентрации H_2O_2 несколько снижается, вероятно, вследствие лизиса.

На рис. 7 приведены фрагменты кадров регистрации изображений клеток *D. salina* после 24-часовой экспозиции с H_2O_2 различных концентраций. Изначально цветные изображения разложены на составляющие цвета (RGB) с помощью программы ImageJ [7]. Верхний ряд соответствует красному каналу, нижний – синему.

Результаты фотометрических и микроскопических измерений суспензий микроводоросли в концентрационном ряду формальдегида оказались качественно схожими с таковыми для перекиси водорода. Диапазоном действующих концентраций формальдегида можно считать 2...12 мг/л, медианное значение (LC50) примерно равно 4 мг/л.

Таким образом, определение токсического действия бесцветных поллютантов⁹ не вызывает особых проблем. Значения LC100 и LC50 можно определить по графикам спектрофотометрических измерений: LC100 соответствуют точки выхода на плато экстраполяционной кривой в области отрицательных значений, LC50 – точки пересечения с линией нулевых значений. ЛОЕС определяются подсчетом мертвых

⁷ЛОЕС (lowest observed effect concentration) – одна из основных токсикометрических характеристик.

⁸LC50 – концентрация, вызывающая половинную гибель популяции.

⁹Поллютант – любое химическое вещество или соединение, которое находится в объекте окружающей природной среды в количествах, превышающих фоновые значения и вызывающие тем самым химическое загрязнение.

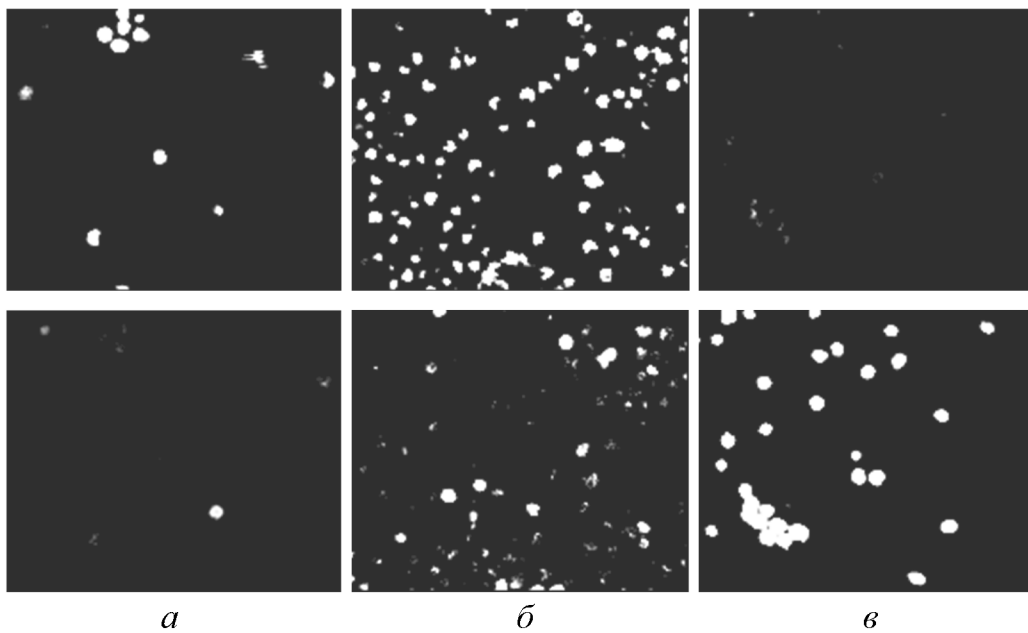


Рис. 7. Флуоресцентные микроскопические изображения фокальной плоскости дна лунок суспензий клеток *D. salina* после 24-часовой экспозиции с H_2O_2 различных концентраций: *a* – 0 мг/л, *б* – 30 мг/л, *в* – 50 мг/л. Красные – живые клетки (флуоресценция хлорофилла), голубые – мертвые клетки

клеток на выделенной площади фокальной плоскости центра дна лунки микропланшета.

2.6. Результаты экспериментов с другими препаратами. Несколько более сложный случай представляют собой препараты серебра, обладающие плазмонным резонансом металлических наночастиц и фоточувствительностью солей, что предполагает значительный вклад хроматических изменений токсиканта в абсорбцию тестируемой суспензии.

Нами были проведены эксперименты с тремя различными препаратами серебра: коллоидным серебром (КС), протеинатом серебра (ПрАг) и нитратом серебра $AgNO_3$ в среде $NaCl$. Препарат КС представляет собой незащищенный (электростатически стабилизированный) гидрозоль металлического наносеребра с размером частиц около 20 нм в диаметре. КС сохраняет свою агрегационную стабильность только в условиях низкой ионной силы при хранении в герметически закупоренных флаконах. ПрАг – коммерческий препарат оксида серебра, стабилизированного сывороточным альбумином с содержанием серебра в порошке 8.3%. Водные растворы этого препарата агрегационно и седиментационно устойчивы в широком интервале кислотности и ионной силы. Очевидно, что $AgNO_3$ в условиях 1.5 М $NaCl$ образует суспензию $AgCl$, не обладающую свойствами плазмонного резонанса и, соответственно, не поглощающую в видимой области спектра.

Результаты экспериментов с препаратами серебра показали отсутствие принципиальных отличий в интерпретации фотометрических и микроскопических данных по сравнению с таковыми для бесцветных поллютантов. При этом проявилось качественное отличие, заключающееся в том, что для препаратов серебра характерны достаточно протяженные зоны полуметальных концентраций, проявляющиеся во

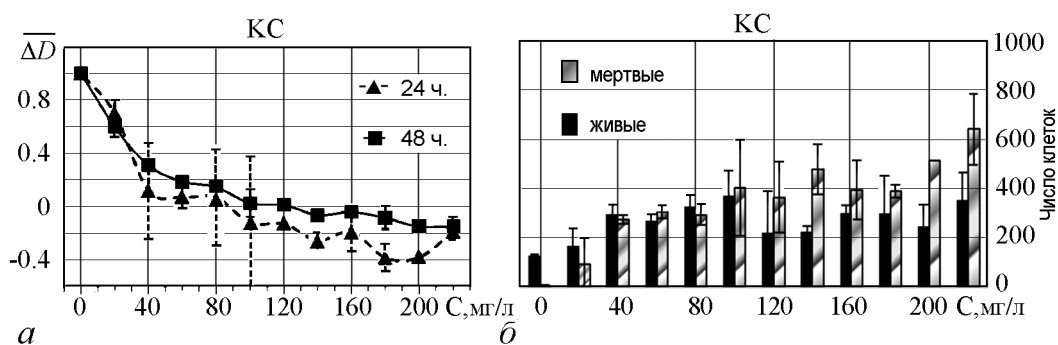


Рис. 8. Изменение относительной оптической плотности $\overline{\Delta D}$ суспензии *D. salina* в концентрационном ряду КС (а) и количество клеток в поле зрения флуоресцентного микроскопа в фокальной плоскости дна лунки, светящихся голубым (мертвые) и красным (живые) цветом после 24-часовой экспозиции (б). C – концентрация токсиканта [Ag], $D_0 = 0.08$, $D_{24}(0) = 0.22$, $D_{48}(0) = 0.45$

флуктуации $\overline{\Delta D}(C)$ в области нулевых значений.

Подобного же рода флуктуации обращают на себя внимание и в случае КС (рис. 8). Можно отметить также, что данные фотометрии дают несколько завышенную оценку токсичности по сравнению с микроскопией.

Так, $\overline{\Delta D}_{24}(C > 100 \text{ мг/л}) < 0$ и $\overline{\Delta D}_{48}(C > 140 \text{ мг/л}) < 0$, в то время как флуоресцентная микроскопия показывает незначительные изменения в количестве живых и мертвых клеток во всем диапазоне 40...200 мг/л Ag. Вероятно, это связано с неконтролируемым вкладом агрегации серебряных наночастиц в поглощение.

Полученные в наших экспериментах данные по токсичности наносеребра в целом неплохо согласуются с опубликованными совсем недавно результатами исследователей из Египта и Саудовской Аравии [8], показавших LC50 КС в области концентраций примерно 50 мг/л для *Chlorella vulgaris* и *D. tertiolecta*.

Значительно более сложный случай представляют собой суспензии агрегационно неустойчивых золотых цитратных наночастиц, поскольку эволюция их спектров в красной области носит немонотонный характер при агрегации¹⁰. Однако визуальная оценка результатов двумерного эксперимента с 15 нм коллоидным золотом (КЗ-15) и ЦТАБ свидетельствовала о примерно равном токсическом действии ЦТАБ при изменении концентрации КЗ-15 от 0 до 50 мг/л Au. Смысл двумерного эксперимента заключается в том, что в серии параллельных рядов концентрация одного поллютанта изменяется в одном направлении, а другого в ортогональном. Во всех рядах в независимости от концентрации КЗ-15 зеленый оттенок сохранялся, начиная с колонки, где концентрация ЦТАБ была меньше 1 мг/л. Однако принятый для бесцветных поллютантов и препаратов серебра алгоритм расчета фотометрических характеристик не давал адекватной оценки из-за неконтролируемых хроматических изменений, связанных с агрегацией КЗ-15. Учитывая, что характерное время агрегации КЗ-15 – несколько часов, и приняв $\overline{\Delta D} = D_{48} - D_{24}$, мы получили такое же хорошее согласие данных фотометрии и микроскопии, как и в предыдущих экспериментах. Более того, нам удалось показать, что в смесях КЗ-15 ЦТАБ токсическое действие на *D. salina* определяется исключительно содержанием этого ПАВ.

¹⁰ Изначально красный цвет КЗ-15 при агрегации приобретает сначала голубой оттенок, затем становится нейтрально серым.

Выводы

Таким образом, можно констатировать следующие результаты по созданию простой системы оперативной оценки общей токсичности для одноклеточных растительных организмов плазмонно-резонансных наноматериалов, предназначенных для медико-биологического применения.

1. Диагностическая тест-система определения токсичности наноматериалов, основанная на измерении фотодеструкции хлорофилла поврежденных клеток солонowodной микроводоросли *D. salina* фотометрическим и микроскопическим способом, позволяет оперативно находить основные токсикометрические характеристики поллютантов – LOEC, LC50, LC100.

2. Минимальная действующая концентрация токсиканта определяется как достоверное увеличение числа мертвых клеток – светящихся синим цветом при соответствующем освещении в поле зрения флуоресцентного микроскопа.

3. Медианная величина токсического действия определяется по графику зависимости изменения оптической плотности в области красного максимума поглощения хлорофилла от концентрации токсиканта как точки пересечения экстраполяционной кривой линии нулевого значения функции. Эти точки соответствуют примерно равенству живых и мертвых клеток, выявляемых флуоресцентным микроскопическим способом.

4. Исследование различных форм препаратов серебра показало, что токсическое действие на микроводоросль *D. salina* уменьшается в ряду «нитрат серебра \geq протеинат серебра \gg металлическое коллоидное серебро».

5. В согласии с литературными данными, полученными на культурах клеток животных, показано, что токсичность ЦТАБ-содержащих препаратов золотых наночастиц определяется, главным образом, содержанием свободного ПАВ, а не самими частицами.

Следующие шаги в разработке данной темы будут состоять: в определении границы применимости диагностической тест-системы; выяснении влияния на реакцию клеточной системы возраста культуры, гетерогенности популяции микроводорослей, изменения условий среды. Следует изучить процессы, происходящие внутри клетки, защищающейся от токсического воздействия.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 12-04-00629-а и 14-04-00114-а, гранта РНФ 14-13-01167. В работе использовано оборудование Центра коллективного пользования научным оборудованием в области физико-химической биологии и нанобиотехнологии «Симбиоз» ИБФРМ РАН.

Библиографический список

1. Дыкман Л.А., Богатырев В.А., Щеголев С.Ю., Хлебцов Н.Г. Золотые наночастицы: Синтез, свойства, биомедицинское применение. М.: Наука, 2008. 319 с.
2. Khlebtsov N., Bogatyrev V., Dykman L., Khlebtsov B., Staroverov S., Shirokov A., Matora L., Khanadeev V., Pylaev T., Tsyganova N., Terentyuk G. Analytical and theranostic applications of gold nanoparticles and multifunctional nanocomposites // *Theranostics*. 2013. № 3(3). P. 167.

3. URL: http://enc-dic.com/enc_biology/Porjadok-poliblefaridoverolybpharidales-1023.html
4. *Богатырев В.А.* Коллоидное золото в световой микроскопии // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, № 1. С. 43.
5. *Масюк Н.П., Посудин Ю.И., Лилицкая Г.Г.* Фотодвижение клеток *Dunaliella* Teod. (Dunaliellales, Chlorophyceae, Viridiplantae). Киев, 2007. 264 с.
6. *Mecozzi M., Onorati F., Oteri F., Sarni A.* Characterisation of a bioassay using the marine alga *Dunaliella tertiolecta* associated with spectroscopic (visible and infrared) detection // Int. J. Environment and Pollution. 2008. Vol. 32. P. 104.
7. URL: <http://imagej.ru/>
8. *Hazani A.A., Ibrahim M.M., Shehata A.I., El-Gaaly G.A., Daoud M., Fouad D., Rizwana H., Moubayed N.M.S.* Ecotoxicity of Ag-nanoparticles on two microalgae, *Chlorella vulgaris* and *Dunaliella tertiolecta* // Arch. Biol. Sci. 2013. № 65. P. 1447.

Поступила в редакцию 15.12.2014

LABORATORY DIAGNOSTIC SYSTEM OF TOXICITY OF NANOMATERIALS

V. A. Bogatyrev

The Russian Academy of Sciences' Institute of Biochemistry
and Physiology of Plants and Microorganisms

The paper describes the results of experimental work of students and post-graduate students of the Department of Biophysics of the FNP SSU and the laboratory of nanobiotechnology IBPPM RAS to identify the potential danger of plasmon-resonance nanomaterials in biomedical research, namely the development of software and instrument complex spectrophotometric and microscopic measurements to estimate viability of microalgae *Dunaliella salina* and determine the toxicity of the components of incubation medium.

Keywords: Nanotoxicology, nanoparticles, spectrophotometry, fluorescence microscopy.



Богатырев Владимир Александрович – родился (1958) в Мончегорске Мурманской обл., окончил Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (1980). После окончания СГУ работает в ИБФРМ РАН ведущим научным сотрудником. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата биологических наук в РОСНИПЧИ «Микроб» (1995) по специальности микробиология и доктора биологических наук в ИБФРМ РАН (2005) по специальности биохимия. Работает в области биохимии, биофизики, нанобиотехнологии. Автор монографий «Золотые наночастицы: Синтез, свойства, биомедицинское применение» (в соавторстве с Дыкманом Л.А., Щеголевым С.Ю. и Хлебцовым Н.Г.), «Gold nanoparticles as an antigen carrier and an adjuvant» (соавторстве с Дыкманом Л.А., Староверовым С.А. и Щеголевым С.Ю.). Общее число публикаций 135 по направлениям, указанным выше. Индекс Хирша по версии РИНЦ – 19.

410049 Саратов, пр-т Энтузиастов, д. 13
Институт биологии и физиологии растений и микроорганизмов РАН
E-mail: vabog58@gmail.com



КАЖУЩИЕСЯ ПАРАДОКСЫ В ГИДРАВЛИКЕ*

Н. Б. Ковылов

Саратовский государственный университет

Статья посвящена описанию простых явлений в гидравлике, для объяснения которых необходимо привлекать законы Ньютона, Архимеда и Паскаля. Описанию этих явлений в базовых курсах общей физики уделено недостаточно внимания. Статья может быть полезна молодым учителям для повышения интереса учащихся к изучению физики.

Ключевые слова: Гидростатика, гидродинамика, плавание, инерция, давление, гидравлический удар.

Когда мне предложили выступить перед старшими школьниками, участниками традиционной школы «Нелинейные дни для молодых» (организатор – факультет нелинейных процессов СГУ), я определил свою задачу следующим образом: показать молодёжи на возможно более простом примере путь познания в сфере естественных наук. Траектория этого познания проходит через наблюдение явления, планирование и постановку опытов для достоверного установления связей и закономерностей между действующими факторами, после чего или открывается новый закон, или уточняется известный закон, или находятся новые применения данного закона. Вот здесь и могут пригодиться снятые более для развлечения внука видеоролики с «кухонными» экспериментами, в которых наблюдались не совсем объяснимые эффекты. «Действующими лицами» опытов стали обыкновенная вода, детские игрушки и какая-то посуда.

Сначала сломанный грузовик был превращён в контейнеровоз, который проходил краш-тест. Положение груза на контейнеровозе до и после столкно-

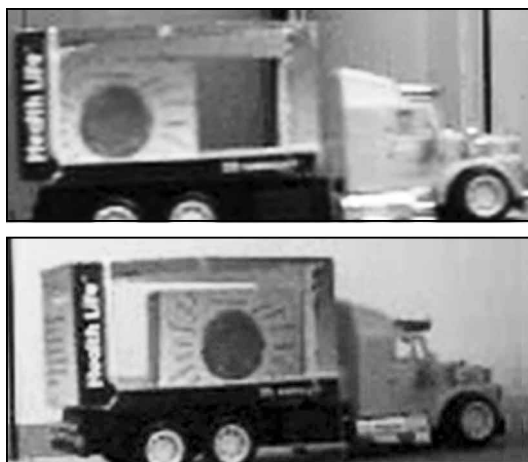


Рис. 1. Проявление инерции незакрепленного груза: *а* – до удара, *б* – после удара

*Статья написана по материалам лекции, прочитанной на Школе «Нелинейные дни в Саратове для молодых-2014». Саратов, 17–21.10.2014, 26–27.11.2014.



Рис. 2. Отклонение поплавка: *a* – при разгоне, *b* – при торможении

вения показано на рис. 1. Результат вполне предсказуем в силу закона инерции, и аудитория согласилась, что в этом опыте ничего необычного нет.

Затем в прозрачную пластиковую посуду был помещен пробковый поплавок на поводке, прикрепленном ко дну. После заполнения водой завинчивалась крышка, а всё сооружение клеивалось в устойчивое основание для удобства наблюдения. И вот при ударе этого сооружения о препятствие, когда все ожидали продолжения движения поплавка по инерции, он вдруг поплыл в противоположную (!?) сторону (рис. 2).

Обе части видеоролика смотрите по ссылке: <https://yadi.sk/i/cWB4yXapYv7dx>.
 Парадокс? Вряд ли. Бесформенная, как мы знаем, движущаяся масса жидкости при торможении стремится сохранить состояние движения, но наталкивается на стенки сосуда. А теперь вообразите себя пассажиром битком набитого вагона. Кто при торможении будет сдавлен сильнее? Правильно, тот, позади которого находится большая масса. Так и с жидкостью. Давление у стенки будет больше, чем на удалении от нее. Попробуем пооперировать формулами. Представим себе, что цилиндрический сосуд высотой L заполнен жидкостью с плотностью ρ и его движение замедляется с постоянным ускорением a . На дно цилиндра площадью s будет действовать сила F , вызванная стремлением всей массы m жидкости сохранить состояние движения с прежней скоростью (второй закон Ньютона).

$$F_1 = ma = \rho Va = \rho Lsa. \quad (1)$$

В каждой точке, прилегающей ко дну, жидкость будет испытывать и распространять давление во всех направлениях

$$p_1 = \frac{F_1}{s} = \rho La. \quad (2)$$

На расстоянии ΔL ото дна давление, очевидно, будет меньше:

$$p_2 = \frac{F_2}{s} = \rho(L - \Delta L)a. \quad (3)$$

Поэтому равнодействующая инерционных сил давления жидкости, действующих на поплавков, будет направлена ото дна, в то время как сила инерции поплавка направлена ко дну. Последнюю силу в данном случае можно не принимать во внимание, поскольку масса пробки (поплавок) много меньше массы вытесненной ею жидкости.

Попробуем видеоизменить опыт так, чтобы направление инерционных сил совпало с направлением сил тяготения. В прозрачную банку помещаем пластиковый чехол от «киндер-сюрприза», внутрь которого вклеен грузик, обеспечивающий отрицательную плавучесть получившемуся поплавку. В банку заливается вода до отказа, и навинчивается крышка. Теперь банку «роняем» с некоторой высоты и наблюдаем

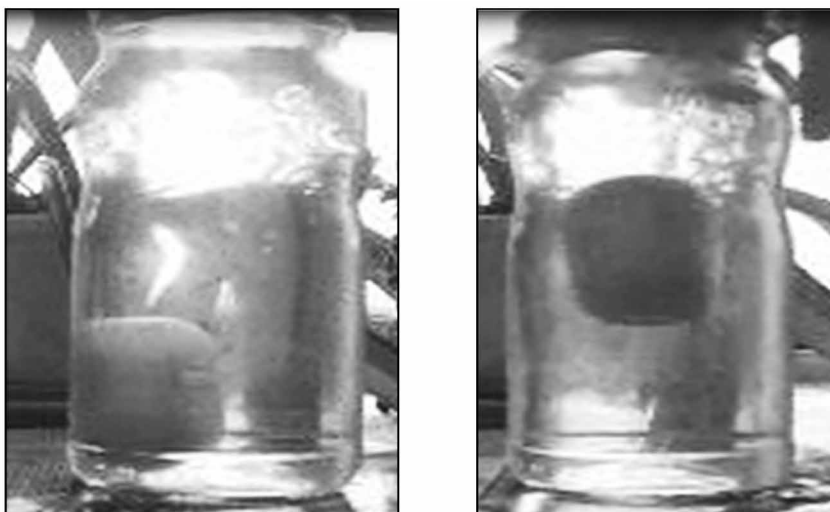


Рис. 3. «Прыгающий» поплавок: *а* – до удара, *б* – после удара

поведение поплавка. Он опять непослушен! Вместо того чтобы прижаться ко дну, он подпрыгивает вверх (рис. 3). Соответствующий видеоролик смотрим по ссылке: <https://yadi.sk/i/ziApF1MZWWaLr>.

У части слушателей данный опыт породил сомнения: а не упругость ли пластика подбрасывает поплавок? Чтобы проверить эту версию, выливаем воду и стучим пустой банкой с тем же поплавком по тому же месту. То, что наблюдается в «сухом» опыте, видно в следующем ролике: <https://yadi.sk/i/RuM5E8IUc8C6E>.

Прыжки еле заметны (даже в отсутствие сопротивления воды). А ведь вода оказывает большее сопротивление! Что-то мы здесь не учитываем, хотя вспомнили и закон Архимеда, и закон Ньютона. Кого же из гениев-физиков вспомнить? Да был же ещё физик, лучше всех знавший свойства жидкостей и газов – Паскаль. Именно закон Паскаля установил свойство несжимаемых жидкостей передавать давление *равномерно по всем направлениям*.

И есть одно обстоятельство, которое требует задержаться на рассмотрении этого случая. Опыт повторили, только в качестве поплавка взяли куриное яйцо, а плотность воды повысили для сохранения тех же условий плавания, растворив в ней поваренную соль. И что же? Наш поплавок почти не сдвинулся с места! Единственное отличие в условиях опыта – форма поплавка. Значит, причину различия надо искать в разнице поведения воды в обоих случаях. В первом случае кроме инерционных сил присутствуют силы упругости корпуса «киндер-сюрприза», который при ударе сминается, а затем, распрямляясь, слегка подбрасывает поплавок вверх. И тут же, за счет повышенного у дна давления, вода устремляется под поплавок. В этом случае, как и при не совсем запол-



Рис. 4. Фонтанирующий «трубопровод» (удар о стенку справа)

ненном сосуде, происходит перемещение масс воды, которое увеличивает динамический эффект. В случае с яйцом перемещения не происходит, так как отсутствует эффект упругой деформации, способствующий возникновению этого эффекта. И, конечно, эффект вертикального скачка этих поплавков менее заметен, так как массы поплавков и вытесненной ими жидкости (а соответственно, и силы инерции) практически равны.

Если смотреть глубже, совместное действие гидростатических и инерционных сил, приложенных к жидкости, заполняющей объем, ограничивающий ее, приводит к эффекту, похожему на волновой процесс. Опыт с горизонтальной цилиндрической ёмкостью, заполненной водой, показывает фонтанчики из двух одинаковых отверстий в начале и в конце ёмкости (рис.4). Соответствующий видеоролик можно посмотреть в Интернете по ссылке: <https://yadi.sk/i/J1ouc33bc8DAu>.

Обратите внимание, что наш житейский опыт подсказывает, что вода должна выплёскиваться с большим напором через переднее отверстие, а происходит наоборот. В чем дело? Любая поисковая система, если мы интересуемся поведением потока жидкости в трубе при её торможении, выводит нас на явление гидравлического удара [1].

Исследовано оно было основателем отечественной аэро- и гидродинамики Н.Е. Жуковским в конце 19 века. В полностью заполненном движущейся жидкостью трубопроводе при изменении средней скорости потока от v_0 до v_1 за счет частичного перекрытия потока жидкости задвижкой в жидкости возникает волна с превышением давления, определяемым формулой

$$D = \rho(v_0 - v_1)V_{\dot{a}},$$

где ρ – плотность жидкости, а $V_{\dot{a}}$ – скорость распространения волны вдоль потока. Она находится в прямой зависимости от сжимаемости жидкости, упругости стенок трубы и её диаметра [2].

С гидроударами приходится профессионально бороться работникам трубопроводного транспорта, в частности, водопроводчикам. Любая поисковая система выдаст вам множество материалов на тему гидроудара. Но наиболее интересным примером использования этого явления в технике является гидротаран (рис. 5). С помощью этого устройства производится подкачка воды в водонапорные башни. Кроме того, используя течение реки, можно устроить поливальную станцию без использования электроэнергии или горючего для полива огородов – есть ссылки на пару патентов на эту тему. И совсем не хочется обойти стороной ошибочно называемые

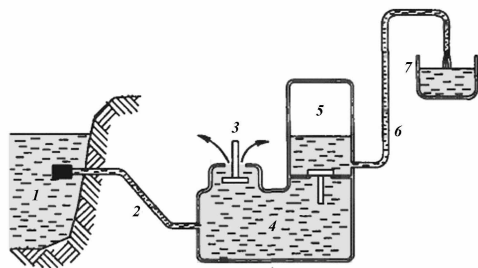


Рис. 5. Устройство для подъема воды (гидротаран): 1 – водоём, 3 – отсекающий клапан, 4 – обратный клапан, 7 – водонапорная ёмкость

гидроударами аварийные ситуации при попадании воды в цилиндры автомобильных двигателей. На самом деле, в этих случаях двигателю безразлично, попадет в цилиндр вода или металлический предмет. Вот только для попадания воды достаточно неопытному водителю заехать поглубже в водоём, а для попадания куска металла в цилиндр без разборки мотора и помощи механика не обойтись.

С чувством большого удовлетворения я воспринял и десятки вопросов после доклада, заданные школьниками, и правоту авторитетных преподавателей физики, которые сетуют на малое количество хрестоматийных материалов, помогающих «почувствовать» работу физических законов в окружающей жизни. Убеждён, что интерес школьников к физике находится в прямой зависимости от количества иллюстративного материала, дающего строгую дополнительную информацию, по возможности, без формул, как бы странно это ни звучало.

Библиографический список

1. 1.ru.wikipedia.org/гидроудар.
2. khd2.narod.ru/hydrodyn/rampump.htm

Поступила в редакцию 12.12.2014

APPARENT PARADOXES IN HYDRAULICS

N. B. Kovylov

Saratov State University

The purpose of this article is to increase the interest of school students in General physics. For notice teacher it will help to illustrate Newton's laws, Archimed's law and Pascale's law by simple home experiments.

Keywords: Hydrostatics, hydrodynamics, swimming, inertia, pressure, hydraulic impact.

Ковылов Николай Борисович – окончил физический факультет Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского по специальности «радиофизика». Работал в Конструкторском бюро нефтяной и газовой промышленности (КБ НГП). В течение 17 лет занимался разработкой средств автоматики и измерительной техники в нефтедобывающей промышленности, главные из которых серийно выпускались для месторождений Западной Сибири и Саратовского региона. Ответственный исполнитель и главный конструктор: электронных влагомеров для нефти; государственного стандарта на диэлькометрический метод измерения электронными влагомерами; измерителя параметров нефтяных эмульсий; метода подтверждения безводности нефти и нефтепродуктов для целей метрологии. Имеет 5 авторских свидетельств и 2 патента на изобретения. Опубликовал монографию «Диэлькометрические нефтяные влагомеры» (в соавторстве с И.Ю. Клугманом, Саратов: Изд-во ВНИИОЭНГ, 1969). Организатор, директор и научный руководитель Кустового информационно-вычислительного центра Производственного объединения «Саратовнефтегаз» (1980–1987). Главный конструктор бытовых отечественных видеоманитофонов «Электроника ВМ-32» и ВП-001 (конец 1980-х). После распада производства перешел полностью на научно-педагогическую работу.

Доцент кафедры нелинейной физики факультета нелинейных процессов (ФНП) Саратовского государственного университета им. Н.Г.Чернышевского. Создал и развивает учебно-научную лабораторию «Электромагнитные явления». Читает лекции по курсам «Теоретическая электротехника» и «Основы электроники для компьютерщиков». Учебные пособия по этим курсам разработаны с учетом богатого практического опыта автора. Ведет лабораторные работы по электричеству и магнетизму на ФНП и практические занятия на ФКНИИТ. За время работы в СГУ как руководителем дипломных работ им выпущено более 45 специалистов.

В настоящее время активизирует поиск междисциплинарных связей, призванных объединить усилия специалистов в области физики и информатики с целью модернизации экспериментальных научных исследований и учебных работ.

410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: nikolajj-kovylov@mail.ru





КОЛЕСО И РЫЧАГ В ТЕХНИКЕ*

Н. Б. Ковылов

Саратовский государственный университет

Статья посвящена описанию разнообразных функций колеса в машинах и механизмах. Уточняются некоторые аспекты решения задач по механике.

Ключевые слова: Трение, двигатель, движитель, момент вращения, рычаг, механическая передача.

Постановка задачи. В своей книге «Путь стрельца» я попытался посмотреть на некоторые физические явления с несколько иных точек зрения, чем в школьных учебниках физики [1]. В настоящем материале рассматриваются древнейшие механизмы человечества: колесо и рычаг. Кажется, про эти приспособления всё давно известно, но, как бывает в подобных случаях, многие факты исчезают из памяти, а новые технические решения наталкиваются на забытые мелочи, порождающие новые проблемы.

Итак, колесо. Говорят, что в живой природе колеса мы не увидим. Наверное, так. Но возникло оно из ствола дерева, бревна, которое можно было перекатывать по достаточно ровной поверхности, а не таскать на себе к своему жилищу. Потом выяснилось, что это бревно можно нагрузить, например, большим валуном и ускорить с его помощью расчистку поля для посева. Облегчив себе труд, человек начал «эволюцию» этих «кругляшек», в результате которой функции колеса существенно расширились (рис. 1).

Ну, а причем здесь рычаг – этот волшебный механизм, который способен прибавить силы там, где этой силы не хватает? Попробуем взглянуть на оба эти механизма одновременно.

Колесо как средство передвижения

Все колёсные транспортные средства имеют общую особенность: они опираются на ту или иную дорогу и имеют ось вращения. А теперь представим себе, что колесо как круг (геометрическая фигура) есть геометрическое место его диаметров и только один из них имеет общую точку с опорой – дорогой, по которой это колесо

*Статья написана по материалам лекции, прочитанной на областной Школе для одарённых детей. Саратов, 08.11.2014.

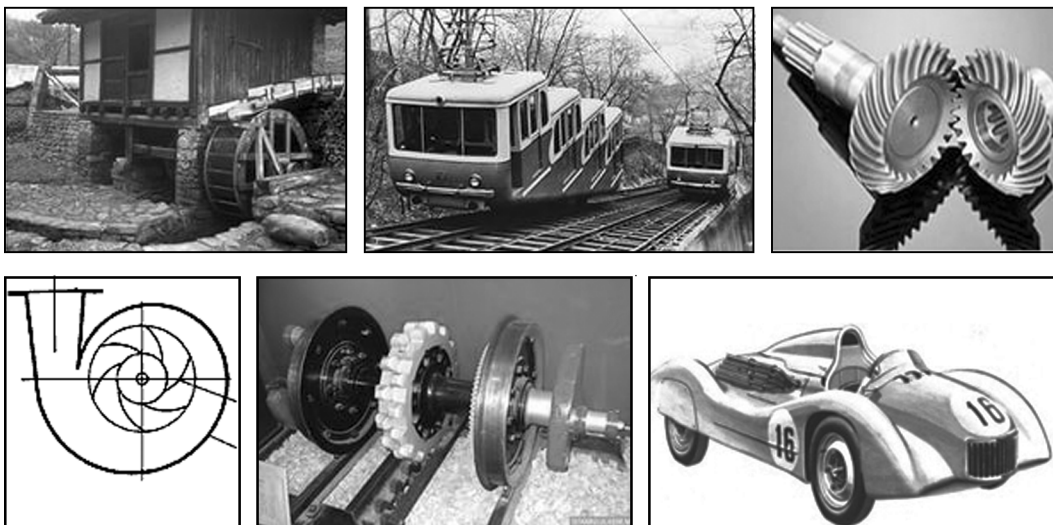


Рис. 1. Функции колеса весьма разнообразны

катится (рис. 2). Вот вам и рычаг. Пользуясь знаниями, полученными из учебника физики, можно сделать вывод, что при качении идеально круглого колеса по ровной горизонтальной дороге потери энергии на трение отсутствуют, хотя сами силы трения существуют и обеспечивают качение.

Это говорит о том, что при рассмотрении процессов, в которых участвует качение, следует приписывать потери энергии *не силам трения, а силам сопротивления качению* [2].

В самодвижущемся транспорте колесо выполняет одну из двух функций: преобразование прилагаемого к оси колеса момента в силу тяги либо преобразование приложенной к оси силы тяги в поступательное движение. Здесь пригодится теорема моментов, которая и устанавливает связь колеса с рычагом-диаметром. Физический смысл этой связи состоит в переходе части энергии вращательного движения в энергию поступательного и наоборот. Эти и другие функции колеса удобно рассмотреть на кинематической схеме, например, автомобиля (рис. 3).

Ведомое колесо служит для снижения сопротивления движению. К оси этого колеса приложена сила в направ-



Рис. 2. Колесо как сумма рычагов

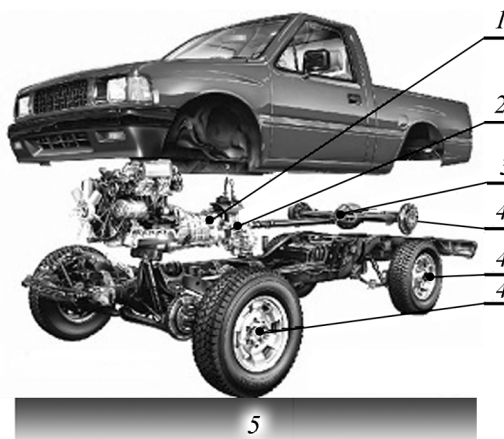


Рис. 3. Взаимодействие агрегатов в механизме. 1-двигатель внутреннего сгорания, 2-коробка перемены передач, 3- передача крутящего момента на колёса, 4 - оси вращения, 5 - сцепление с дорожным покрытием

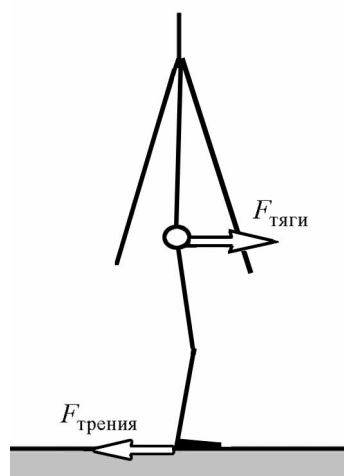


Рис. 4. Моменты сил при ходьбе

ус колеса, опирающийся в данный момент времени на дорогу, преобразует момент в силу, направленную против движения. Если скольжение отсутствует, то точка опоры остаётся на месте, зато смещается в направлении движения ось колеса, а через элементы подвески – и весь автомобиль.

Теперь очевидна разница между понятиями «двигатель» как источник механической энергии и «двигатель» как средство преобразования её в энергию движения.

Кстати, в нулевом приближении нога человека при осторожной ходьбе тоже может интерпретироваться как рычаг с осью (в тазобедренном суставе), опирающийся на землю (рис. 4). Момент вращения при ходьбе создаётся мышцами, хотя ходьба – гораздо более сложный динамический процесс, управляемый многими факторами. Желая углубить свои знания в области спортивной сложной динамики рекомендую интересную статью в № 4 журнала «Известия вузов. ПНД» [3]. В ней раскрыты большие возможности исследования сложнейших динамических систем на современной основе. Возможно, скоро мы станем свидетелями бездопингового спорта, когда всё будет решать техника спортивных упражнений.

Вернёмся к автомобилю. А что, разве многочисленные шестеренки в узлах автомобиля – не колёса? Только функция этих колёс другая: преобразование угловых скоростей вращения валов.

А если вместо твердой дороги – поверхность водоёма? И здесь колесо приобрело роль двигателя. Сейчас не встретить на реке колесный пароход, и паровые машины ушли в прошлое, а в роли двигателей выступают гребные винты, иногда пропеллеры и все чаще – водометы. А ранее колесо на судне было оснащено гребными лопастями, и тяговое усилие от него порождалось как трением увлекаемых им масс воды о неподвижные массы воды (похоже на наземный транспорт), так и реактивными силами отбрасываемых масс (рис. 5).

Законы механики благодаря принципу относительности движения предсказали колесу обратимые функции: ведомое колесо запасает кинетическую энергию при движении (роль двигателя), а ведущее колесо отдает энергию. Гребное колесо с парохода можно установить в потоке движущейся воды, а с осью его связать мельничные диски – вот вам и бесплатный помол зерна. Обратимость? Конечно. Конструкция колеса водяной мельницы постепенно сильно изменилась, превратившись и в ротор паровой турбины, и в ротор гидрогенератора, а также в элементы самых разных на-

лении движения через раму, элементы подвески, рычаги и рессоры. В возникновении сопротивления движению сила трения колеса о дорогу участия не принимает, зато деформация колеса, прогиб дорожного покрытия, слой грязи или снега, наконец, аэродинамическое сопротивление воздушного потока – вот главные виновники повышения расхода бензина.

Ведущее колесо служит *двигателем* в самоходном наземном транспорте. Здесь вращательный момент через элементы трансмиссии (сцепление, коробку передач и др.) передаётся от двигателя на ось ведущего колеса. Ради-



Рис. 5. Гребное колесо – весло или ракета?

сосов. Ведь, если поместить это же колесо в специально сконструированный корпус и хорошенько раскрутить, получится центробежный насос (рис. 6)!

Всем известно, что возвратно-поступательное движение поршня в цилиндре паровой машины или двигателя внутреннего сгорания – процесс очень неравномерный, а транспорт должен двигаться плавно. Вот и здесь пригодился такой важный параметр колеса, как момент инерции. Обладание этим важным свойством превращает колесо в аккумулятор кинетической энергии – маховик (рис. 7). Такой аккумулятор

с легкостью накапливает энергию и так же легко её отдаёт. Известны конструкции гироавтомобилей, которые не получили широкого распространения, но интересны с точки зрения экологической безопасности.

Важные выводы следуют из перечисленных фактов.

Единство двух видов механического движения позволило в процессе техногенной деятельности человека создать огромное количество комбинаций из преобразователей движения и накопителей энергии на основе разновидностей гладких и зубчатых колёс, воплощенных в транспортные средства, технологическое оборудование, электростанции, грузоподъемное оборудование и многое другое, без чего современная жизнь уже неммыслима.

Но есть одна функция колеса, которая не вписывается в описанные примеры потому, что она основана ис-

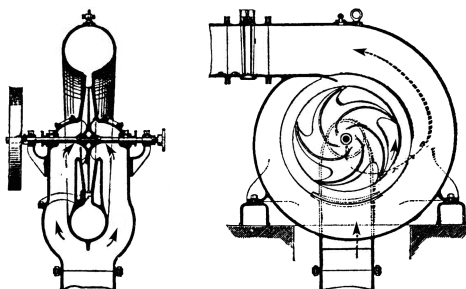


Рис. 6. Колесо водяной мельницы превратилось в насос



Рис. 7. Механический аккумулятор энергии

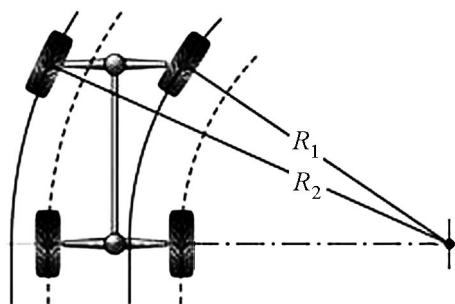


Рис. 8. Зачем автомобилю «схождение» колёс?
 собой концентрические окружности с общим центром, в котором пересекаются продолжения осей всех колёс. Нетрудно убедиться, что для выполнения этого условия передние колеса должны поворачиваться на разные углы. Это и есть «схождение». Ну, а развал обеспечивает регулирование площади опоры колеса в зависимости от загрузки машины и создает равномерный износ шины по ширине.

Ещё один важный пример. Привлекая воображение, можно представить качение колеса по дороге как наматывание дороги на колесо, если нет проскальзывания. А вот идея свернуть отрезок дороги в замкнутую ленту и надеть эту ленту на передние и задние колеса создает новую картину движения: колёса катятся по ленте (гусенице), а сама гусеница ползёт по дороге. Площадь соприкосновения с дорогой резко возрастает, и риск перехода колеса в режим скольжения снижается. Значит, появляется возможность получить огромные тяговые усилия с помощью гусеничного механизма. Заодно давление на дорогу становится малым, и можно ездить по болотам. Так мы пришли к тягачам, вездеходам и боевым машинам.

Кстати, всё вышесказанное призывает к осторожному использованию «нулевых» моделей движения с трением во многих задачах для школьников, в которых предполагается использование сил трения колес о дорогу взамен сил сопротивления качению (движению), иначе у учащихся может возникнуть превратное представление о физике процессов в этой области знаний.

Библиографический список

1. Ковылов Н.Б. Путь стрелца. Саратов: ООО ИЦ «Наука», 2011.
2. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: «Высшая школа», 1976. С. 332.
3. Кузнецов А.П., Селиверстова Е.С., Трубецков Д.И., Тюрюкина Л.В. Феномен уравнения ван дер Поля // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 4. С. 3.

Поступила в редакцию 12.12.2014

WHEEL AND LEVER IN ENGINEERING

N. B. Kovylov

Saratov State University

The article describes various functions of wheels in machines and mechanisms. It clarifies some aspects of the tasks solutions in mechanics.

Keywords: Friction, engine, torque, lever, mechanical transmission.



ДИССЕРТАНТУ О ВОСПРИНИМАЕМОСТИ, ЧИСЛОВОЙ ОЦЕНКЕ И ЗАЩИТЕ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В. М. Аникин¹, И. В. Измайлов², Б. Н. Пойзнер²

¹Национальный исследовательский Саратовский государственный университет

²Национальный исследовательский Томский государственный университет

Рассматриваются проблемы воспринимаемости, значимости числовых оценок качества научных публикаций, защиты авторских прав. Приведены примеры из истории науки. Обращено внимание на этические моменты, возникающие при пользовании научными электронными базами данных.

Ключевые слова: Язык науки, публикационная активность, индекс Хирша, электронные базы данных.

Три стадии признания научной истины:
первая – «это абсурд», вторая – «в этом что-то есть», третья – «это общеизвестно».

Эрнест Резерфорд

Диссертант претендует на признание своих научных достижений в форме присуждения соответствующей учёной степени, в силу чего особенно зависим от мнения научного сообщества. Поэтому он должен учитывать при написании и продвижении своей работы все те критерии, нормы, науковедческие положения и соглашения, сложившиеся в научной среде и применяемые при анализе качества научной работы. Данные заметки посвящены некоторым особенностям презентации научных результатов и их оценки.

1. О «резонансности» научных идей

Публикация научного результата в рамках (или вне рамок) диссертации любого формата (магистерская, кандидатская, докторская) не означает мгновенного признания научным сообществом его истинности, которая, прежде всего, соотносится с *общеобязательностью* результата, то есть его воспроизводимостью при заданных условиях и независимостью от не относящихся непосредственно к научной деятельности личностных «параметров» ученого. Качество «общеобязательности» придает добытым знаниям смысл и, как писал В.И. Вернадский, «создаёт научным исканиям в разнообразии и изменчивости жизни незыблемость» (цит. по [1, с. 59]). Признанию истинности результата объективно предшествует «рабочий процесс» его «воспринимаемости» со стороны представителей соответствующей области науки. Воспринимаемость требует отражения в научной работе идейно-экспериментальной базы в

форме согласованных научным сообществом стандартных способов проведения исследований, описания их процедур и получения результатов, без чего невозможны общение и дискуссия между специалистами в течение некоторого периода времени, когда к результату «привыкают» и, наконец, признают.

«Скорость» признания результата может определяться не только степенью убедительности его доказательности, но и социальными и человеческими факторами. Условия возникновения научных идей и резонансность их восприятия профессиональным сообществом нередко задаются сплетением разнообразных исторических, этнокультурных, ситуативных, личностных факторов (биографических обстоятельств) и просто непредвиденных событий. Как отмечал В.И. Вернадский, «...недостаточно, чтобы истина была высказана или чтобы явление было доказано. Их понимание, проникновение ими человеческого разума зависит от других причин, одна хрустальная ясность и стройность, строгость доказательств недостаточны. Условия внешней, социальной, среды, состояние техники, настроения и привычки мыслящих людей науки должны быть при этом принимаемы во внимание» (цит. по [1, с. 60]). Дело в том, что «научное мировоззрение не есть абстрактное логическое построение. Оно является сложным и своеобразным выражением общественной психологии» (цит. по [1, с. 60]). Классический пример: идеи И. Ньютона после выхода в свет «Математических начал натуральной философии» (1687) «пробивались» в общественное и научное сознание в течение нескольких десятков лет, преодолевая сопротивление учения Р. Декарта о силе как свойстве пространства.

2. Переходит ли «количество» в «качество»

Завоевание внимания к собственному научному творчеству происходит (это все знают) благодаря активности автора в публикационной деятельности, участию в научных конференциях и семинарах различного ранга, непосредственному обмену электронными версиями статей с представителями близкого по тематике круга исследователей и т.п.

О степени известности (далеко не всегда совпадающей с научной ценностью) работы свидетельствует количество ссылок на неё, что наряду с другими числовыми оценками-индексами (например, с индексом Хирша), используется в качестве числового показателя эффективности научной деятельности ученого. Можно вспомнить по этому поводу одно наблюдение академика П.П. Лазарева. В статье, посвящённой памяти своего учителя – выдающегося русского физика Петра Николаевича Лебедева [2], он приводил такую статистику: за 22 года творческой деятельности Лебедев опубликовал 22 оригинальные научные работы (не считая их переизданий), то есть в среднем по одной работе в год. Скончался Петр Николаевич в возрасте 46 лет. Аналогичная статистика по другим выдающимся ученым-физикам такова: у Георга Римана (умер в 39 лет) – 18 работ, у Генриха Герца (умер в 37 лет) – 25 работ, у Жана Фуко (умер в 47 лет) – 66 работ. Некоторые ученые оставили после себя всего по 2–3 работы, например, математик Эварист Галуа, погибший на дуэли в 20 лет. «И тем не менее, – подчёркивает Лазарев, – их имена навсегда связаны с историей науки. Мы видим, что одно только количество работ не дает никакого критерия значимости данного ученого» [2, с. 580].

И всё же числовые показатели играют сейчас немалую роль при решении вопросов об отборе претендентов на гранты, включении в экспертные советы и т.д., и иногда это оставляет в стороне внешне «неплодовитых» людей, обладающих большими знаниями и интеллектуальными возможностями.

Ясно, что в наше время компьютерные технологии значительно ускорили выполнение и презентацию научных исследований, тем более, в областях расчетов и виртуальных экспериментов, для которых компьютер, собственно, и вышел на первые планы и играет роль главного инструмента. Вот один из многочисленных примеров. Поставленная и не решенная в течение жизни великим К. Гауссом 200 лет назад проблема по определению скорости установления инвариантного распределения в первой введенной в научный оборот динамической системе теории чисел (имеется в виду отображение Гаусса [3], нашедшее применение в космологических теориях) была численно решена в машинную эпоху (правда, с некоторыми «приключениями», поскольку требовалось работать с каверзным математическим объектом – несамосопряженным линейным оператором).

«Может удивлять малое количество печатных работ у Лебедева, который целые дни проводил в лаборатории, – писал в той же статье П.П. Лазарев, – но это объясняется колоссальной технической трудностью тех вопросов, которые ставил для разрешения Лебедев. Исследования светового давления на твердые тела потребовали от него около 8 лет работы; изучение давления света на газы продолжалось ещё дольше – около 10 лет. Если пересмотреть все варианты опытов Лебедева, все контрольные исследования, то мы должны согласиться с Вином, который писал, что Лебедев «владел искусством экспериментирования, как никто в наше время» [2, с. 580].

3. Научная тщательность и публикационная скромность

На проблему своевременной апробации научных результатов можно взглянуть в несколько ином ракурсе: в истории науки есть учёные, которые демонстрировали предельную «публикационную скромность» при наличии важных оригинальных результатов. Прежде всего, следует назвать имя математического гения Карла Фридриха Гаусса (1777–1885). Он оставил много неопубликованных работ, о которых стало известно спустя многие годы. Так, выяснилось, что Гаусс занимался, в частности, вопросами неевклидовой (термин принадлежит Гауссу!) геометрии, теорией эллиптических функций и стал свидетелем первых публикаций по этим темам других авторов, причём относился к чужим работам весьма скептически.

Второй, более близкий по времени, сюжет. В 2006 году физики-теоретики мира не оставили без внимания 100-летие со дня рождения итальянского профессора Этторе Майораны (1906–1938(?)). Его исключительный математический талант признавали ведущие специалисты мира в области ядерной физики – Энрико Ферми, Эмилио Сегрэ, Бруно Понтекорво, Эдуардо Амальди¹. Опубликованные работы Майораны (а их насчитывают от 8 до 10) сохраняют научную ценность (и, соответственно, цитируются) до настоящего времени. Как отмечал И.М. Капитонов, профессор кафедры общей физики МГУ, Майорана «навсегда вошёл в историю науки, благодаря двум провидческим работам в области физики. Он первым в начале 1930-х годов создал теорию атомного ядра, состоящего из протонов и нейтронов, начав работать над ней ещё до открытия нейтрона. В основном же Майорана известен тем, что «изобрел» в 1937 году абсолютно нейтральное (истинно-нейтральное) нейтрино, называемое теперь майорановским, и значение которого для физики нейтрино было осознано лишь почти 40 лет спустя»².

¹Э. Амальди издал книгу о Майоране: Amaldi E. La Vita e l'Opera di Ettore Majorana (Roma: Accademia Nazionale dei Lincei, 1966).

²Капитонов И.М. Жизнь и дело Этторе Майораны (Эпилог к 100-летию Этторе Майораны) // Газета «Советский физик» (Физический факультет МГУ). 2007, № 1 (54). Статья 8. URL: [http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2007/1\(54\)-2007/54-8/](http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2007/1(54)-2007/54-8/)

Однако «официально» Майорана не значится среди авторов протон-нейтронной теории атомного ядра (термин «силы Майораны» все же закрепился в ядерной физике). Но он мгновенно, по свидетельству Сегрэ и Ферми, правильно интерпретировал опубликованные результаты опытов супругов Жолио-Кюри, из которых можно было «вывести» существование нейтрона, и провел теоретические расчеты по «конструированию» ядра. Майорана отказался обнародовать эти результаты, считая их незавершенными, хотя мог бы их представить (при посредстве Э. Ферми), допустим, летом 1932 года на международной конференции в Париже по атомной физике.

И ещё более парадоксальный случай: свою знаменитую статью о нейтрино Э. Майорана, по свидетельству Б.М. Понтекорво, написал просто для того, чтобы повысить свои шансы на занятие места профессора на кафедре физики университета Неаполя в 1937 году. А в 1938 году, в возрасте 31 года, Э. Майорана, в буквальном смысле, таинственно исчез (по этой причине около даты его смерти иногда ставят знак вопроса). К сожалению, в науке он оставил вклад гораздо меньший, чем реально мог ей дать. Многие свои идеи он сообщал только узкому кругу лиц, отказываясь их публиковать; не берег своих расчетов. Рассказывали, что во время научных дискуссий он мог сделать важные выкладки на пачке сигарет, которую потом со спокойной душой выбрасывал. Возможно, для него представляли большую ценность *собственно процесс познания и ощущение личного ясного понимания проблемы*, чем представительский момент (а он имеет и определённый тщеславный смысл), связанный с публикацией научных статей...

А вот, в случае открытия в конце 60-х годов прошлого века нового фундаментального типа поверхностных акустических волн в пьезоэлектрических материалах (сдвиговых поверхностных волн), лавры первооткрывателей международное научное сообщество единодушно поделило между Юрием Васильевичем Гуляевым, будущим академиком и членом Президиума РАН, и Джеффри Л. Блюстейном (Jeffrey L. Bleustein), преподавателем (Associate Professor) факультета инженерии и прикладных наук Йельского университета (штат Коннектикут, США). В мировой литературе для названного типа волн утвердилось название Bleustein–Gulyaev waves (Gulyaev–Bleustein waves).

Как случилось, что новый тип волны получил двойное наименование? Гуляев и Блюстейн работали независимо друг от друга. Статья Ю.В. Гуляева «Поверхностные электрорезонансные волны в твердых телах» поступила в журнал «Письма в ЖЭТФ» 17 октября 1968 года и была опубликована в январском выпуске этого журнала 1969 года (Т. 9, вып. 1. С. 63–65). Статья Джеффри Блюстейна «A new Surface Wave in Piezoelectric Materials» принята в журнал «Applied Physics Letters» на три недели позже – 7 ноября 1968 года, но зато была опубликована раньше – уже в декабрьском номере журнала (Vol. 13, Number 12, 1968, December 15). Можно сказать, что редакционная нерасторопность лишила отечественного учёного единоличного приоритета³. Соавторы открытия ни разу не встречались в жизни, но в вопросе приоритета корректны по отношению друг к другу.

³Любопытна дальнейшая карьера Джеффри Блюстейна (PhD in engineering mechanics from Columbia University). В 1971 году он занялся управленческой деятельностью в компании American Machine and Foundry, а затем – в «брендовой» компании Harley–Davidson. На стезе бизнеса, управления и маркетинга он добился больших успехов (ему пригодился здесь и инженерный опыт). В 2002 году он привлекался к работе в президентской комиссии по трудовым ресурсам (в тот год издание «Industry Week» «определило» его в число технологических лидеров года – Technology Leader of the Year). В 2010 году журнал «Harvard Business Review» включил Блюстейна в список «100 наиболее эффективных руководителей мира».

4. Учёные «всякие нужны», учёные «всякие важны»

Однако продолжим обсуждать вопрос о «популярности» научных публикаций на более «приземленном» уровне. В число цитирований входят и ссылки автора на собственные работы, и «внешние» ссылки, сделанные «коллегами по цеху». Устойчивый интерес к конкретной публикации на временной шкале призван подтверждать научную новизну, качество содержания научной работы и, в конечном итоге, истинность и значимость представленных данных. Однозначно сказать, исходя из общего понятия «наука», что «лучше» – «внутренние» или «внешние» ссылки – трудно. Если тема, которая профессионально разрабатывается автором, серьёзна, но поддерживается в мире (стране) относительно небольшим числом исследователей, то «внутренние» ссылки можно рассматривать как подтверждение «преданности» своей теме и ее развития, а также компетентности в данной области, и без них просто не обойтись.

С другой стороны, большое число «внешних» ссылок в первую очередь означает, что работа хорошо разрекламирована и (или) выполнена в «ударном» направлении, придерживаться которого «выгодно» не только из научных, но и конъюнктурных соображений, тем более, если предшествующий научный багаж можно успешно использовать при разработке новой тематики. С научной точки же зрения, важны *все* работы, содержащие истинные, в рамках заложенных в них модельных представлений, результаты. К тому же, пожалуй, прав Норберт Винер, который писал: «Вполне вероятно, что 95 процентов оригинальных научных работ принадлежат меньше чем 5 процентам профессиональных ученых, но большая часть из них вообще бы не была написана, если бы остальные 95 процентов ученых не содействовали созданию общего достаточно высокого уровня науки» (цит. по [4, с. 69]). Это высказывание, во-первых, можно адресовать людям, распоряжающимся в стране финансовыми потоками. А во-вторых, популярность тематики может приводить, как остроумно отмечено в [5, с. 8], к «самопроизвольному рождению» «первопроходцев»: «Не успеешь что-нибудь открыть, как набегут предшественники» (по Л.А. Вайнштейну).

5. Электронная библиотека, индекс Хирша и «поручики Киж» XXI века

Попутно отметим, что динамика числа цитирований имеет свои «удивительные» особенности. Например, для активно работающих учёных своеобразной «ловушкой» для ссылок оказываются написанные ими монографии. Читатели перестают ссылаться на оригинальные статьи, а указывают в качестве источника книгу – так проще и, может быть (особенно, если монография «свежая»), «солиднее». Далее, едва ли не во всех журналах правила оформления библиографических данных различны и, как правило, в полной мере не соответствуют государственному стандарту на затекстовые ссылки (их использование в научной литературе представляется наиболее разумным). Это создаёт трудности при установлении связей между публикациями в отечественной электронной системе eLibrary, поскольку соответствующая программа необыкновенно чувствительна (до знака) к расхождениям в библиографических текстах, в результате чего ссылки не «проявляют» себя, так что каждый автор со стажем легко обнаружит в своём «досье» не один десяток (!) «непривязанных» ссылок. И просто анекдотом в системе eLibrary выглядит название журнала,

записанное как ... «Там же». Это следствие редакторской «экономии» при оформлении библиографии в журнальных статьях, доведённое до абсурда недостаточно осведомленными (мягко говоря) уполномоченными, которые от имени организаций заносят первичные данные в систему. Переход же на единый стиль библиографических данных не прост, поскольку требует перепрограммирования редакторских систем, используемых в журналах. Право вносить коррективы самим авторам разумно не предоставлено в силу (опять же) их возможной некомпетентности в содержательной и технической стороне дела. Они могут лишь надеяться на помощь службы поддержки eLibrary.

Всех пользователей системы eLibrary (и, впрочем, зарубежных электронных баз данных) ждут также «сюрпризы» в форме ошибочно занесённых в их списки статей других авторов, являющихся однофамильцами (язык и инициалы при этом не играют никакой роли – лишь бы совпадали фамилии и их транслитерации). Но особенность системы состоит в том, что формируя список работ автора с «избытком», она при этом «доверяет» сохранить свои и удалить чужие публикации. Как показывает практика, далеко не все авторы внимательны и щепетильны в этом вопросе. Это, в частности, может привести к появлению «поручиков Кижее» XXI века: обладая мизерным значением индекса Хирша, благодаря «гуманитарной помощи» бригады авторов-однофамильцев (с несовпадающими даже инициалами!), работающих в иных, в том числе за пределами Родины, организациях, некоторые таким путем могут свой индекс существенно «прирастить» и попасть (по недосмотру), к изумлению честного народа, на местные «доски почёта» «рекордсменов» по Хиршу.

Что мы хотели сказать этим отступлением? Числовые показатели «эффективности» научной деятельности не являются абсолютными в содержательном отношении. Их корректность и объективность пока не обеспечивается также техническими средствами и во многом зависит от «человеческого фактора».

6. Осторожно: Интернет!

Продолжая основную тему, отметим, что особое значение проблема «завоевания» научной аудитории имеет для соискателей учёных степеней. Современные информационные технологии облегчили этот процесс. На заключительной стадии прохождения диссертации коммуникативное взаимодействие [6] достигается посредством рассылки автореферата по электронной почте и размещения текстов автореферата и диссертации в Интернете. Широкой аудитории теперь доступны и размещаемые на сайтах диссертационных советов полные тексты всех отзывов, поступающих на диссертацию и автореферат.

Но здесь мы вынуждены опять остановиться и обратить внимание на существенные проблемы, встающие перед авторами диссертаций. При открытом доступе, во-первых, существенно «обнажается» лингводисциплинарная компетенция диссертанта – научная эрудиция, владение средствами грамотного вербального представления результатов, терминологией, умение делать смысловые умозаключения [4, 6]⁴, а во-вторых, беззащитными становятся «недоопубликованные» фрагменты текста диссертации. В принципе, это создаёт мотивацию для более внимательной

⁴Кстати, критическое отношение к общему уровню соискателя может вызвать даже некорректное с редакторской точки зрения и нелогичное по содержанию форматирование заголовка диссертации!

работы над диссертацией и её апробации. И это плюс. Но насколько хорошо это «средство мотивации» в плане абсолютной защиты авторских прав, да и обеспечения информационной безопасности? Ведь размещение полных текстов диссертаций при всей формальной открытости тематики открывает неконтролируемым «учёным-хищникам» широкий путь для присвоения систематизированных результатов, выводов, идей, направлений дальнейших исследований. И это уже большой минус.

7. Язык науки

И в заключение обратим внимание как авторов, так и читателей научных работ на моменты, связанные с вербальным представлением научных данных.

В контексте проблемы восприимчивости новых результатов определённую роль играет научная терминология, в частности, непротиворечивость и однозначность терминов, используемых в пределах диссертационной работы. Многовековая жизнь науки доказывает, что содержание отдельных важных терминов со временем постепенно изменяется. И неудачный выбор автором основных для его теории терминов и (или) её названия может определить судьбу теории. Примером «на все времена» может служить несчастливая судьба научных идей французского естествоиспытателя Ж.-Б. Ламарка (1744–1829). Одновременно (1802) с немецким учёным Г.Р. Тревиранусом он ввел термин «биология», имеющий исключительно широкое хождение и ныне. Будучи предшественником Ч.Р. Дарвина, Ламарк создал учение об эволюции живой природы (ламаркизм). Но, следуя традициям XVIII века, он назвал движущие эволюцию взаимодействия «невидимыми флюидами». И уже учёными XIX века «невидимые флюиды» воспринимались как нечто мистическое (и потому бессодержательное). Как полагает историк естествознания С.Д. Хайтун, это обстоятельство почти на два столетия отодвинуло вполне рациональную автогенетическую концепцию Ламарка с авансцены эволюционизма. В этой связи актуализация непротиворечивой классификации терминов и обозначаемых ими понятий является актуальной (хотя и сложной задачей), что оказывается полезным и в прогностических целях. Соискатель обязан (а) помнить, что язык науки должен соответствовать *предметной области* исследования, и (б) стремиться к максимальной точности и однозначности не только при определении понятий и высказываний, но и при их *использовании*!⁵

К сожалению, даже при выполнении императивов (а) и (б) участники научной коммуникации не застрахованы от взаимного непонимания. Речь не идёт о банальных недоразумениях, вызванных, например, несоизмеримостью их тезаурусов. Уязвимость коммуникации имеет более глубокую основу. Обычно в научных положениях, выносимых диссертантом на защиту, в выводах, резюме и иных формах «плотной упаковки» нового знания автор обязан оперировать абстракциями (часто весьма высокого уровня, скажем, «система», «(бес)порядок», «устойчивость», «преобразование»). И чем выше градус абстрагирования, обобщения, тем ценнее в познавательном плане тезис, поскольку он универсален, всеприложим, служит компасом в многообразных исследовательских ситуациях. В этом обстоятельстве проявляется одна из генеральных функций науки, подчёркиваемая В.И. Вернадским: подводить

⁵В радиофизических работах, например, нужно аккуратно подходить к использованию термина «мода».

различное, конкретное под общее, единое, то есть унифицировать многочисленные частности. Или, как стали выражаться позднее, сжимать информацию.

Попытаемся встать на позицию коллеги-читателя, то есть того, кому адресована статья, книга, диссертация etc. Ему предстоит безошибочно воспринять её содержание и действовать в согласии с ним. Но каковы источники помех? Согласно выводам А. Коржибского⁶ в его книге «Наука и здравый смысл», чем выше уровень абстракции сообщения, тем ниже вероятность того, что оно будет осмыслено должным образом. Причина парадокса в том, что абстрактное слово читатель или слушатель воспринимает в *субъективной* «системе координат». А её образует нейроструктура, регулирующая познавательную деятельность. Восприятие основано на личном опыте человека (осознаваемом или нет) и на «подмене» абстракции внутренним представлением, хранящимся в подсознании.

Иначе говоря, в ходе восприятия читатель или слушатель не «вынимает» *смысл* абстракции, который ранее «вложил» в своё высказывание автор, а «дешифрует» его. Но дешифрует не только стандартным, общепринятым алгоритмом, но и с помощью «ключей», «подсказок», «сигналов», которые рождены его личными подсознательными ощущениями. Очевидно, что абстракциям и общим категориям неизбежно свойственна *неопределённость* значения. Чем больше такой неопределённости в сообщении, тем больше личных внутренних представлений она мобилизует и тем выше активность подсознания. А это всё субъективные явления⁷. Поэтому от читателя (слушателя) требуется особая бдительность при работе с восприятием абстракций.

Заключение

Действенность критериев общеобязательности и воспринимаемости демонстрирует история научных открытий. На хронологической оси встречаются *все* события, с которыми связаны те или иные творческие достижения естествоиспытателей и инженеров: гениальные догадки, экспериментальные факты, постановки проблем, убедительные теории, открытия, плодотворные идеи, пионерские изобретения, точные модели природных явлений, полезные приспособления, поучительные неудачи и т.д. Уже по одной этой причине история науки и техники обладает бесспорной познавательной силой. Знание истории науки – непосредственно либо косвенно – способствует освоению её предмета, постепенному овладению специальной терминологией, помогает ориентироваться в эпонимии, в содержании споров между учёными, представить себе судьбу некоторых творческих идей, различные периоды развития науки [1,7]. Конкретным примером познавательного научно-исторического рассмотрения является работа [5].

Различные науковедческие аспекты, определяющие качество научной работы, рассматриваются также в [8–12]. В данных заметках акцентируется, главным образом, мысль о том, что только те знания, которые автор делает публичным достоянием и которые проходят экспертную оценку, можно считать состоявшимися, «восприни-

⁶ А. Коржибский (иначе Кожибский, Корзыбский; 1879–1950) – философ, один из творцов психолингвистики, занимающейся соотношением смысла и его передачи средствами речи. Родился в Российской империи, учился в Варшавском университете, эмигрировал (1940) в США.

⁷ См. : Жучкова А.В. Психолингвистическая структура стихотворения Мандельштама «Стихи о неизвестном солдате» // Вопросы литературы. 2014. Ноябрь–Декабрь. С. 145–168.

маемыми». Но для этого требуется встречное «движение» интеллектуальных усилий авторов и читателей. Мысли и идеи, оставшиеся в рабочих дневниках и со временем потерявшие научную актуальность, могут служить лишь характеристикой блестящей научной интуиции и эрудиции их авторов.

Библиографический список

1. *Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н.* О науке, событиях в истории изучения света, колебаний, волн, об их исследователях, а также глоссы и этимоны: Учеб. пособие / Под ред. А.В. Войцеховского. Томск: Издательский Дом ТГУ, 2014. 380 с.
2. *Лазарев П.П.* Воспоминания о П.Н. Лебедеве // УФН. 1962. Т. 77, вып. 4. С. 571.
3. *Аникин В.М.* Отображение Гаусса: Эволюционные и вероятностные свойства. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2007. 80 с.
4. *Аникин В.М., Усанов Д.А.* Диссертация в зеркале автореферата: Метод. пособие для аспирантов и соискателей ученой степени естественно-научных специальностей. М.: ИНФРА-М, 2013. 128 с.
5. *Кузнецов А.П., Селиверстова Е.С., Трубецков Д.И., Тюрюкина Л.В.* Феномен уравнения ван дер Поля // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 4. С. 3.
6. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* Коммуникативная функция автореферата и уровень лингво-дисциплинарной компетенции диссертанта // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2013. Т. 13, вып. 1. С. 80.
7. *Аникин В.М.* Физика и интеллектуальное саморазвитие личности // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 4. С. 117.
8. *Соснин Э.А., Пойзнер Б.Н.* Осмысленная научная деятельность: Диссертанту – о жизни знаний, защищаемых в форме положений / Под ред. А.В. Войцеховского. М.: ИНФРА-М, 2015. 144 с.
9. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* «Предзащита» диссертации: Формальные требования и традиции // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 2. С. 95.
10. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* Провокация магистранта на вербализацию защищаемого положения как прием когнитивного менеджмента // Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология. 2013. № 2. С. 15.
11. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* Какова природа интересного, или дефиниции науки и научности – эпистемологический компонент профессиональной компетенции (радио)физика как инженера-исследователя // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, № 10/3. С. 118.
12. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* Эпистемологические упражнения магистранта: Формулировка и оценка научных положений в своей диссертации // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 8/3. С. 213.
13. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* Как диссертанту аргументировать достоверность научных положений и результатов, выносимых на защиту // Известия высших учебных заведений. Физика. 2011. Т. 54, № 6. С. 105.

Поступила в редакцию 10.12.2014

ABOUT PERCEPTION, NUMERICAL RATING AND PROTECTION OF SCIENTIFIC RESULTS

V. M. Anikin¹, I. V. Izmailov², B. N. Poizner²

¹National Research Saratov State University

²National Research Tomsk State University

The problems of perception, significance of numerical assessments of scientific publications quality, copyright protection are considered. Examples from the history of science are given. Ethical issues by using electronic scientific databases are named.

Keywords: Words of science, publication activity, h-index, scientific electronic databases.



Аникин Валерий Михайлович – родился в Аткарске Саратовской области (1947). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1970). Доктор физико-математических наук, профессор, декан физического факультета СГУ, заведующий базовой кафедрой компьютерной физики и метаматериалов физического факультета СГУ в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ученый секретарь диссертационного совета Д 212.243.01 на базе СГУ, эксперт Министерства образования и науки Российской Федерации. Область научных интересов: математическое моделирование хаотических и стохастических процессов, диссертациоисведение. В числе работ – монография «Аналитические модели детерминированного хаоса» (совместно с А.Ф. Голубенцевым; М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007), методическое пособие «Диссертация в зеркале автореферата» для аспирантов и соискателей ученой степени естественнонаучных специальностей (совместно с Д.А. Усановым; М.: ИНФРА-М, 2013, 2014).

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83

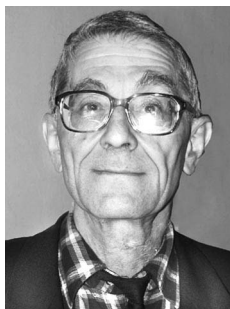
Национальный Исследовательский Саратовский государственный университет
E-mail: AnikinVM@yandex.ru



Измайлов Игорь Валерьевич – родился в Алма-Ате (1976), окончил Томский государственный университет (ТГУ, 1999). Работает в ТГУ доцентом радиофизического факультета. Кандидат физико-математических наук (2002), доцент (2012). Ведёт исследования, ориентированные на выявление новых синергетических феноменов и закономерностей нелинейной динамики в системах различной природы, на применение их в радиофизических и оптических устройствах (обработки и защиты информации, адаптивной, сингулярной оптики, функциональной электроники). Опубликовал четыре монографии и два учебных пособия с грифом УМО (в соавторстве). Автор 100 научных статей по направлениям, указанным выше (из них 50 – в рецензируемых журналах).

634050, Томск, пр-т Ленина, 36

Национальный Исследовательский Томский государственный университет
E-mail: izmi@mail.tsu.ru



Пойзнер Борис Николаевич – родился в Томске (1941). Окончил радиофизический факультет Томского государственного университета (1963). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук (1970). Работал на кафедре квантовой электроники и фотоники (1964–1967 и с 1970). В настоящее время – профессор этой кафедры. Читает лекции по нелинейной оптике, лазерной технике, основам синергетики, социальной информатике. Автор и соавтор более 400 публикаций, 10 изобретений, 20 учебных пособий и монографий по физике лазеров, процессам самоорганизации и хаотизации в оптических, радиофизических, социокультурных системах, вопросам вузовской педагогики и (само)образования, науковедению и культурологии, проблемам творчества как целенаправленной деятельности в обществе. Заслуженный работник высшей школы РФ (2005). Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.267.04 на базе ТГУ. Действительный член Национального союза библиофилов РФ.

634050 Томск, пр-т Ленина, 36

Национальный Исследовательский Томский государственный университет
E-mail: pznr@elefot.tsu.ru



О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ СЖАТОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СОСТАВНОЙ ТРУБЕ ДРЕЙФА

А. Г. Петрик

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина

В работе проведено полномасштабное численное трехмерное моделирование формирования сжатого состояния релятивистского электронного пучка в виркаторной системе с составным пространством дрейфа с трубами разного диаметра. Был обнаружен механизм формирования сжатого состояния пучка через образование двух виртуальных катодов вблизи анодной сетки и на скачке радиуса пространства взаимодействия, которые со временем смыкаются в один распределенный в пространстве дрейфа виртуальный катод (сжатое состояние пучка).

Ключевые слова: Численное моделирование, сжатое состояние, виртуальный катод, нелинейная динамика, релятивистский электронный пучок.

Введение

Исследования, направленные на изучение образования и динамики виртуального катода (ВК) в интенсивных электронных потоках, представляют большой интерес и являются важной задачей в области современной вакуумной и плазменной электроники больших мощностей [1–5]. Интерес обусловлен как фундаментальной важностью подобных исследований, так и прикладным значением данных работ. Электронные потоки с виртуальным катодом имеют большой спектр практических применений. В частности, они используются в мощных источниках электромагнитного излучения [3–8], для коллективного ускорения пучков положительных ионов [9], для генерации широкополосных шумоподобных СВЧ-колебаний [10–12], для генерации мощных импульсов тормозного рентгеновского излучения [3], в мощной коммутационной технике [12], для измерения сверхглубокого вакуума [8] и т.д.

ВК, отражающий от себя часть электронного потока, формируется в пучках со сверхкритическим током, который существенно зависит от энергии инжектируемых электронов и геометрии пространства дрейфа [2, 3, 6]. После формирования ВК в промежутке «катод–ВК» устанавливается двухпотокное состояние пучка. В работе [13] было обнаружено и описано новое состояние, опережающее в своем развитии

двухпотокую неустойчивость, так называемое сжатое состояние пучка (ССП), характеризующееся малой скоростью и большой плотностью электронов, а также развитой турбулентностью встречных потоков. Было показано, что один из сценариев формирования СПП носит волновой характер, причем волна переключения от двухпотокowego к сжатому состоянию движется от ВК к катоду, то есть против инжекции пучка. Следуя работе [14], можно сказать, что фактически СПП – это распределенный в пространстве дрейфа ВК, обнаруживаемый по специфическому профилю фазового портрета, когда встречные пучки на некотором участке смыкаются вдоль оси скоростей, образуя область сильно нагретого электронного облака.

В мощных системах с релятивистскими электронными пучками для получения СПП используют составное пространство дрейфа из труб разного радиуса [15]. В секции с меньшим диаметром размещены катод и анод, ток пучка в ней ниже критического тока возникновения ВК, а во второй трубе дрейфа ток превышает критический и реализуется СПП. В работе [15] были также рассмотрены сценарии установления СПП при различных условиях. Было показано, что, если разместить на скачке радиуса фольгу или сформировать тонкий плазменный слой, то скорость установления СПП несколько уменьшится. В работе [16] было обнаружено, что СПП устанавливается между осциллирующим и магнитным ВК, а волна переключения может двигаться в противоположную от катода сторону. В работе [17] также была изучена возможность формирования СПП в гладкой трубе дрейфа за счет дополнительного торможения электронов и были выявлены характерные особенности поведения подобной системы.

Практический интерес к изучению сжатого состояния определяется, например, возможностью применения СПП для коллективного ускорения ионов [9, 18]. Например, в работе [18] был оценен темп ускорения ионов в волне переключения от двухпотокowego к сжатому состоянию пучка, который составил порядка 1 МэВ/см.

Вместе с тем, детали механизма образования и нелинейной динамики сжатого состояния потоков до конца не изучены. В частности, не проведены детальные исследования поведения системы с изменением тока пучка, что можно осуществить, например, меняя расстояние «катод–анод» источника потока. Поэтому целью данной работы стало рассмотрение и анализ механизма установления сжатого состояния сильноточного электронного потока в составной трубе дрейфа при изменении расстояния «катод–анод» источника электронов.

1. Исследуемая модель

Как уже говорилось во Введении, типичной системой для изучения СПП является модель, имеющая составное пространство дрейфа из труб разного радиуса. В данной работе мы рассматриваем мощную релятивистскую виркаторную систему с двухсегментным пространством дрейфа пучка, аналогичную рассмотренной в работах [14, 15].

Схема рассматриваемой нами системы показана на рис. 1, а. В качестве источника электронов выступает цилиндрический катод 1, размещенный соосно с первой секцией пространства дрейфа 3. С катода происходит эмиссия электронов за счет ускоряющего напряжения, подаваемого на ускоряющую сетку 2 (анод), которая считается полностью прозрачной для электронов. Форма моделируемого импульса напряжения показана на рис. 1, б. Амплитуда импульса 500 кВ, время нарастания импульса 3.0 нс. Ускоренный пучок движется в эквипотенциальном пространстве

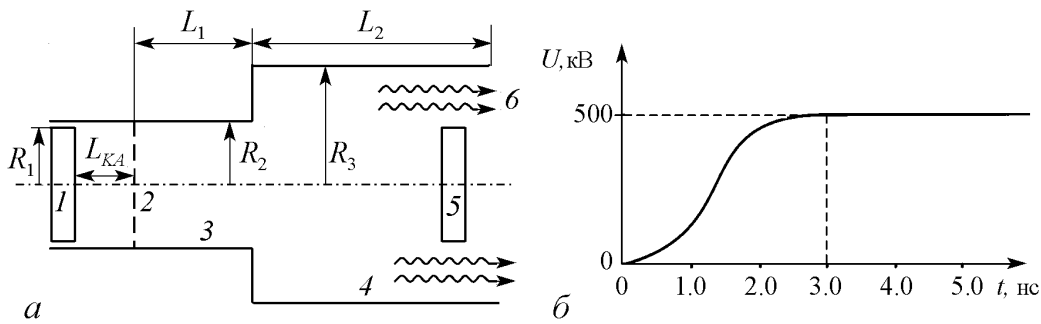


Рис. 1. *a* – схема моделирования (масштаб сохранен): 1 – катод, 2 – анодная сетка, 3 – анодная секция, 4 – секция дрейфа, 5 – коллектор, 6 – вывод СВЧ-мощности; геометрические параметры: $L_1 = 70$ мм, $L_2 = 100$ мм, $R_1 = 24$ мм, $R_2 = 27$ мм, $R_3 = 50$ мм. *б* – форма импульса напряжения, время нарастания импульса 3.0 нс

дрейфа в первой секции, которая на расстоянии L_1 от анодной сетки испытывает скачок радиуса, переходя во вторую секцию длиной L_2 . Пучок, прошедший через ВК, осаждается на коллекторе электронов 5. Вывод электромагнитной мощности 6 располагается в плоскости коллектора и представляет собой коаксиальный волновод, центральным проводником которого выступает коллектор. Вся система находится во внешнем продольном однородном магнитном поле с индукцией $B = 50$ кГс, которое фокусирует и удерживает электронный пучок.

В качестве основного управляющего параметра выступало расстояние от катода до анодной сетки L_{KA} , которое менялось в диапазоне 3.0...11.0 мм за счет того, что катод отодвигался от анодной сетки.

Все вычисления проводились с использованием лицензионного программного комплекса CST ParticleStudio (CST PS) [19]. Данный продукт представляет собой специализированный инструмент для моделирования динамики заряженных частиц в 3D электромагнитных полях электродинамических систем. При расчетах используется particle-in-cell вычислитель CST PS, предназначенный для моделирования самосогласованной задачи распространения электромагнитных волн и движения заряженных частиц во временной области. При этом электромагнитные поля вычисляются в дискретных узлах путем решения полной системы уравнений Максвелла по схеме с перешагиванием (метод сеток), тогда как крупные частицы движутся в непрерывном фазовом пространстве, для каждой крупной частицы решаются уравнения движения, далее для нахождения величин тока и пространственного заряда частицы взвешиваются на пространственной сетке [20]. При моделировании источника электронного потока используется модель эмиссии постоянного тока.

2. Численные результаты

Рассмотрим результаты изучения поведения исследуемой системы при изменении основного управляющего параметра – расстояния «катод–анод». На рис. 2 и 3 приведены фазовые портреты электронного потока в различные моменты времени при двух различных характерных значениях управляющего параметра. Данные графики демонстрируют эволюцию во времени установления и развития сжатого состояния электронного потока, которая сопровождается накоплением частиц и, соответственно, дополнительного электрического заряда в области пространства дрейфа пучка.

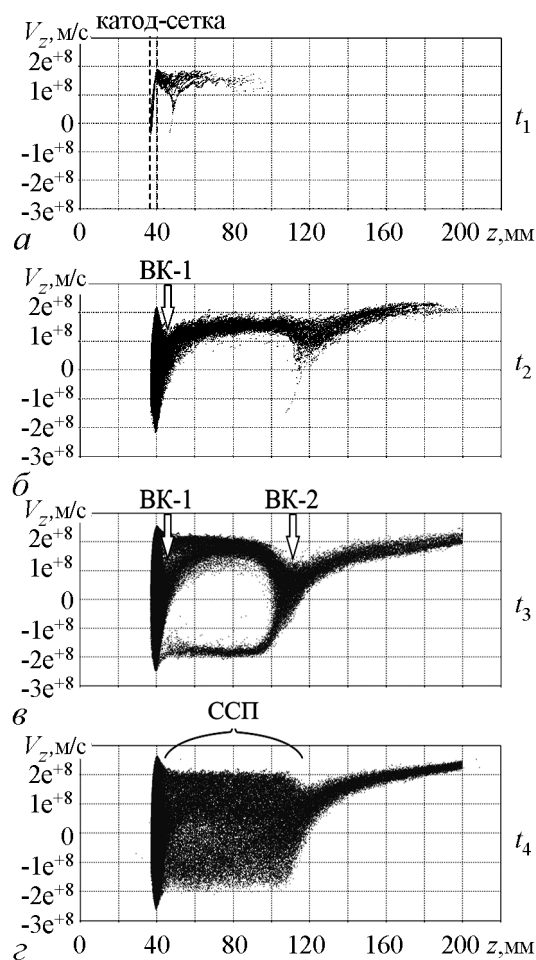


Рис. 2. Фазовые портреты для $L_{KA} = 3.0$ мм в моменты времени t , нс: $t_1 = 2.2$, $t_2 = 2.8$, $t_3 = 3.4$, $t_4 = 10.0$

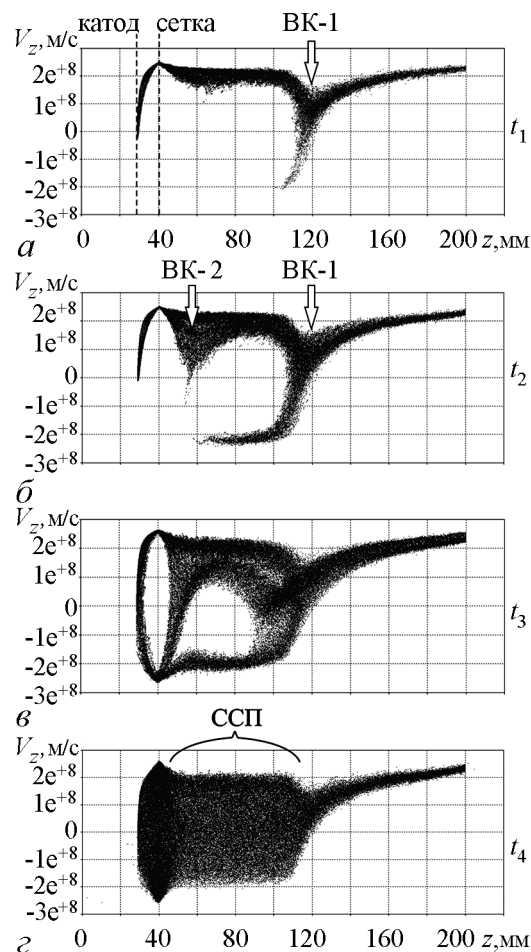


Рис. 3. Фазовые портреты для $L_{KA} = 11$ мм в моменты времени t , нс: $t_1 = 2.8$, $t_2 = 3.0$, $t_3 = 3.4$, $t_4 = 10.0$

При малых величинах расстояния «катод–анод», например, при $L_{KA} = 3.0$ мм (этот случай показан на рис. 2), изначально накопление частиц происходит возле анодной сетки за счет торможения потока в результате действия сил пространственного заряда (2.2 нс, рис. 2, а), которое спустя приблизительно 0.6 нс приводит к формированию первого виртуального катода вблизи анодной сетки. А около границы скачка радиуса трубы дрейфа образуется второе уплотнение в потоке, в котором имеется значительное провисание потенциала, так что в этой области пучок начинает интенсивно тормозиться (рис. 2, б). Формирование второй области торможения связано со скачком радиуса пространства дрейфа, в этой области величина критического тока пучка понижается. В ходе дальнейшей эволюции системы вторая область торможения развивается во второй виртуальный катод (показан стрелкой на рис. 2, в), отражающий электроны, так что в первой секции пространства дрейфа формируется двухпоточное состояние (см. рис. 2, в). Виртуальные катоды постепенно сливаются в один распределенный по пространству ВК, и примерно в момент времени 10 нс в системе формируется ССП между сеткой и скачком диаметра труб системы (отмечен скобкой на рис. 2, г).

При больших расстояниях катод–анод (например, $L_{KA} = 11.0$ мм, см. рис. 3) наблюдается картина эволюции, отличающаяся от вышеописанной. До момента времени $t \sim 2.2$ нс все частицы пролетают через систему, не задерживаясь в ней, в области скачка дрейфа имеет место провисание потенциала, которое постепенно возрастает, тормозя электроны. Как следствие в системе в области скачка радиуса между трубами дрейфа формируется первый ВК (показан стрелкой на рис. 3, а). В результате в первой трубе дрейфа возникает двухпотокное состояние, отраженный поток от первого виртуального катода понижает потенциал в области первой трубы дрейфа, благодаря чему в ней спустя 0.2 нс формируется второй ВК (рис. 3, б), который имеет более «размытый» профиль, чем первый. Далее, как и в предыдущем случае, имеет место слияние обоих ВК (рис. 3, в), так что к моменту времени в 10 нс виртуальные катоды сливаются, и в системе снова устанавливается сжатое состояние потока (отмечено скобкой на рис. 3, г).

Таким образом, в ходе численного моделирования было показано, что в пучке, распространяющемся в составной трубе дрейфа со скачком радиуса, последовательно возникают два виртуальных катода в первой и второй секциях с различными радиусами. ВК в такой системе первоначально формируется либо в первой, либо во второй трубе пространства дрейфа, в зависимости от того, в какой трубе меньше величина критического тока. Таким образом, в зависимости от значения управляющего параметра первый ВК появляется вблизи анодной сетки или около границы между трубами дрейфа, далее по мере развития процессов в системе виртуальные катоды двигаются навстречу друг другу и объединяются в состояние, которое носит название распределенного в пространстве ВК или ССП.

На рис. 4 схематично показаны области по параметру L_{KA} , представлены два режима образования виртуальных катодов. Как было описано ранее, при изменении значения управляющего параметра L_{KA} реализуются различные режимы поведения электронного пучка со сверхкритическим током в системе. В случае, когда расстояние «катод–анод» меньше 7 мм, реализуется первый режим, для которого характерно образование ВК вначале около анодной сетки, а уже после этого в области скачка радиуса поперечного сечения труб дрейфа образуется второй ВК. Второй режим образования виртуальных катодов реализуется в случае, когда управляющий параметр $L_{KA} > 7$ мм. Для данного режима характерен обратный сценарий: первый ВК образуется в области на границе между составными трубами дрейфа и только спустя какое-то время после установления двухпотокного состояния в системе образуется второй ВК около анодной сетки.

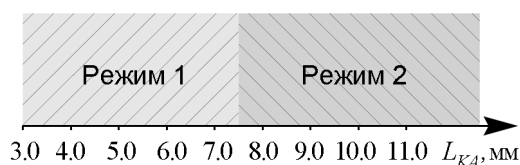


Рис. 4. Режимы реализации различных сценариев формирования сжатого состояния в пучке со сверхкритическим током в зависимости от управляющего параметра (расстояние «катод–анод»)

Выводы

В работе проведено полномасштабное 3D численное моделирование формирования сжатого состояния релятивистского электронного пучка в виркаторной системе с составным пространством дрейфа с трубами разного диаметра. Был обнаружен новый механизм формирования сжатого состояния пучка через образование двух виртуальных катодов вблизи анодной сетки и на скачке радиуса пространства взаи-

модействия, которые со временем смыкаются в один распределенный в пространстве дрейфа виртуальный катод (сжатое состояние пучка). Следует отметить, что новый обнаруженный механизм формирования сжатого состояния затрудняет возможность использования данного состояния потока для ускорения ионов, так как в этом случае не имеет места формирование волны переключения, на фронте которой могут ускоряться ионы [9,14].

Автор благодарит научного руководителя профессора А.Е. Храмова, доцентов Е.Н. Егорова и С.А. Куркина за помощь в выполнении исследования и обсуждение полученных результатов.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ (№ 14-02-31149-мол_а).

Библиографический список

1. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. М.: Физматлит, 2003.
2. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
3. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Электронные приборы с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 6. С. 575.
4. Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю., Сайков С.К., Селемир В.Д., Тараканов В.П. Нелинейная динамика электронных пучков с виртуальным катодом // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2004. Т. 35, Вып. 2. С. 462.
5. Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перелыгин С.Ф., Фоменко Г.П. Генерация мощного СВЧ-излучения релятивистским электронным пучком в триодной системе // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5, № 6. С. 321.
6. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
7. Kurkin S.A., Badarin A.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Higher harmonics generation in relativistic electron beam with virtual cathode // Physics of Plasmas. 2014. Vol. 21, № 9. P. 093105.
8. Kurkin S.A., Hramov A.E., Koronovskii A.A. Microwave radiation power of relativistic electron beam with virtual cathode in the external magnetic field // Applied Physics Letters. 2013. Vol. 103. P. 043507.
9. Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д. Коллективное ускорение ионов в системах с виртуальным катодом // УФН. 2002. Vol. 172, № 11. С. 1225.
10. Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А. Экспериментальное и теоретическое исследование хаотических колебательных явлений в нерелятивистском электронном потоке с виртуальным катодом // Физика плазмы. 2005. Т. 31, № 11. С. 1009.
11. Калинин Ю.А., Храмов А.Е. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния распределения электронов по скоростям на хаотические колебания в электронном потоке в режиме образования виртуального катода // ЖТФ. 2006. Т. 76, № 5. С. 25-34.
12. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A. Numerical study of chaotic oscillations in the electron beam with virtual cathode in the external non-uniform magnetic fields // Physics Letters A. 2010. Vol. 374, № 30. P. 3057.
13. Ignatov A.M., Tarakanov V.P. Squeezed state of high-current electron beam // Phys. Plasmas. 1994. Vol. 1, № 3. P. 741.

14. Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю., Сайков С.К., Селемир В.Д., Тараканов В.П. Нелинейная динамика электронных пучков с виртуальным катодом // ФЭЧАЯ. 2004. Т. 35, № 2. С. 462.
15. Дубинов А.Е. Сценарии установления «сжатого состояния» электронного потока в магнитоизолированном виркаторе // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23, № 22. С. 29.
16. Дубинов А.Е. Особенности динамики электронов в виркаторе с магнитной пробкой // Радиоэлектроника. 2000. Т. 45, № 7. С. 875.
17. Егоров Е.Н., Короновский А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е. Формирование и нелинейная динамика сжатого состояния винтового электронного пучка с дополнительным торможением // Физика плазмы. 2013. Vol. 39, № 11. Р. 1033.
18. Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Тараканов В.П. О возможности коллективного ускорения ионов в магнитоизолированном виркаторе в режиме бегущей границы распределенного виртуального катода // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, № 4. С. 71.
19. <https://www.cst.com/products/cstps>
20. Birdsall C.K., Langdon A.B. Plasma physics via computer simulation. Taylor and Francis Group, 2005.

Поступила в редакцию 28.11.2014

ON THE MECHANISM OF «COMPRESSED»-STATE FORMATION AT RELATIVISTIC ELECTRON BEAM IN TWO-SECTION DRIFT TUBE

A. G. Petrik

Saratov State Technical University

This paper is devoted to the three-dimensional numerical simulation of the «compressed» state of the relativistic electron beam in two-section vircator system with drift tubes with different diameters. We have discovered the mechanism of formation of the «compressed» state of the relativistic beam through the formation of two virtual cathode near the anode grid and between connected sections, which will eventually merged into one distributed in the drift space virtual cathode (compressed state of the beam).

Keywords: Numerical simulation, «compressed» state, virtual cathode, nonlinear dynamic, relativistic electron beam.



Петрик Алексей Георгиевич – родился в Саратове (1992). Окончил факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по специальности «Физика открытых нелинейных систем» (2014). С 2014 года – аспирант Саратовского государственного технического университета. Область научных интересов – исследование интенсивных электронных пучков, изучение механизмов образования и динамики виртуального катода.

410054 Саратов, ул. Политехническая, 77
Саратовский государственный технический университет
E-mail: a.g.petrik@gmail.com



ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ГЕНЕРАТОРА ХАОСА САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ЛБВ

А. П. Жидков

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

В работе представлены результаты экспериментального исследования сверхширокополосного генератора хаоса сантиметрового диапазона на основе ЛБВ. Изучен эффект полного подавления широкополосного хаотического сигнала внешним гармоническим сигналом.

Ключевые слова: Прямохаотические системы связи, ЛБВ-автогенератор с задерживающей обратной связью, широкополосный хаотический сигнал, кольцевые моды автогенератора с ЗОС, подавление хаоса в ЛБВ-автогенераторе.

Введение

В настоящее время определенный интерес в современной радиофизике и электронике вызывает исследование динамических систем, демонстрирующих сложную динамику и хаос. Показано, что динамический хаос обладает большими потенциальными возможностями в области прикладных исследований, прежде всего, в радиофизике, электронике, в частности, в различных генераторах СВЧ, в системах передачи и защиты информации [1–2]. Основная причина интереса заключается в совокупности свойств динамического хаоса, таких как простота его генерации, широкая полоса частот, обеспечивающая высокую помехоустойчивость, потенциально высокие скорости передачи, лёгкая управляемость характеристиками [3].

Для указанных целей вакуумные СВЧ-приборы являются привлекательными из-за своей способности генерировать излучение высокой мощности и возможности работы в условиях электромагнитного и радиационного излучений [4–7].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований сверхширокополосного генератора хаотических колебаний на основе лампы с бегущей волной и управления этими колебаниями.

1. Экспериментальная установка

Исследуемый автогенератор создан на промышленной ЛБВ десятисантиметрового диапазона длин волн, среднего уровня мощности. Основные характеристики ЛБВ усилителя следующие: ток электронного пучка до 60 мА, ускоряющее

напряжение 2500 В при коэффициенте усиления до 30 дБ на частоте 3 ГГц, полоса частот – октава и более. Фокусировка пучка осуществляется периодическим магнитным полем.

Автогенератор хаотических колебаний с запаздывающей обратной связью (ЗОС) представляет собой кольцевую схему, когда вход и выход ЛБВ замкнуты цепью обратной связи. В отличие от классического шумотрона [2], состоящего из двух соединённых в кольцо ЛБВ с регулируемым аттенуатором, в исследуемом генераторе использовалась одна ЛБВ. В лампе возбуждение хаотических колебаний, как и в любых кольцевых схемах, связано с наличием падающего участка на амплитудной характеристике.

Принципиальная схема для исследования основных характеристик автогенератора хаотических колебаний на ЛБВ показана на рис. 1. На такой схеме возможно изучение как различных автономных режимов и характеристик автогенератора, включая и хаотические колебания, так и режимов управления хаосом внешним гармоническим воздействием.

В кольце обратной связи расположены: нелинейный ЛБВ усилитель 1; переменный поляризационный аттенуатор 6; через направленные ответвители 2, 4 подключены измерительные приборы: анализатор спектра Agilent E4408B 5 и осциллограф реального времени Agilent DSO3062A. Через тройник 7 и ферритовый вентиль в кольцо обратной связи подаётся внешний сигнал от генератора стандартных сигналов Agilent MXJN5181A 9, который усиливается транзисторным усилителем 8.

Можно отметить, что в настоящее время для применения хаотических колебаний в широкополосных средствах связи и радиолокации во многих странах введены стандарты IEEE по использованию соответствующих частот, в соответствии с которыми наибольшее внимание исследователями и разработчиками уделяется диапазону частот от 3 до 8 ГГц [8]. Именно в этом диапазоне и получены приведённые в данной работе результаты.

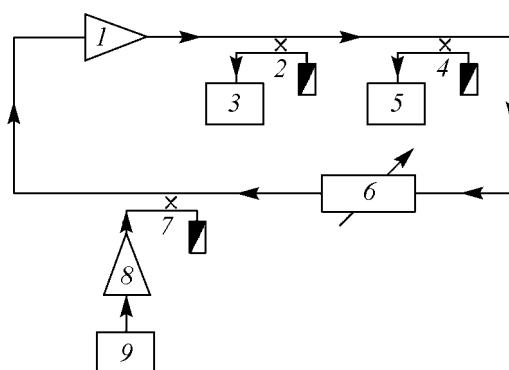


Рис. 1. Принципиальная схема для исследования основных характеристик автогенератора хаотических колебаний на ЛБВ: 1 – ЛБВ; 2, 4 – направленные ответвители; 3 – осциллограф реального времени; 5 – анализатор спектра; 6 – поляризационный аттенуатор; 7 – тройник; 8 – транзисторный усилитель; 9 – генератор стандартных сигналов

2. Основные характеристики ЛБВ-автогенератора

Для кольцевых автогенераторов хаоса одним из характерных параметров динамической системы является время запаздывания сигнала в кольце обратной связи. Что касается ЛБВ-автогенератора, запаздывание определяется временем задержки сигнала в самой ЛБВ и во внешнем кольце обратной связи. Для выбранных

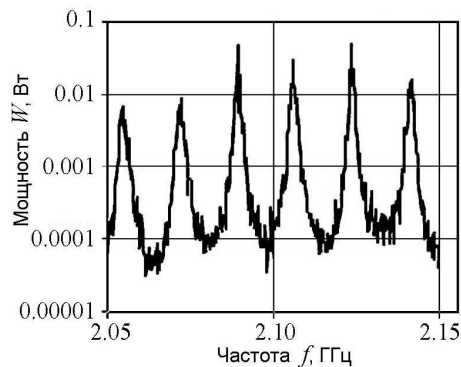


Рис. 2. Кольцевые резонансные моды ЛБВ-автогенератора при $I = 43$ мА, $U = 2690$ В

Как известно, кольцевая система с запаздыванием обладает набором собственных мод - резонансов ω_N , на которых полный набег фазы гармонического сигнала по замкнутому кольцу обратной связи равен $2\pi N$. Частотный интервал между соседними модами ω_N и ω_{N+1} равен $\Delta\omega_N = 2\pi/t$, где t есть полное групповое время запаздывания вдоль замкнутого кольца обратной связи.

Таким образом, используя полное время задержки сигнала t , можно вычислить частотный интервал между двумя соседними модами и сопоставить его с экспериментальным значением. Согласно формуле $\Delta\omega_N = 2\pi/t$ для исследуемого ЛБВ-автогенератора частотный интервал между модами составляет в среднем 17.2 МГц. Определяя частотный интервал между кольцевыми резонансными модами (рис. 2) реальной автоколебательной системы по анализатору спектра, отмечаем практически полное совпадение экспериментального значения 17.4 МГц с рассчитанным по формуле.

Подбором управляющих параметров автогенератора I, U, L (L – затухание в цепи обратной связи) можно реализовать разнообразные регулярные и хаотические режимы генерации. Хаотическое поведение системы удаётся наблюдать в достаточно широком диапазоне управляющих параметров. Наиболее характерные режимы работы ЛБВ-автогенератора (периодические колебания, автомодуляция, развитой хаос), которые представлены на рис. 3, достигались настройкой затухания в цепи обратной связи при определённых значениях тока пучка $I = 50$ мА и напряжения $U = 2550$ В. Мощность устойчивого хаотического сигнала на рис. 4 составляет $W = 1.5$ Вт.

Генераторы на основе ЛБВ, как известно, из-за широкой полосы частот и нелинейных процессов модуляции скорости и группировки электронов могут генерировать вторую и даже третью гармонику вблизи точки насыщения. В спиральных ЛБВ в точке насыщения обычно появляются вторая гармоника, мощностью на 8–10 дБ ниже основной, и третья гармоника, мощностью обычно ниже основной на 16–18 дБ [9].

В исследуемом кольцевом ЛБВ-автогенераторе благодаря анализатору спектра, позволяющему наблюдать широкий диапазон частот до 10 ГГц, также можно

параметров ЛБВ и длины кольца обратной связи (кабель с внутренним диэлектрическим заполнением и поляризационный аттенюатор) на частоте 3 ГГц простой расчёт даёт величину 55 нс. Это время можно определить и экспериментально с помощью анализатора СВЧ-цепей Agilent E5062F, подбирая значение рабочего тока установки очень малым (6 мА), чтобы ЛБВ являлась пассивным элементом и не генерировала заметного сигнала. На частоте 3 ГГц это время составило 60 нс, что свидетельствует о достоверности расчётных параметров применяемой ЛБВ.

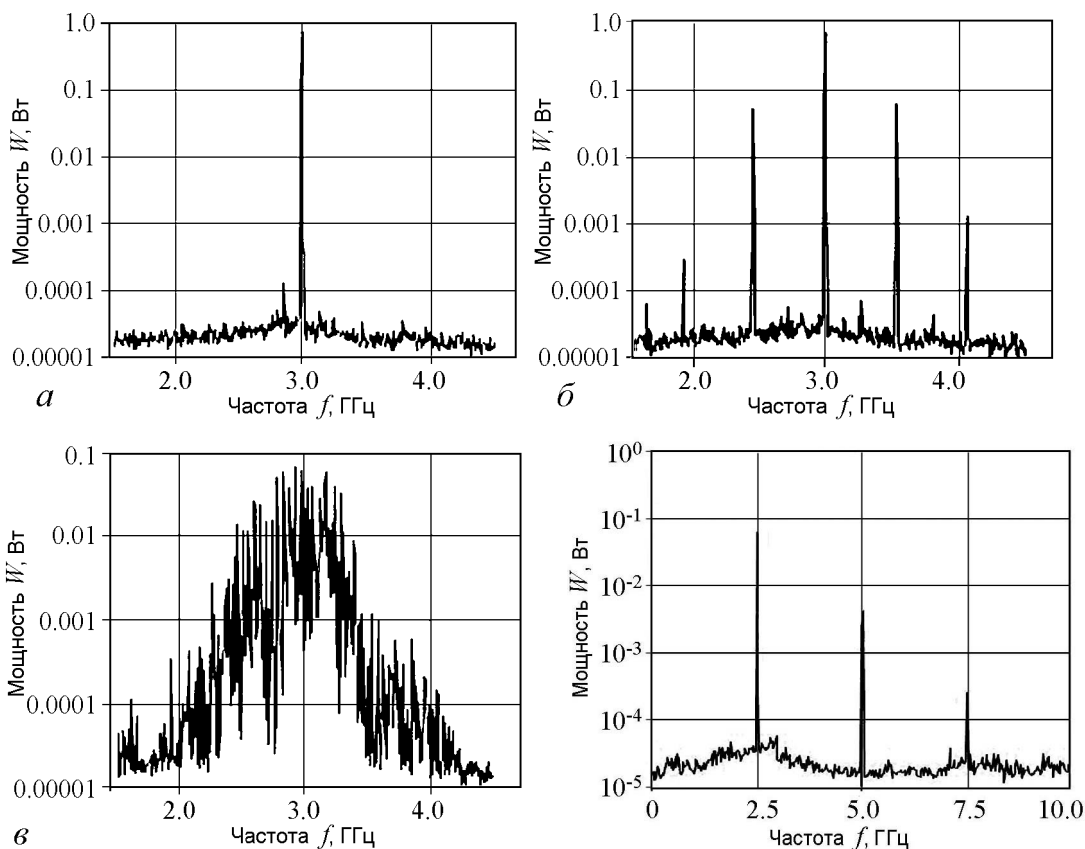


Рис. 3. Характерные режимы работы ЛБВ-автогенератора, достигаемые при определенных настройках затухания в цепи обратной связи L , дБ: a – 8.3, одночастотный режим; $б$ – 9.4, автомодуляция; $в$ – 11.0, хаотический режим

Рис. 4. Гармоники в ЛБВ-автогенераторе

удостовериться в наличии второй и третьей гармоник. Так, при токе $I = 12$ мА наблюдались три гармоники на частотах 2.5 ГГц, 5 ГГц и 7.5 ГГц (см. рис. 4). Причём вторая гармоника ниже основной на 11.4 дБ, а третья ниже на 23.8 дБ, что хорошо соответствует приведённым в [9] данным.

Для целей практического применения широкополосных хаотических сигналов в информационных системах возникает задача управления этими сигналами. Один из таких интересных режимов связан с эффектом подавления хаоса (известного в литературе как синхронизация) путём полного подавления хаоса внешним гармоническим сигналом [10]. Этот эффект заключается в том, что при воздействии внешнего гармонического сигнала, строго выбранного уровня и определенной частоты, на развитый хаос автогенератора наблюдается полное подавление собственных хаотических колебаний и установление генерации периодических колебаний, совпадающих по частоте с частотой вынуждающего сигнала. В частности, этот эффект экспериментально хорошо изучен для клистронных автогенераторов с ЗОС, характеризующихся довольно малой полосой частот хаотического сигнала [11]. Отметим, что для подавления сверхширокополосных хаотических сигналов этот эффект экспериментально не изучен.

3. Подавление хаотического сигнала

В ходе экспериментальных исследований был реализован хаотический режим ЛБВ-автогенератора со значением ускоряющего напряжения $U = 2740$ В и при токе $I = 56$ мА с интегральной мощностью сигнала 1.35 Вт в широкой полосе частот (1–8 ГГц). Подаем в кольцо обратной связи внешний гармонический сигнал мощностью 10 мВт на частоте 2.94 ГГц первой гармоники сгруппированного тока. Внешний сигнал усиливается примерно до 200 мВт с помощью транзисторного усилителя. В результате удаётся осуществить полное подавление хаотического сигнала.

Исследования подавления генерации хаоса на частоте первой гармоники доказывает возможность синхронизации путём подавления хаоса в ЛБВ-автогенераторе с ЗОС, что открывает перспективы для дальнейших исследований в области создания широкополосных хаотических импульсов по аналогии с клистронным автогенератором [12].

Был также поставлен специальный физический эксперимент по исследованию возможности управления хаотическим сигналом с помощью второй гармоники. Как выяснилось, для наблюдения полного подавления хаотического сигнала требуется заметный уровень мощности на этой гармонике, что было трудно выполнить при имеющейся аппаратуре, поэтому эксперимент носил качественный характер.

Для этого в ходе экспериментальных исследований при токе пучка ЛБВ-автогенератора 18 мА был получен «квазихаотический» сигнал с интегральной мощностью 0.26 Вт (рис. 5, а). Под «квазихаотическим» сигналом понимается режим сложной модуляции, предшествующий возникновению хаоса. Как видно из рис. 5, а, пики «квазихаотических» колебаний наблюдаются на частотах гармоник сгруппированного тока. В результате управления внешним сигналом на частоте второй гармоники (4.6 ГГц) мощностью всего 8.17 мВт «квазихаотический» сигнал был полностью подавлен (рис. 5, б).

Проведённый физический эксперимент показал, что при наличии источников с необходимой мощностью можно добиться полного подавления широкополосного хаотического сигнала и на частоте второй гармоники.

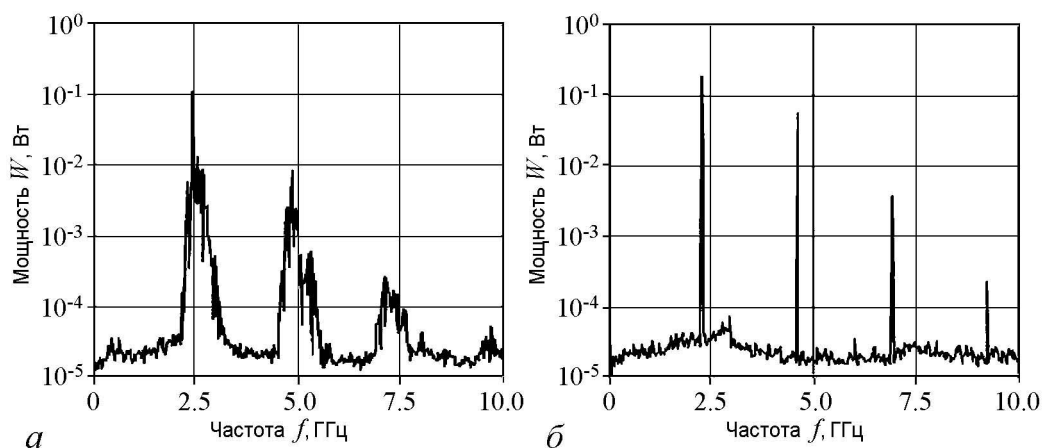


Рис. 5. а – «квазихаотический» сигнал $I = 18$ мА, $U = 2530$ В, интегральная мощность 0.26 Вт; б – подавление «квазихаотического» сигнала с помощью ГСС мощностью 8.17 мВт на частоте второй гармоники 4.6 ГГц

Заключение

В данной работе подробно исследован сверхширокополосный генератор хаотических колебаний на основе лампы с бегущей волной с запаздывающей обратной связью. Основное внимание в работе уделено исследованию эффекта полного подавления широкополосного хаоса внешним гармоническим сигналом. Именно этот эффект перспективен для использования в прямохаотических системах связи.

Выражаю благодарность за постоянную помощь в проведении исследований и обсуждении полученных результатов профессору Дмитриеву Б.С., а также заведующему лабораторией Скороходову В.Н. и инженеру Садовникову С.А. за помощь в организации и проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты 14-02-00329 и 14-02-00577) и Программы по государственной поддержке ведущих научных школ РФ (НШ – 828.2014.2).

Библиографический список

1. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И.* Генерация хаоса. Москва: Техносфера, 2012.
2. *Залогин Н.Н., Кислов В.В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. Москва: Радиотехника, 2006.
3. *Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., Старков С.О.* Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 2.
4. *Кислов В.Я., Мясин Е.А., Залогин Н.Н.* О нелинейной стохастизации автоколебаний в электронно-волновом генераторе с задержанной обратной связью // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. № 10.
5. *Shigaev A.M., Dmitriev B.S., Zharkov Yu.D., Ryskin N.M.* Chaotic dynamics of delayed feedback klystron oscillator and it's control by external signal // IEEE Transaction on electron devices. 2005. Vol. 52, № 5.
6. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Семеновых П.Ю., Бирюков А.А.* Каскадный клистронный автогенератор с запаздыванием // ЖТФ. 2005. Т. 75, вып. 12.
7. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Жидков А.П.* Генерация широкополосных хаотических СВЧ-сигналов и управление ими в ЛБВ-автогенераторе // Материалы Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2014»: Т. 1. Саратов, 25–26 сентября 2014. Саратов, 2014. С. 29.
8. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.Ф., Румянцев Н.В.* Генератор микроволнового хаоса с плоской огибающей спектра мощности в диапазоне 3–8 ГГц // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, № 2. С. 1.
9. *Гилмор А.С.-мл.* Лампы с бегущей волной. Москва: Техносфера, 2013

10. *Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю.* Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. Москва: Техносфера, 2003.
11. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Геншафт А.М.* Синхронизация хаотических колебаний путём подавления хаоса в клистронном автогенераторе внешним гармоническим сигналом // ПНД. 2007. Т. 15, № 3.
12. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Бирюков А.А.* Генерация хаотических радиоимпульсов с помощью клистронного автогенератора с запаздыванием// Известия вузов. ПНД. 2006. Т. 14, № 4.

Поступила в редакцию 26.11.2014

RESEARCH OF ULTRA-WIDE RANGE S-BAND CHAOS GENERATOR BASED ON TWT

A. P. Zhidkov

Saratov State University

The paper presents the results of the experimental research ultra-wide range s-band chaos generator based on TWT. The effect of absolute suppression mode chaotic signal by external harmonic signal has been investigated.

Keywords: Chaotic communications systems, TWT-generator with delaying feedback, ultra wide range chaotic signal, cyclic resonant mode of generator with delaying feedback, absolute suppression mode chaos of the TWT-generator.



Жидков Артём Павлович – родился в Саратове (1993). Получил степень бакалавра по направлению «Прикладные математика и физика» (2014) в Саратовском государственном университете. В настоящее время является магистрантом первого курса. Имеет одну публикацию в области радиофизики и электроники в качестве соавтора. Научные интересы – генерация хаотических сигналов сантиметрового диапазона. Принимал участие в конференции АПЭП-2014, Саратов как докладчик.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail:art.prod.mc@gmail.com



РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

А. И. Бенедик

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Представлены результаты электродинамического моделирования фотонно-кристаллического резонатора для диодного генератора с автоэмиссионным катодом при помощи современных программных пакетов расчета СВЧ-структур. Резонатор образован удалением центрального элемента в периодической двумерной фотонно-кристаллической решетке из диэлектрических стерженьков. Снаружи фотонно-кристаллическая структура окружена металлическим экраном, на торцевых стенках которого в центре дефекта расположены катод и анод. Результаты моделирования показали, что добротность резонатора, в первую очередь, определяется омическими потерями в анодной и катодной пластинах металлического экрана. Путем вариации конструкции вывода ВЧ-энергии можно менять нагруженную добротность резонатора в широких пределах, что позволяет оптимизировать выходную мощность и КПД генератора.

Ключевые слова: Вакуумная микроэлектроника, фотонно-кристаллический резонатор, диодный генератор, нагруженная добротность.

Введение

Одним из перспективных направлений современной вакуумной электроники является освоение терагерцового диапазона частот, представляющего большой интерес для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии, биологии и медицины. В последние годы в связи с развитием технологии и разработкой новых искусственных материалов с необычными электродинамическими свойствами появилась возможность создания приборов – миниатюрных аналогов существующих вакуумных СВЧ-приборов, работающих в терагерцовом диапазоне [1–3]. В частности, для таких приборов относительно недавно была выдвинута идея использования фотонных кристаллов (ФК) в качестве электродинамических структур ввиду чрезвычайной сложности изготовления миниатюрных объемных резонаторов и замедляющих систем. ФК представляет собой искусственную периодическую структуру, в которой естественным образом существуют разрешенные и запрещенные зоны. Если в такой структуре сделать дефект, то волны, попадающие в запрещенную зону, смогут распространяться в дефекте, а стенки

ФК-структуры будут являться для них идеальными отражателями. Использование ФК-структур позволяет уменьшить омические потери, а также облегчает селекцию типов колебаний, так как фотонный кристалл можно сконструировать таким образом, чтобы в область запрещенной зоны не попадали частоты наиболее опасных паразитных мод. Современные технологии позволяют изготавливать фотонно-кристаллические резонаторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, обладающие высокой добротностью.

Предлагалось использовать подобные структуры для giroприборов [4–8], отражательных клистронов [9–11], ЛБВ [12,13], ускорительных структур [14, 15]. В работах [16, 17] была предложена модель диодного генератора, помещенного в фотонно-кристаллический резонатор. На рис. 1 представлена схема генератора. Высокодобротный резонатор образован точечным дефектом в двумерной ФК-решетке из диэлектрических стерженьков. Резонатор спроектирован таким образом, чтобы рабочим типом колебаний являлась мода TM_{110} , частота которой лежит в полосе непропускания ФК-структуры. Вывод СВЧ-энергии представлен линейным дефектом в фотонном кристалле (ФК-волновод), соединенным с обыкновенным прямоугольным металлическим волноводом. Вся ФК-структура окружена металлическим экраном. На нижней и верхней пластинах металлического экрана в центре ФК-резонатора расположены катод и анод, соответственно. В качестве источника электронов предполагается использовать автоэмиссионные катоды, к достоинствам которых, в первую очередь, стоит отнести эффективную модуляцию эмиссии из-за сильной зависимости эмиссионного тока от поля на катоде. Также важными преимуществами автоэмиссионных катодов являются безынерционность, то есть практически мгновенная готовность прибора к работе, отсутствие необходимости использования подогревательного элемента, потенциальное уменьшение размеров и массы прибора.

В работах [18, 19] развита линейная теория диодного генератора с автоэмиссионным катодом и представлены результаты численного моделирования генератора X-диапазона. В настоящей работе приводятся методика и результаты численного анализа электродинамических параметров ФК-резонатора представленного генератора при помощи современных пакетов электродинамического моделирования.

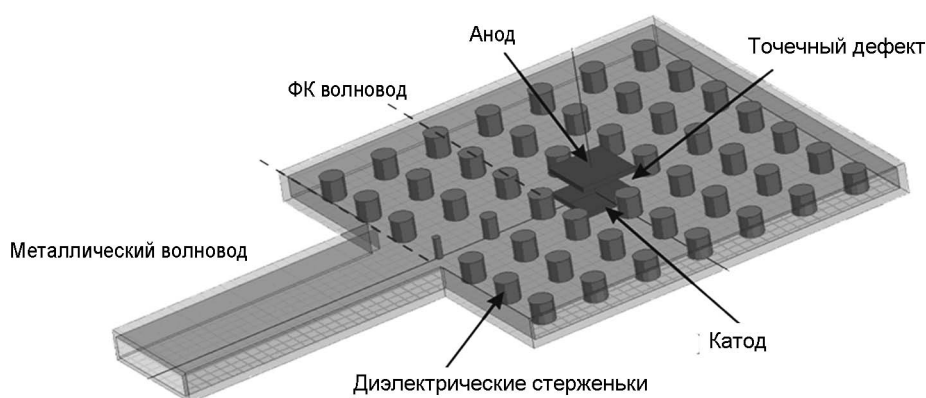


Рис. 1. Схема диодного генератора с автоэмиссионным катодом, помещенного в фотонно-кристаллический резонатор

1. Фотонно-кристаллическая структура

Как уже отмечалось, под ФК понимают искусственную периодическую структуру, обладающую полными запрещенными зонами, то есть электромагнитные волны определенных длин волн, падающие под любым углом к поверхности кристалла, не могут распространяться в такой структуре ни в каком направлении. При помощи свободно распространяемого пакета программ MIT Photonic-Bands (MPB) [20] были проведены расчеты границ первой запрещенной зоны для двумерной квадратной решетки с периодом Λ , в узлах которой находятся круглые диэлектрические стерженьки радиуса r (рис. 2). В соответствии с [17], предполагалось, что стерженьки изготовлены из алуминооксидной керамики с диэлектрической проницаемостью $\text{Re}(\epsilon) = 9.85$, $\text{Im}(\epsilon) < 0.001$. На рис. 3 представлены результаты расчетов дисперсионных характеристик ТМ-мод фотонного кристалла для различных значений радиусов стерженьков r . Как видно из рисунка, ТМ-моды электромагнитного поля обладают запрещенной зоной, которая лежит между первой и второй ветвями дисперсионной характеристики. В результате расчетов размеры ФК-структуры бы-

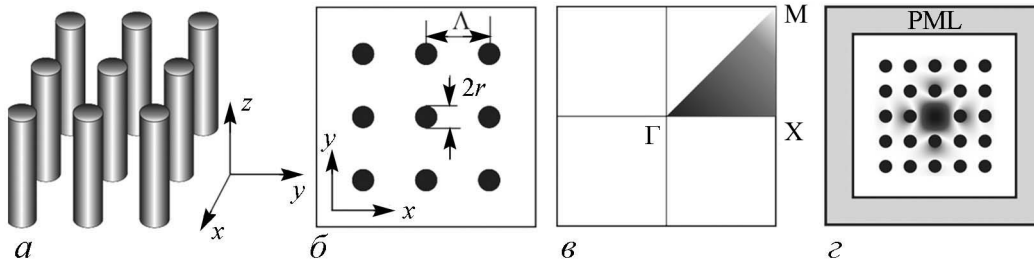


Рис. 2. *a* – трехмерная периодическая в направлении осей x и y , однородная вдоль оси z ФК-структура (предполагается, что цилиндры имеют бесконечную высоту). *b* – геометрия системы с квадратной решеткой (фрагмент бесконечной системы), темная область – $\epsilon = 9.85$, белая – $\epsilon = 1$. *в* – первая зона Бриллюэна для двумерной квадратной решетки; буквами Γ , M и X обозначены вершины неприводимой зоны Бриллюэна (серая область на рисунке) в пространстве обратных векторов решетки. *г* – двумерная модель фотонно-кристаллического резонатора и пространственное распределение поля, соответствующее моде TM_{110} ; по периметру ФК-структура окружена идеально согласованными поглощающими стенками (PML)

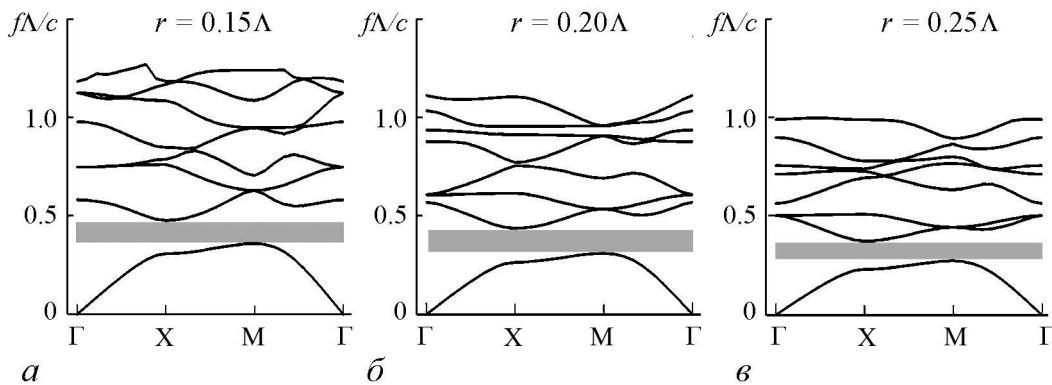


Рис. 3. Дисперсионная диаграмма ТМ-мод, построенная для системы с квадратной решеткой при различных значениях радиусов стерженьков r . По оси абсцисс отложены значения координат волнового вектора в пространстве векторов обратной решетки, соответствующие вершинам (Γ, X, M) неприводимой зоны Бриллюэна (см. рис. 2, *в*). Серым цветом показана область частот, в которой не могут распространяться ТМ-моды электромагнитного поля

ли выбраны таким образом, чтобы запрещенная зона приходилась на X-диапазон: $\Lambda = 1$ см, $r = 2$ мм. Для повышения частотного диапазона в n раз необходимо уменьшить в n раз все геометрические размеры ФК-структуры.

2. Расчет электродинамических характеристик ненагруженного ФК-резонатора

Первоначально была рассмотрена двумерная модель ФК-резонатора (рис. 2, z): вдоль оси z фотонно-кристаллическая структура предполагалась однородной; высокодобротный резонатор образован точечным дефектом в диэлектрической решетке, а боковые стенки резонатора образованы N рядами диэлектрических стерженьков. Чтобы исключить отражения от границ расчетной области, с боков ФК-структура была окружена идеально согласованными поглощающими стенками – perfectly matched layers (PML).

При помощи свободно распространяемого программного пакета MIT Electromagnetic Equation Propagation (MEEP) [21] был проведен расчет собственных частот и добротностей возбуждаемых мод ФК-резонатора. На рис. 4, a представлена зависимость собственной добротности резонатора от толщины стенки ФК (числа рядов диэлектрических стерженьков). Собственная добротность такого резонатора определяется омическими потерями в диэлектрических стерженьках ($\text{Im}(\varepsilon) = 0.001$) и дифракционными потерями, то есть потерями за счет «вытекания поля» из области дефекта ФК-структуры в область слоев PML:

$$1/Q_0 = 1/Q_{\text{ом}} + 1/Q_{\text{диф}},$$

где Q_0 , $Q_{\text{ом}}$, $Q_{\text{диф}}$ – собственная, омическая и дифракционная добротности, соответственно.

С ростом числа рядов диэлектрических стерженьков в боковой стенке резонатора дифракционные потери уменьшаются, так как поле лучше локализуется в области точечного дефекта, а потери в диэлектрике остаются практически постоянными. В результате собственная добротность Q_0 растет, стремясь к некоторому пределу $Q_{\text{ом}} \sim 32000$. Собственная частота возбуждаемой моды TM_{110} составила $f_0 \approx 11.626$ ГГц.

При расчетах в пакете программ High Frequency System Simulator (HFSS) [22] рассматривалась трехмерная модель ФК-резонатора с высотой диэлектрических стерженьков $d = 2$ мм, окруженная металлическим экраном из меди с конечной проводимостью $\sigma = 20 \cdot 10^6$ См/м. Диэлектрическая проницаемость оксидной керамики полагалась равной $\varepsilon = 9.8$, а тангенс диэлектрических потерь – $\text{tg} \delta = 0.001$, что примерно соответствует керамике, используемой на предприятиях радиоэлектронной промышленности в России. Как видно, диэлектрические потери данной керамики в 10 раз больше диэлектрических потерь керамики, описанной в [17], что должно привести к значительному уменьшению собственной добротности ФК-резонатора. Однако результаты 3D моделирования в пакете HFSS показали, что добротность резонатора, окруженного металлическим экраном, в первую очередь, определяется не диэлектрическими потерями в стерженьках, а омическими потерями в катод-

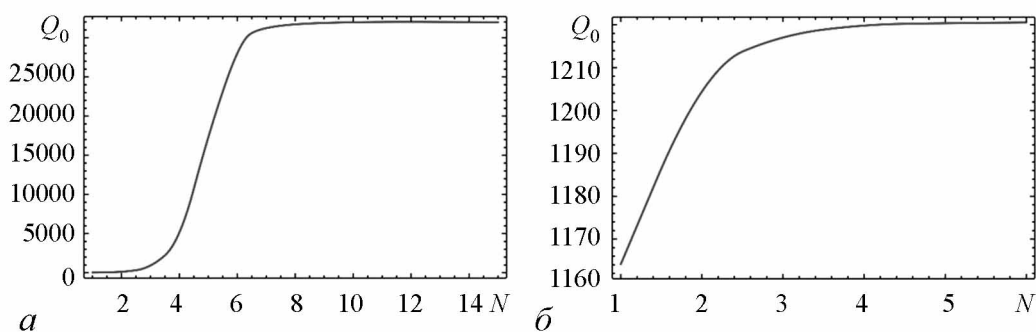


Рис. 4. Зависимость собственной добротности ФК-резонатора с идеально согласованными поглощающими стенками (а) и резонатора с металлическим экраном (б) от числа рядов диэлектрических стерженьков в ФК-стенке

ной и анодной пластинах. До боковых стенок экрана поле практически не доходит. На рис. 4, б представлена зависимость собственной добротности ФК-резонатора с металлическим экраном от толщины ФК-стенки резонатора. Для резонатора с ФК-решеткой приемлемого размера – 7x7 стерженьков, которую можно реализовать технологически, ненагруженная добротность составляет порядка $Q_0 \approx 1217$, собственная частота $f_0 \approx 11.686$ ГГц.

Расчет волнового сопротивления резонатора проводился при помощи калькулятора поля – подпрограммы постпроцессорной обработки в HFSS. На оси системы волновое сопротивление определяется формулой

$$Z_0 = \frac{E_0^2 d^2}{\omega_0 \varepsilon_0 N_s},$$

где E_0 – поле на оси системы, d – ширина зазора резонатора, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – круговая частота возбуждаемой моды колебаний, ε_0 – диэлектрическая постоянная, $N_s = \int_V E(x, y, z)^2 dV$ – норма колебаний. Вычисления показали, что волновое сопротивление на оси и волновое сопротивление, усредненное по сечению пучка (1×1 см²), составляют 30.3 и 24.6 Ом, соответственно.

3. Методика расчета добротности нагруженного ФК-резонатора

Подпрограмма анализа собственных колебаний и собственных волн, реализуемая в пакете HFSS, не позволяет провести расчет электродинамических характеристик нагруженного резонатора, так как вывод энергии будет восприниматься как еще один связанный резонатор. В работе [14] описана методика расчета фотонно-кристаллического резонатора с выводом энергии. Для расчета нагруженной добротности необходимо провести расчет S-параметров при помощи подпрограммы Modal, позволяющей проводить анализ многополюсников с многомодовыми портами, идеально согласованными с нагрузкой (то есть нагруженными полубесконечными волноводами).

Рассмотрим обыкновенный металлический резонатор с одним вводом-выводом энергии (рис. 5, а). Пусть $P_{вх}$ – входная мощность, поступающая в резонатор от внешнего источника, $\Gamma = E_{отр}/E_{пад}$ – коэффициент отражения, то есть отношение

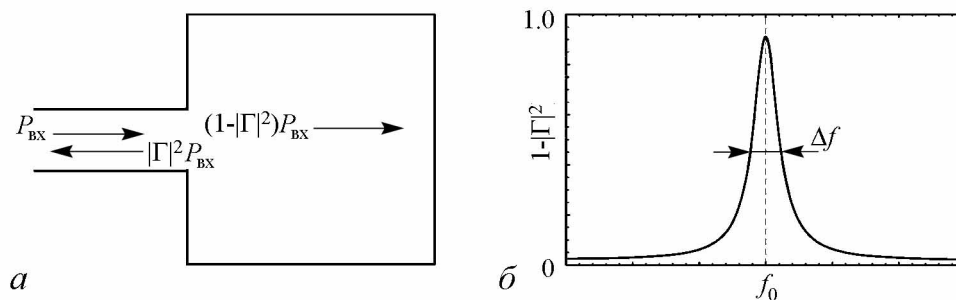


Рис. 5. Схема резонатора с одним вводом-выводом энергии (а) и качественная амплитудно-частотная характеристика (б)

амплитуд отраженной ($E_{отр}$) и падающей ($E_{пад}$) волн, что по сути есть параметр S_{11} . Тогда отраженная мощность $P_{отр} = |\Gamma|^2 P_{вх}$, а мощность колебаний в резонаторе $P_{кол} = (1 - |\Gamma|^2) P_{вх}$. Построив зависимость коэффициента $(1 - |\Gamma|^2)$ от частоты, мы получим резонансную кривую (рис. 5, б). Нагруженная добротность резонатора определяется выражением

$$Q_{нагр} = f_0 / \Delta f,$$

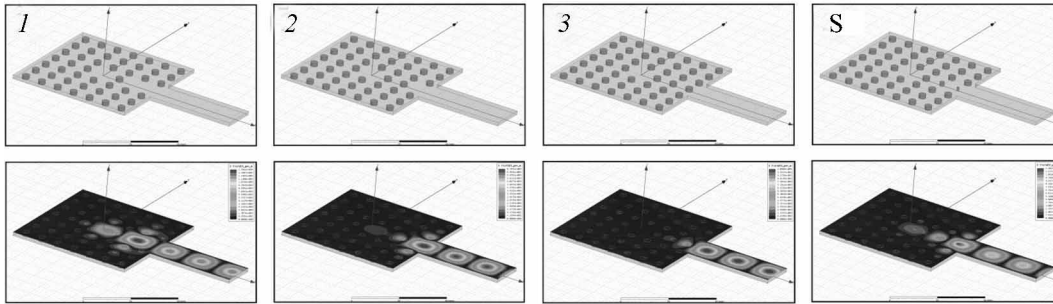
где f_0 – резонансная частота, Δf – полоса частот, взятая на половинном уровне мощности.

При численных расчетах нагруженной добротности ФК-резонатора рассматривались варианты, когда перед металлическим прямоугольным волноводом располагаются один, два и три одинаковых стерженька, либо «согласованный» ФК-волновод – 3 стерженька с линейно уменьшающимися радиусами (рис. 6). На рис. 7 представлены резонансные кривые рассматриваемых конструкций. Соответствующие значения добротностей указаны в таблице. Для проверки результатов рассматривались также конструкции резонаторов с двумя симметричными выводами ВЧ-энергии. Как и следовало ожидать, внешняя добротность резонаторов $Q_{вн} = Q_0 Q_{нагр} / (Q_0 - Q_{нагр})$ с двумя выводами энергии оказалась в два раза меньше добротности резонаторов с одним выводом. Таким образом, результаты расчетов показывают, что путем вариации конструкции вывода ВЧ-энергии нагруженную добротность можно менять в широких пределах, что дает возможность получить приемлемую выходную мощность и КПД генератора при умеренных значениях стартового тока.

Таблица

Тип вывода энергии	Конструкции с одним выводом СВЧ-энергии		Конструкции с двумя выводами СВЧ-энергии	
	Нагруженная добротность	Внешняя добротность	Нагруженная добротность	Внешняя добротность
1	81	87	42	43.5
2	429	663	266	340
3	973	4853	806	2387
S	254	321	143	162

Варианты конструкций с одним выводом энергии



Варианты конструкций с двумя выводами энергии

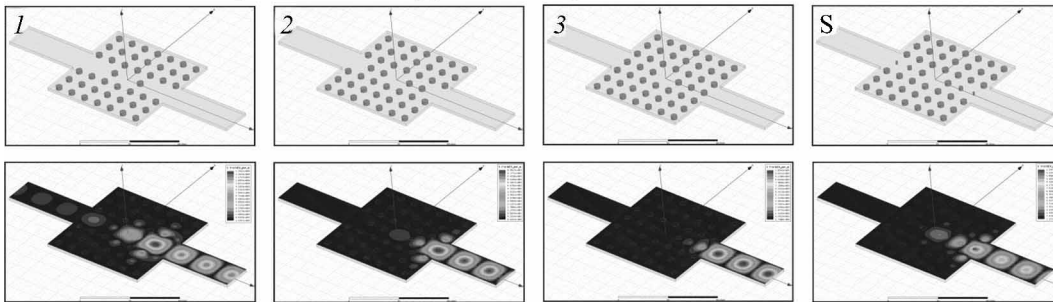


Рис. 6. Варианты конструкций композитного вывода СВЧ-энергии фотонно-кристаллического резонатора и соответствующие распределения электрического поля

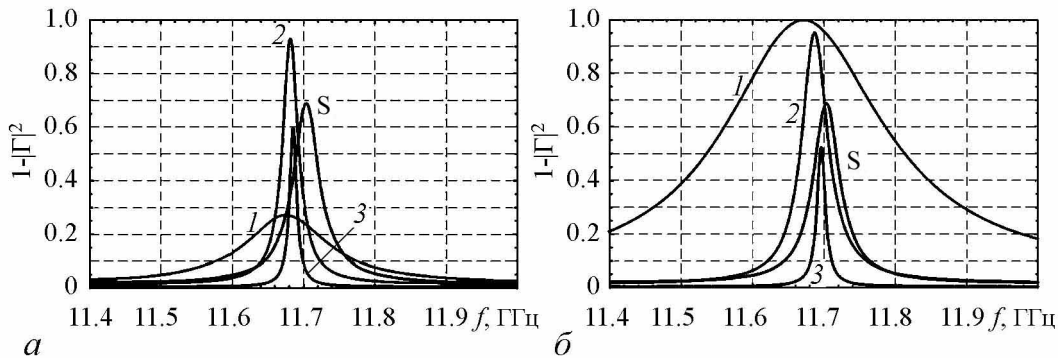


Рис. 7. Резонансные кривые различных конструкций резонаторов с одним (а) и двумя (б) выводами энергии. Кривые 1, 2, и 3 соответствуют случаям, когда перед металлическим выводом энергии стоит один, два или три диэлектрических стерженька, кривая S – «согласованному» фотонно-кристаллическому волноводу (см. рис. 6)

4. Численное моделирование генератора X-диапазона

В работах [18,19] была развита линейная теория диодного генератора с автоэмиссионным катодом, проведен анализ условий самовозбуждения генератора, получены аналитические выражения для оценки стартового тока. Была разработана численная модель взаимодействия электронного потока с высокочастотным полем диода, основанная на использовании нестационарной теории возбуждения резонаторов и методе «частиц в ячейке».

Варьируя нагруженную добротность резонатора, можно оптимизировать выходные характеристики генератора. На рис. 8, а представлена зависимость мак-

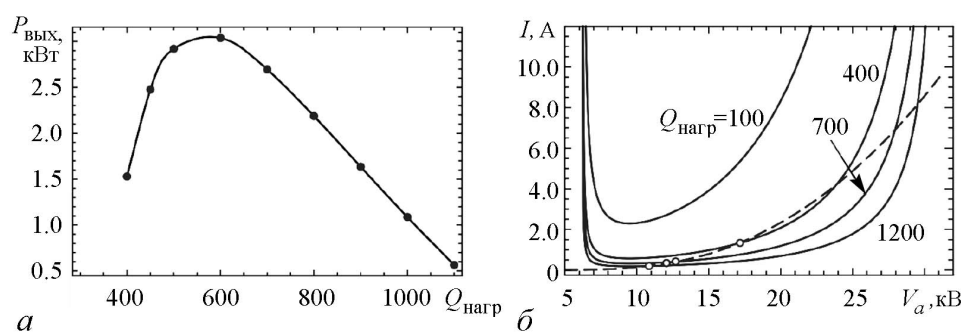


Рис. 8. *а* – зависимость выходной мощности в насыщении от значения нагруженной добротности ФК-резонатора. *б* – первые зоны генерации при различных значениях нагруженной добротности (сплошные линии) на плоскости (V_a, I) и ток эмиссии (пунктирная линия)

симальной выходной мощности генератора от значения нагруженной добротности. Видно, что оптимальная выходная мощность $P_{\text{вых}} \approx 3$ кВт достигается при нагруженной добротности $Q_{\text{нагр}} \approx 600$.

На рис. 8, *б* сплошными линиями показаны границы зон генерации (зависимости стартового тока от анодного напряжения) при различных значениях нагруженной добротности генератора. Пунктирной линией показана вольт-амперная характеристика автокатода, параметры которого взяты из работы [17]. В соответствии с этой работой предполагалось, что в качестве автоэммиттера используется пленка из углеродных нанотрубок. Пересечения этих кривых соответствуют точкам самовозбуждения генератора при различных значениях добротности. Видно, что при уменьшении значения нагруженной добротности стартовый ток растет, и при значении $Q_{\text{нагр}} \approx 300$ происходит срыв генерации.

Таким образом, при проектировании фотонно-кристаллического резонатора необходимо искать компромиссное решение, чтобы снизить стартовый ток и получить приемлемое значение выходной мощности.

Заключение

Представленные результаты электродинамического моделирования показывают, что идея использования фотонно-кристаллических структур в качестве колебательных систем приборов СВЧ-электроники является перспективным направлением. В частности, диэлектрическая ФК-решетка позволяет сконструировать вывод СВЧ-энергии, который достаточно простым способом может быть согласован с нагрузкой. Вариация нагруженной добротности резонатора в широких пределах позволяет получить приемлемое значение выходной мощности при умеренных значениях стартового тока генератора. Так, для представленного диодного генератора X-диапазона при значении нагруженной добротности $Q_{\text{нагр}} = 600$, соответствующей максимальной выходной мощности, плотность стартового тока составляет порядка 0.5 А/см² (сечение электронного пучка – 1×1 см²).

Автор выражает благодарность профессору, заведующему кафедрой нелинейной физики, д.ф.-м.н. Н.М. Рыскину, доценту, старшему научному сотруднику кафедры нелинейной физики А.Г. Рожневу и ассистенту кафедры электроники, колебаний и волн, к.ф.-м.н. А.В. Садовникову за поддержку и полезное обсуждение работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-02-00976.

Библиографический список

1. *Srivastava V.* THz vacuum microelectronic devices // J. Phys.: Conf. Series. 2008. Vol. 114. № 1. 012015.
2. *Ives R.L.* Microfabrication of high-frequency vacuum electron devices // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32, № 3. P. 1277.
3. *Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.S., Park J.H., Temkin R.J.* Vacuum electronic high power terahertz sources // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. Vol. 1, № 1. P. 54.
4. *Sirigiri J.R., Kreischer K.E., Machuzak J., Mastovsky I., Shapiro M.A., Temkin R.J.* Photonic-band-gap resonator gyrotron // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86, № 24. P. 5628.
5. *Ashutosh, Jain P.K.* Design and analysis of metallic photonic band gap cavity for a gyrotron // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. 2012. Vol. 11, № 2. P. 242.
6. *Singh A., Jain P.K.* Multimode analysis and PIC simulation of a metal PBG cavity gyrotron oscillator // Progress in Electromagnetics Research M. 2014. Vol. 39. P. 11.
7. *Joo Y.-D., Park G.-S., Kim D.-H., Kim J.-I., Jeon S.-G., Han S.-T., Jung S.-S., Kim J.-U.* Design of a third-harmonic gyrotron oscillator using a photonic crystal cavity // Japanese Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 48. 074502
8. *Nanni E., Lewis S., Shapiro M., Temkin R.* A high gain photonic band gap gyrotron amplifier // Proc. 14th IEEE International Vacuum Electronics Conference. 21–23 May 2013, Paris, France.
9. *Han S.-T., Jeon S.-G., Shin Y.-M., Jang K.-H., So J.-K., Kim J.-H., Chang S.-S., Park G.-S.* Experimental investigations on miniaturized high-frequency vacuum electron devices // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. Vol. 33, № 2. P. 679.
10. *Jeon S.-G., Shin Y.-M., Jang K.-H., Han S.-T., So J.-K., Joo Y.-D., Park G.-S.* High order mode formation of externally coupled hybrid photonic-band-gap cavity // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90, № 2. 021112.
11. *Jang K.-H., Jeon S.-G., Kim J.-I., Won J.-H., So J.-K., Bak S.-H., Srivastava A., Jung S.-S., Park G.-S.* High order mode oscillation in a terahertz photonic-band-gap multibeam reflex klystron // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93, № 21. 211104.
12. *Liu X., Lei H., Yu T., Feng J., Liao F.* Characteristics of terahertz slow-wave system with two-dimensional photonic band-gap structure // Optics Communications. 2008. Vol. 281, № 1. P. 102.
13. *Gong Y., Yin H., Wei Y., Yue L., Deng M., Lu Zh., Xu X., Wang W., Liu P., Liao F.* Study of traveling wave tube with folded-waveguide circuit shielded by photonic crystals // IEEE Trans. Electron Devices. 2010. Vol. 57. № 5. P. 1137.
14. *Shapiro M.A., Brown W.J., Mastovsky I., Sirigiri J.R., Temkin R.J.* 17 GHz photonic band gap cavity with improved input coupling // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2001. Vol. 4. 042001.
15. *Smirnova E.I., Kesar A.S., Mastovsky I., Shapiro M.A., Temkin R.J.* Demonstration of a 17-GHz, high-gradient accelerator with a photonic-band-gap structure // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95, № 7. 074801.
16. *Han S.-T.* A high-frequency monotron employing two-dimensional, dielectric photonic-crystal, diode resonator // 35th Int. Conf. Infrared Millim. Terahertz Waves (IRMMW-THz). Rome, Italy, 2010.

17. *Han S.-T.* Numerical study on radio-frequency field emission from carbon nanotube film in a photonic crystal diode resonator // *J. Korean Phys. Soc.* 2011. Vol. 59, № 1. P. 141.
18. *Бенедик А.И.* Численное моделирование генератора на основе диода с автоэмиссионным катодом и фотонно-кристаллическим резонатором // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2012. Т. 20, № 2. С. 63.
19. *Benedik A.I., Ryskin N.M., Han S.T.* Theory and simulation of field emission diode oscillators // *Phys. Plasmas.* 2013. Vol. 20. № 8. 083117.
20. *Johnson S.G., Joannopoulos J.D.* Block-iterative frequency domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis // *Optics Express.* 2001. Vol. 8, № 3. P. 173.
21. *Oskooi A.F., Roundy D., Ibanescu M., Bermel P., Joannopoulos J.D., Johnson S.G.* MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method // *Computer Physics Communications.* 2010. Vol. 181. P. 687–702.
22. High Frequency Structure Simulator (HFSS) of ANSYS. [Online]. Available: <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>

Поступила в редакцию 27.11.2014

NUMERICAL CALCULATION OF THE ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE DIODE OSCILLATOR WITH PHOTONIC CRYSTAL RESONATOR

A. I. Benedik

Saratov State University

Design of a diode oscillator with a field-emission cathode placed in a photonic crystal (PC) resonator is described. Results of numerical calculation of basic electrodynamic parameters of the PC resonator are presented. The 3D electrodynamic simulation by using the modern software package HFSS shows that varying the design of the energy output allows control of the loaded Q-factor in a wide range. Selection of the optimal value of the loaded Q-factor provides rather high output power and efficiency for reasonable values of the field-emission cathode current density.

Keywords: Vacuum microelectronics, photonic crystal resonator, diode oscillator, loaded Q-factor.



Бенедик Андрей Иванович – родился в городе Мукачево Закарпатской области, Украина (1990). В 2008 году окончил Лицей прикладных наук г. Саратова и поступил на факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. В 2013 году с отличием защитил диплом по специальности «физика открытых нелинейных систем». Аспирант 2-го года обучения кафедры нелинейной физики СГУ. С 2013 г. также работает инженером АО «НПП «Алмаз», г. Саратов. Область научных интересов включает исследование приборов вакуумной микроэлектроники с автоэмиссионными катодами и фотонно-кристаллическими колебательными системами, численное моделирование нелинейных явлений в приборах вакуумной СВЧ-электроники. Автор ряда публикаций по данным направлениям.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
 Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
 E-mail: andrej-benedik@yandex.ru



ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАПРЕЩЕННЫХ ЗОН В СВЯЗАННЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

А. Ю. Шараевская

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Рассматриваются связанные периодические структуры в виде двух связанных магнонных кристаллов и связанные магнонный кристалл – пленка, разделенные диэлектрическим слоем. Получены дисперсионные уравнения для магнитостатических волн, распространяющихся в таких структурах, и выявлены основные особенности формирования запрещенных зон по сравнению с периодической структурой в виде одного магнонного кристалла. Показано, что связь позволяет эффективно управлять характеристиками запрещенных зон в спектре магнитостатических волн, в частности, их шириной и положением в спектре. Полученные результаты могут быть реализованы при создании на основе магнонных кристаллов частотно-избирательных устройств для селективной обработки информационных сигналов в СВЧ-диапазоне.

Ключевые слова: Магнонный кристалл, магнитостатическая волна, микроволновый диапазон, запрещенная зона, устройства обработки сигналов.

Введение

В настоящее время благодаря успехам в технологии выращивания пленочных магнитных материалов и новым подходам в технологиях получения периодических структур возможно создание кристаллов, подобных фотонным [1], на основе магнитных материалов – магнонных кристаллов (МК) [2–6]. В магнонных кристаллах, выполненных на основе ферромагнитных пленок, могут распространяться спиновые волны, обусловленные диполь-дипольным взаимодействием в среде, которые получили название «магнитостатические волны» (МСВ). Интерес к магнонным кристаллам связан, прежде всего, с тем, что возможно управление их свойствами внешним магнитным полем; создание кристаллов в диапазоне сверхвысоких частот размером порядка нескольких миллиметров; использование планарной технологии и др. [2–6].

Наличие пространственного периода приводит к возникновению в спектре спиновых волн запрещенных зон для волновых чисел, удовлетворяющих условию

брэгговского резонанса [7]:

$$k_B^n = 2\pi/\lambda_n = (2n - 1)\pi/L, \quad n = 1, 2, 3... \quad (1)$$

где k_B^n и λ_n – брэгговские волновые числа и длины волн, соответственно; L – период структуры. В этом случае удовлетворяющие условию Брэгга частоты определяются соотношением $\omega_B^n = k_B^n V_\phi$, где V_ϕ – фазовая скорость волны в структуре.

Наличие запрещенных зон (ЗЗ) в спектре спиновых волн позволяет создавать на основе магнетонных кристаллов перестраиваемые магнитным полем устройства для обработки и генерации сигналов в микроволновом диапазоне [8–10]. Для решения этой задачи в последние годы были проведены теоретические и экспериментальные исследования МК, в которых периодичность создавалась различными способами: путём создания модуляции геометрических параметров ферромагнитной плёнки [11, 12], периодических граничных условий в виде металлических решёток [13] и т.д. В этом случае актуальной является задача управления характеристиками запрещённых зон в спектре распространяющихся волн (плотностью, шириной и др.). Управление характеристиками запрещённых зон предлагалось осуществлять: динамически, например, путём создания переменного магнитного поля [14, 15]; за счёт изменения геометрических параметров структур [11, 12]; изменения граничных условий [13]; за счёт нарушения периодичности и создания дефектов [16–18]; путём изменения мощности входного сигнала [10, 19].

Для управления характеристиками запрещённых зон в периодических структурах представляет интерес также использование связанных систем. Необходимо отметить, что связанные структуры существенно расширяют функциональные возможности любых радиофизических систем (так как появляется дополнительный управляющий параметр – связь) и широко используются как в микроволновой технике (см., например [20, 21]), так и в оптических системах [7]. В случае двух связанных волноведущих ферромагнитных структур связь приводит к появлению быстрой и медленной волн, распространяющихся с различными групповыми и фазовыми скоростями, характеристиками которых можно управлять путем изменения величины связи [22]. Последнее обстоятельство, как показано в [23, 24], должно приводить к существенному изменению характера дисперсионных зависимостей в ферромагнитной структуре магнетонный кристалл – магнетонный кристалл (МК–МК).

В настоящей работе на основе анализа дисперсионных характеристик рассматриваются основные особенности формирования запрещённых зон в периодических структурах, которые представляют собой связанную систему в виде магнетонных кристаллов и магнетонный кристалл – ферромагнитная пленка. В этом случае характеристики запрещённых зон должны определяться двумя коэффициентами связи. Один из них определяет связь между прямой и встречной волнами и зависит только от параметров периодической структуры [2, 21]. Другой коэффициент определяется связью между ферромагнитными пленками и приводит к изменению фазовых и групповых скоростей распространяющихся волн в рассматриваемой структуре [22].

Последнее обстоятельство, как показано в [23, 24], приводит к изменению дисперсионных характеристик в структуре двух связанных МК.

1. Модель структуры

Рассмотрим сначала структуру, схема которой приведена на рис. 1 и которая представляет собой два связанных МК с одинаковыми геометрическими и магнитными параметрами, разделенных диэлектрическим слоем толщиной D . Связь между МК осуществляется через высокочастотные электромагнитные поля. Для схемы, представленной на рис. 1, величина связи между структурами K , прежде всего, определяется расстоянием D . Система помещена во внешнее магнитное поле H_0 , направленное вдоль оси z и соответствующее значению, при котором в каждом из МК вдоль оси y распространяются медленные спиновые волны – прямые объёмные магнитостатические волны (МСВ) [21]. В отсутствие связи ($K = 0$), рассматриваемая система представляет собой два одномерных МК с одинаковыми параметрами, причем каждый из МК представляет собой ферромагнитную плёнку с периодическими граничными условиями (периодические канавки, как показано на рис. 1). Предполагается, что в направлении осей x и y структура бесконечна.

Используя уравнение движения для высокочастотных составляющих намагниченности m_1 и m_2 , уравнения для магнитостатического потенциала в каждой плёнке, а также соответствующие граничные условия на границах ферромагнитных слоёв и диэлектрика в длинноволновом приближении ($kd \ll 1$), можно получить следующую систему волновых уравнений для однородных ферромагнитных слоёв [22]:

$$\frac{\partial^2 m_{1,2}}{\partial t^2} + \omega_H^2 m_{1,2} - \frac{d}{2k} \omega_H \omega_M \frac{\partial^2}{\partial y^2} (m_{1,2} + K m_{2,1}) = 0, \quad (2)$$

где $m_{1,2} = m_{x_{1,2}}/M_0$ – безразмерные составляющие намагниченности в каждом слое (M_0 – намагниченность насыщения); $\omega_M = \gamma 4\pi M_0$; $\omega_H = \gamma H_0$; γ – гиромагнитное соотношение; d – толщина однородной плёнки; k – волновое число МСВ; $K = \exp(-kD)$ – коэффициент, определяющий электродинамическую связь по ВЧ-полю одного ферромагнитного слоя с другим [21]. Считаем, что в (2) толщина d в каждой плёнке является периодической функцией, зависящей от продольной координаты, и представим ее в виде $d(y) = d_2 + \delta(y)$,

$$\text{где } \delta(y) = \delta(y+L) = \begin{cases} \Delta d, & 0 \leq y \leq a_2, \\ 0, & a_2 \leq y \leq L. \end{cases}$$

Представляя $\delta(y)$ в виде ряда Фурье и ограничиваясь тремя первыми членами

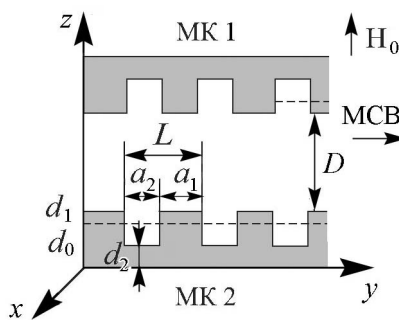


Рис. 1. Схема ферромагнитной структуры в виде двух одномерных МК, разделённых диэлектрическим слоем (толщина исходной пленки d_1 , эффективная толщина пленки d_0 , глубина канавки $\Delta d = d_1 - d_2$, её ширина $a_2 = L - a_1$, период структуры L)

разложения*, представим периодическую функцию $d(y)$ в виде [23]:

$$d = d_0 \left[1 + \delta d \cos \left(\frac{2\pi}{L} y \right) \right], \quad (3)$$

где $\delta d = \frac{2\Delta d}{\pi d_0} \sin \left(\frac{\pi a_1}{L} \right)$; $d_0 = d_2 + \frac{\Delta d a_1}{L}$.

После подстановки (3) в (2) полученная система связанных уравнений будет описывать периодическую структуру МК–МК. Для решения полученной системы уравнений используется подход, основанный на методе связанных волн, который заключается в том, что волны, распространяющиеся в прямом и встречном направлениях в периодической системе, рассматриваются независимо, а периодическая структура обеспечивает их связь [1]. Такой подход применительно к рассматриваемой структуре связанных МК позволяет вполне обоснованно сделать предположение, что электродинамический коэффициент связи K , описывающий взаимодействие между волнами в каждой плёнке, будет сохранять свое значение как для прямых, так и для встречных волн.

Решение волновых уравнений для намагниченности (2) в каждом кристалле можно представить в виде суммы пространственных гармоник [7]:

$$m = \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i \exp[-jk_i y], \quad (4)$$

где $k_i = k_0 + 2\pi i/L$, ($i = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) – постоянные распространения пространственных гармоник. В первой зоне Бриллюэна ($0 \leq k_i L \leq 2\pi$) для каждого из МК будем учитывать только нулевые гармоники прямых волн ($i = 0$) и «-1» гармоники встречных волн ($i = -1$) и будем записывать решение только в полосе первого брэгговского резонанса. В этом случае решение волновых уравнений (2) с учётом (4) может быть представлено в виде суммы прямых и встречных волн в каждом из кристаллов

$$m = A_{1,2} \exp[j(\omega t - k_0 y)] + B_{1,2} \exp[j(\omega t + k_{-1} y)], \quad (5)$$

где $A_{1,2}$ – амплитуды прямых волн в каждом из МК, $B_{1,2}$ – амплитуды встречных волн, соответственно; ω – частота; $k_{-1} = k_0 - 2\pi/L$.

Подставляя соотношения (3) и (5) в волновые уравнения для высокочастотных составляющих намагниченности для каждого из слоёв (2) с учётом сделанных предположений можно получить дисперсионное соотношение для связанных МК в следующем виде:

$$\text{Det} \begin{pmatrix} \Omega_0 & \beta k_0 K & \Delta_{-1} & \Delta_{-1} K \\ \beta k_0 K & \Omega_0 & \Delta_{-1} K & \Delta_{-1} \\ \Delta_0 & \Delta_0 K & \Omega_{-1} & \beta k_{-1} K \\ \Delta_0 K & \Delta_0 & \beta k_{-1} K & \Omega_{-1} \end{pmatrix} = 0, \quad (6)$$

* В представлении $\delta(y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta_n \exp(2\pi n \frac{y}{L})$ ограничение тремя первыми членами разложения ($n = 0, \pm 1$) вполне допустимо, так как в дальнейшем будет учитываться только резонансное взаимодействие прямых и встречных волн в полосе первого брэгговского резонанса.

где $\Omega_{0,-1} = -\omega^2 + \omega_H^2 + \frac{\omega_H \omega_M d_0}{2} k_{0,-1}$,
 $\beta = \frac{\omega_H \omega_M d_0}{2}$, $\Delta_{0,-1} = \beta \frac{\delta d k_{0,-1}^2}{2 k_{-1,0}}$.

Диагональные компоненты определителя в (6), приравненные к нулю ($\Omega_{0,-1} = 0$), представляют собой дисперсионные соотношения для прямой и встречной МСВ в однородной плёнке [23]. Недиagonальные компоненты, куда входит электродинамический коэффициент K , описывают связь между магнитными кристаллами, а $\Delta_{0,-1}$ – параметр связи между прямыми и встречными волнами в каждом МК. При $K \neq 0$ и $\delta d_{1,2} = 0$ соотношение (6) переходит в соотношение для МСВ в двух связанных однородных плёнках [22].

Полагая в (6) для МК1 $\delta d = 0$, получим дисперсионное соотношение для структуры МК – однородная пленка, схема которой представлена на рис. 2:

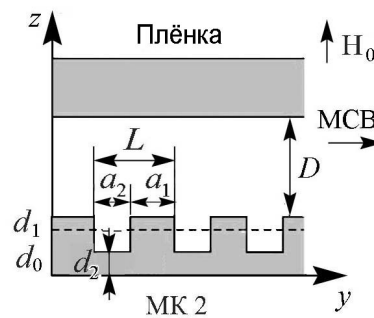


Рис. 2. Схема структуры МК – пленка

$$\text{Det} \begin{pmatrix} \Omega_0 & \beta k_0 K & \Delta_{-1} & \Delta_{-1} K \\ \beta k_0 K & \Omega_0 & \Delta_{-1} K & \Delta_{-1} \\ 0 & 0 & \Omega_{-1} & \beta k_{-1} K \\ \Delta_0 K & \Delta_0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = 0. \quad (7)$$

2. Результаты численного расчета

На рис. 3 представлены результаты расчёта дисперсионных характеристик МСВ в первой зоне Бриллюэна, построенные с использованием (6) для двух одинаковых МК. Зависимости $\text{Re}(k)$ (сплошные линии) соответствуют дисперсионным зависимостям МСВ для быстрой (толстые кривые) и медленной (тонкие кривые) волн, а огибающие внутри закрашенных областей на этом рисунке – значениям $\text{Im}(k)$, определяющим постоянные затухания волны.

В случае связанных однородных плёнок ($\delta d = 0$) дисперсионная кривая для МСВ в одиночной однородной пленке расщепляется на две (пунктирные линии на рис. 3), соответствующих быстрой (линии 1) и медленной (линии 2) волнам – нормальным модам связанной структуры, (соответствующие им встречные волны показаны линиями 1' и 2').

На частотах фазового синхронизма (вертикальные линии на рис. 3) выполняется брэгговское условие. Взаимодействие быстрых прямой и встречной волн, а также медленных прямой и встречной волн приводит к формированию запрещённых зон (полос непропускания, в которых $\text{Im}(k) \neq 0$). В случае связанных МК ($\delta d \neq 0$) имеет место формирование двух запрещённых зон – высокочастотной G1 и низкочастотной G2 (показаны закрашенными областями на рис. 3, а–в). Высокочастотная

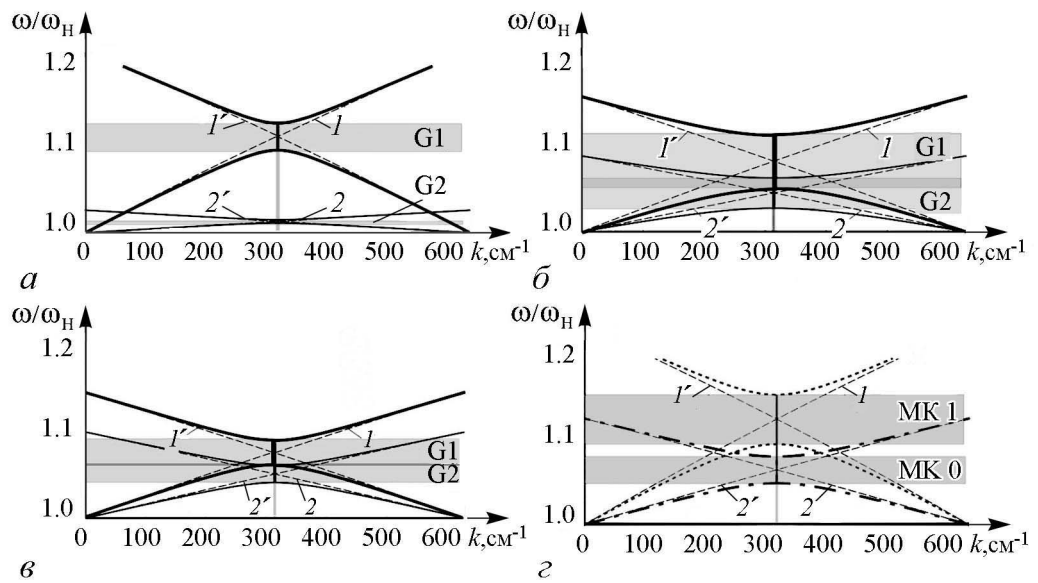


Рис. 3. Дисперсионные характеристики структуры МК–МК (G1 – запрещённая зона для быстрой волны, G2 – запрещённая зона для медленной волны): $\delta d = 0.3, K = 0.8$ (а); $\delta d = 0.8, K = 0.3$ (б); $\delta d = 0.4, K = 0.1$ (в); $\delta d = 0.5$ (г); $L = 100$ мкм

запрещенная зона формируется за счёт взаимодействия прямой и встречной быстрых волн. Низкочастотная – за счёт взаимодействия прямой и встречной медленных волн. На рис. 3, г приведены дисперсионные кривые для предельных случаев, когда в структуре коэффициент связи $K = 0$ или $K = 1$. При $K = 0$ (штрихпунктирные кривые) остается одна запрещенная зона. Такую структуру можно рассматривать, как одиночный МК (МК 0). При $K = 1$ (пунктирные кривые) также остается одна запрещенная зона (МК+1), но она будет располагаться выше, так как МСВ в таком МК имеет большую эффективную фазовую скорость V_{ϕ} и, следовательно, большую брэгговскую частоту.

Как следует из результатов расчетов для связанных МК, приведенных на рис. 3, ЗЗ могут не перекрываться (см. рис. 3, а), могут перекрываться частично и полностью (см. рис. 3, б, темная область – ЗЗ и для быстрых и для медленных волн). Можно подобрать параметры структуры так, что между ЗЗ возникает узкая полоса пропускания (см. рис. 3, в).

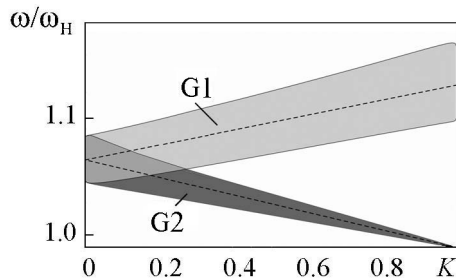


Рис. 4. Зависимость характеристик запрещённых зон в структуре МК–МК от параметра K при $\delta d = 0.5$

На рис. 4 показана зависимость центральной частоты ЗЗ (пунктирные прямые) ω_1 (G1) и ω_2 (G2) от параметра связи K . Закрашенные области на рис. 4 соответствуют ширине зон G1 (для быстрой волны) и G2 (для медленной волны). Видно, что при увеличении K центральная запрещенная зона G1 сдвигается вверх по частоте и расширяется (светлая область на рис. 4), а G2 – вниз по частоте и сужается (темная

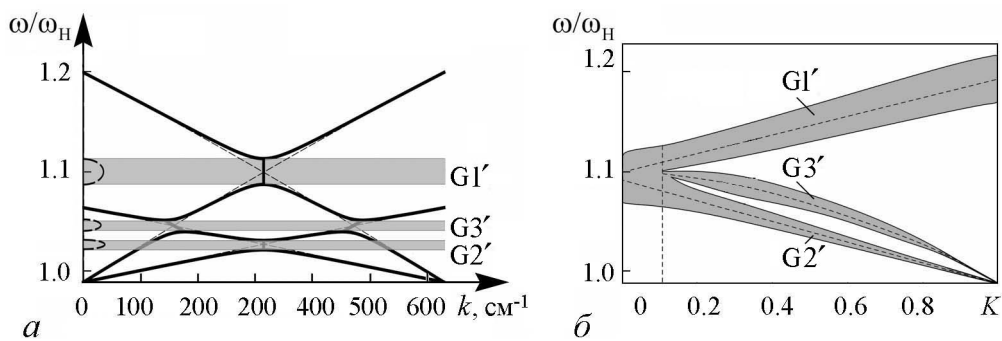


Рис. 5. *a* – Дисперсионные характеристики структуры МК–пленка при $\delta d = 0.5$, $K = 0.5$. *б* – Зависимость ширины запрещённых зон от параметра K . $G1'$ – первая зона для быстрой волны, $G2'$ – вторая зона для медленной волны, $G3'$ – третья зона (дополнительная), $\delta d = 0.5$

область на рис. 4). Причем при $K = 0$ и $K = 1$ ширина ЗЗ соответствует результатам, приведенным на рис. 3, *з*. Влияние второго параметра связи δd сводится только к увеличению ширины запрещённых зон $G1$ и $G2$ при возрастании δd . Таким образом, результаты, представленные на рис. 4, демонстрируют возможность управления характеристиками ЗЗ при изменении параметра связи K .

На рис. 5 представлены результаты расчета для структуры МК – однородная пленка на основе соотношения (7).

Как следует из рис. 5, в случае связанной структуры МК – пленка формируются три ЗЗ при определенном значении K . Дополнительная зона $G3'$ образуется за счет взаимодействия прямой быстрой волны и обратной медленной при малых волновых числах k , а также обратной быстрой волны и прямой медленной при больших волновых числах k (рис. 5, *a*). При увеличении K (рис. 5, *б*) зона $G3'$ сдвигается вниз по частоте и сужается, как и зона $G2'$, но характер изменения не является линейным, в отличие от $G1'$ и $G2'$. Аналогичный результат получается и для структуры МК–МК с разными геометрическими параметрами и может быть обусловлен несимметричностью структур.

Отметим, что для всех рассмотренных случаев также существует дополнительная возможность перестройки всех запрещённых зон (и, соответственно, полос пропускания между ними) и управления описанными выше эффектами с помощью изменения величины внешнего магнитного поля (параметра $\omega_H = \gamma H_0$) [23–25].

Выводы

На основе полученных результатов выявлены основные особенности формирования запрещённых зон в связанных ферромагнитных структурах на основе магнетных кристаллов. Показано, что в таких структурах связь между слоями позволяет эффективно управлять характеристиками запрещённых зон (центральной частотой зоны, полосой частот и величиной подавления сигнала), а также характеристиками полос пропускания между ними. Возможность управлять резонансными свойствами таких структур может быть реализована при создании на основе магнетных кри-

сталлов частотно-избирательных устройств с уникальными характеристиками для селективной обработки информационных сигналов в СВЧ-диапазоне. Такие устройства в виде режекторных и полосовых фильтров, фильтров для выделения каналов, ответвителей и мультиплексоров могут найти применение в системах радиолокации и связи [26].

В заключение выражаю глубокую благодарность моему научному руководителю к.ф.-м.н., доценту М.А. Морозовой за постоянное внимание к работе и полезные критические замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-07-31142) и Программы поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-828.2014.2).

Библиографический список

1. *Кившарь Ю.С., Агравал Г.П.* Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. М. : Физматлит, 2005. 648 с.
2. *Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Животовский Л.В. и др.* Ферромагнитные пленки с периодическими структурами с магнотной запрещённой зоной – магнотные кристаллы // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77, № 10. С. 670.
3. *Nikitov S.A., Tailhadesand Ph., Tsai C.S.* Spin waves in periodic magnetic structures – magnonic crystals // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2001. Vol. 236, № 3. С. 320.
4. *Chumak A.V., Serga A.A., Hillebrands B. and Kostylev M.P.* Scattering of backward spin waves in a one-dimensional magnonic crystal // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 93. 022508.
5. *Kruglyak V.V., Demokritov S.O. and Grundler D.* Magnonics // Journal of Physics D. 2010. Vol. 43. 264001.
6. *Serga A.A., Chumak A.V. and Hillebrands B.* YIG magnonics // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43. P. 264002.
7. *Kashyap R. Fibe.* Bragg Gratings. San Diego, USA: Acad. Press., 1999.
8. *Sang-Koog Kim, a Ki-Suk Lee, and Dong-Soo Han.* A gigahertz-range spin-wave filter composed of width-modulated nano-strip magnonic-crystal waveguides // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 95. 082507.
9. *Ustinov A.B., Drozdovskii A.V., Kalinikos B.A.* Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing // Applied physics letters. 2010. Vol. 96. P. 142513.
10. *Grishin S.V., Beginin E.N., Morozova M.A., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A.* Self-generation of dissipative solitons in magnonic quasicrystal active ring resonator // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115, № 5. 053908, Feb. 2.
11. *Arikan M., Au. Y., Vasile G., Ingvarsson S. and Kruglyak V.V.* Broadband injection and scattering of spin waves in lossy width-modulated magnonic crystal waveguides // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. Vol. 46. 135003.
12. *Ciubotaru F., Chumak A.V., Grigoryeva N.Yu., Serga A.A. and Hillebrands B.* Magno-

- nic band gap design by the edge modulation of micro-sized waveguides// J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. Vol. 45. 255002.
13. *Beginin E.N., Filimonov Yu.A., Pavlov E.S., Vysotskii S.L., and Nikitov S.A.* Bragg resonances of magnetostatic surface spin waves in a layered structure: Magnonic crystal-dielectric-metal // Applied Physics Letters .2012. Vol. 100, 252412.
 14. *Chumak A.V., Neumann T., Serga A.A., Hillebrands B. and Kostylev M.P.* A current-controlled, dynamic magnonic crystal // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. 205005.
 15. *Анненков А.Ю., Герус С.В., Ковалев С.И.* Объемные и поверхностно-объемные магнитостатические волны в волноводах, создаваемых ступенчатым полем подмагничивания / ЖТФ. 2004. Т. 74, № 2.
 16. *Costa C.H.O. and Vasconcelos M.S.* Band gaps and transmission spectra in generalized Fibonacci $\sigma(p, q)$ one-dimensional magnonicquasicrystals // J. Phys. Condens. Matter. 2013. Vol. 25. 286002.
 17. *Filimonov Yu. Yu., Pavlov E., Vystostkii S. and Nikitov S.* Magnetostatic surface wave propagation in a one-dimensional magnonic crystal with broken translational symmetry // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101. 242408.
 18. *Qi Wang, Huaiwu Zhang, Xiaoli Tang, Hua Su, Feiming Bai, Yulan Jing and Zhiyong Zhong.* Effects of symmetry reduction on magnon band gaps in two-dimensional magnonic crystals // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014.
 19. *Sheshukova S.E., Morozova M.A., Beginin E.N., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A.* Formation of gap solitons in a finite magnonic crystal // Phys. Wave Phenom. 2013. Vol. 21, № 4. P. 304.
 20. *Louisell W.H.* Coupled mode and parametric electronics. John Wiley, New York, 1960.
 21. *Ваишковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П.* Магнитостатические волны в электронике СВЧ. Саратов: СГУ. 1993.
 22. *Morozova M.A., Sharaevskii Yu.P., Sheshukova S.E., Zhamanova M.K.* Investigation of self-action effects of magnetostatic waves in ferromagnetic structures in terms of the system of Schrödinger equations with coherent or incoherent coupling // Physics of the Solid State. 2012. Vol. 54, № 8. P. 1575.
 23. *Морозова М.А., Шараевская А.Ю.* Дисперсионные характеристики магнитостатических волн в связанных магнонных кристаллах // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2013. Вып. 15. С. 82.
 24. *Morozova M.A., Grishin S.V., Sadovnikov A.V., Sharaevskii Yu P. and Nikitov S.A.* Magnonic bandgap control in coupled magnonic crystals // IEEE Trans. on Magnetics. 2014. Vol. 50, № 11. 4007204.
 25. *Морозова М.А., Шешукова С.Е., Шараевский Ю.П.* Механизмы формирования солитонов огибающей в периодических ферромагнитных структурах // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. № 5. С. 113.
 26. *Калиникос Б.А., Устинов А.Б., Баруздин С.А.* Спин-волновые устройства и эхо-процессоры. Москва: Радиотехника. 2013. ISBN 9785-87070-362-3.

Поступила в редакцию 15.12.2014

FEATURES OF FORMATION OF BAND GAPS IN COUPLED STRUCTURES BASED ON MAGNONIC CRYSTALS

A. Yu. Sharaevskaya

Saratov State University

There are introduced ferromagnetic periodic structures consist of two coupled magnonic crystals and related magnonic and crystal film, separated by a dielectric layer. The dispersion equation made for magnetostatic waves, that propagate in such structures and identified main features of formation band gaps and a comparison with a periodic structure of one magnonic crystal was made. It was shown that connection can effectively manage characteristics of band gaps in spectrum of magnetostatic waves, and theirs width and position in spectrum. The results can be realize for creating on basis of magnonic crystals frequency selective devices for selectively processing information signals with microwave range.

Keywords: Magnonic crystal, magnetostatic wave, microwave range, band gap, processing device.



Шараевская Анна Юрьевна – родилась в Саратове (1992), получила степень бакалавра по специальности «прикладные математика и физика» на факультете нелинейных процессов Саратовского государственного университета (2013). Продолжает обучение в магистратуре по специальности «радиофизика» и работает в лаборатории магнитных явлений. Является постоянным участником научных конференций. Опубликовала несколько статей в соавторстве по теме «магнонные кристаллы».

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: upark@inbox.ru



ДИНАМИКА ДВУХ СПИН-ТРАНСФЕРНЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ С ПОЛЕВОЙ СВЯЗЬЮ

Я. В. Туркин, П. В. Куцов

Саратовский государственный технический университет

Предложена и исследована модель системы двух спин-трансферных осцилляторов связанных при помощи магнитного поля. Показано, что данная модель может демонстрировать фазовую синхронизацию в широком диапазоне частот, а также режимы квазипериодичности и хаос.

Ключевые слова: Спин-трансферные осцилляторы, уравнение Ландау–Лифшица, спинтроника, синхронизация, хаос.

Введение

В настоящее время значительно возрос интерес к динамике спин-трансферных осцилляторов и систем, построенных на их основе. Этот интерес обусловлен целым рядом практически важных свойств, которыми обладают спин-трансферные осцилляторы. В работе [1] было показано, что спин-трансферные осцилляторы обладают большим потенциалом как источники маломощных СВЧ-сигналов в интегральных схемах. В работе [2] приведены способы изменения собственной частоты спин-трансферного осциллятора при помощи внешнего магнитного поля или тока. Преимущества этих способов в том, что перестройка частоты осуществляется посредством внешнего воздействия без необходимости изменения внутренних параметров осциллятора.

Одиночный спин-трансферный осциллятор в автономном режиме может демонстрировать только периодические колебания [3–5]. Более богатую феноменологическую картину можно получить в системе связанных осцилляторов. Так как колебания в спин-трансферном осцилляторе возникают при пропускании через него постоянного тока, то одним из способов связи является последовательное или параллельное включение осцилляторов в цепь с источником постоянного тока. Поведение связанных таким образом спин-трансферных осцилляторов исследовано уже довольно подробно (см., например, [6–8]). Другой, значительно менее изученный механизм связи, это связь по полю. При таком типе связи осцилляторы изолированы друг от друга электрически, но располагаются достаточно близко, так что магнитное поле, создаваемое одним осциллятором, действует на вектор намагниченности в другом и наоборот.

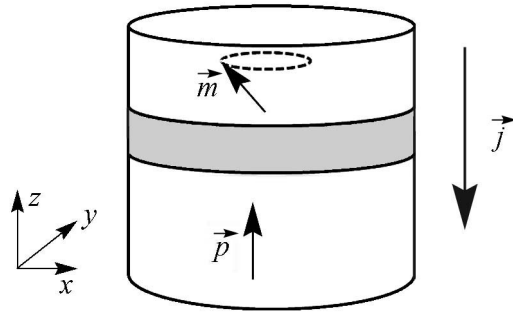


Рис. 1. Структура одиночного спин-трансферного осциллятора

«свободным». Ток \vec{j} направлен от свободного слоя к закреплённому. Сначала электроны проходят через закреплённый слой и поляризуются (приобретают направление спина, коллинеарное \vec{p}). Затем, проходя диамagnetную прослойку (на рисунке она выделена серым цветом), электроны попадают в свободный слой и теряют там свою поляризацию. Это приводит к возникновению вращающего момента, влияющего, в конечном счете, на вектор намагненности свободного слоя. В зависимости от параметров осциллятора при включении тока вектор либо просто меняет свое направление, то есть происходит перемагничивание, либо начинает совершать автоколебания. Динамика вектора намагненности в свободном слое описывается уравнением Ландау–Лифшица с добавочным членом Слончевского [10]

$$\frac{d\vec{m}}{d\tau} = - [\vec{m} \times \vec{h}_{\text{eff}}] - \alpha \cdot \vec{m} \times [\vec{m} \times \vec{h}_{\text{eff}}] - \beta \cdot [\vec{m} \times [\vec{m} \times \vec{p}]] + \alpha \cdot \beta \cdot [\vec{m} \times \vec{p}]. \quad (1)$$

Здесь \vec{h}_{eff} – эффективное поле (поле которое действует на вектор намагненности в свободном слое); α – константа затухания; β – токовый параметр (параметр пропорциональный плотности тока в свободном слое); \vec{p} – направление намагненности в закреплённом слое (совпадает по направлению с поляризацией спинового тока).

Эффективное поле в общем случае складывается из внешнего поля, которое приложено к осциллятору, и полей, обусловленных геометрическими размерами и кристаллическими свойствами материала осциллятора,

$$\vec{h}_{\text{eff}} = K_u (\vec{m}, \vec{u}) \vec{u} - N\vec{m} + \vec{h}_{\text{ext}}. \quad (2)$$

Здесь K_u – константа анизотропии; \vec{u} – вектор анизотропии; N – размагничивающий тензор (в данном случае тензор представляет собой диагональную матрицу, сумма элементов которой равна единице).

Следует отметить, что уравнение (1) сохраняет амплитуду вектора намагненности, и поэтому динамика вектора намагненности может быть рассмотрена как динамика на поверхности сферы [11].

В общем случае у системы (1) может быть не более трёх пар неподвижных точек. Точки $(0, 0, 1)$ и $(0, 0, -1)$ существуют при выбранных нами параметрах всегда. Две другие пары, два устойчивых фокуса и две седловые точки, располагаются в плоскости (x, y) и меняют свое положение в зависимости от значения токового параметра.

Система (1) может демонстрировать автоколебания. На оси токового параметра область существования предельного цикла ограничена бифуркацией Андронова–Хопфа и гомоклинической бифуркацией [11]. На рис. 2 показана зависимость амплитуды колебаний компоненты m_x вектора намагниченности от токового параметра. Рождение предельного цикла происходит в результате суперкритической бифуркации Андронова–Хопфа при отрицательном β , а с приближением токового параметра к нулю, цикл разрушается вследствие касания сепаратрис седловых точек. Рис. 3 показывает, как меняется частота автоколебаний в зависимости от β . Вблизи точки рождения цикла имеется узкая область, где частота не зависит от управляющего параметра, а затем она начинает убывать по линейному закону. Отметим очень широкий диапазон перестройки частоты: в точке рождения цикла она, примерно, на порядок выше, чем в точке его исчезновения. Подробное описание динамики одиночного спин-трансферного осциллятора можно найти [5, 7, 11].

Рассмотрим пару связанных осцилляторов, расположенных достаточно близко, чтобы магнитное поле создаваемое свободным слоем одного осциллятора могло оказывать ощутимое влияние на вектор намагниченности другого осциллятора и наоборот. Для учета действия одного осциллятора на другой в эффективное поле вводится дополнительный член – магнитное поле создаваемое другим осциллятором. Формула, описывающая поле, создаваемое каждым осциллятором, достаточно сложна. Поэтому в настоящей работе рассматривается упрощенная задача, где предполагается, что напряженность создаваемого поля пропорциональна вектору намагниченности, а коэффициент пропорциональности выступает в роли параметра связи. Поле, создаваемое первым осциллятором, добавляется к эффективному полю второго осциллятора и наоборот.

Таким образом, система двух связанных осцилляторов описывается двумя уравнениями Ландау–Лифшица

$$\frac{d\vec{m}_1}{d\tau} = -[\vec{m}_1 \times (\vec{h}_{\text{eff}} + \varepsilon \cdot \vec{m}_2)] - \alpha \cdot \vec{m}_1 \times [\vec{m}_1 \times (\vec{h}_{\text{eff}} + \varepsilon \cdot \vec{m}_2)] - \beta_1 \cdot [\vec{m}_1 \times [\vec{m}_1 \times \vec{p}]] + \alpha \cdot \beta_1 \cdot [\vec{m}_1 \times \vec{p}], \quad (3a)$$

$$\frac{d\vec{m}_2}{d\tau} = -[\vec{m}_2 \times (\vec{h}_{\text{eff}} + \varepsilon \cdot \vec{m}_1)] - \alpha \cdot \vec{m}_2 \times [\vec{m}_2 \times (\vec{h}_{\text{eff}} + \varepsilon \cdot \vec{m}_1)] - \beta_2 \cdot [\vec{m}_2 \times [\vec{m}_2 \times \vec{p}]] + \alpha \cdot \beta_2 \cdot [\vec{m}_2 \times \vec{p}], \quad (3б)$$

где ε – параметр связи.

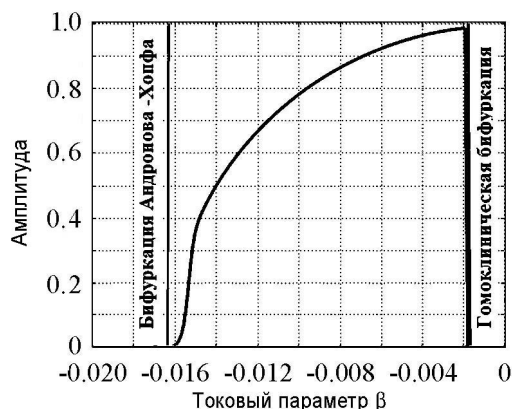


Рис. 2. Зависимость амплитуды компоненты намагниченности m_x от значения токового параметра. Значения параметров соответствуют первому осциллятору системы (2) при отсутствии связи

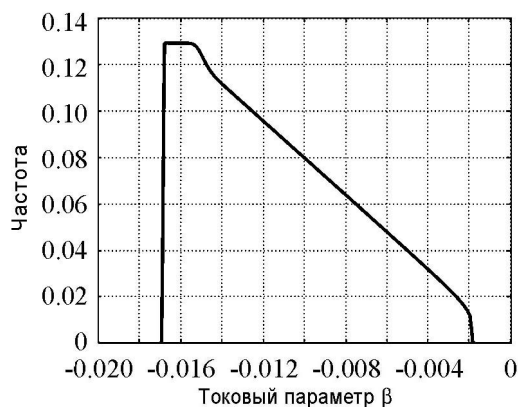


Рис. 3. Частота колебаний вектора намагниченности. Параметры как на рис. 2

Результаты расчетов, приведенные ниже, были получены при следующих значениях параметров: $\alpha = 0.02$, $\vec{p} = (0, 0, 1)$, $\beta_2 = -0.015$, $K_u = 0.001$, $N_1 = \text{diag}(0.0489, 0.0776, 0.8733)$, $N_2 = \text{diag}(0.0645, 0.0774, 0.8580)$, $\vec{u} = (0, 1, 0)$. Токовый параметр второго осциллятора фиксирован. Частота его автоколебаний в отсутствие связи равна 0.0106. Токовый параметр первого осциллятора изменяется.

Исследование поведения системы (3) производится при помощи построения карт показателей Ляпунова и карт режимов. При вычислении показателей Ляпунова следует учитывать, что каждое из уравнений (3а) и (3б) сохраняет длину вектора намагниченности. Это влечет появление двух направлений безразличного равновесия в шестимерном фазовом пространстве системы. Следовательно, два показателя Ляпунова всегда будут нулевыми. Исходя из этого, режимы системы (3) можно классифицировать следующим образом.

1. Имеется хотя бы один положительный показатель – хаотический режим.
2. Имеются два отрицательных и четыре нулевых показателя – квазипериодический режим, которому в фазовом пространстве отвечает двумерный тор.
3. Имеются три отрицательных и три нулевых показателя – режим синхронизации. В фазовом пространстве этому режиму соответствует предельный цикл или в общем случае резонансный тор.
4. Имеются четыре отрицательных и два нулевых показателя – гибель колебаний в обоих осцилляторах, чему соответствует выход на неподвижную точку в фазовом пространстве.

Карты режимов строятся исходя из отношений частот между первым и вторым осциллятором. Если происходит гибель колебаний, то отношение частот считается равным нулю.

Плоскость показателей Ляпунова и карта режимов приведены на рис. 4, 5, соответственно.

На плоскости показателей Ляпунова (см. рис. 4) можно видеть четыре основных режима системы (3): гибель колебаний, синхронизацию, квазипериодический

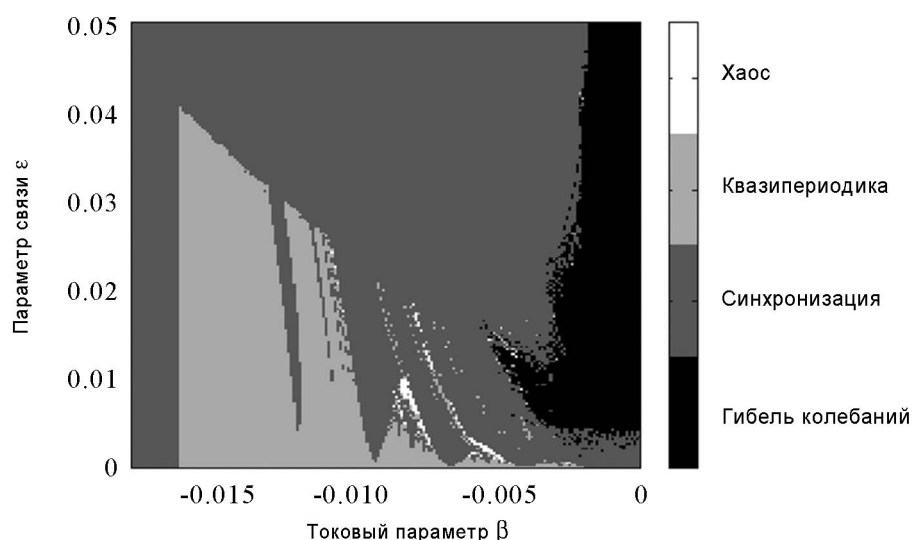


Рис. 4. Плоскость показателей Ляпунова: хаос (белый цвет) – имеется хотя бы один положительный показатель; квазипериодика (светло серый цвет) – два нулевых и четыре отрицательных показателя; синхронизация (темно серый цвет) – три нулевых и три отрицательных показателя; гибель колебаний (черный цвет) – два нулевых и четыре отрицательных показателя

режим, хаос. Более детальная картина приведена на карте динамических режимов (см. рис. 5), которая качественно повторяет плоскость ляпуновских показателей. Здесь дополнительно выделены языки синхронизации $1/1$, $1/3$, $1/5$, $1/7$. Эти языки, примыкают вплотную друг к другу. Еще один язык $1/9$ отделен от них квазипериодическим режимом. Видно, что ширина языков убывает с ростом порядка. По этой причине не исключено существование ещё нескольких очень узких языков более высоких порядков слева от языка $1/9$. Однако их не может быть много из-за того, что область ограничена слева бифуркацией Андронова–Хопфа в первом осцилляторе. За порогом этой бифуркации собственные автоколебания в первом осцилляторе прекращаются. Напомним, что параметры второго осциллятора фиксированы и отвечают режиму автоколебаний. В данной ситуации второй осциллятор заставляет первый совершать малые колебания. Частота вынужденных колебаний совпадает с частотой вынуждающих колебаний, то есть имеет место синхронизация $1/1$, при которой второй осциллятор колеблется на частоте, близкой к собственной, а первый осциллятор повторяет его колебания с малой амплитудой вблизи неподвижной точки. Такую ситуацию можно назвать доминированием второго осциллятора над первым. Область доминирования можно видеть на рис. 5 слева от штриховой линии. Область гибели колебаний находится вблизи точки гомоклинической бифуркации первого осциллятора (штрихпунктирная линия на рис. 5). При увеличении модуля токового параметра, чему соответствует движение по плоскости справа налево, область гибели сменяется языками синхронизации высших порядков. При увеличении параметра связи область гибели колебаний сужается и ограничивается линией гомоклинической бифуркации. Слева от нее возникает область синхронизации $1/1$.

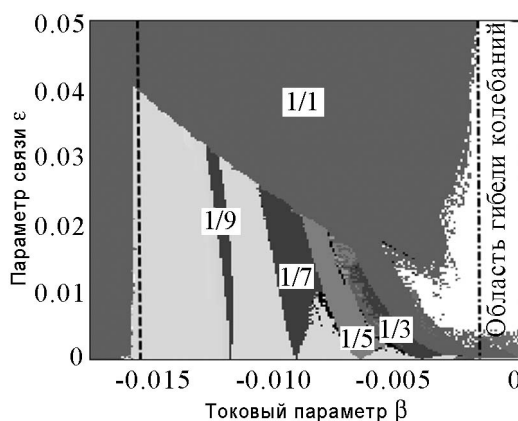


Рис. 5. Карта режимов системы (3): штриховой линией отмечено критическое значение токового параметра, при котором происходит бифуркация Андронова–Хопфа, а штрихпунктирной – гомоклиническая бифуркация для первого осциллятора в автономном режиме

Важно отметить, что область синхронизации $1/1$ занимает значительную часть карты динамических режимов на рис. 5. При достаточно сильной связи этот тип синхронизации наблюдается во всём диапазоне существования автоколебаний в изолированных подсистемах. Собственные частоты синхронизированных осцилляторов могут отличаться очень существенно, что иллюстрирует рис. 3, на котором показано, как сильно изменяется собственная частота автоколебаний первого осциллятора в диапазоне существования предельного цикла. Напомним, что собственная частота второго осциллятора фиксирована и равна 0.0106. Исходя из этого, можно предположить, что механизм возникновения режима $1/1$ такой же, как и при широкополосной синхронизации [12]. Как известно, широкополосная синхронизация может возникать в системах с диссипативной связью. В нашем случае связь нельзя однозначно интерпретировать как диссипативную. Однако члены, отвечающие за связь, входят, в том числе, и в коэффициенты уравнений (3), отвечающие за диссипацию (эти коэф-

фициенты пропорциональны α). Нужно заметить, тем не менее, что существенным отличием рассматриваемой системы от канонических моделей с широкополосной синхронизацией является то, что в данном случае область синхронизации ограничена диапазоном существования предельных циклов в парциальных системах.

Колебания, наблюдаемые в разных областях карты режимов, иллюстрирует рис. 6. В левой колонке показаны зависимости динамических переменных от времени, а в правой – построены фигуры Лиссажу. Так как динамика каждой из подсистем происходит на поверхностях сфер, то их динамические переменные можно в компактной форме выразить при помощи стереографической проекции

$$w_{x1,2} = \frac{m_{x1,2}}{1 + m_{z1,2}}, \quad (4a)$$

$$w_{y1,2} = \frac{m_{y1,2}}{1 + m_{z1,2}}, \quad (4б)$$

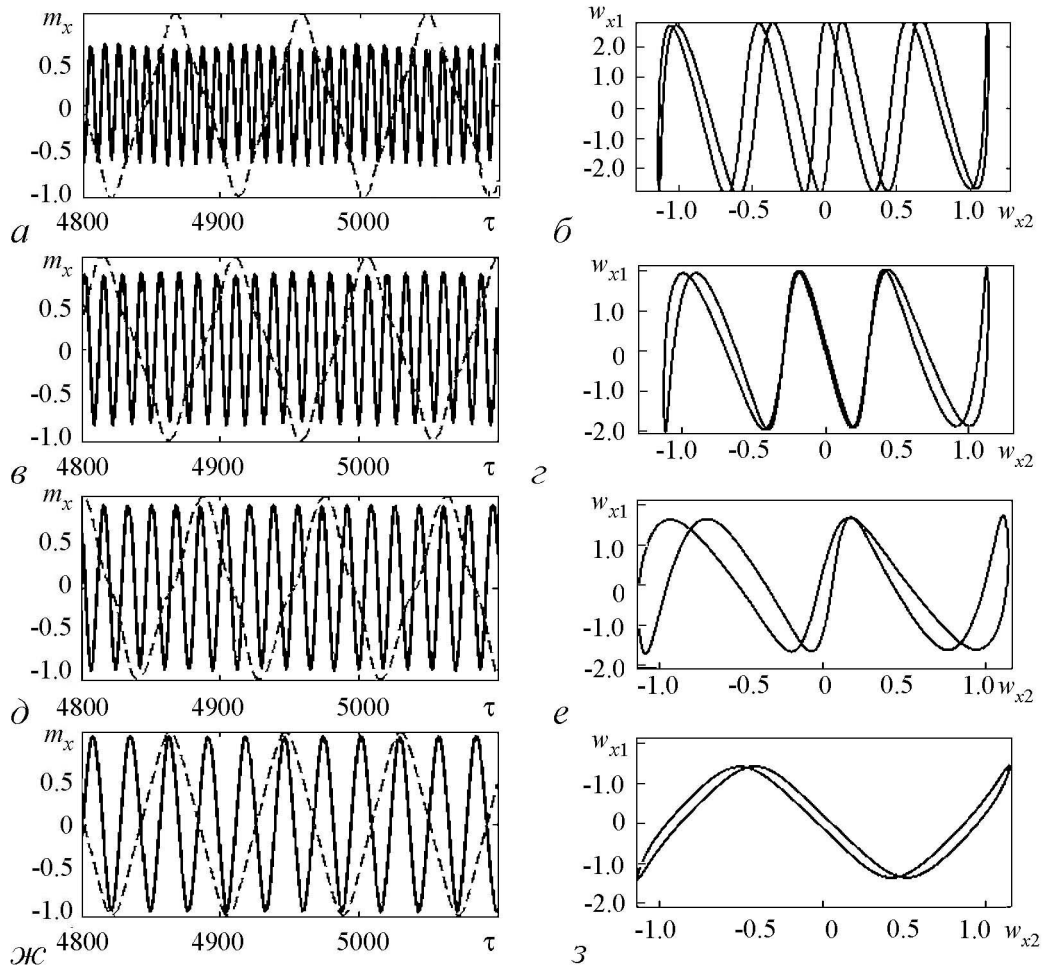


Рис. 6. Динамические режимы системы (3). Слева показана зависимость компоненты намагниченности m_x от времени, справа – фигуры Лиссажу в стереографической проекции. Диаграммы представляют следующие случаи синхронизации: $a, б - 1/9$; $в, г - 1/7$; $д, е - 1/5$; $ж, з - 1/3$. Сплошная линия – компонента намагниченности первого осциллятора, а штриховая линия – второго

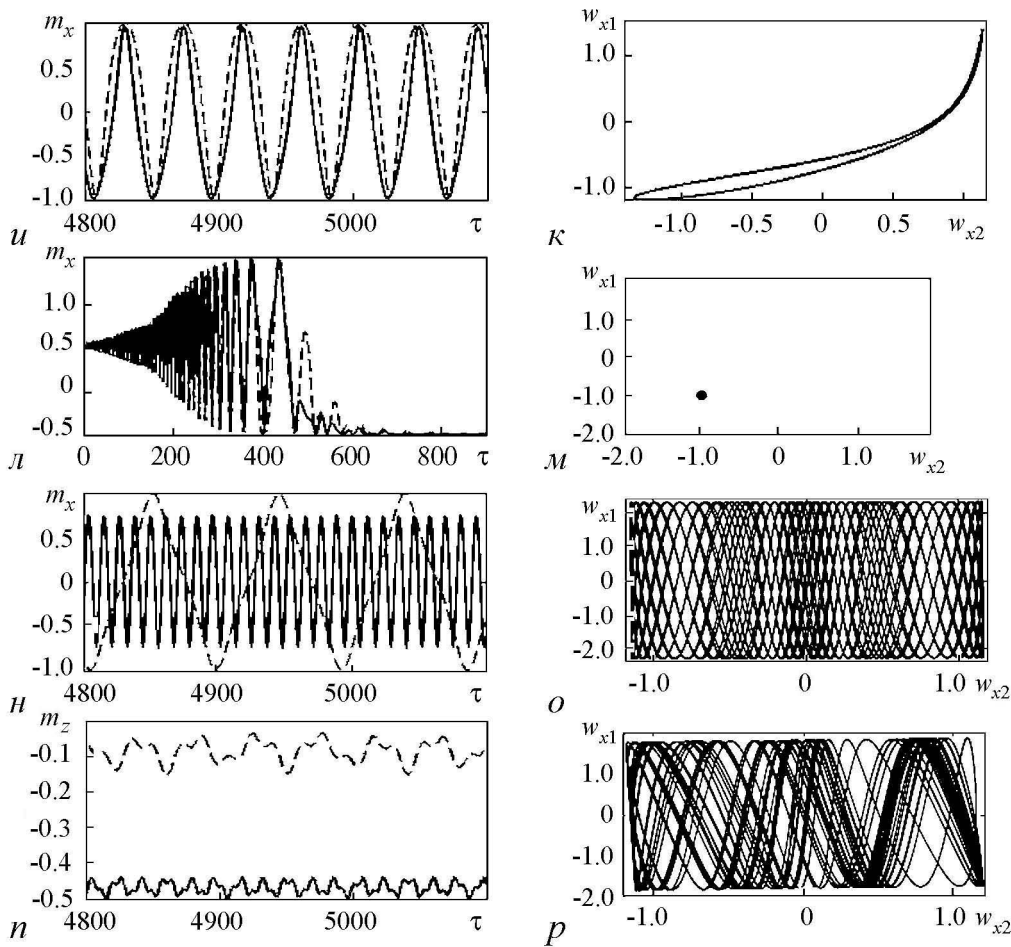


Рис. 6 (продолжение). Диаграммы представляют следующие режимы: *u, k* – синхронизация 1/1; *л, м* – гибель колебаний; *н, о* – квазипериодический режим; *п, р* – хаос. На диаграмме «*п*» вместо компоненты вектора намагниченности m_x показана компонента m_z для большей наглядности

где $m_{x1,2}$, $m_{y1,2}$ и $m_{z1,2}$ – координаты векторов $\vec{m}_{1,2}$, соответственно. Фигуры Лиссажу на рис. 6 построены для переменных стереографической проекции w_{x1} , w_{x2} первого и второго осцилляторов, соответственно.

По виду фигуры Лиссажу можно определить динамический режим системы. Фигура, представленная замкнутой кривой с конечным числом точек поворота, соответствует синхронизации, где порядок синхронизации – число контуров, образованных линиями. Этот случай показан на рис. 6, *а-к*, которые соответствуют режимам синхронизации 1/9, 1/7, 1/5, 1/3 и 1/1, соответственно. Как видно из рисунков, число контуров на фигурах Лиссажу равно девяти, семи, пяти, трем и одному, соответственно. Точка на диаграмме Лиссажу соответствует гибели колебаний. Этот случай показан на рис. 6, *м*. На рис. 6, *л* представлен соответствующий этому режиму переходный процесс, из которого видно, как затухают колебания. Незамкнутая кривая на диаграмме Лиссажу, имеющая счётное число точек поворота, которые упорядоченно заполняют плоскость, соответствует квазипериодическому режиму. Такой режим изображен на рис. 6, *н, о*. Из рис. 6, *о* можно видеть, что кривая равномерно запол-

няет плоскость. Причём точки самопересечений распределены регулярным образом. Незамкнутая кривая, нерегулярным образом заполняющая плоскость, соответствует хаосу. Этот режим изображен на рис. 6, *n*, *p*. Так как хаос слабо выражен на графике зависимости компоненты намагниченности m_x от времени, на рис. 6, *n* построен график компоненты m_z . На рис. 6, *p* можно видеть, что кривая имеет большое число беспорядочно расположенных точек самопересечений.

Заключение

- Предложена и исследована модель системы двух спин-трансферных осцилляторов, связанных по полю. При построении модели было сделано упрощающее предположение, что напряжённость магнитного поля свободного слоя осциллятора пропорциональна вектору намагниченности этого слоя.
- Показано, что система демонстрирует следующие режимы: синхронизацию, гибель колебаний, квазипериодичность и хаос. Синхронизация 1/1 имеет место в обширной области на карте динамических режимов, в пределах которой собственные частоты связанных систем могут отличаться очень значительно (на порядок). Это свидетельствует о наличии так называемой широкополосной синхронизации. Данный вывод подтверждается присутствием у связи между подсистемами (сложной по своей структуре) диссипативной компоненты, как того и требует механизм широкополосной синхронизации.
- Связанные по полю спин-трансферные осцилляторы могут быть использованы в маломощных СВЧ-микросхемах в качестве генераторов периодических, квазипериодических и хаотических сигналов. Также они могут найти применение как преобразователи частоты. Так как взаимодействие между осцилляторами осуществляется посредством магнитного поля при отсутствии электрического контакта, их можно использовать для реализации аналога трансформаторной связи между отдельными элементами интегральной схемы. Существенным преимуществом устройств такого типа является то, что перестройка собственной частоты может осуществляться простым изменением силы постоянной компоненты тока, текущей через осциллятор. Перечисленные особенности делают рассматриваемые системы достаточно перспективными с точки зрения их практического применения в качестве компонент электронных устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения базовой части государственного задания высшим учебным учреждениям по проекту № 1694.

Библиографический список

1. Prokopenko O., Bankowski E., Meitzler T., Tiberkevich, V., Slavin, A. Spin-torque nano-oscillator as a microwave signal source// IEEE Magnetic Letters. 2011. Vol. 2. Article #.3000104
2. Zeng Z. Ultralow-current-density and bias-field-free spin-transfer nano-oscillator// Nature Scientific Reports. 2013. № 3. P. 1.

3. *Huang H.B., Ma X.Q., Liu Z.H.* Micromagnetic simulation of spin transfer torque magnetization precession phase diagram in a spin-valve nanopillar under external magnetic fields// *ISRN Condensed Matter Physics*. 2012. Vol. 5–2012. Article ID 387380. P. 1.
4. *Mohseni S.M., Sani S., Persson J.* High frequency operation of a spin-torque oscillator at low field// *Phys. Status Solidi*. 2011. Vol. 12, Issue 5. P.432.
5. *Ozatay O., Gowtham P.G.* Sidewall oxide effects on spin-torque- and magnetic-field-induced reversal characteristics of thin-film nanomagnets// *Nature Materials*. 2008. Vol. 7. P. 567.
6. *Pikovsky A.* Robust synchronization of spin-torque oscillators with an LCR load// *Phys. Rev. E*. 2013. Vol. 88, Issue 3. P. 032812.
7. *Sanid C., Muruges S.* Synchronization and chaos in spin-transfer-torque nano-oscillators coupled via a high-speed operational amplifier// *Journal of Physics D: Applied Physics*. .2014. Vol. 47, Issue 6. P. 065005.
8. *Subash B., Chandrasekar V. K., Lakshmanan M.* Synchronization of an array of spin-torque nano oscillators in periodic applied external magnetic field// *EPL (Europhysics Letters)*. 2013. Vol. 102, №1. P. 17010.
9. *Hartmann U.* Magnetic multilayers and giant magnetoresistance. New York: Springer-Verlag, 2001.
10. *Slonczewski J.C.* Current-driven excitation of magnetic multilayers// *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1996. Vol. 159, № 1. P. L1-L7.
11. *Bertotti G., Mayergoyz I., Serpico C.* Nonlinear magnetization dynamics in nano-systems. Amsterdam: Elsevier, 2009.
12. *Кузнецов А.П., Паксютов В.И., Роман Ю.П.* Особенности синхронизации в системе неидентичных связанных осцилляторов ван дер Поля и ван дер Поля–Дуффинга. Широкополосная синхронизация // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2007. Т. 15, № 4. С. 3.

Поступила в редакцию 24.12.2014

DYNAMICS OF TWO FIELD-COUPLED SPIN-TRANSFER OSCILLATORS

Y. V. Turkin, P. V. Kuptsov

State Technical University of Saratov

The model of two field-coupled spin-transfer oscillators has been derived and studied. It has been shown that this model demonstrates phase synchronization in a wide bandwidth, quasiperiodic oscillations and chaos.

Keywords: Spin-transfer oscillators, Landau Lifshitz equation, spintronics, synchronization, chaos.



Туркин Ярослав Вячеславович – родился в Саратове (1992). Окончил с отличием бакалавриат Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (2013). В настоящее время магистрант второго года обучения в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. Занимается научной работой по направлению: математическое моделирование магнитных наноструктур.

410054 Саратов, ул. Политехническая, 77
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
E-mail: turkin.yaroslav@gmail.com



Купцов Павел Владимирович – родился в Саратове (1972), с отличием окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1994), защитил кандидатскую диссертацию (1998) и докторскую диссертацию (2013). В настоящее время – профессор кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., а также сотрудник научной группы теоретической нелинейной динамики в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов – сложные колебания в распределённых системах, хаотическая динамика в системах высокой размерности, численные методы.

410054 Саратов, ул. Политехническая, 77
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
E-mail: p.kuptsov@rambler.ru



МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОЙ ПРОВЕРКИ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ АТТРАКТОРОВ ДЛЯ РЕДУЦИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

В. П. Круглов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал

Метод проверки гиперболической природы хаотических аттракторов, основанный на анализе статистики распределения углов между подпространствами устойчивых и неустойчивых направлений, применяется к редуцированным конечномерным моделям нескольких распределенных систем, сконструированных на основе модификации уравнений Свифта–Хохенберга и модели брюсселятора, а также к задаче о параметрическом возбуждении стоячих волн модулированным сигналом накачки.

Ключевые слова: Однородно гиперболический аттрактор, структурная устойчивость, показатель Ляпунова.

Введение. Описание метода

Аттракторы, состоящие только из седловых траекторий, устойчивые и неустойчивые многообразия которых могут пересекаться лишь трансверсально, называют однородно гиперболическими [1–5]. Из трансверсальности многообразий следует свойство структурной устойчивости: устройство их фазового пространства и характер динамики нечувствительны к изменению параметров и функций, входящих в уравнения. Примеры физически реализуемых систем с однородно гиперболическими аттракторами были предложены недавно в работах С.П. Кузнецова и соавторов [6–12], причем некоторые из них относятся к категории распределенных систем и описываются уравнениями в частных производных. Существует необходимость проверки гиперболичности аттракторов этих систем на базе математически обоснованных методик.

Известный критерий конусов [1–5, 7, 13] позволяет подтвердить гиперболичность аттрактора с высокой достоверностью, но его использование требует значительных вычислительных ресурсов и, что наиболее существенно, затруднительным представляется его распространение на случай систем высокой размерности фазового пространстве, в том числе на распределенные системы.

Альтернативный метод состоит в анализе распределений углов между устойчивыми и неустойчивыми многообразиями на аттракторе [2, 14].

Предположим, что необходимо проверить гиперболичность аттрактора некоторого отображения $M : x_{n+1} = M(x_n)$, имеющего размерность фазового пространства k . Если аттрактор гиперболический, то в любой его точке пространство векторов малых возмущений представляется как прямая сумма двух инвариантных подпространств, являющихся касательными к устойчивому и неустойчивому многообразиям [5].

Пусть неустойчивое подпространство одномерным (во всех рассмотренных ниже примерах это так), тогда устойчивое подпространство имеет размерность $k - 1$.

Неустойчивый вектор в точках произвольной траектории на аттракторе можно получить, выполняя многократные итерации отображения M совместно с линеаризованным отображением $DM : \delta x_{n+1} = DM(x_n)\delta x_n$. С другой стороны, для той же траектории в обратном времени можно провести многократные итерации набора из $k - 1$ линеаризованных отображений DM , подвергая полученные на каждой итерации векторы процедуре ортогонализации и нормировки. Таким образом, для каждой точки траектории находим касательный вектор к неустойчивому многообразию и ортонормированный базис гиперповерхности, касательной к устойчивому многообразию. Это позволяет определить угол между устойчивым и неустойчивым подпространствами. Отсутствие углов, близких к нулю, свидетельствует о гиперболической природе аттрактора. С другой стороны, обнаружение близких к нулю углов говорит о нарушении гиперболичности.

Хотя описанный тест не может претендовать на строгое обоснование гиперболичности аттрактора, он позволяет на практике различать гиперболические и негиперболические аттракторы. В описанной выше форме, однако, использование этого метода вызывает трудности для систем высокой размерности, поскольку требует выполнения решения большого числа уравнений в вариациях. Благодаря недавно открытым алгоритмам вычисления ковариантных ляпуновских векторов [15] появилась возможность модифицировать этот метод [16]. Как и в исходной версии метода, для определения вектора, принадлежащего неустойчивому подпространству, в прямом времени осуществляются итерации линеаризованного отображения DM . Для итераций в обратном времени вдоль той же траектории вводится сопряженное линеаризованное отображение DM^T . Для него матрица Якоби, отвечающая линеаризованному отображению DM , транспонируется и берется с обратным знаком. В результате в коде итераций в каждой точке траектории получается вектор, ортогональный гиперповерхности, касательной к устойчивому многообразию.

Опишем алгоритм более детально, имея в виду его применение к аттракторам в сечении Пуанкаре систем обыкновенных дифференциальных уравнений. На первом этапе решаем численно систему уравнений $\dot{x} = F(x, t)$ совместно с уравнениями в вариациях $\delta\dot{x} = F'(x, t)\delta x$, нормируя вектор возмущения на каждом шаге, пока не установится режим, соответствующий хаотическому аттрактору, а вектор возмущения будет принадлежать неустойчивому подпространству. На втором этапе, продолжая вычисления, на каждой итерации отображения Пуанкаре записываем в файл значения динамических переменных $x = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ и компонент вектора возмущения $\delta x = \{\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_k\}$. Этот участок траектории должен быть достаточно длинным. На третьем этапе продолжаем решать уравнения и записы-

вать в файл значения динамических переменных на каждой итерации отображения Пуанкаре. На четвертом этапе движемся вдоль записанной в файл опорной траектории в обратном времени и численно решаем сопряженные уравнения в вариациях $\delta \dot{\mathbf{u}} = -[\mathbf{F}'(\mathbf{x}, t)]^T \delta \mathbf{u}$. Когда процедура доходит до участка траектории, где записывался вектор возмущения в прямом времени, начинаем записывать вектор возмущения сопряженной системы на каждой итерации отображения Пуанкаре. В результате для точек на длинном отрезке траектории получаем набор векторов $\{\delta \mathbf{x}_n\}$, касательных к неустойчивому многообразию, и набор векторов $\{\delta \mathbf{u}_n\}$, ортогональных к устойчивому многообразию. В каждой точке можно найти угол $\beta_n \in [0, \pi/2]$ между векторами $\delta \mathbf{x}_n$ и $\delta \mathbf{u}_n$ по теореме косинусов. Соответственно, угол между устойчивым и неустойчивым подпространствами в этой точке $\alpha_n = \pi/2 - \beta_n$.

Если система дифференциальных уравнений автономная, на каждом шаге итераций из векторов возмущения необходимо исключить составляющую, отвечающую одномерному нейтральному подпространству. Для этого из вектора возмущения вычитается вектор \mathbf{F} , направленный вдоль траектории, компоненты которого отвечают функциям в правых частях уравнений, с выбранным надлежащим образом коэффициентом (скалярное произведение вектора возмущения и нормированного на единицу вектора \mathbf{F}).

В данной работе описанная методика проверки гиперболичности применяется к редуцированным конечномерным моделям распределенных систем, которые предположительно имеют хаотические аттракторы типа Смейла–Вильямса.

1. Исследуемые системы и их конечномерные модели

1.1. Автономная система на основе уравнения Свифта–Хохенберга. В статье [8] предложен пример автономной распределенной системы на основе модификации уравнения Свифта–Хохенберга [13], описывающей возникновение и затухание в одномерной среде структур, пространственная фаза которых на определенном характерном периоде претерпевает удвоение (с обратным знаком). Модель описывается системой уравнений в частных производных

$$\begin{aligned} \partial_t u + (1 + \partial_x^2)^2 u &= (\mu + u^2 - v^2/5)u + \varepsilon v \cos 3x, \\ \partial_t v &= (u^2 - 1)v + u^2, \end{aligned} \quad (1)$$

с периодическими граничными условиями

$$u(x, t) = u(x + L, t), \quad v(x, t) = v(x + L, t). \quad (2)$$

Первое уравнение системы (1) представляет собой модифицированное уравнение Свифта–Хохенберга. Функция $\varepsilon \cos 3x$ в последнем слагаемом правой части описывает пространственную неоднородность среды. Второе уравнение – вспомогательное и не содержит производных по координате.

В соответствии с граничными условиями (2) функция, описывающая паттерн в фиксированный момент времени, периодическая по координате x , поэтому переменные u и v можно разложить в ряд Фурье.

Качественно функционирование системы можно описать следующим образом. Когда величина $\mu + u^2 - v^2/5$, входящая в первое уравнение системы (2), стано-

вится больше нуля, переменная u нарастает, при этом основной вклад в ее величину вносит первая пространственная гармоника с фазой φ : $u \approx |U_1| \cos(x + \varphi)$. Когда величина $u^2 - 1$, входящая во второе уравнение, становится больше нуля, нарастает переменная v , при этом возбуждаются нулевая и вторая пространственные гармоники, и за счет присутствия слагаемого u^2 , второй гармонике передается удвоенная фаза: $|V_2| \cos(2x + 2\varphi)$. Произведение второй гармоники переменной v и функции, описывающей пространственную неоднородность среды, обеспечивает передачу первой гармонике переменной u удвоенной фазы с обратным знаком: $\cos(2x + 2\varphi) \cos 3x = \cos(x - 2\varphi)/2 + \dots$. Далее переменные u и v убывают, и остаются близкими к нулю, пока величина $\mu + u^2 - v^2/5$ снова не станет положительной. Таким образом, на каждой стадии возбуждения фазы пространственных спектральных компонент претерпевают удвоение с изменением знака: $\varphi_{n+1} = -2\varphi_n$. Это – растягивающее отображение окружности, демонстрирующее хаос с показателем Ляпунова, равным $\ln 2 \approx 0.6931$.

Система уравнений (1)–(2) решалась численно с помощью явно-неявной разностной схемы. На рис. 1 представлена пространственно-временная зависимость переменных u и v при значениях параметров, указанных в подписи к рисунку. Колебания переменной u в среде представляют собой длительные стадии роста возмущений, чередующиеся с резкими спадами почти до нуля. Средний период между последовательными сбросами возбуждения в данном режиме составил $\tau = 50.37$. Можно видеть, что фазовый сдвиг от паттерна к паттерну меняется нерегулярно.

Поскольку функционирование распределенной системы основано на взаимодействии пространственных гармоник, приближенно динамику можно описать конечномерной системой обыкновенных дифференциальных уравнений, в качестве переменных которой выступают несколько наиболее значимых фурье-компонент переменных u и v . Представим решение уравнений (1)–(2) в виде усеченных рядов Фурье

$$\begin{aligned} u &= C_1 e^{ix} + C_1^* e^{-ix}, \\ v &= w + C_2 e^{2ix} + C_2^* e^{-2ix}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь C_1 – комплексная амплитуда первой гармоники переменной u ; C_2 – комплексная амплитуда второй гармоники переменной v ; w – вещественная амплитуда нулевой гармоники переменной v . Подставляя соотношения (3) в уравнения (1), умножая

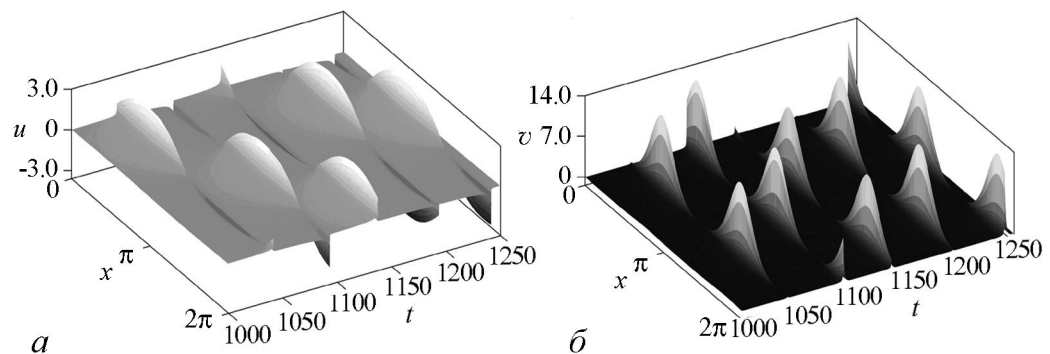


Рис. 1. Пространственно-временные реализации переменных u (а) и v (б) при значениях параметров $\mu = 0.03$, $\varepsilon = 0.03$, $L = 2\pi$, $\Delta t = 0.001$, $\Delta x = L/64 \approx 0.098$

первое из получившихся выражений на e^{-ix} , а второе на e^{-2ix} или 1, и усредняя их в каждом случае по пространственному периоду 2π , приходим к системе уравнений

$$\begin{aligned} \dot{C}_1 &= (\mu - \frac{1}{5}w^2 + 3|C_1|^2 - \frac{2}{5}|C_2|^2)C_1 - \frac{2}{5}C_2C_1^*w + \frac{1}{2}\varepsilon C_2^*, \\ \dot{C}_2 &= (2|C_1|^2 - 1)C_2 + (w + 1)C_1^2, \\ \dot{w} &= -w + 2\text{Re}(C_2C_1^{*2}) + 2|C_1|^2(w + 1). \end{aligned} \quad (4)$$

Система уравнений (4) решалась численно с помощью метода Рунге–Кутты четвертого порядка при $\mu = 0.03$, $\varepsilon = 0.03$. Для построения отображения Пуанкаре секущая поверхность задавалась условием $S = |C_1| - 1 = 0$, причем отслеживаются значения переменных в моменты времени, когда пересечение этой поверхности сопровождается уменьшением абсолютной величины переменной C_1 .

На рис. 2, *а* изображена диаграмма для фазы переменной C_1 . Как видно из диаграммы, динамика фазы в конечномерной системе описывается растягивающим отображением окружности. На рис. 2, *б* изображена проекция аттрактора в сечении Пуанкаре на плоскость действительной и мнимой частей переменной C_1 . Предположительно, аттрактор в сечении Пуанкаре представляет собой соленоид Смейла–Вильямса.

Для аттрактора потоковой системы вычислялись показатели Ляпунова по алгоритму Бенеттина с ортогонализацией по Граму–Шмидту. При значениях параметров $\mu = 0.03$, $\varepsilon = 0.03$ показатели Ляпунова составили $\lambda = \{0.0123, 0, -0.892, -0.951, -0.972\}$. Поскольку средний период между последовательными прохождениями сечения Пуанкаре равен $\tau = 52.61$, старший показатель Ляпунова для отображения Пуанкаре $\Lambda_1 = \lambda_1\tau = 0.65$, что приблизительно соответствует показателю Ляпунова растягивающего отображения окружности $\ln 2$. Остальные показатели Ляпунова отображения Пуанкаре отрицательные (нулевой показатель, полученный для потоковой системы, у отображения отсутствует). Таким образом, элемент объема в фазовом пространстве отображения Пуанкаре испытывает за одну итерацию растяжение по одному направлению и сжатие по трем направлениям. Это соответствует построению гиперболического аттрактора типа Смейла–Вильямса (растяжение происходит по угловой переменной) в четырехмерном фазовом пространстве.

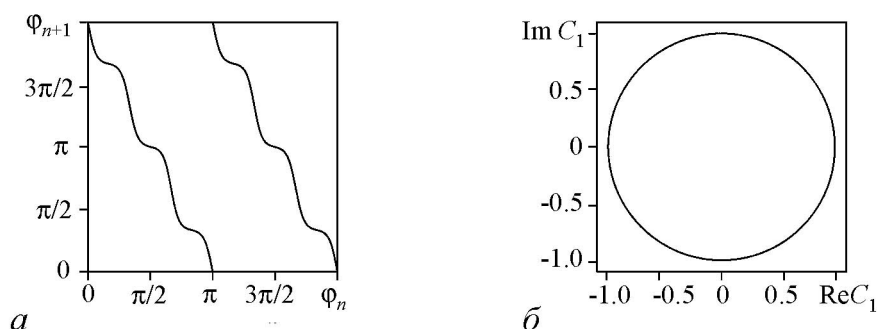


Рис. 2. Итерационная диаграмма для фазы переменной C_1 (*а*) и проекция аттрактора в сечении Пуанкаре на плоскость действительной и мнимой частей переменной C_1 (*б*). Параметры $\mu = 0.03$, $\varepsilon = 0.03$

Используя вместо (3) подстановки с большим числом гармоник, можно построить более точные конечномерные модели с гиперболическими аттракторами. В частности, используя вместо (3) соотношения

$$\begin{aligned} u &= C_1 e^{ix} + C_1^* e^{-ix}, \\ v &= w + C_2 e^{2ix} + C_2^* e^{-2ix} + C_4 e^{4ix} + C_4^* e^{-4ix}, \end{aligned} \quad (5)$$

где C_4 – комплексная амплитуда четвертой гармоники переменной v , на основе уравнений (2), получим систему

$$\begin{aligned} \dot{C}_1 &= (\mu - \frac{1}{5}w^2 + 3|C_1|^2 - \frac{2}{5}|C_2|^2 - \frac{2}{5}|C_4|^2)C_1 - \frac{2}{5}C_2 C_1^* w - \\ &\quad - \frac{2}{5}C_1^* C_2^* C_4 + \frac{1}{2}\varepsilon(C_2^* + C_4), \\ \dot{C}_2 &= (2|C_1|^2 - 1)C_2 + C_4 C_1^{*2} + (w + 1)C_1^2, \\ \dot{C}_4 &= (2|C_1|^2 - 1)C_4 + C_1^2 C_2, \\ \dot{w} &= -w + 2\text{Re}(C_2 C_1^{*2}) + 2|C_1|^2(w + 1). \end{aligned} \quad (6)$$

(В подстановке (5) не учитываются гармоники переменной u , следующие за первой, так как их амплитуды оказываются намного меньше, чем амплитуда первой гармоники.)

Система уравнений (6) решалась численно методом Рунге–Кутты четвертого порядка. Сечение Пуанкаре определялось так же, как и для системы (4).

Динамика фазы (рис. 3, *а*) приближенно описывается растягивающим отображением окружности. Преобразование фазы в системе (6) по сравнению с системой (4) оказывается сглаженным, благодаря учету дополнительной гармоники. На рис. 3, *б* изображена проекция аттрактора в сечении Пуанкаре на плоскость действительной и мнимой частей переменной C_1 . Предположительно, аттрактор в сечении Пуанкаре представляет собой соленоид Смейла–Вильямса.

Показатели Ляпунова для аттрактора при значениях параметров $\mu = 0.03$, $\varepsilon = 0.03$ составили $\lambda = \{0.0135, 0, -0.841, -0.934, -0.955, -0.96, -0.9639\}$. Средний период между последовательными сечениями $\tau = 49.6$, поэтому старший показатель Ляпунова отображения Пуанкаре $\Lambda_1 = \lambda_1 \tau = 0.67$, то есть близок

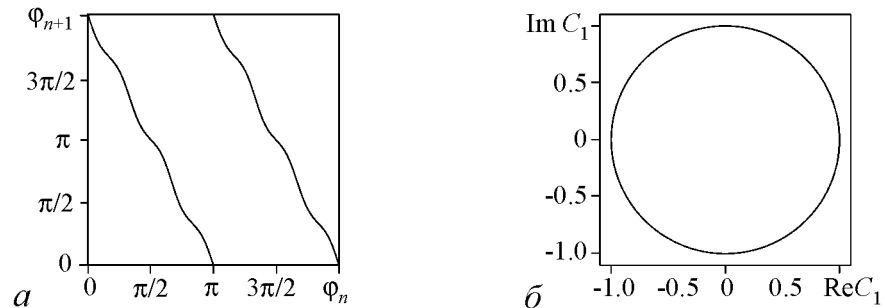


Рис. 3. Итерационная диаграмма для фазы переменной C_1 (*а*) и проекция аттрактора в сечении Пуанкаре на плоскость действительной и мнимой частей переменной C_1 (*б*). Параметры $\mu = 0.03$, $\varepsilon = 0.03$

к величине $\ln 2$, отвечающей равномерно растягивающему отображению окружности. Остальные показатели Ляпунова отрицательны. Это соответствует построению гиперболического аттрактора типа Смейла–Вильямса (если учесть, что растяжение происходит по угловой переменной) в шестимерном фазовом пространстве.

1.2. Система на основе брюсселятора. В работе [9] предложена модель неавтономной распределенной системы на основе системы типа брюсселятор [17, 18] с аттрактором Смейла–Вильямса. Модель описывается системой уравнений в частных производных

$$\begin{aligned}\partial_t u &= (A - u)(1 + \varepsilon \cos 3k_0 x) - Bu + u^2 v + \gamma(t) \sigma \partial_{xx} u, \\ \partial_t v &= Bu - u^2 v + \gamma(t) \partial_{xx} v,\end{aligned}\tag{7}$$

где

$$\gamma(t) = \begin{cases} 1, & nT < t \leq nT + T/2, \\ 1/4, & nT + T/2 < t \leq (n+1)T. \end{cases}$$

Граничные условия – периодические:

$$u(x, t) = u(x + L, t), \quad v(x, t) = v(x + L, t),\tag{8}$$

где L – пространственный период. Фактор $(1 + \varepsilon \cos 3k_0 x)$ описывает пространственную неоднородность затухания в среде. Функция $\gamma(t)$ описывает периодическое переключение коэффициентов диффузии. В соответствии с периодическими граничными условиями, функции u и v периодические по координате и могут быть представлены рядами Фурье.

Система функционирует следующим образом. На первой половине периода модуляции ($nT < t \leq nT + T/2$) наиболее значимый вклад вносит первая пространственная гармоника, которая характеризуется некоторой фазой φ : $\cos(k_0 x + \varphi)$. На второй половине периода модуляции ($nT + T/2 < t \leq (n+1)T$), вторая пространственная гармоника $\cos(2k_0 x + 2\varphi)$ нарастает, а первая гармоника затухает. На следующем периоде первая гармоника возбуждается под воздействием возмущения, обусловленного произведением второй гармоники u и функции $(1 + \varepsilon \cos 3k_0 x)$, учитывающей пространственную неоднородность. Этим обеспечивается передача первой гармонике вновь возникающего паттерна удвоенной пространственной фазы (с обратным знаком), что следует из соотношения $\cos(2k_0 x + 2\varphi) \cos 3k_0 x = 1/2 \cos(k_0 x - 2\varphi) + \dots$. Этот процесс повторяется на каждом периоде. Таким образом, пространственные фазы на последовательных стадиях формирования волновых структур эволюционируют в соответствии с растягивающим отображением окружности $\varphi_{n+1} = -2\varphi_n + \text{const}$. Это хаотическое отображение характеризуется положительным показателем Ляпунова $\Lambda = \ln 2 = 0.693 \dots$

Уравнения (7)–(8) решались численно при значениях параметров $A = 2$, $B = 4.1$, $\sigma = 0.25$, $\varepsilon = 0.03$. Пространственный период был задан $L = 2\pi$, а период модуляции $T = 32\pi$. При таком выборе параметров волновое число, отвечающее максимальной неустойчивости, составляет $k_0 = \sqrt[4]{A^2/\sigma} = 2$. На рис. 4 показаны

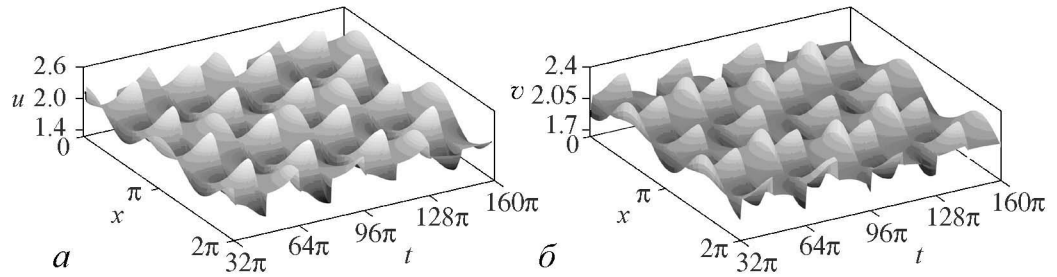


Рис. 4. Пространственно-временные реализации переменных u (а) и v (б) при значениях параметров $A = 2$, $B = 4.1$, $\sigma = 0.25$, $\varepsilon = 0.03$, $L = 2\pi$, $T = 32\pi$, $k_0 = 2$

пространственно-временные реализации, полученные в численных расчетах для переменных u и v . Можно видеть, что фазовый сдвиг от паттерна к паттерну меняется нерегулярным образом.

Так как работа системы основана на взаимодействии пространственных гармоник переменных u и v , можно свести ее описание к конечномерной системе обыкновенных дифференциальных уравнений для амплитуд наиболее значительных мод – первых слагаемых разложенного в ряды Фурье возмущения в окрестности неподвижной точки $(A, B/A)$ системы (7)–(8). Минимальный набор укороченных уравнений, который адекватно описывает динамику, можно получить с помощью подстановки

$$u(x, t) = A + x_1 \cos 2x + u_1 \sin 2x + x_2 \cos 4x + u_2 \sin 4x,$$

$$v(x, t) = B/A + y_1 \cos 2x + v_1 \sin 2x + y_2 \cos 4x + v_2 \sin 4x.$$

Коэффициенты Фурье x_1 , u_1 , x_2 , u_2 и y_1 , v_1 , y_2 , v_2 – это новые переменные, зависящие только от времени. Подставляя эти разложения в (7), после усреднения по пространственному периоду 2π получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 - \varepsilon x_2/2 - Bx_1 - 4\sigma x_1 \gamma(t) + F_1, \\ \dot{u}_1 &= -u_1 + \varepsilon u_2/2 - Bu_1 - 4\sigma u_1 \gamma(t) + G_1, \\ \dot{x}_2 &= -x_2 - \varepsilon x_1/2 - Bx_2 - 16\sigma x_2 \gamma(t) + F_2, \\ \dot{u}_2 &= -u_2 + \varepsilon u_1/2 - Bu_2 - 16\sigma u_2 \gamma(t) + G_2, \\ \dot{y}_1 &= Bx_1 - 4y_1 \gamma(t) - F_1, \\ \dot{v}_1 &= Bu_1 - 4v_1 \gamma(t) - G_1, \\ \dot{y}_2 &= Bx_2 - 16y_2 \gamma(t) - F_2, \\ \dot{v}_2 &= Bu_2 - 16v_2 \gamma(t) - G_2, \end{aligned} \tag{9}$$

где

$$\begin{aligned}
 F_1 &= (2B + u_1v_1/2 + u_2v_2 + x_2y_2 + 3x_1y_1/4)x_1 + (A^2 + x_2^2/2 + u_2^2/2 + u_1^2/4)y_1 + \\
 &\quad + A(u_1v_2 + u_2v_1 + x_1y_2 + x_2y_1) + BA^{-1}(u_1u_2 + x_1x_2), \\
 G_1 &= (2B + x_1y_1/2 + u_2v_2 + x_2y_2 + 3u_1v_1/4)u_1 + (A^2 + x_2^2/2 + u_2^2/2 + x_1^2/4)v_1 + \\
 &\quad + A(x_1v_2 + u_2y_1 - u_1y_2 - v_1x_2) + BA^{-1}(x_1u_2 - u_1x_2), \\
 F_2 &= (2B + u_1v_1 + x_1y_1 + u_2v_2/2 + 3x_2y_2/4)x_2 + (A^2 + x_1^2/2 + u_1^2/2 + u_2^2/4)y_2 + \\
 &\quad + A(x_1y_1 - u_1v_1) + BA^{-1}(x_1^2 - u_1^2)/2, \\
 G_2 &= (2B + u_1v_1 + x_1y_1 + x_2y_2/2 + 3u_2v_2/4)u_2 + (A^2 + x_1^2/2 + u_1^2/2 + x_2^2/4)v_2 + \\
 &\quad + A(x_1v_1 + u_1y_1) + BA^{-1}x_1u_1.
 \end{aligned} \tag{10}$$

На рис. 5, а можно видеть, что динамика фазы описывается растягивающим отображением окружности. На рис. 5, б изображен аттрактор стробоскопического отображения в проекции на плоскость переменных x_1 и u_1 . Визуально аттрактор можно отнести к аттракторам типа Смейла–Вильямса.

Показатели Ляпунова стробоскопического отображения Пуанкаре составили $\Lambda = \{0.672, -2.49, -138.14, -148.25, -351.65, 362.86, -1263.72, -1264.64\}$. Отметим, что старший показатель положителен и близок к $\ln 2$, а остальные – отрицательны, что соответствует аттрактору типа Смейла–Вильямса в восьмимерном фазовом пространстве стробоскопического отображения Пуанкаре.

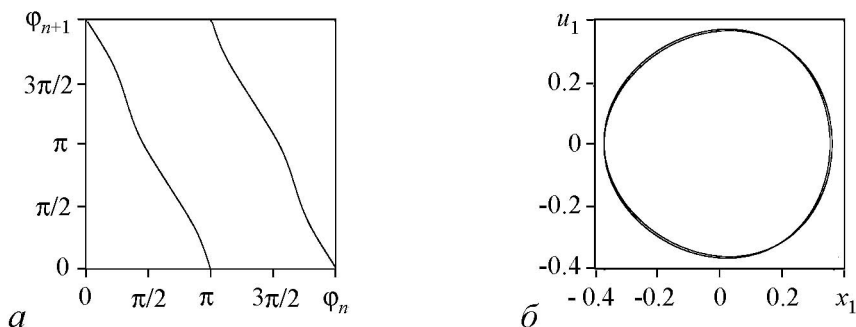


Рис. 5. Итерационная диаграмма для фазы $\varphi = \arctan(u_1/x_1)$ (а) и проекция аттрактора в сечении Пуанкаре на плоскость переменных x_1 и u_1 (б). Параметры $A = 2$, $B = 4.1$, $\sigma = 0.25$, $\varepsilon = 0.03$, $T = 32\pi$

1.3. Параметрическое возбуждение стоячих волн. В работах [6, 7, 12] предложена система, в которой осуществляется параметрическое возбуждение длинноволновых и коротковолновых паттернов стоячих волн благодаря соответствующим образом заданной модуляции накачки. Примером может служить нелинейная струна. Уравнение в частных производных имеет вид

$$\rho(x) \partial_t^2 u = -(\alpha + u^2) \partial_t u - \gamma u + G(t) \partial_x^2 u. \quad (11)$$

Граничные условия – периодические:

$$u(x, t) = u(x + L, t). \quad (12)$$

Слагаемое $-(\alpha + u^2) \partial_t u$ обеспечивает нелинейную диссипацию, слагаемое $-\gamma u$ подавляет возмущения с волновым числом $k = 0$. Присутствие нелинейной диссипации необходимо для стабилизации параметрической неустойчивости на некотором уровне амплитуды колебаний, однако для рассматриваемой здесь системы весьма существенным является еще и то обстоятельство, что кубическая нелинейность обеспечивает возникновение третьей и других нечетных гармоник при колебательно-волновых движениях. Функция $\rho(x) = 1 + \varepsilon \sin 4k_0 x$ описывает линейную плотность струны, при малом значении ε распределение массы вдоль струны – слабо неоднородное. Функция $G(t) = 1 + a \cos^2(2\pi t/T) \sin 2\omega_0 t + b \sin^2(2\pi t/T) \sin 6\omega_0 t$ описывает натяжение струны, величины a и b неотрицательные, $a + b < 1$. Частота ω_0 и волновое число k_0 равны друг другу. Длину L примем равной целому числу длин волн с волновым числом k_0 : $L = 2\pi N/k_0$.

Предположим, что при накачке на частоте $2\omega_0$ в системе возбуждена стоячая волна на частоте ω_0 с волновым числом k_0 , у которой расположение узлов и пучностей характеризуется фазовой постоянной θ , так что в грубом приближении $u \sim \cos \omega_0 t \sin(k_0 x + \theta)$.

Амплитуда волны стабилизируется на конечном уровне благодаря нелинейной диссипации, и из-за ее присутствия колебательно-волновое движение будет иметь также составляющую на третьей гармонике. Пространственная фаза гармоники на частоте $3\omega_0$ будет, очевидно, даваться величиной 3θ .

На следующем этапе временной эволюции амплитуда накачки на частоте $2\omega_0$ становится малой, и колебания на частоте ω_0 затухают. Амплитуда накачки на частоте $6\omega_0$, с другой стороны, с какого-то момента оказывается достаточной для развития параметрической неустойчивости стоячей волны с частотой $3\omega_0$ и волновым числом $3k_0$. Эта волна формируется из начального возмущения, отвечающего третьей гармонике волны, существовавшей на предыдущей стадии, так что пространственная фаза будет определяться величиной 3θ .

Далее вновь наступает стадия интенсивной накачки на частоте $2\omega_0$. Теперь затравочное колебательно-волновое возбуждение с волновым числом k_0 обеспечивается комбинацией возмущения $u \sim \cos 3\omega_0 t \sin(3k_0 x + 3\theta)$, оставшегося от предыдущей стадии. Поскольку эта комбинация содержит слагаемое, пропорциональное $\cos \omega_0 t \sin(k_0 x - 3\theta)$, новая фаза получается из предыдущей посредством растягивающего отображения окружности: $\theta_{n+1} = -3\theta_n + \text{const}$. Это хаотическое отображение характеризуется положительным показателем Ляпунова $\Lambda = \ln 3 \approx 1.098$. При

наличии сжатия в фазовом пространстве по остальным направлениям, для отображения, описывающего изменение состояния системы за период модуляции накачки, на этом основании можно предположить присутствие аттрактора типа соленоида Смейла–Вильямса. В статье [1] рассмотрены также варианты модели, где для фазы имеет место отображение окружности с растяжением в 5, 7, 9, 11 раз.

Система уравнений (11)–(12) решалась численно с использованием явной схемы типа «крест». На рис. 6 представлена пространственно-временная диаграмма, визуализирующая эволюцию огибающей для паттернов стоячих волн; форма струны показана в моменты, кратные периоду быстрых колебаний. Параметры приведены в подписи к рисунку. Как можно видеть, в системе поочередно возбуждаются длинноволновые и коротковолновые структуры, притом пространственная фаза их меняется от одного периода модуляции накачки к другому, претерпевая растягивающее отображение окружности. Фаза колебаний стоячих волн во времени, с другой стороны, жестко привязана к фазе накачки.

Поскольку параметрическое возбуждение в рассмотренной системе имеет место на волновых числах k_0 и $3k_0$, для сведения к конечномерной системе обыкновенных дифференциальных уравнений, естественно искать решение уравнений (11)–(12) в виде

$$u(x, t) = y_1(t) \cos k_0 x + v_1(t) \sin k_0 x + y_3(t) \cos 3k_0 x + v_3(t) \sin 3k_0 x. \quad (13)$$

Подстановка этого выражения в (11)–(12) и разложение обеих частей уравнения в ряд Фурье с учетом гармоник того же порядка приводят к системе уравнений для коэффициентов

$$\ddot{y}_1 = \frac{F_1 - \varepsilon G_3/2}{1 - \varepsilon^2/4}, \quad \ddot{v}_1 = \frac{G_1 - \varepsilon F_3/2}{1 - \varepsilon^2/4}, \quad \ddot{y}_3 = \frac{F_3 - \varepsilon G_1/2}{1 - \varepsilon^2/4}, \quad \ddot{v}_3 = \frac{G_3 - \varepsilon F_1/2}{1 - \varepsilon^2/4}, \quad (14)$$

где

$$F_1 = -\omega_0 \left(1 + a \cos^2 \frac{\pi t}{T} \sin 2\omega_0 t + b \sin^2 \frac{\pi t}{T} \sin 6\omega_0 t \right) y_1 - \gamma y_1 - \alpha \dot{y}_1 - \\ - \frac{1}{2} \left[(3y_1^2/2 + y_1 y_3 + y_3^2 + v_1^2/2 + v_1 v_3 + v_3^2) \dot{y}_1 + \frac{1}{2} (y_1^2 + 4y_1 y_3 - v_1^2) \dot{y}_3 + \right. \\ \left. + (y_1 v_1 - y_3 v_1 + y_1 v_3) \dot{v}_1 + (y_1 v_1 + 2y_1 v_3) \dot{v}_3 \right],$$

$$G_1 = -\omega_0 \left(1 + a \cos^2 \frac{\pi t}{T} \sin 2\omega_0 t + b \sin^2 \frac{\pi t}{T} \sin 6\omega_0 t \right) v_1 - \gamma v_1 - \alpha \dot{v}_1 - \\ - \frac{1}{2} \left[(3v_1^2/2 - v_1 v_3 + v_3^2 + y_1^2/2 - y_1 y_3 + y_3^2) \dot{v}_1 + \frac{1}{2} (y_1^2 + 4v_1 v_3 - v_1^2) \dot{v}_3 + \right. \\ \left. + (y_1 v_1 - y_3 v_1 + y_1 v_3) \dot{y}_1 + (-y_1 v_1 + 2y_3 v_1) \dot{y}_3 \right],$$

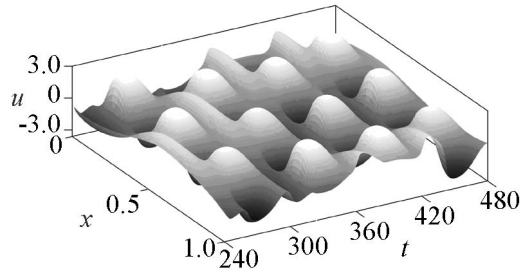


Рис. 6. Пространственно-временные реализации переменной u при значениях параметров $\omega_0 = 2\pi$, $k_0 = 2\pi$, $L = 1$, $a = 0.4$, $b = 0.2$, $\varepsilon = 0.2$, $\alpha = 0.4$, $\gamma = 0.03$, $T = 60$

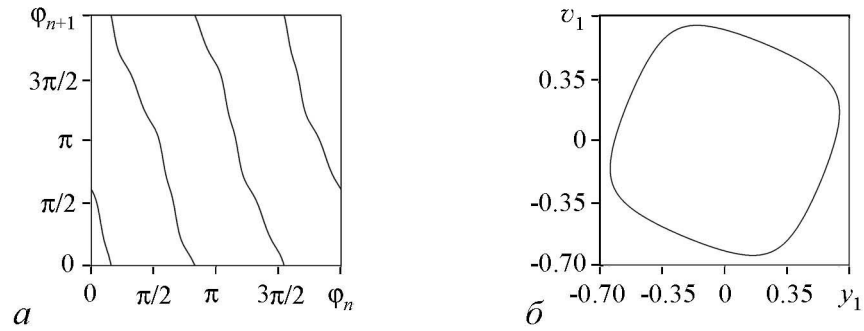


Рис. 7. Итерационная диаграмма для фазы $\varphi = \arctan(v_1 v_1 / y_1)$ (а) и проекция аттрактора в сечении Пуанкаре на плоскость переменных x_1 и u_1 (б). Параметры $\omega_0 = 2\pi$, $a = 0.4$, $b = 0.2$, $\varepsilon = 0.2$, $\alpha = 0.4$, $\gamma = 0.03$, $T = 60$

$$\begin{aligned}
 F_3 = & -9\omega_0 \left(1 + a \cos^2 \frac{\pi t}{T} \sin 2\omega_0 t + b \sin^2 \frac{\pi t}{T} \sin 6\omega_0 t \right) y_3 - \gamma y_3 - \alpha \dot{y}_3 - \\
 & - \frac{1}{4} \left[(y_1^2 + 4y_1 y_3 - v_1^2) \dot{y}_1 + 2(-y_1 v_1 + 2y_3 v_1) \dot{v}_1 + \right. \\
 & \left. + (2y_1^2 + 2v_1^2 + 3y_3^2 + v_3^2) \dot{y}_3 + 2y_3 v_3 \dot{v}_3 \right], \\
 G_3 = & -9\omega_0 \left(1 + a \cos^2 \frac{\pi t}{T} \sin 2\omega_0 t + b \sin^2 \frac{\pi t}{T} \sin 6\omega_0 t \right) v_3 - \gamma v_3 - \alpha \dot{v}_3 - \\
 & - \frac{1}{4} \left[2(y_1 v_1 + 2y_1 v_3) \dot{y}_1 + (y_1^2 + 4v_1 v_3 - v_1^2) \dot{v}_1 + 2y_3 v_3 \dot{y}_3 + \right. \\
 & \left. + (2y_1^2 + 2v_1^2 + y_3^2 + 3v_3^2) \dot{v}_3 \right].
 \end{aligned}$$

На рис. 7, б изображен аттрактор стробоскопического отображения системы (14) в проекции на плоскость y_1 и v_1 . Визуально его можно отнести к аттракторам типа Смейла–Вильямса. На рис. 7, а приведена итерационная диаграмма для фаз $\varphi = \arctan(v_1 / y_1)$. Можно видеть, что динамика фазы описывается растягивающим отображением окружности.

С помощью алгоритма Бенеттина был вычислен спектр показателей Ляпунова аттрактора стробоскопического отображения Пуанкаре: $\Lambda = \{1.099, -22.1, -30.44, -40.78, -43.61, -46.43, -56.67, -69.97\}$. Отметим, что старший показатель положителен и близок к величине $\ln 3$, а остальные отрицательные. Это соответствует аттрактору типа Смейла–Вильямса в восьмимерном фазовом пространстве стробоскопического отображения Пуанкаре.

2. Результаты численной проверки гиперболической природы аттракторов

Для всех конечномерных моделей систем, описанных в предыдущем разделе, были получены гистограммы распределений углов между устойчивыми и неустойчивыми многообразиями аттракторов в сечении Пуанкаре.

На рис. 8 представлены гистограммы распределений углов для отображений Пуанкаре пятимерной и семимерной модели модифицированного уравнения Свифта–Хохенберга. Оба распределения дистанцированы от нуля, что подтверждает гиперболическую природу аттракторов. Распределение для пятимерной аппроксимации

более широкое и состоит из нескольких «частей». Более узкое распределение для семимерной аппроксимации означает, что аттрактор устроен примерно одинаково во всех областях. Семимерная модель лучше отражает свойства исходной распределенной системы, чем пятимерная.

На рис. 9 приводится гистограмма распределения углов между устойчивыми и неустойчивыми направлениями для аттрактора конечномерной модели модифицированного уравнения Брюсселятора. Нулевые углы в распределении отсутствуют, что подтверждает предположение о гиперболичности аттрактора. Отметим, что распределение сосредоточено в очень узком диапазоне углов.

На рис. 10 представлена гистограмма распределения углов для конечномерной модели струны с параметрическим возбуждением. Распределение дистанцировано от нуля, что подтверждает гиперболическую природу аттрактора системы.

Заключение

В данной работе к трем редуцированным конечномерным моделям распределенных систем, предложенных как примеры, характеризующиеся присутствием хаотических аттракторов типа Смейла–Вильямса, была применена предложенная в [12] модифицированная методика проверки гиперболичности. Тест состоит в построении распределения углов между подпространствами устойчивых и неустойчивых направлений на хаотическом аттракторе и позволяет отличить режимы с гиперболическим и негиперболическим аттракторами. Благодаря использованию нового алгоритма [14], метод требует относительно небольшого объема вычислений, поскольку и устойчивое и неустойчивое подпространство задаются лишь одним

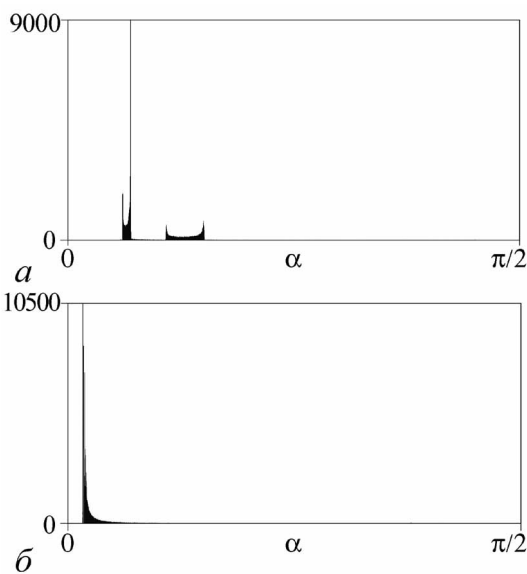


Рис. 8. Гистограмма распределения углов между устойчивым и неустойчивым направлениями на аттракторе в сечении Пуанкаре пятимерной (а) и семимерной (б) модели модифицированного уравнения Свифта–Хохенберга. Параметры $\mu = 0.03$, $\varepsilon = 0.03$

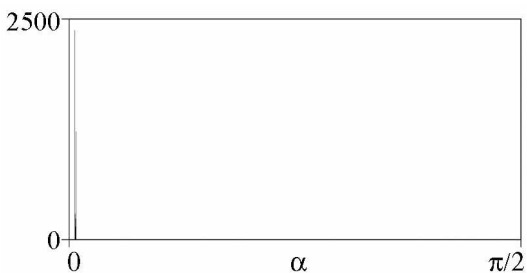


Рис. 9. Гистограмма распределения углов между устойчивым и неустойчивым многообразиями аттрактора в сечении Пуанкаре конечномерной модели модифицированной системы типа Брюсселятора. Параметры $A = 2$, $B = 4.1$, $\sigma = 0.25$, $\varepsilon = 0.03$, $T = 32\pi$

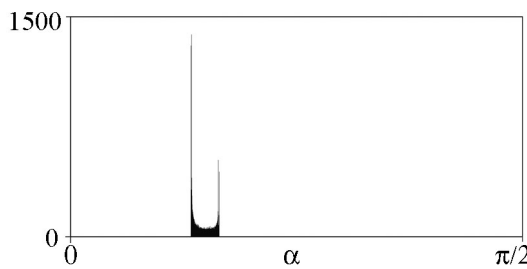


Рис. 10. Гистограмма распределения углов между устойчивым и неустойчивым направлениями на аттракторе в сечении Пуанкаре конечномерной модели струны с параметрическим возбуждением при $\omega_0 = 2\pi$, $a = 0.4$, $b = 0.2$, $\varepsilon = 0.2$, $\alpha = 0.4$, $\gamma = 0.03$, $T = 60$

вектором каждое. Это делает удобным применение теста к системам произвольной размерности. В работе методика применена только к системам с одномерным неустойчивым подпространством, однако ее можно применять и к системам с произвольно большими размерностями устойчивых и неустойчивых подпространств [12]. Для всех рассмотренных примеров – системы на основе модификации уравнений Свифта–Хохенберга и модели брюсселятора, а также системы с параметрическим возбуждением стоячих волн – тест подтверждает предположение об однородно гиперболической природе аттракторов в отображении Пуанкаре.

Автор благодарен профессору С.П. Кузнецову за обсуждение и помощь.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №14-02-31162 и гранта поддержки ведущих научных школ НШ-1726.2014.2.

Библиографический список

1. *Кузнецов С.П.* Динамический хаос и гиперболические аттракторы: от математики к физике. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. 488 с.
2. *Кузнецов С.П.* Динамический хаос и однородно гиперболические аттракторы: от математики к физике // Успехи физических наук. 2011. Т.181, № 2. С. 121.
3. *Синай Я.Г.* Стохастичность динамических систем // В кн. Нелинейные волны. М.: Наука, 1979. С. 192.
4. *Anishchenko V.S., Kopeikin A.S., Kurths J., Vadivasova T.E., Strelkova G.I.* Studying hyperbolicity in chaotic systems // Physics Letters A. 2000. Vol. 270. P. 301.
5. *Katok A., Hasselblatt B.* Introduction to the Modern Theory of Dynamical Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
6. *Круглов В.П., Кузнецов А.С., Кузнецов С.П.* Гиперболический хаос в системах с параметрическим возбуждением паттернов стоячих волн // Нелинейная динамика. Т.10, №3. 2014. с. 265-277.
7. *Isaeva O.B., Kuznetsov A.S., Kuznetsov S.P.* Hyperbolic chaos of standing wave patterns generated parametrically by a modulated pump source // Phys. Rev. E. 2013. Vol.87. 040901.
8. *Kruglov V.P., Kuznetsov S.P., Pikovsky A.* Attractor of Smale–Williams type in an autonomous distributed system // Regular and Chaotic Dynamics. 2014. Vol. 19, № 4. P. 483.
9. *Kruglov V.P.* Attractor of Smale–Williams type in modified Brusselator model // Book of Abstracts. International Conference <Nonlinear Dynamics of Deterministic and Stochastic Systems: Unraveling Complexity> 19-23 May 2014, Saratov: Saratov State University. 2014. P. 26.
10. *Kuptsov P.V., Kuznetsov S.P., Pikovsky A.* Hyperbolic chaos of Turing patterns // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 108. 194101.
11. *Kuznetsov S.P.* Example of a physical system with a hyperbolic attractor of the Smale–Williams type // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. 144101.
12. *Kuznetsov S.P.* Some mechanical systems manifesting robust chaos // Nonlinear Dynamics and Mobile Robotics. 2013. Vol. 1, № 1. P. 3.

13. *Cross M.C. and Hohenberg P.C.* Pattern formation outside of equilibrium // *Rev. Mod. Phys.* 1993. Vol. 65, № 1. 1993. P. 851.
14. *Lai Y.-C., Grebogi C., Yorke J.A., Kan I.* How often are chaotic saddles nonhyperbolic? // *Nonlinearity*. 1993. Vol. 6. P. 779.
15. *Kuptsov P.V., Parlitz U.* Theory and computation of covariant Lyapunov vectors // *Journal of nonlinear science*. 2012. Vol. 22, № 5. P. 727.
16. *Kuptsov P.V.* Fast numerical test of hyperbolic chaos // *Phys. Rev. E*. 2012. Vol. 85, № 1. 015203.
17. *Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. 280 с.
18. *Kuznetsov S.P., Mosekilde E., Dewel G., Borckmans P.* Absolute and convective instabilities in a one-dimensional Brusselator flow model // *The Journal of chemical physics*. 1997. Vol. 106, № 18. P. 7609.

Поступила в редакцию 25.12.2014

TECHNIQUE AND RESULTS OF NUMERICAL TEST FOR HYPERBOLIC NATURE OF ATTRACTORS FOR REDUCED MODELS OF DISTRIBUTED SYSTEMS

V. P. Kruglov

Saratov State University

V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Saratov Branch

A test of hyperbolic nature of chaotic attractors, based on an analysis of statistics distribution of angles between stable and unstable subspaces, is applied to reduced finite-dimensional models of distributed systems which are the modifications of the Swift–Hohenberg equation and Brusselator model, as well as to the problem of parametric excitation of standing waves by the modulated pump.

Keywords: Uniformly hyperbolic attractor, structural stability, Lyapunov exponents.

Круглов Вячеслав Павлович – родился в 1990 году. В 2007 году окончил среднюю школу № 8 г. Саратова. В 2012 окончил факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. В настоящее время является аспирантом ФНП СГУ и работает в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, в должности стажера-исследователя. Участвовал в научных конференциях «ХАОС», «Нелинейные волны», «Нелинейные дни для молодых», «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», «Гамильтонова динамика, неавтономные системы и структуры в уравнениях с частными производными», «Динамика, бифуркации и странные аттракторы». Автор 5 статей в российских и международных научных журналах.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
410019, Саратов, ул. Зеленая, 38
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Саратовский филиал
E-mail: kruglovyacheslav@gmail.com



В.П. Круглов

Изв. вузов «ПНД», т. 22, № 6, 2014

93



ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТИ И ВЫНУЖДЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В НЕАВТОННОЙ СИСТЕМЕ ДВУХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ ВАН ДЕР ПОЛЯ С ОТТАЛКИВАЮЩИМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

А.П. Гулай, А.В. Бух

Саратовский государственный университет

В работе исследуются бифуркационные механизмы синхронизации и формирования мультистабильности в системе двух взаимодействующих осцилляторов ван дер Поля, один из которых находится под внешним гармоническим воздействием. Строится двухпараметрическая бифуркационная диаграмма для системы в фазовом приближении и исследуется ее эволюция при переходе от симметричного к асимметричному отталкивающему взаимодействию. На основании результатов бифуркационного анализа исходной системы делается вывод о соответствии сценариев синхронизации и формирования мультистабильности в системе фазовых осцилляторов таковым в исходной системе с учетом повышения размерности.

Ключевые слова: Синхронизация, мультистабильность, бифуркации, асимметричная связь.

Введение

Явление синхронизации – один из наиболее широко изучаемых феноменов, характерных для взаимодействующих нелинейных систем [1–3]. Синхронизация может наблюдаться как в относительных простых автоколебательных системах, демонстрирующих квазигармонические автоколебания, так и в более сложных системах, для которых может быть характерно квазипериодическое [4–7] и хаотическое поведение [8–11]. На сегодняшний день большое внимание уделяется исследованию явления синхронизации в больших ансамблях и сетях взаимодействующих систем [12, 13]. При исследовании больших ансамблей крайне важную роль играют топология и тип связей между взаимодействующими осцилляторами. Однако влияние типа связи может существенно влиять на бифуркационные сценарии синхронизации и в достаточно простых системах, например, в случае взаимодействия двух квазигармонических осцилляторов.

В рамках данной статьи рассмотрена система двух осцилляторов ван дер Поля, характеризующаяся асимметричным отталкивающим взаимодействием и наличием внешней гармонической силы. С использованием фазового приближения проведен бифуркационный анализ на плоскости параметров «амплитуда–частота внешнего

воздействия» и исследована эволюция бифуркационной структуры пространства параметров при переходе от классического симметричного взаимодействия к асимметричной и отталкивающей связи между фазовыми осцилляторами. Затем исследованы бифуркации в исходной, неукороченной системе и построена карта режимов данной системы на плоскости параметров «амплитуда–частота внешнего воздействия». Полученные результаты для исходной системы сравниваются с результатами бифуркационного анализа укороченной системы уравнений для фаз.

Статья имеет следующую структуру. В разделе 1 описана исследуемая система и приведены ее укороченные уравнения в фазовом приближении. В разделе 2 представлены и обсуждены результаты бифуркационного анализа укороченной системы на плоскости управляющих параметров. В разделе 3 представлены результаты бифуркационного анализа исходной системы и проводится сравнение с результатами из раздела 2 с учетом понижения размерности. Оценка структуры пространства параметров исходной системы осуществлена путем построения карты режимов и вычисления спектра ляпуновских характеристических показателей. Построенная таким образом карта на плоскости параметров «амплитуда–частота внешнего воздействия» сравнивается с соответствующей двухпараметрической диаграммой укороченной системы. В заключении приведен обзор новых результатов.

1. Исследуемая система

Итак, рассмотрим систему двух взаимодействующих осцилляторов ван дер Поля, один из которых находится под действием внешней гармонической силы,

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 - \varepsilon(1 - x_1^2)\dot{x}_1 + \omega_1^2 x_1 &= \gamma_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + F_0 \cos(\omega_0 t), \\ \ddot{x}_2 - \varepsilon(1 - x_2^2)\dot{x}_2 + \omega_2^2 x_2 &= \gamma_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $x_{1,2}$ – динамические переменные, характеризующие поведение первого и второго осцилляторов, соответственно; ε – параметр нелинейности осцилляторов (он имеет идентичные значения для первого и второго осцилляторов); $\omega_{1,2}$ – собственные частоты первого и второго осцилляторов, соответственно; $\gamma_{1,2}$ – коэффициенты связи первого осциллятора со вторым и второго осциллятора с первым, соответственно; F_0 – амплитуда внешней гармонической силы; ω_0 – частота внешнего гармонического воздействия.

Динамика системы (1) достаточно подробно описана в литературе при различных значениях параметров. В отсутствие внешнего воздействия ($F_0 = 0$) и при симметричной связи ($\gamma_1 = \gamma_2$) исследуемая система соответствует классическому случаю двух резистивно связанных генераторов ван дер Поля [1, 3]. В такой системе явление взаимной синхронизации осуществляется посредством двух механизмов: механизма захвата частоты и механизма подавления. Кроме того, система (1) при данных параметрах может демонстрировать явление амплитудной смерти [14]. Хорошо известно, что наблюдаемые в данной системе механизмы синхронизации основаны на двух типах бифуркаций: захват частоты связан с седло-узловой бифуркацией предельных циклов, а подавление – с бифуркацией Неймарка–Сакера. Для бифуркационного анализа данной системы часто используют квазигармоническое приближение, переходя от системы (1) к уравнениям для амплитуд и фаз колебаний. Такой переход позволяет понизить размерность фазового пространства и, соответственно, исследовать бифуркации предельных множеств меньшей размерности.

В этом случае седло-узловой бифуркации предельных циклов в полной системе будет соответствовать седло-узловая бифуркация состояний равновесия, а бифуркации Неймарка–Сакера – бифуркация Андронова–Хопфа.

Внесение внешней гармонической силы ($F_0 \neq 0$) ведет к увеличению размерности фазового пространства на 1 и появлению нового пика в спектре колебаний системы (1) на частоте ω_0 внешнего воздействия. Относительно недавно были опубликованы результаты бифуркационного анализа такой системы в фазовом приближении [7]. Отметим, что рассмотрение системы (1) в фазовом приближении позволяет оценивать только фазовую динамику и связанные с ней механизмы синхронизации. В этой работе было показано, что система фазовых уравнений демонстрирует, помимо седло-узловой бифуркации состояний равновесия, касательную бифуркацию предельных циклов. Таким образом, в полной системе следует ожидать касательную бифуркацию инвариантных торов. Исследование полной системы [15] и радиофизический эксперимент [16] подтвердили наличие в неукороченной системе сценария синхронизации, найденного в фазовом приближении.

Вопрос влияния асимметричности в канале связи ($\gamma_1 \neq \gamma_2$) при наличии внешнего гармонического воздействия ($F_0 \neq 0$) был рассмотрен в работе [17]. Для исследования динамической системы также было использовано фазовое приближение. Было показано, что если коэффициенты связи имеют различные знаки ($\gamma_1 \cdot \gamma_2 < 0$), то в системе фазовых уравнений возможна реализация бифуркации Андронова–Хопфа и появление мультистабильности. Были проведены аналитические исследования фазовых уравнений, продемонстрированы соответствующие фазовые портреты и построены однопараметрические бифуркационные диаграммы. Тем не менее, остались открыты следующие вопросы.

1. Какова бифуркационная структура основного языка синхронизации на плоскости параметров «частота–амплитуда внешнего воздействия»? Как располагаются области мультистабильности в нем?
2. Как эволюционирует бифуркационная структура указанной плоскости параметров при переходе от случая $\gamma_1 = \gamma_2 > 0$ к случаю $\gamma_1 \neq \gamma_2$ и $F_0 \neq 0$ [17]?
3. Есть ли соответствие между бифуркационной структурой плоскости параметров системы в фазовом приближении и картой режимов неукороченной системы (1) в соответствующей области изменения управляющих параметров?

В следующих разделах делается попытка дать ответы на эти вопросы.

2. Фазовое приближение

Воспользуемся методом медленно меняющихся амплитуд (см., например, [1]), чтобы получить уравнения для динамики разностей фаз колебаний первого и второго осцилляторов относительно внешнего воздействия. В результате получим следующую систему:

$$\begin{aligned}\dot{\varphi}_1 &= \Delta_1 + g_1 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - \frac{F}{1 - \Delta_1} \cos(\varphi_1), \\ \dot{\varphi}_2 &= \Delta_1 + \delta + g_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2).\end{aligned}\tag{2}$$

Здесь $\varphi_{1,2}$ – динамические переменные; $g_{1,2} = \gamma_{1,2}/2$ – коэффициенты связи; параметр $\Delta_1 = (\omega_1^2 - \omega_0^2) / (2\omega_0)$ определяет отстройку собственной частоты первого осциллятора от внешнего воздействия, а параметр $\delta = (\omega_2^2 - \omega_1^2) / (2\omega_0)$ определяет расстройку взаимодействующих осцилляторов по собственным частотам.

В работе [17] было показано, что при значениях управляющих параметров $F = 0.15$, $\delta = 0.1$, $g_1 = 0.15$, $g_2 = -0.0616$ и вариации параметра расстройки Δ_1 в системе (2) реализуется бифуркация Андронова–Хопфа, ведущая к возникновению мультистабильности в фазовом пространстве системы. При этом, также было показано, что при другом значении амплитуды внешнего воздействия F бифуркация Андронова–Хопфа в системе не реализуется.

Зафиксируем управляющие параметры δ , g_1 , g_2 и проведем двухпараметрический бифуркационный анализ системы (2) на плоскости параметров (Δ_1, F) с помощью программного обеспечения ХРРАuto [18]. Результаты бифуркационного анализа представлены на рис. 1.

На рис. 2 представлена динамика фазовых портретов этой системы при тех же значениях управляющих параметров δ , g_1 , g_2 и различных значениях Δ_1 , F . Установим значения $\Delta_1 = -0.1$, $F = 0.12$, при которых система (2) имеет фазовый портрет, представленный на рис. 2, а. Здесь 1 и 2 – седловые состояния равновесия, 3 – устойчивый фокус, 4 – неустойчивый фокус. Увеличение параметра F ведет к пересечению бифуркационной линии L_{AH} , соответствующей бифуркациям Андронова–Хопфа состояний равновесия 3 и 4, в результате которых в фазовом пространстве образуются устойчивый C_s^* и неустойчивый C_u^* предельные циклы, а состояния равновесия 3 и 4 меняют свою устойчивость.

Дальнейшее увеличение параметра F ведет к увеличению размеров предельных циклов. При этом предельные циклы C_s и C_u приближаются к предельным циклам C_u^* и C_s^* , соответственно (рис. 2, в). Пересечение линии L_{SC} на плоскости параметров рис. 1 соответствует касательной бифуркации предельных циклов C_s^* и C_u^* и сепаратрис седловых точек 2 и 3, соответственно. Отметим, что в этот же момент происходит касательная бифуркация циклов C_s и C_u с петлями сепаратрис седел 3 и 2, соответственно (при этом циклы приближаются к петлям сепаратрис с внешней стороны). В результате описанных касательных бифуркаций предельные циклы исчезают и в системе (2) остаются только состояния равновесия (рис. 2, г).

Выход из области B в область C связан с пересечением линии L_{SN} , соответствующей одновременному возникновению седло-узловой и седло-репеллерной бифуркаций пар состояний равновесия в системе. В результате этих бифуркаций в фазовом пространстве исчезают состояния равновесия и образуется пара предельных циклов (рис. 2, д).

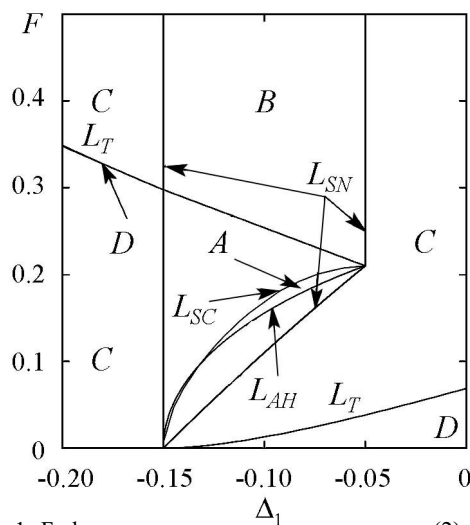


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма системы (2) на плоскости параметров (Δ_1, F) при фиксированных значениях $g_1 = 0.15$, $g_2 = -0.05$. L_{SN} – линия седло-узловой бифуркации состояний равновесия; L_{AH} – линия бифуркации Андронова–Хопфа; L_{SC} – линия касательной бифуркации предельного цикла и петли сепаратрисы седла; L_T – седло-узловая бифуркация предельных циклов. A – область существования предельных циклов, возникших в результате бифуркации Андронова–Хопфа; B – область существования состояний равновесия; C – область существования предельных циклов, возникших в результате седло-узловой бифуркации состояний равновесия; D – область существования двухчастотных колебаний

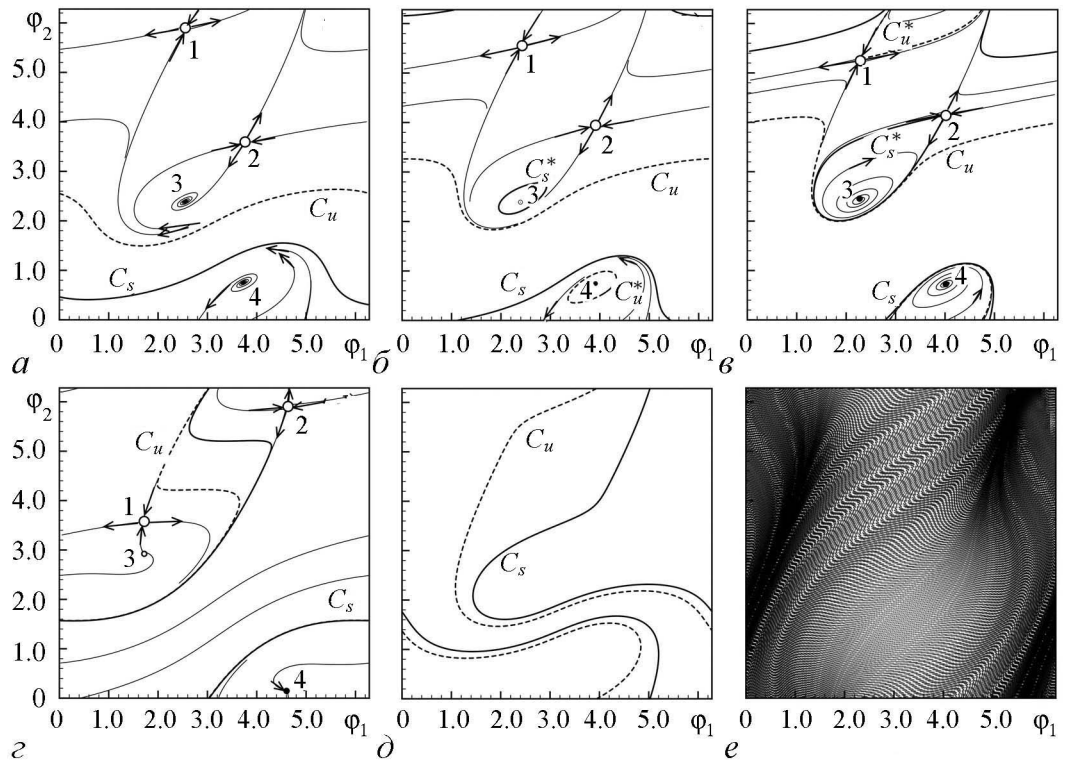


Рис. 2. Фазовые портреты системы (2) при значениях управляющих параметров $\delta = 0.1$, $g_1 = 0.15$, $g_2 = -0.05$. 1, 2, 3 и 4 – состояния равновесия; C_s , C_s^* – устойчивые предельные циклы; C_u , C_u^* – седловые предельные циклы. а – $\Delta_1 = -0.1$, $F = 0.12$; б – $\Delta_1 = -0.1$, $F = 0.15$; в – $\Delta_1 = -0.1$, $F = 0.16$; г – $\Delta_1 = -0.1$, $F = 0.2$; д – $\Delta_1 = -0.072$, $F = 0.15$; е – $\Delta_1 = 0.18$, $F = 0.15$

Переход из области C в область D сопровождается касательной бифуркацией предельных циклов, отмеченной линией L_T на бифуркационной диаграмме. В результате данной бифуркации в системе реализуются двухчастотные колебания, а фазовая траектория покрывает всю фазовую плоскость (ϕ_1, ϕ_2) (рис. 2, е). Следует также отметить, что область D частично заходит в область B , образуя складку в бифуркационной структуре пространства параметров. Таким образом, в фазовом пространстве реализуется сосуществование двухчастотных колебаний и состояний равновесия, то есть в исходной системе (1) следует ожидать сосуществование предельных циклов и двумерных торов. Данное предположение будет проверено в разделе 3 статьи.

Структура бифуркационной диаграммы, представленной на рис. 1, имеет существенные отличия от бифуркационной диаграммы, полученной ранее для системы (2) при $\gamma_1 = \gamma_2 > 0$ и опубликованной в статье [7]. Возникает естественный вопрос: как эволюционирует бифуркационная структура пространства параметров системы (2) при переходе к асимметричной отталкивающей связи?

Для ответа на поставленный вопрос зафиксируем значение одного из коэффициентов связи и, меняя значение второго коэффициента, построим три двухпараметрические бифуркационные диаграммы (рис. 3). Из результатов, представленных на рисунке, легко видеть, что внесение асимметричности во взаимодействие между фазовыми осцилляторами ведет к сужению основного языка синхронизации (ср. области B на рис. 3, а, б). Смена знака одного из коэффициентов связи «разворачивает»

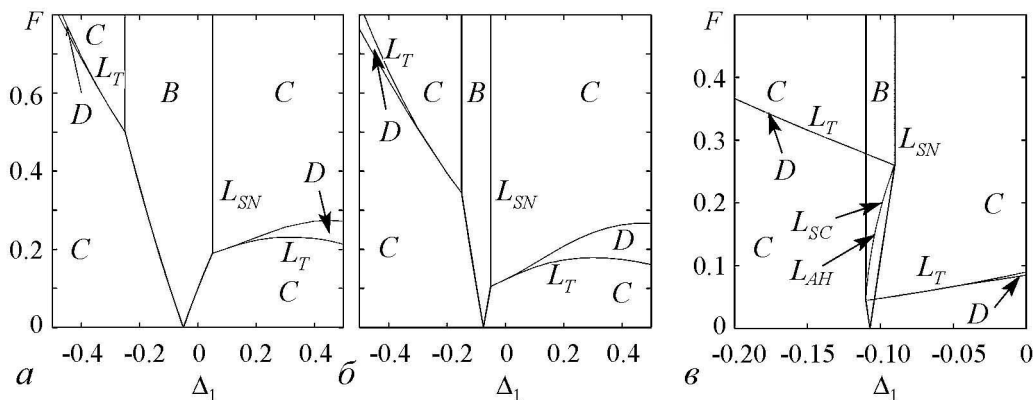


Рис. 3. Эволюция бифуркационной диаграммы системы (2) на плоскости параметров (Δ_1, F) при фиксированном значении $g_1 = 0.15$ и различных значениях g_2 : $a - 0.05$; $б - (-0.01)$; $в - (-0.05)$. Обозначения областей и линий те же, что и на рис. 1

основной язык (ср. области B на рис. 3, $б, в$). При этом бифуркации коразмерности 2, соответствующие точкам касания областей B и D , также «разворачиваются», увлекая за собой и области двухчастотных колебаний, которые теперь пересекают область существования состояний равновесия, обуславливая существование мультистабильности в системе (2). При уменьшении одного коэффициента связи, в момент «разворота» области B (при переходе изменяемого коэффициента связи через нуль), внутри нее образуется новая пара бифуркационных линий L_{AH} и L_{SC} , обуславливающих реализацию бифуркации Андронова–Хопфа в системе (2). Обе новые бифуркационные линии соединяют точки бифуркаций коразмерности 2, соответствующие касанию бифуркационных линий L_T и L_{SN} .

В следующем разделе будут рассмотрены бифуркации в исходной, неукороченной, системе (1), характерные для случая асимметричной отталкивающей связи, проведены сравнения их с соответствующими бифуркациями в укороченной системе (2) с учетом понижения размерности фазового пространства.

3. Полная система

Теперь рассмотрим исходную, неукороченную, систему (1). Исходя из результатов, полученных в фазовом приближении, можно предположить возникновение мультистабильности в виде сосуществования устойчивых двумерного тора и предельного цикла.

Зафиксируем следующие значения управляющих параметров: $\gamma_1 = 0.09$, $\gamma_2 = -0.02$, $\varepsilon = 0.5$, $\omega_1 = 1.0$, $\omega_2 = 1.001$, $\omega_0 = 0.985$ и, изменяя управляющий параметр F_0 , проследим за бифуркациями, происходящими в системе (1). Соответствующая бифуркационная диаграмма представлена на рис. 4, a . Вход в область синхронизации соответствует седло-узловой бифуркации SN_1 , в результате которой рождается пара предельных циклов: седловой C_1 и устойчивый C'_1 . При дальнейшем увеличении параметра F_0 происходит пара касательных бифуркаций SN_2 и SN_4 и образуются 4 неустойчивых предельных цикла. Дальнейшее увеличение амплитуды внешнего воздействия приводит к касательной бифуркации SN_3 и исчезновению пары неустойчивых циклов C'_2 и C_3 . Таким образом, в фазовом пространстве существуют 4 предельных цикла: один устойчивый C'_1 и три неустойчивых C_1, C_2 и C'_3 . Заметим, что данная ситуация соответствует наблюдаемой ситуации в системе (2) до бифуркации Андронова–Хопфа с учетом понижения размерности (см. рис. 2, a).

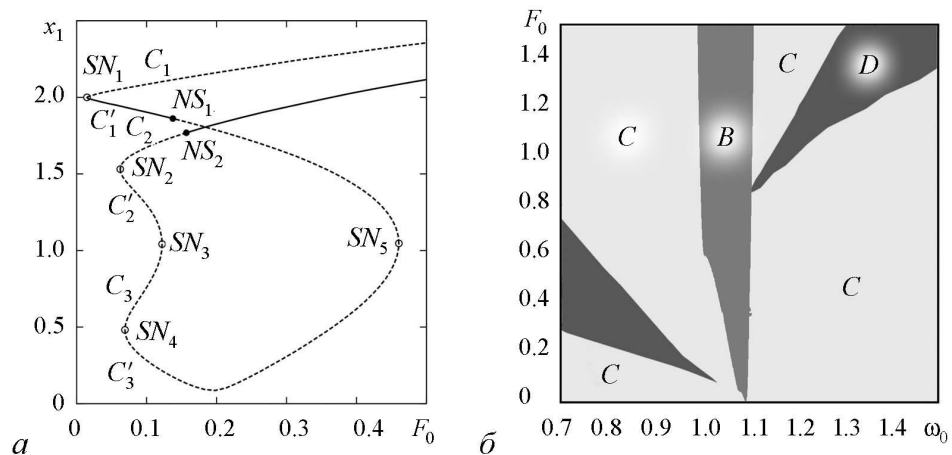


Рис. 4. *a* – бифуркационная диаграмма системы (1) при значениях управляющих параметров: $\gamma_1 = 0.09$, $\gamma_2 = -0.02$, $\varepsilon = 0.5$, $\omega_1 = 1$, $\omega_2 = 1.001$, $\omega_0 = 0.985$. $SN_{1,2,3,4,5}$ – касательные бифуркации предельных циклов; $NS_{1,2}$ – бифуркации Неймарка–Сакера; $C_{1,2,3}$ и $C'_{1,2,3}$ – предельные циклы. Сплошной линией обозначены устойчивые предельные циклы, пунктирной – седловые предельные циклы. *б* – структура плоскости параметров «частота–амплитуда внешнего воздействия» системы (1), построенная на основании анализа сигнатуры спектра характеристических показателей Ляпунова. *B* – область существования одночастотных колебаний; *C* – область существования двухчастотных колебаний; *D* – область существования трехчастотных колебаний

Пересечению бифуркационной линии L_{AH} (см. рис. 1) на плоскости параметров системы фазовых уравнений соответствуют бифуркации Неймарка–Сакера в системе (1), отмеченные на бифуркационной диаграмме рис. 4 точками NS_1 и NS_2 . В результате бифуркации NS_1 предельный цикл C'_1 теряет свою устойчивость, и в его окрестности рождается устойчивый двумерный тор. В результате бифуркации NS_2 в окрестности предельного цикла C_2 рождается седловой двумерный тор, а сам предельный цикл приобретает устойчивость. Таким образом, в фазовом пространстве сосуществуют 4 предельных цикла, один из которых является устойчивым, а также устойчивый и неустойчивый двумерные торы. С учетом понижения размерности, это соответствует структуре фазового пространства укороченной системы (2), представленной на рис. 2, б.

Следует отметить, что есть и отличия в структуре как фазового пространства, так и пространства параметров между исходной системой (1) и фазовым приближением (2). Например, возникновение и исчезновение предельных циклов C'_2 и C_3 никак не отражено в бифуркационных сценариях, наблюдаемых в системе (2). Кроме того, если в укороченной системе две бифуркации Андронова–Хопфа происходят при одних и тех же значениях параметров, то в исходной системе (1) точки бифуркаций NS_1 и NS_2 соответствуют различным (хотя и незначительно) величинам амплитуды внешнего воздействия F_0 . Тем не менее, сосуществование устойчивого предельного цикла и двумерного эргодического тора в системе (1), предполагаемое на основании анализа фазового приближения (2) в работе [17], действительно реализуется как следствие соответствующих бифуркаций. Фазовые портреты, иллюстрирующие явление бистабильности в системе (1), представлены на рис. 5.

Изображенная на рис. 4, *a* бифуркационная диаграмма, дает некоторое представление о внутренней структуре основного языка синхронизации в системе (1) для случая асимметричного отталкивающего взаимодействия между осцилляторами. Для того, чтобы сравнить в общих чертах структуру плоскости параметров «частота–амплитуда внешнего воздействия» исходной системы (1) с представленной на рис. 1,

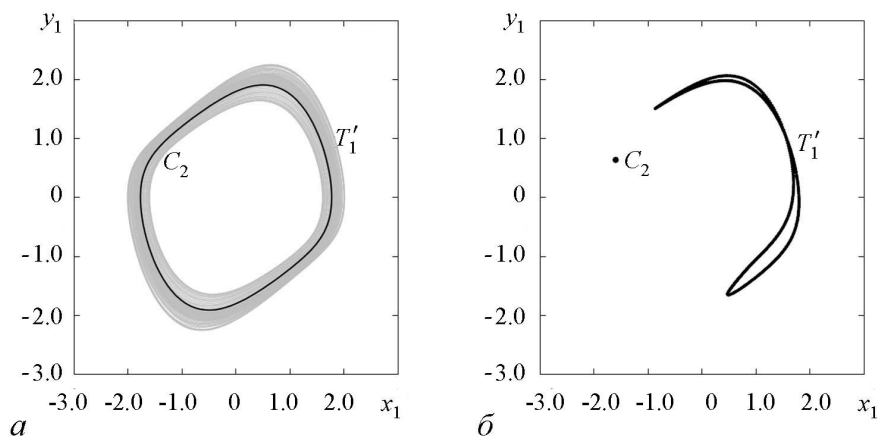


Рис. 5. Фазовые портреты системы (1) при значениях управляющих параметров: $\varepsilon = 0.5$, $\gamma_1 = 0.09$, $\gamma_2 = -0.02$, $\omega_1 = 1$, $\omega_2 = 1.001$, $\omega_0 = 0.985$, $F_0 = 0.158$. C_2 – устойчивый предельный цикл, T_1' – устойчивый двумерный тор. *a* – фазовый портрет в непрерывном времени; *б* – стробоскопическое сечение с периодом внешнего воздействия $2\pi/\omega_0$

обратимся к анализу сигнатуры спектра ляпуновских характеристических показателей. Исходя из того, что режиму со старшим показателем Ляпунова, равным нулю (при остальных отрицательных), соответствует движение на предельном цикле, режиму с двумя старшими показателями, равными нулю, – движение на двумерном эргодическом торе, а режиму с тремя старшими показателями, равными нулю, – движение на трехмерном эргодическом торе, произведем разбиение плоскости параметров (рис. 4, б). Подчеркнем, что в деталях внутренняя структура областей не исследовалась, а лишь определялись границы областей. Тем не менее, представленная на рис. 4, б карта в целом повторяет структуру расположения областей на бифуркационной диаграмме рис. 1. Отметим, что методика, по которой была построена карта на рис. 4, б, не позволила учесть явление мультистабильности, чем объясняется отсутствие сложной внутренней структуры основного языка синхронизации, соответствующего области *B*.

Заключение

В рамках данной работы рассмотрены особенности синхронизации внешним гармоническим воздействием системы двух осцилляторов ван дер Поля с асимметричным и отталкивающим взаимодействием. Были применены два подхода. С использованием фазового приближения осуществлен детальный двухпараметрический бифуркационный анализ системы фазовых осцилляторов. Для оценки, насколько обнаруженные в фазовом приближении явления соответствуют таковым в исходной динамической системе, был осуществлен бифуркационный анализ неукороченных уравнений и проанализирован спектра характеристических показателей Ляпунова.

Для системы фазовых уравнений построена подробная бифуркационная диаграмма на плоскости параметров, соответствующих амплитуде и частоте внешнего воздействия в исходной системе. Полученная диаграмма позволяет ответить на вопрос, каким образом возникает сценарий формирования мультистабильности, описанный в работе [17]. Кроме того, показана эволюция двухпараметрической бифуркационной диаграммы при переходе от случая симметрично резистивно связанных осцилляторов, описанного в статье [7], к случаю отталкивающей асимметричной связи.

Рассмотрен вопрос соответствия результатов, полученных в фазовом приближении, бифуркационным переходам, демонстрируемым исходной, неукороченной, системой. Явно показано, что бифуркации Андронова–Хопфа, ведущей к формированию мультистабильности в фазовом приближении, соответствует бифуркация Неймарка–Сакера, в результате которой в области значений параметров из основного языка синхронизации сосуществуют устойчивый предельный цикл и устойчивый двумерный эргодический тор. С помощью анализа сигнатуры спектра ляпуновских характеристических показателей проведена оценка структуры плоскости параметров «амплитуда–частота внешнего воздействия». Исходя из этой оценки, можно предположить, что бифуркационная структура плоскости параметров исходной системы в определенной степени соответствует таковой у системы в фазовом приближении с учетом понижения размерности фазового пространства.

Авторы выражают благодарность научному руководителю С.В. Астахову за непосредственную помощь в выполнении работы, а также профессору Ю. Куртсу за плодотворные обсуждения полученных результатов.

Библиографический список

1. *Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J.* Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Science. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
2. *Anishchenko V.S., Astakhov V.V., Neiman A.B. et al.* Nonlinear Dynamics of Chaotic and Stochastic Systems. Tutorial and Modern Development. Berlin: Springer, 2007.
3. *Balanov A.G., Janson N.B., Postnov D.E., Sosnovtseva O.V.* Synchronization: From Simple to Complex. Berlin: Springer, 2009.
4. *Izhikevich E.M.* Weakly connected quasi-periodic oscillators, FM interactions, and multiplexing in the brain // *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 1999. Vol. 59, № 6. P. 2193.
5. *Anishchenko V., Nikolaev S., Kurths J.* Peculiarities of synchronization of a resonant limit cycle on a two-dimensional torus // *Phys. Rev. E*. 2007. Oct. Vol. 76. P. 046216.
6. *Anishchenko V., Nikolaev S., Kurths J.* Bifurcational mechanisms of synchronization of a resonant limit cycle on a two-dimensional torus // *Chaos*. 2008. Vol. 18, № 3. P. 037123.
7. *Anishchenko V., Astakhov S., Vadivasova T.* Phase dynamics of two coupled oscillators under external periodic force // *Europhysics Letters*. 2009. May. Vol. 86. P. 30003.
8. *Fujisaka H., Yamada T.* Stability theory of synchronized motion in coupled-oscillator systems // *Progress of Theoretical Physics*. 1983. Vol. 69, № 1. P. 32.
9. *Pecora L.M., Carroll T.L.* Synchronization in chaotic systems // *Phys. Rev. Lett.* 1990. Feb. Vol. 64. P. 821.
10. *Anishchenko V.S., Vadivasova T.E., Postnov D.E., Safonova M.A.* Synchronization of chaos // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 1992. Vol. 2, № 3. P. 633.
11. *Rosenblum M.G., Pikovsky A.S., Kurths J.* Phase synchronization of chaotic oscillators // *Phys. Rev. Lett.* 1996. Mar. Vol. 76. P. 1804.
12. *Strogatz S.H.* Exploring complex networks // *Nature*. 2001. Vol. 410, №6825. P. 268.
13. *Lu J., Zhong J., Tang Y. et al.* Synchronization in output-coupled temporal Boolean networks // *Sci. Rep.* 2014. 09. Vol. 4.
14. *Koseska A., Volkov E., Kurths J.* Oscillation quenching mechanisms: Amplitude vs. oscillation death // *Physics Reports*. 2013. 10. Vol. 531, № 4. P. 173.
15. *Кузнецов А.П., Сатаев И.Р., Тюрюкина Л.В.* Вынужденная синхронизация двух

связанных автоколебательных осцилляторов ван дер Поля // Нелинейная динамика. 2011. Т. 7, № 3. С. 411.

16. Анищенко В.С., Астахов С.В., Вадивасова Т.Е., Феоктистов А.В. Численное и экспериментальное исследование внешней синхронизации двухчастотных колебаний // Нелинейная динамика. 2009. Т. 5, № 2. С. 237.
17. Astakhov S.V., Fujiwara N., Gulay A.P. et al. Hopf bifurcation and multistability in a system of phase oscillators // Phys. Rev. E. 2013. Sep. Vol. 88. P. 032908.
18. <http://www.math.pitt.edu/~bard/xpp/xpp.html>.

Поступила в редакцию 10.12.2014

THE STUDY OF MULTISTABILITY AND EXTERNAL SYNCHRONIZATION IN NONAUTONOMOUS SYSTEM OF TWO COUPLED VAN DER POL OSCILLATORS WITH REPULSIVE COUPLING

A.P. Gulay, A.V. Buh

Saratov State University

In this paper we study the bifurcational mechanisms of synchronization and multistability formation in a system of two interacting van der Pol oscillators, one of which is under external harmonic forcing. We draw a two-parametric bifurcation diagram for phase-reduced system and study its evolution in transition from symmetrical to asymmetrical repulsive interaction. Relying on the results of bifurcation analysis of non-reduced system we conclude that the synchronization scenarios found in the phase-reduced system correspond to the ones in the non-reduced system.

Keywords: Synchronization, multistability, bifurcations, asymmetrical coupling.



Гулай Артем Петрович – родился в 1994 году в городе Акмола, Республика Казахстан. Студент 4 курса физического факультета Саратовского государственного университета. Научные интересы: синхронизация, бифуркационный анализ, мультистабильность.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: gulai.artem@gmail.com



Бух Андрей Владимирович – родился в 1993 году в городе Палласовка, Волгоградская область, Россия. Студент 4 курса физического факультета Саратовского государственного университета. Научные интересы: синхронизация, бифуркационный анализ, мультистабильность.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: buh.andrey@yandex.ru



Научная школа-конференция

НЕЛИНЕЙНЫЕ ДНИ В САРАТОВЕ ДЛЯ МОЛОДЫХ – 2014

Саратов, 17–21.10.2014, 26–27.11.2014

Организаторы

- Факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского
- Саратовский институт повышения квалификации и переподготовки работников образования
- при поддержке Фонда инновационных научно-образовательных программ «Современное естествознание»

Программный комитет

Трубецков Д.И., председатель, чл.-корр. РАН, заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн ФНП СГУ

Левин Ю.И., зам. председателя, профессор, декан ФНП СГУ

Шараевский Ю.П., д.ф.-м.н., заведующий кафедрой нелинейной физики ФНП СГУ

Рыскин Н.М., д.ф.-м.н., профессор кафедры нелинейной физики ФНП СГУ

Савин А.В., к.ф.-м.н., доцент кафедры нелинейной физики ФНП СГУ

Оргкомитет

Трубецков Д.И., председатель, чл.-корр. РАН, заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн ФНП СГУ

Левин Ю.И., зам. председателя, профессор, декан ФНП СГУ

Рыскин Н.М., д.ф.-м.н., профессор кафедры нелинейной физики ФНП СГУ

Савин А.В., к.ф.-м.н., доцент кафедры нелинейной физики ФНП СГУ

Марнопольская В.П., вед. программист ФНП СГУ

Савин Д.В., аспирант ФНП СГУ

Кузнецов Н.Н., вед. программист ФНП СГУ

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Секция школьников

Саратов, пансионат «Сокол», 17–21 октября 2014 года

17 октября, пятница

Открытие школы-конференции

Лекции

Ковылов Н.Б., к.т.н., СГУ. Архимед или Ньютон?

Селиверстова Е.С., ФНП СГУ, 5 курс. Феномен уравнения ван дер Поля

Мигунова Н.А., аспирант ФНП СГУ. Цепные дроби

Организационное собрание участников

18 октября, суббота

Лекции

Храмов А.Е., профессор, СГУ. Самоорганизация как основной феномен нелинейной науки

Трубецков Д.И., член-корр. РАН, СГУ. Современная естественно-научная картина мира

Юбилей факультета нелинейных процессов

Демонстрация научно-популярного фильма

19 октября, воскресенье

Олимпиада по физике

Лекции

Богатырев В.А., профессор, ИБФРМ РАН, Саратов. Лабораторная диагностическая система определения токсичности наноматериалов

Савин А.В., к.ф.-м.н., СГУ. Что такое динамический хаос и зачем он нужен

Разбор задач олимпиады

Интеллектуальная игра «Что? Где? Когда?»

20 октября, понедельник

Доклады участников

Новиков Николай, 11 класс, лицей № 37, Саратов. Зависимость мощности электрического тока от нагрузки

Ростунцова Алена, 11 класс, ЛПН, Саратов. Исследование эффективности использования гидропаровой турбины в электрогенерирующих установках

Кулинский Александр, 11 класс, лицей № 37, Саратов. Свойства ферромагнетиков в магнитном поле

Трифоновая Мария, 11 класс, лицей № 47, Саратов. Поляризованный свет в науке и технике

Матюшкина Анна, 10 класс, лицей № 37, Саратов. Аналогии в описании гравитационного и электромагнитного полей

Горенков Михаил, 11 класс, СОШ № 2, Саратов. Легко ли плыть в вязкой жидкости?

Родин Дмитрий, *Коплевацкий Давид*, 11 класс, ФТЛ № 1, Саратов. Численное исследование динамических систем

Сидоров Кирилл, 10 класс, лицей № 37, Саратов. Физические задачи на экстремум

Абрамов Артем, 11 класс, ЛПН, Саратов. Отображение на комплексной плоскости. Множества Мандельброта

Тельнов Владимир, 11 класс, лицей № 37, Саратов. Олимпийский трамплин (задачи на экстремум)

Подлевский Виктор, Шимчук Татьяна, 11 класс, ЛПН, Саратов. Instant Follow
Иванов Денис, Амеров Роман, 11 класс, ЛПН, Саратов. QR Code
Беляева Валентина, 10 класс, гимназия № 1, Балашов. Зеркала
Пичугин Михаил, 11 класс, лицей № 37, Саратов. Вихрь в чашке кофе

Лекции

Шараевский Ю.П., профессор, СГУ. Левые среды

Подготовка к академбою

Академбой

21 октября, вторник

Лекции

Короновский А.А., профессор, СГУ. Нелинейная динамика общества

Заккрытие школы-конференции, награждение победителей олимпиады и авторов лучших докладов

Секция студентов

Саратовский университет, корпус VIII, 26–27 ноября 2014

26 ноября, среда

Устные доклады

Секция «Нелинейные явления в радиофизике и электронике»

Бадарин А.А., 4 курс, ФНП СГУ. Исследование влияния проводимости стенок камеры дрейфа на динамику релятивистского электронного потока с виртуальным катодом

Жидков А.П., магистрант, ФНП СГУ. Исследование сверхширокополосного генератора хаоса сантиметрового диапазона на основе ЛБВ

Бенедик А.И., аспирант, ФНП СГУ. Расчет электродинамических характеристик фотонно-кристаллического резонатора

Шараевская А.Ю., магистрант, ФНП СГУ. Особенности формирования запрещенных зон в структурах на основе магнетонных кристаллов

Матвеев О.В., аспирант, ФНП СГУ. Исследование дисперсионных характеристик структуры магнетонный кристалл–сегнетоэлектрик–магнетонный кристалл

Секция «Нелинейная динамика»

Тышкун А.В., 3 курс, ФНП СГУ. Стабилизация частоты генератора запаздывающим отражением от нагрузки

Кочанов А.А., магистрант, СГУ. Эффекты синхронизации и гашения колебаний в системе двух генераторов ван дер Поля, связанных через диссипативный контур

Туркин Я.В., магистрант, СГУ. Широкополосная синхронизация и хаос в системе спин-трансферных осцилляторов с полевой связью

Харченко А.А., аспирант, ФНП СГУ. Синхронизация элементов сложной сети по интегральным характеристикам

Круглов В.П., аспирант, ФНП СГУ. Примеры распределенных систем с хаотической динамикой паттернов, связанной с аттракторами Смейла–Вильямса

Андреев А.В., 4 курс, ФНП СГУ. Анализ перехода к хаосу в системе двух ридберговских атомов

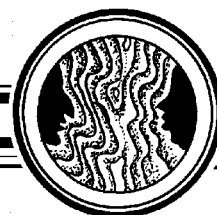
27 ноября, четверг

Стеновая секция

Асанов К.Р., 4 курс, физфак СГУ. Полимеризация графеновых чешуек внутри углеродной трубки

Корнеев И.А., Аринушкин П.А., 4 курс, физфак СГУ. Особенности динамики мемристорных генераторов с линией равновесий

Белов К.В., магистрант, ФНП СГУ. Компьютерное моделирование нелинейных нестационарных процессов в двухкаскадном клистронном генераторе
Бубликов К.В., магистрант, ФНП СГУ. Исследование влияния сегнетоэлектрика на распространение поверхностных МСВ в ограниченном по ширине ферритовом волноводе в случае касательного намагничивания
Бух А.В., Гулай А.В., 4 курс, физфак СГУ. Исследование явлений мультистабильности и вынужденной синхронизации в неавтономной системе двух осцилляторов ван дер Поля с отталкивающим взаимодействием
Гиревой Р.А., магистрант, ФНП СГУ. Численное моделирование многорезонаторного клистрона-усилителя средней мощности с двухзачерными резонаторами
Гришианов И.А., аспирант СГТУ. Статистическое оценивание динамических квазистационарных процессов при резании
Гулай А.П., 4 курс, физфак СГУ. Исследование явлений бистабильности и взаимной синхронизации в автономной системе двух осцилляторов ван дер Поля с отталкивающим взаимодействием
Ишбулатов Ю.М., 4 курс, ФНБМТ СГУ. Сопоставление методов оценки параметров автогенератора с запаздыванием, динамика которого близка к периодической
Камаев С.А., Соломин М.А., 3 курс, СГТУ. Разработка макета «Ротор на качелях» лаборатории кибернетической физики
Колосов Д.А., 4 курс, физфак СГУ. Влияние нелинейности индуктивности зарядного дросселя в схеме заряда формирующего двухполюсника
Мельникова М.М., аспирант, ФНП СГУ. Влияние отражений на динамику простых моделей многомодового гиротрона
Митрофанов В.В., аспирант, физфак СГУ. Выявление закономерностей движения молекулы фуллерена C_{60} по графеновому листу, содержащему дефект атомного каркаса
Стародубова Е.Н., инженер, ООО «ОпенСофт». Исследование процессов синхронизации двухмодового гиротрона с близкими частотами
Петрик А.Г., аспирант, СГТУ. Особенности формирования сжатого состояния в интенсивных релятивистских пучках со сверхкритическим током
Пинюгин Н.О., Ковалев М.С., 3 курс, СГТУ. Разработка макета «Маятник в колесе» лаборатории кибернетической физики
Терентюк А.Г., магистрант, ФНП СГУ. Численное моделирование модуляционной неустойчивости электромагнитных волн в нелинейной диэлектрической среде с дисперсией
Уманцева О.В., магистрант, ФНП СГУ. Синхронизация многомодового резонансного генератора обратной волны
Фадеев А.А., 5 курс, физфак СГУ. Наноэмиттер на основе углеродных нанотрубок
Фельк Е.В., магистрант, ФНП СГУ. Влияние слабой диссипации на структуру фазового пространства консервативной системы с диффузией Арнольда
Чекмарева А.Ж., 3 курс, ФНП СГУ. Консервативные режимы и их разрушение в системе фазовых уравнений с симметрией
Шиловский В.И., Гуцевич Д.Е., 3 курс, СГТУ. Разработка макета «Робот на качелях» лаборатории кибернетической физики
Якунина К.А., 5 курс, ФНП СГУ. Синхронизация гиротрона в режиме жесткого возбуждения



ДЖЕЙМС КЛЕРК МАКСВЕЛЛ: ДВЕ ЗНАМЕНАТЕЛЬНЫЕ ДАТЫ

О. И. Гусякова, Ю. И. Левин

Саратовский государственный университет

Рассмотрены события, в которых ключевую роль сыграл великий шотландец Дж.К. Максвелл и значение которых в развитии мировой культуры невозможно переоценить. В 2014 году исполнилось 150 лет выходу в свет его итоговой работы по теории электромагнитного поля и 140 лет созданию под его руководством Кавендишской лаборатории, ставшей мировым научным центром. Обсуждаются спорные даты, связанные с этими событиями.

Ключевые слова: Джеймс Клерк Максвелл, электромагнитное поле, уравнения Максвелла, Кавендишская лаборатория, Кембридж, лауреаты Нобелевской премии.

Мы всегда чувствуем себя увереннее, когда имеем дело с физикой...

Наука захватывает нас только тогда, когда заинтересовавшись жизнью великих исследователей, мы начинаем следить за историей развития их открытий.

Дж.К. Максвелл

В 2014 году мы отмечаем две знаменательные даты, связанные с именем великого шотландца – Джеймса Клерка Максвелла. В ряде публикаций о событиях, о которых пойдет речь, называются разные даты. Разночтение в датах возникло не только из-за небрежности изложения фактов (особенно в Интернете), но и из-за не всегда четкой формулировки «точки отсчета».

Уравнения Максвелла, или аксиомы электродинамики

150 лет тому назад, в 1864 году Максвелл доложил Лондонскому королевскому обществу свою работу «Динамическая теория электромагнитного поля» [1], которая завершала цикл его работ по классической электродинамике: первая работа «О фарадеевских силовых линиях», вторая – «О физических силовых линиях» [2]. Позже Максвелл изложил полученные результаты в двухтомном труде «Трактат об электричестве и магнетизме», первое издание которого вышло в 1873 году. Отличительной

особенностью этой работы, вероятно, явилось то, что в ней Максвелл практически отказался от изложения механических моделей электромагнитного поля. Тем не менее, основным итогом исследований электрических и магнитных явлений, начатых Максвеллом в 1854 году, явилась работа «Динамическая теория электромагнитного поля». В этой работе он вводит понятие электромагнитного поля (у Фарадея – электрическое поле), отмечает, что рассматривает электромагнитные явления, «пытаясь их объяснить свойствами поля, окружающего наэлектризованные или намагниченные тела». И далее пишет: «Та теория, которую я предлагаю, может быть названа теорией электромагнитного поля, потому что она имеет дело с пространством, окружающим электрические и магнитные тела, и она может быть названа также динамической теорией, поскольку она допускает, что в этом пространстве имеется материя, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые электромагнитные явления... Таким путем мы пришли к определенным уравнениям, выражающим определенные свойства электромагнитного поля».

В 1864 году Максвелл доложил работу, а опубликована она была через несколько месяцев в «Трудах» Лондонского королевского общества в 1865 году. Однако в статье отмечается, что работа была устно доложена 8 декабря 1864 года. Первая работа «О фарадеевских силовых линиях», выполненная Максвеллом, когда он был ещё студентом Кембриджского университета, также была первоначально устно доложена им Кембриджскому философскому обществу на двух заседаниях: I часть – в конце 1855 года, II часть – в 1856 году. В те времена, вероятно, доклад имел значительно больший вес, чем в наше время.

Фундаментальная работа Максвелла «Динамическая теория электромагнитного поля» (как и две предыдущие) «первоначально не привлекла к себе внимание. Между тем появление этой статьи мы должны считать не менее выдающимся событием в истории мировой культуры, чем выход в свет в 1687 году “Математических начал натуральной философии” Ньютона» [3]. В статье [4] Макс Планк, говоря о Максвелле, отмечает, что «в учении об электричестве его гений предстает перед нами в своём полном величии. Именно в этой области... на долю Максвелла выпал такой успех, который мы должны причислить к наиболее удивительным деяниям человеческого духа... Максвелл в своей смелой фантазии и математической проницательности пошел дальше Фарадея». У Р.Э. Пайерса есть такая фраза: «Если вы разбудите физика среди ночи и скажите “Максвелл” он, наверное, ответит: “электромагнитное поле”» [5].

В максвелловские времена были хорошо известны законы взаимодействия зарядов, постоянных токов и магнитов, которые были записаны в интегральной форме и отражали в той или иной степени идеологию «дальнего действия». Максвелл, обобщив известные факты, придал им форму дифференциальных уравнений – появилась непрерывность, появилось «близкое действие». Запись уравнений в такой форме привело к безвозвратному исчезновению «мгновенного действия» [1].

Если ограничиться только этим обобщением, то уравнения получаются несоместными. В курсе общей физики, рассматривая вопросы электродинамики, обычно решают эту проблему следующим образом (ниже мы записываем уравнения не в тех обозначениях, которые использовал Максвелл в своей знаменитой статье, а в тех, которые используются в настоящее время – сути это не меняет). Проблема содержится в уравнении для магнитного поля, возбуждаемого током,

$$[\nabla \vec{B}] = \frac{\vec{j}}{\varepsilon_0 c^2}.$$

Если «взять» от этого уравнения дивергенцию, то слева получаем ноль, так как дивергенция от ротора тождественно равна нулю. Следовательно, дивергенция от вектора плотности тока тоже равна нулю

$$\nabla[\nabla\vec{B}] \equiv 0, \quad \nabla\vec{j} = 0.$$

Это противоречит фундаментальному закону сохранения заряда (любой поток заряда через замкнутую поверхность равен изменению заряда внутри этой поверхности)

$$\nabla\vec{j} = -\frac{\partial\rho}{\partial t}.$$

Чтобы устранить противоречие в уравнениях, следует ввести в уравнение дополнительное слагаемое, которое Максвелл назвал «током смещения»,

$$[\nabla\vec{B}] = \frac{1}{\varepsilon_0 c^2} \vec{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial\vec{E}}{\partial t}.$$

С введением дополнительного слагаемого (тока смещения) получаем

$$\nabla\left(\vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial\vec{E}}{\partial t}\right) = 0$$

и закон сохранения заряда выполняется с учетом $\nabla\vec{E} = \rho\varepsilon_0$.

Максвелл пришел к необходимости введения дополнительного слагаемого, тока смещения, с других позиций. Если «наложить электрическое поле на конденсатор, в котором промежуточная среда имеет очень большую диэлектрическую постоянную, то большая часть электрической индукции фактически будет затрачена на разделение зарядов в диэлектрике от одной стороны к другой. Вполне естественно ожидать, что движение этих зарядов будет сопровождаться током – током смещения» [5]. Важным обстоятельством явилось то, что Максвелл ввел ток смещения не только для диэлектрика, но и для вакуума, который воспринимался как особая физическая среда – эфир. «Введенное Максвеллом представление о поляризации вакуума долго служило препятствием к одобрению уравнений Максвелла в научных кругах» [3]. Идея тока смещения – центральная идея теории электромагнитного поля. Анри Пуанкаре с изумлением отмечал: «Все опыты того времени, казалось, противоречили этому, так как токи наблюдались исключительно в проводниках. Как мог Максвелл примирить свою смелую гипотезу с фактом так прочно установленным?». Ответ может быть таким: Максвелл органически был неспособен думать о физике неверно [6].

В статье [5] Р.Э. Пайерс пишет: «Максвелл нигде не рассматривает вопроса, являются ли все дифференциальные уравнения, которые он окончательно написал, совместными друг с другом. Однако я ни минуты не сомневаюсь, что он был убежден в совместности этих уравнений. И действительно, он написал много решений, и если... он выписал бы уравнения с другим членом (так что уравнения не были бы совместными), я уверен, что он не был бы удовлетворен и продолжал бы работу, пока не нашел бы надлежащим образом действующую схему. Таким образом, хотя я и не могу доказать этого, я вполне убежден, что та аргументация, которую мы обычно применяем сегодня, составляла фактически, явно или не явно, часть его рассуждений».

В работах по электромагнитному полю (указанных в начале настоящей статьи) Максвелл широко использует различные механические модели, которые должны, по

его замыслу, сделать более доступными математические формулировки. В работе «Динамическая теория электромагнитного поля» Максвелл пишет: «...применяя такие термины, как “электрическое количество движения” и “электрическая упругость” в отношении известных явлений индукции токов и поляризации диэлектриков, я хочу просто направить внимание читателя на механические явления, которые помогут ему в понимании электрических явлений. Все подобные фразы в настоящей статье должны пониматься как иллюстративные, а не объясняющие». Попытки Максвелла в этом направлении оказались тщетными, и только затрудняли понимание теории. Максвелл не смог отказаться от идеи эфира. В то время, особенно после крушения корпускулярной теории света, было трудно это сделать – существование эфира воспринималось как нечто естественное и несомненное. Для иллюстрации живучести идеи эфира можно указать на следующие два факта. Профессор Московского университета Н.А. Умов опубликовал в 1902 году «Курс физики», в котором пишет: «Еще сравнительно недавно тонкая невесомая материя, проникающая тела и наполняющая все пространство, называемая эфиром, считалась местом исключительно одних световых явлений. В настоящее время мы рассматриваем свет только как частный случай явлений, возможных в эфире». В 1901–1902 годах Г.А. Лоренц прочитал в Лейденском университете курс лекций «Теория и модели эфира» (на русском языке эти лекции издаются в 1936 году [7]).

Рассуждения о введении тока смещения и совместности уравнений нельзя отнести к доказательству уравнений Максвелла. Они являются просто неким аргументом, объясняющим структуру уравнений. «Нет сомнений, – пишет Пайерс, – что можно было бы изменить уравнения другими способами, чтобы сделать их непротиворечивыми» [5]. Тем не менее, дополнительное слагаемое вводится в уравнении в той форме, которую предложил Максвелл. Уравнения Максвелла – это аксиомы электродинамики. Зоммерфельд, рассматривая аксиоматику уравнений электродинамики, отмечает: «Аксиомы электродинамики, так же как и ньютоновские аксиомы механики, основываются на опыте, точнее говоря, на обобщении всего комплекса опытных фактов в упрощенной идеализированной форме» [8].

При введении тока смещения и формулировке уравнений электродинамики Максвелл, по-видимому, прежде всего, руководствовался физическими соображениями. Подтверждением целесообразности и эффективности такого подхода, в какой-то мере, являются слова Р. Фейнмана: «Математики часто говорят: “Послушайте, эти дифференциальные уравнения – уравнения Максвелла – ведь это все, что есть в электродинамике; ведь сами физики признают, что нет ничего, чего бы не содержалось в этих уравнениях. Уравнения эти сложны; ладно, но это всего лишь математические уравнения, и если я разберусь в них математически, я разберусь и в физике”. Но ничего из этого не выходит. Математики, которые подходят к физике с этой точки зрения (а таких очень много), обычно не делают большого вклада в физику, да, кстати, и в математику. Их постигает неудача оттого, что настоящие физические ситуации реального мира так запутаны, что нужно обладать гораздо более широким пониманием уравнений» [9].

«Для Максвелла математика никогда не была самоцелью, и не наслаждения он искал в математических тонкостях, а орудие познания» [6].

Кавендишская лаборатория

Вторая знаменательная дата, связанная с именем Джеймса Клерка Максвелла, – 140 лет основанию знаменитой Кавендишской лаборатории, явлению уникальному, возникшему в небольшом городке Кембридже, примерно, в двухстах километ-

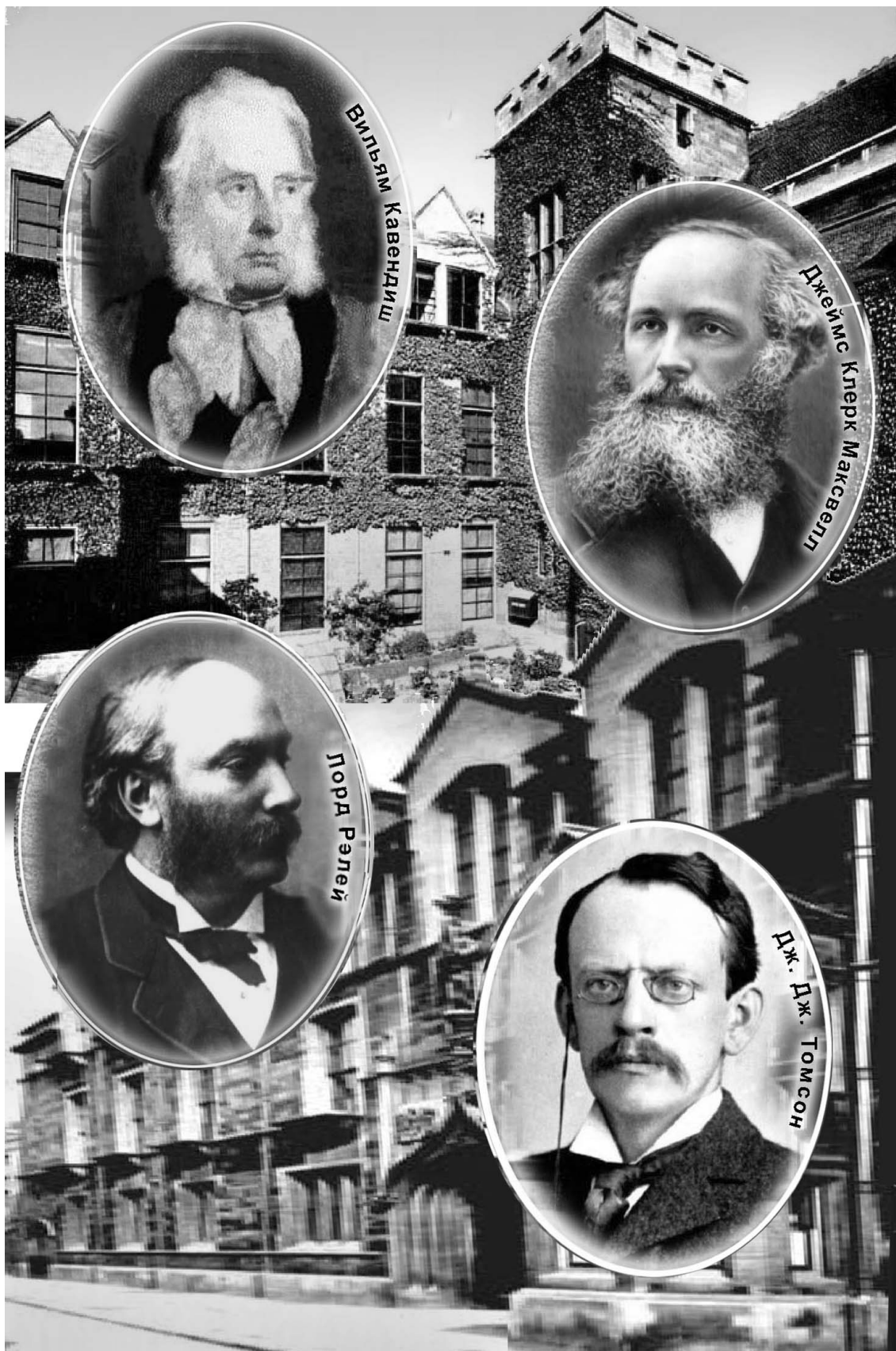
рах от Лондона. В разное время в этой Лаборатории работали 29 лауреатов Нобелевской премии. Для оценки научной атмосферы в этом городке можно обратить внимание на то, что из стен Кембриджского университета, основанного в 1209 году, вышло более 80 лауреатов Нобелевской премии. Кавендишская лаборатория имеет уникальную историю открытий и созданий новых направлений в науке [10]: открытие электрона (1897); создание теории радиоактивности и планетарной модели атома; осуществление искусственной радиоактивности (1919); открытие нейтрона (1932); построение модели ДНК (1953); создание камеры Вильсона (1912), масс-спектрографа (1913) и линейного ускорителя (1932); осуществление значительных научных достижений в области кристаллографии, рентгеноструктурного анализа, молекулярной биологии, радиоастрономии и т.д.

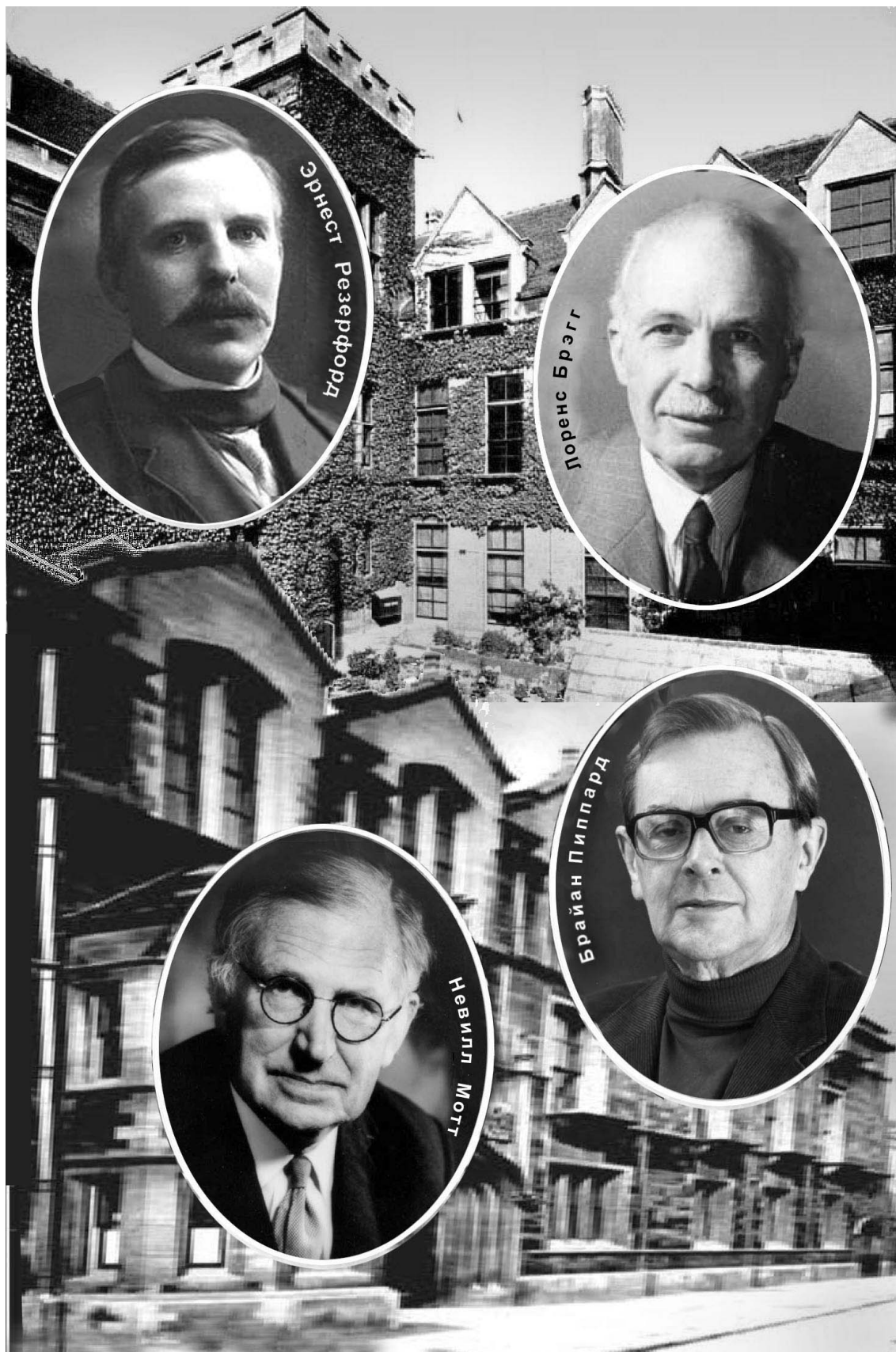
В литературных источниках есть расхождение в дате создания Лаборатории. В одних источниках говорится, что Кавендишская лаборатория создана в 1871 году, в других – в 1874 году. Разобраться в датах в данном случае несложно.

В 1871 году в Кембриджском университете была учреждена кафедра экспериментальной физики. Само по себе явление незаурядное. В то время теоретическую физику относили к математике, а «остальную физику» относили к натуральной философии (до Кембриджа Максвелл возглавлял в ряде университетов кафедры натуральной философии). Наряду с кафедрой предусматривалось создание физической лаборатории. Первоначально возглавить кафедру предложили Вильяму Томсону (будущему лорду Кельвину), но он отказался, уже имея кафедру в Глазго. Отказался и Генри Гельмгольц. Тогда учрежденную кафедру предложили Максвеллу, кандидатуру которого поддержали Стокс, Рэлей и другие ученые. После некоторых колебаний Максвелл согласился возглавить кафедру и Лабораторию, которой практически ещё не было. Она только начинала строиться и лишь впоследствии была названа Кавендишской.

Формальное назначение Максвелла состоялось 8 марта 1871 года, а в октябре он прочитал вступительную лекцию о функциях экспериментальной работы в университетском образовании, в которой говорил: «Кембриджский университет... с большей или меньшей быстротой приспосабливается к требованиям времени и недавно ввел курс экспериментальной физики. Курс этот, требуя поддержания способностей к пониманию и анализу, ... требует также упражнения наших чувств в наблюдении и наших рук в общении с приборами. Привычные принадлежности – перо, чернила и бумага – не будут уже достаточны, и нам потребуется большее пространство, чем пространство кафедры, и большая площадь, чем поверхность доски... мы должны начать в лекционном зале с курса лекций в какой-нибудь отрасли физики, пользуясь опытами как иллюстрацией, и закончить в лаборатории рядом исследовательских опытов» [6]. То есть Лаборатория с самого начала мыслилась как исследовательская, научная.

При создании и оборудовании Лаборатории Максвелл проявил незаурядные организаторские способности. Строительство Лаборатории происходит при его активном участии. Максвелл вникает во все детали, стремясь все предусмотреть, сделать Лабораторию приспособленной и для лекционных демонстраций, и для научной деятельности. Ему удалось создать учебно-научную Лабораторию, в которой обучение студентов и глубокие научные исследования составляли единое целое, которая со временем стала крупным мировым центром физической науки. Трудно переоценить значение деятельности Максвелла по созданию этой Лаборатории. Можно с уверенностью сказать, что Лаборатория стала практическим наследием, оставленным Максвеллом потомкам [6, 10, 11].

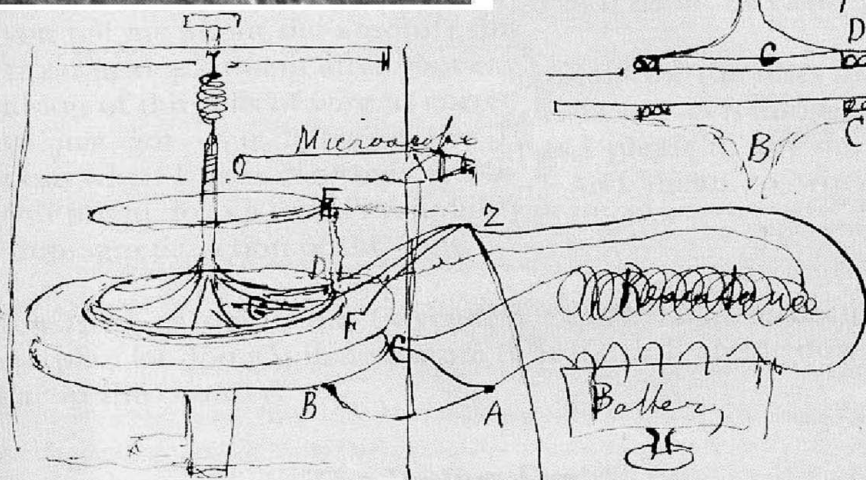
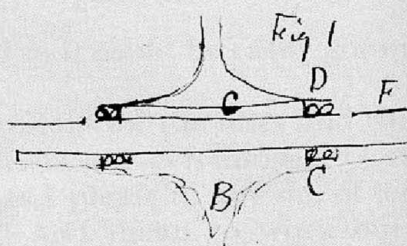






Д.К.Максвелл в молодости

8 Palace Gardens, Terenure W
1864 Oct 15



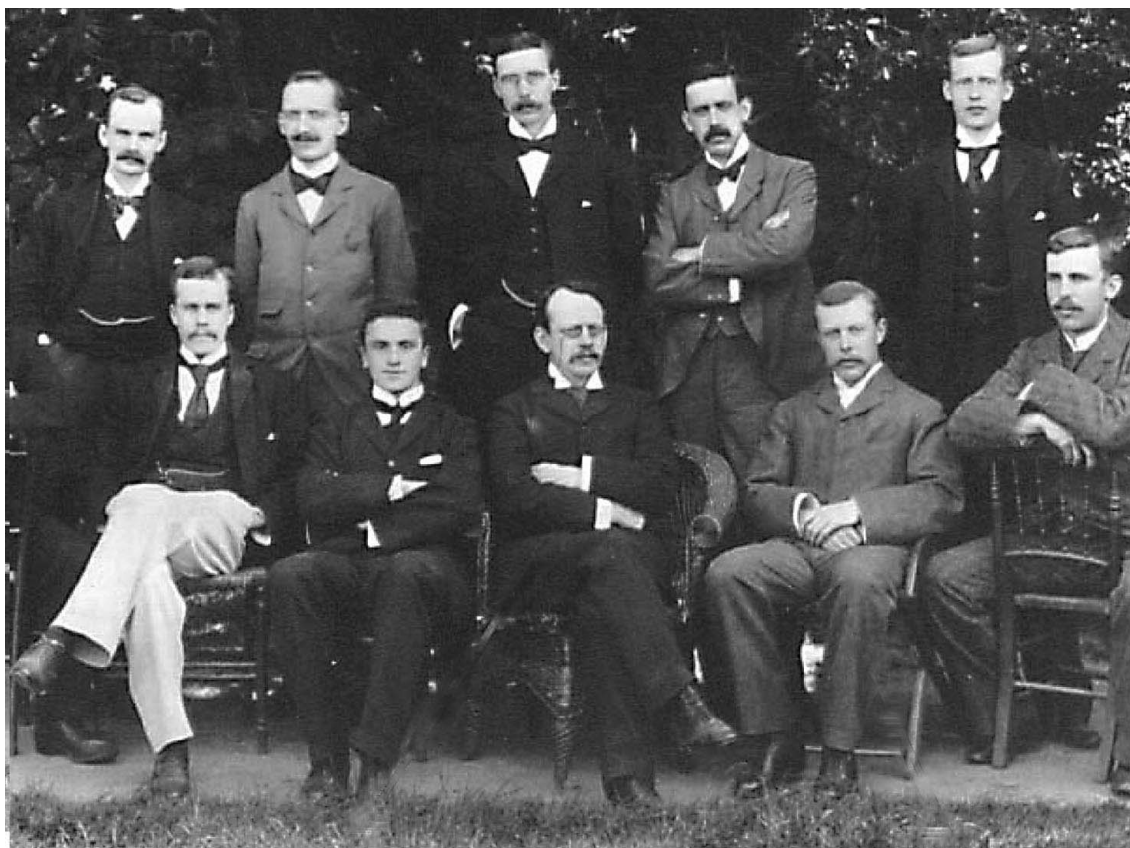
Dear Thomson

earth

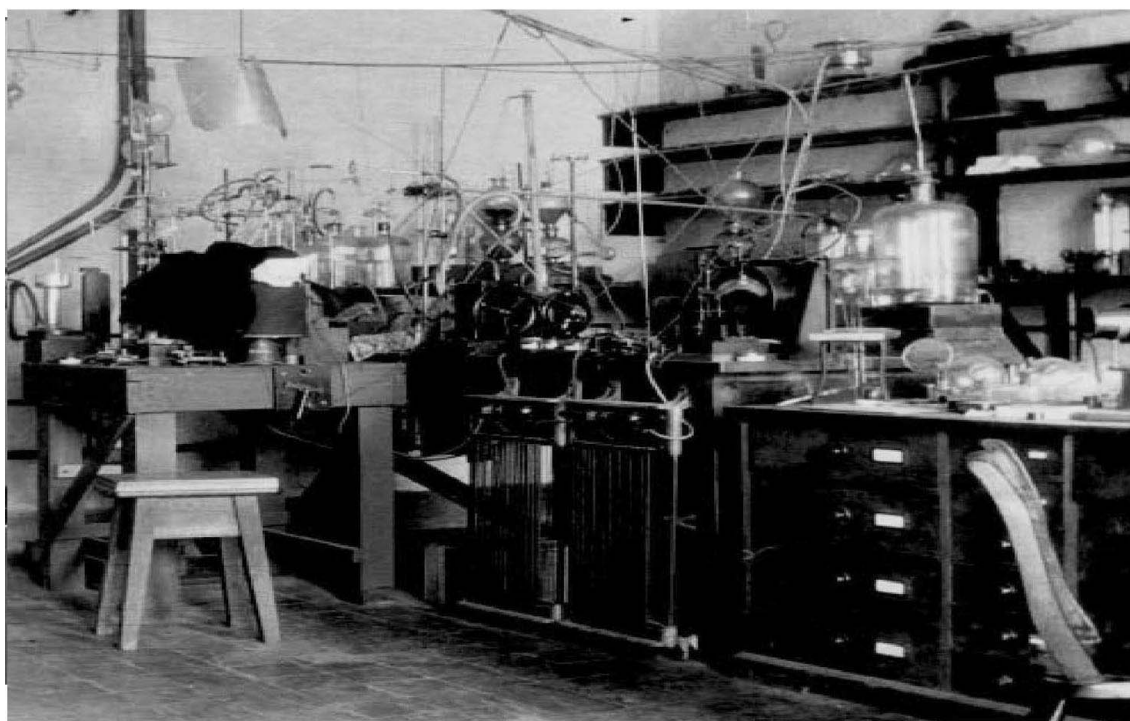
Here is a plan to weigh an electrostatic attraction against an electromagnetic repulsion, directly, so as to require no standard except a resistance coil and some ^{proportional} measures of dimensions in any scale you please.

The electrostatic attraction of two discs kept at a constant potential is balanced against the electromagnetic repulsion of two coils of wire through which a current is urged by the same electromotive force.

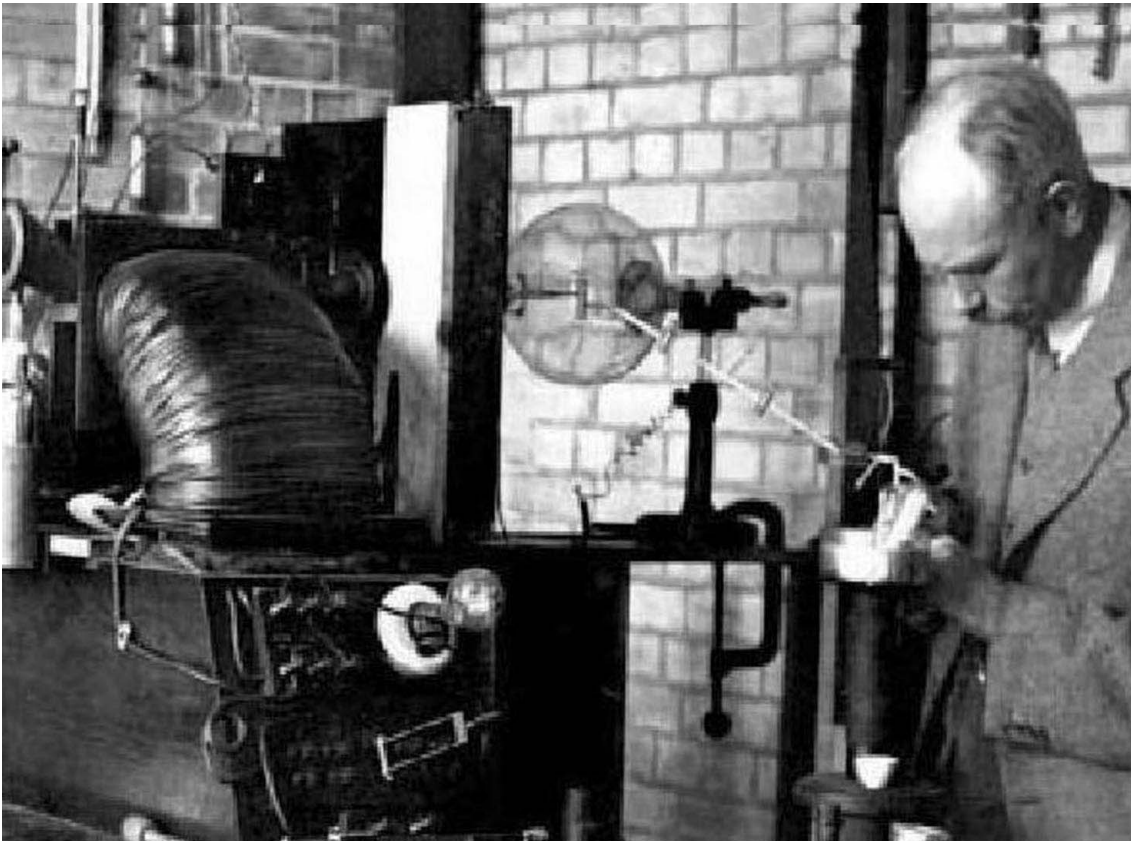
Письмо Максвелла Кельвину, 1864 г.



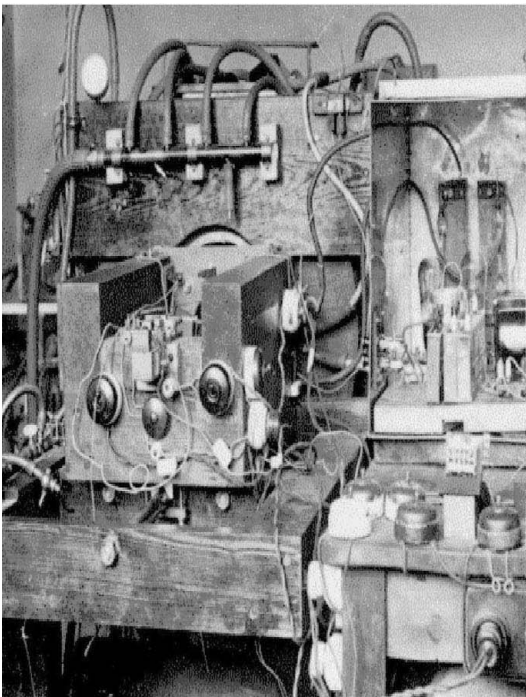
Профессор Дж.Дж. Томсон (сидит в центре первого ряда) и его ученики:
Дж.С.Таунсенд и Э.Резерфорд (сидят справа от Томсона) и Ч.Т.Р. Вильсон (стоит второй слева)



Рабочее место Э.Резерфорда



Фрэнсис Астон в лаборатории



Автоматическая конденсационная
камера Патрика Блэккетта



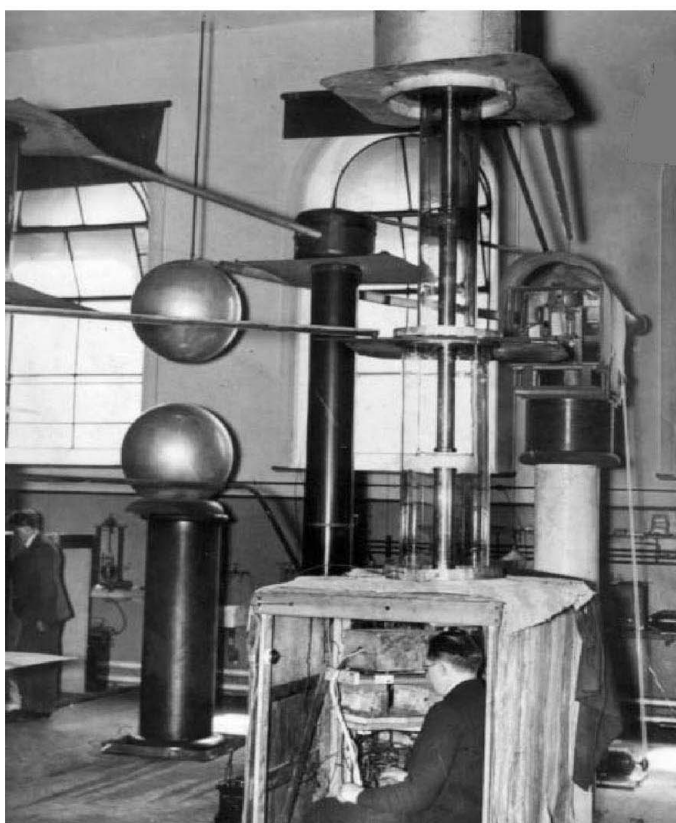
Фрэнсис Крик и Джеймс Уотсон



Мондовская лаборатория



П.Л.Капица



Расщепление ядер



Прибор, позволивший
открыть нейтрон



Фасады зданий лабораторий Брэгга и Мотта



Центр экспериментальной астрофизики



Современная Лаборатория West Cambridge



Здание медицинской физики



Новое здание Кавендишской лаборатории

Становление Лаборатории не проходило «в радужных тонах». Встречался своеобразный саботаж: наставники студентов старших курсов отговаривали их идти в Лабораторию [7]. Максвеллу приходилось заниматься не только организацией Лаборатории, но и круто менять всю кембриджскую систему образования. Его ученик Артур Шустер вспоминал [6], что Максвелл был очень взволнован, когда ему удалось показать в вырезанной и отшлифованной им пластине двоякопреломляющего кристалла коническую рефракцию. Опыт был довольно сложным. Обрадованный Максвелл, встретив математика Тодгёнтера, спросил его: «Хотите видеть коническую рефракцию?». Ответ был таков: «Нет, я её преподавал всю свою жизнь и вовсе не хочу, чтобы все мои представления перевернулись, когда я её увижу». Тодгёнтер был образованным человеком и талантливым математиком, но это не помешало ему неприязненно отнестись к эксперименту; он считал, что достаточно, чтобы студент просто безоговорочно верил своему преподавателю.

Официальное открытие Кавендишской лаборатории состоялось 16 июня 1874 года. На торжество прибыли именитые гости, среди которых Стокс, Адамс, Лаверрье и многие другие. Лорд-канцлер, ректор Кембриджского университета, герцог Девонширский Вильям Кавендиш совершил официальный акт дарения Лаборатории университету. Очевидцем этого события был молодой русский физик профессор Московского университета Александр Григорьевич Столетов. Вот как он описывает в газете «Московские ведомости» (от 21 июня 1874 года) это событие: «Сегодня великий день в классическом Кембридже. Люди, кебы, колокола – всё в необычном движении. Праздновалось открытие одного из учреждений, ещё редких в Европе, но размножающихся с каждым годом... Едва ли не самая роскошная и комфортабельная Лаборатория, вверенная одному из первоклассных физиков нашего времени, профессору Джеймсу Клерку Максвеллу, без сомнения будет играть видную роль и в истории физики, и в истории английских университетов». Александр Григорьевич не ошибся! Далее Столетов даёт подробное описание Лаборатории. Первый этаж: комната для измерения длины, времени, массы, некоторых измерений электричества, магнетизма и теплоты; магнитная комната, на значительное расстояние от которой удалены железо и сталь; комната для весов; комната, предназначенная для теплоты; обширная кладовая; мастерская; комната для большой гальванической батареи. Второй этаж: большая аудитория; комната для приготовления лекционных демонстраций; огромная рабочая комната; комната профессора; комната для обеспечения неподвижности, столь необходимой для многих чувствительных приборов, где столы покоятся не на полу, а на особых балках, укрепленных в капитальных стенах здания. Верхний этаж: комнаты для акустики, лучистой теплоты, оптики и электричества; особая зала для вычислений; комната для фотографических работ и т.д. Здание отапливается горячей водой с помощью системы чугунных (а в магнитном отделении – медных) труб. Все комнаты обильно и удобно снабжены водой и газом.

Открытая 140 лет тому назад Лаборатория стала называться Кавендишской. Кто из Кавендишей, история рода которых восходит к эпохе норманнов, дал имя Лаборатории? Претендентов два. Первый претендент – Генри Кавендиш (1731–1810), гениальный ученый, затворник и оригинал, большую часть неопубликованных трудов которого издал Дж. Максвелл в 1879 году спустя 5 лет после открытия Лаборатории. Второй претендент – Вильям Кавендиш, лорд-канцлер Кембриджского университета, Седьмой герцог Девонширский, внучатый племянник первого кандидата. Он был большим меценатом, инициировал создание Лаборатории и пожертвовал на ее строительство 6300 фунтов.

В ряде изданий, в том числе достаточно солидных, утверждается, что Лаборатория названа в честь замечательного ученого XVIII века Генри Кавендиша, опубликовавшего при жизни работы в основном в области химии. Прямых подтверждений этому не обнаружено. Создается впечатление, что это утверждение основано, прежде всего, на нашем желании главенствования науки над кошельком с деньгами.

В других источниках, не менее авторитетных, говорится о том, что Лаборатория названа в честь Вильяма Кавендиша герцога Девонширского. Можно назвать три косвенных подтверждения этого. Во-первых, на официальном сайте Кавендишской лаборатории [10] читаем: «Кавендишская лаборатория имеет экстраординарную историю открытий и инноваций в физике, начиная с момента открытия в 1874 году под руководством Джеймса Клерка Максвелла... Необходимость в практическом обучении ученых и инженеров выразилась в успехе Великой Выставки в 1851 году и требованиях индустриального общества. Введение естественно-научного экзамена (англ. Natural Sciences Tripos – экзамен для получения отличия – прим. Авт.) в 1851 году вскрыло необходимость строительства лаборатории, посвященной экспериментальной физике, и это было сделано благодаря щедрости канцлера университета Вильяма Кавендиша, Седьмого Герцога Девонширского». Ни слова о Генри Кавендише. Во-вторых, на старом здании лаборатории висит доска, на которой написано: «Кавендишская лаборатория 1874–1974 основана герцогом Девонширским...» [12]. И опять ни слова о Генри Кавендише. Можно обратить внимание еще на одно косвенное обстоятельство, если учесть традиции консервативной (во все времена) Англии. Для сотрудника Кавендишской лаборатории, ученика и коллеги Эрнеста Резерфорда, Петра Леонидовича Капицы, проводившего опыты с сильными магнитными полями на громоздком оборудовании, было построено новое здание, создана специальная лаборатория, получившая название Мондовской. Это название связано с именем крупного предпринимателя Людвиг Монда, предоставившего средства для строительства лаборатории. Кто дает деньги, тот дает и имя. Только в 1970-е годы лаборатории, входящие в состав Кавендишской лаборатории, стали называть именами ученых: лаборатория Брэга, лаборатория Мотта.

На фронтальной поверхности здания Мондовской лаборатории изображен раскрывший пасть, но совсем не страшный крокодил. Появление изображения крокодила связано с красивой легендой и является, в какой-то мере, свидетельством неформальной, дружественной обстановки в Кавендишской лаборатории, свойственной ей во все времена. Капица называл крокодилом своего учителя Резерфорда, к которому относился с большой любовью. В первые годы своего пребывания в Кембридже (начало 1920-х годов) в одном из писем к матери Петр Леонидович шуточно писал о своих подозрениях, что в припадке гнева Резерфорд (как крокодил) может откусить ему голову. Кличка приклеилась к мэтру – так его стали называть сотрудники Лаборатории за глаза и в глаза.

В Англии есть сказка о мальчике Питере Пене и его друзьях, за которыми на некоем острове охотятся пираты и кровожадный крокодил. Питер Пен отрубает руку пирату и ее проглатывает крокодил. Но на беду крокодила на отрубленной руке были часы и теперь, тикая в его брюхе, они всех предупреждают о его приближении. Причем здесь Резерфорд? Тяжелые шаги и очень громкий голос предшествовали появлению Резерфорда в комнатах Лаборатории; он никогда не появлялся внезапно [13].

Создатель и первый директор Кавендишской лаборатории Джеймс Клерк Максвелл родился 13 июня 1831 года в Эдинбурге, а через 48 лет 5 ноября 1879 года его не

стало. Он похоронен не в Вестминстерском аббатстве – усыпальнице великих людей Англии, где покоится прах Ньютона, а на скромном сельском кладбище, недалеко от родового поместья. В 1931 году широко отмечалось 100-летие со дня рождения великого ученого. 30 сентября в Вестминстерском аббатстве, недалеко от надгробия Ньютона, были открыты мемориальные доски Фарадея и Максвелла. В связи с этим событием Макс Планк в статье [4] писал: «По рождению он принадлежит Эдинбургу, как личность он принадлежит Кембриджу, а труды его – достояние всего мира».

После смерти Максвелла директором Кавендишской лаборатории стал Джон Уильям Стретт, который после смерти отца в 1871 году стал лордом Рэлеем. Рэлей был типичным представителем ученых, которые в те времена предпочитали работать в «домашних» условиях. В 1868 году он создал научную лабораторию в своей родовой усадьбе в Терлинг-Плейс. В 1879 году Рэлей неохотно принял предложение стать профессором экспериментальной физики и директором Кавендишской лаборатории и пробыл на этом посту 5 лет. В Кембридже он начал вместе со студентами осуществлять программу точного определения электрических единиц и «природных постоянных, которые нельзя найти при помощи чистых рассуждений» [13]. Программа выполнялась с присущими ему тщательностью и терпением, с использованием тонких инструментов, и многие ее результаты, полученные к 1884 году, в дальнейшем почти не требовали исправлений. Он также ввел для студентов лабораторную работу по физике, что было совершенно новым видом обучения для Англии того времени. Закон рассеяния света (закон Рэлея), ряд статей по акустике и оптике, фундаментальный анализ свойств спектроскопов, публикация классической двухтомной монографии «Теория звука», которая до сих пор остается востребованной, серия измерений плотности газов и открытие аргона и многое другое – все это было получено и открыто в «домашней» лаборатории. Тем не менее, Рэлей был первым из работавших в Кавендишской лаборатории, удостоенных Нобелевской премии (1904).

Во времена Максвелла и Рэлея Кавендишская лаборатория еще не стала в полной мере мировым научным центром. Тем не менее, «уже в свои ранние годы Кавендишская лаборатория выдвинулась вперед по сравнению с другими физическими лабораториями. Этим она была обязана не столько направлению работ, сколько своим первым двум профессорам – Максвеллу и Рэлею» [13]. Лаборатория стала ведущим научным центром в мире при Джозефе Джоне Томсоне и Эрнесте Резерфорде.

В 1884 году, когда Рэлей ушел в отставку, пост директора Кавендишской лаборатории занял Джозеф Джон Томсон. Ему было тогда всего двадцать семь лет и за ним еще не числились сколь-нибудь заметные успехи в экспериментальной физике. Поэтому его назначение не обошлось «без ворчания некоторых по поводу того, что какие-то мальчишки назначаются профессорами» [13]. Но Кавендишской лаборатории всегда везло на руководителей.

Дж.Дж. Томсон главным направлением исследований выбрал изучение электрической проводимости газов и добился огромных успехов на этом пути. Наиболее значимый результат – открытие электрона (см. библиографию в статье [14]). Томсон фактически начал революцию в физике, которая привела к созданию квантовой механики. В 1906 году Томсон получил Нобелевскую премию по физике как «признание его выдающихся заслуг в области теоретических и экспериментальных исследований проводимости электричества в газах» [15].

Томсон оказал влияние на физику не только результатами своих блестящих экспериментальных исследований, но и как превосходный преподаватель и прекрасный руководитель Кавендишской лаборатории. Сотни наиболее талантливых моло-

дых физиков со всего мира выбирали местом обучения Кембридж. Из тех, кто работал в Кавендише под руководством Томсона, семеро стали в свое время лауреатами Нобелевской премии [15]. Учениками Томсона были будущие директора Кавендишской лаборатории: Эрнест Резерфорд и Лоренс Брэгг. А родители ещё одного будущего директора лаборатории познакомились, работая у Томсона.

В 1919 году Дж.Дж. Томсона сменил его ученик Э. Резерфорд, к этому времени уже известный ученый. Работы по атомной физике, выполненные им в Мак-Галльском университете (Монреаль) и университете Виктории (Манчестер), принесли ему мировую славу. В 1908 году он становится лауреатом Нобелевской премии. В 1912 году начинается плодотворное сотрудничество с датским физиком Нильсом Бором. «В Манчестере впервые “родился” атом и впервые там же был расщеплен, однако для всего мира... физику того периода символизирует Кавендиш» [13]. А. Пиппард называл это «эмоциональной властью, которую Кембридж имеет над своими выпускниками». Приняв пост профессора Кембриджского университета и директора Кавендишской лаборатории, Резерфорд «продолжил в последующие несколько лет вести Лабораторию к положению, доминирующему во всем мире» [13]. Учениками Резерфорда считают себя многие ученые с мировым именем, в их числе: Г. Мозли, Дж. Чедвик, Д. Кокрофт, М. Олифант, В. Гейтлер, Отто Ган, П.Л. Капица, Ю.Б. Харитон, Г.А. Гамов. В то время, когда Лабораторией руководил Резерфорд, Фрэнсис Астон открыл изотопы химических элементов, Патрик Блэккетт получил снимок вынужденного взаимодействия ядер, Джеймс Чедвик открыл нейтрон, и этот список можно долго продолжать. Период, когда Томсон и Резерфорд руководили Кавендишской лабораторией, Пиппард определил как «золотой век веревки и сургуча». Технология эксперимента не требовала сложной и громоздкой аппаратуры. Это было время, «когда эксперименты ставились быстро, дешево, а главное, в одиночку» [13].

В 1938 году Кавендишскую лабораторию возглавил Лоренс Брэгг. Работа, сделанная Брэггом вместе с отцом Уильмом Брэггом, заложила основы современной рентгеновской кристаллографии. Анализ рентгеновских дифракционных картин стал мощным инструментом для минералогов, металлургов и других исследователей, имеющих дело с атомной структурой материалов. В 1915 году Лоренс Брэгг вместе со своим отцом был награжден Нобелевской премией «за заслуги в исследовании структуры кристаллов с помощью рентгеновских лучей» [15]. Брэгг-сын становится самым молодым лауреатом Нобелевской премии. После смерти Резерфорда состав Лаборатории увеличивается почти в три раза, существенно расширяется тематика научных исследований. Брэгг делит Лабораторию на исследовательские группы от 1 до 6–12 человек. Он активно поддерживает группу Фрэнсиса Крика и Джеймса Уотсона по исследованию сложных молекул, которые, в конечном итоге, приводят к открытию биспиральной структуры молекулы ДНК (Нобелевская премия совместно с сотрудником Лондонского королевского колледжа М. Уилкинсом по физиологии и медицине за 1962 год [15]). В это же время в Кавендишской лаборатории Макс Перутц проводит исследования структуры гемоглобина, которые приносят ему Нобелевскую премию по химии за 1962 год. К началу 1950-х годов, когда подходили к концу полномочия Брэгга, «физика низких температур, кристаллография (особенно та ее область, которая стала молекулярной биологией) и радиоастрономия соперничали с ядерной физикой и физикой элементарных частиц настолько, чтобы притягивать к себе самых лучших студентов» [13].

Приемником Брэгга в 1954 году стал Невилл Мотт. «Под его руководством было проведено множество инновационных исследований в области, известной сейчас как

физика конденсированного состояния, включая его собственную работу над некристаллическими полупроводниками» [10]. В 1977 году Мотт совместно с Филипом Андерсоном и Джоном Ван Флеком получил Нобелевскую премию «за фундаментальные теоретические исследования электронной структуры магнитных и неупорядоченных систем» [15]. Вероятно, в истории Кавендишской лаборатории это была первая Нобелевская премия за чисто теоретические исследования. Штатный состав продолжал расти, устанавливалось современное оборудование, и Лаборатория уже не могла помещаться в старых стенах, овеянных славой Максвелла, Рэля, Томсона, Резерфорда, Брэгга. Возникла необходимость размещения Лаборатории в более просторном помещении, оборудованном в соответствии с современными потребностями. Мотт стал последним руководителем Кавендишской лаборатории, который работал в старом здании. Переезд в новое здание был завершен в 1974 году под руководством Брайана Пиппарда, заменившего Мотта на посту руководителя Кавендишской лаборатории в 1971 году. Начался новый этап в жизни Кавендишской лаборатории, традиционная роль которой, по словам Пиппарда, – быть на передовой.

Может быть, успех Джеймса Клерка Максвелла в создании фундаментальной теории электромагнитного поля и уникальной Кавендишской лаборатории в том, что для него «физика – это нечто намного большее, чем набор законов, применение которых дело элементарного навыка. Физика – прежде всего, живое творение рук и мозга, которое передается более примером, чем зубрежкой. Она воплощает искусство решать проблемы материального мира. И поэтому физике надо учиться, но учиться как искусству» [13].

Библиографический список

1. *Maxwell James Clerk. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*// Royal Society Transactions. 1865. Vol. CLV. P. 459. The paper was orally read Dec. 8, 1864.
2. *Максвелл Дж.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля.* М., 1954
3. *Дорфман Я.Г. Всемирная история физики.* М.: Изд-во «Наука», 1979.
4. *Планк М. Джеймс Клерк Максвелл и его значение для теоретической физики в Германии*// Сб. Джеймс Клерк Максвелл: Статьи речи. М.: Изд-во «Наука», 1968.
5. *Пайерлс Р.Э. Теория поля со времени Максвелла*// Джеймс Клерк Максвелл: Статьи речи. М.: Изд-во «Наука», 1968.
6. *Кляус Е.М. Джеймс Клерк Максвелл*// Джеймс Клерк Максвелл: Статьи речи. М.: Изд-во «Наука», 1968.
7. <http://www.nplit.ru/books/item/f00/s00/z0000004/st037.shtml>
8. *Зоммерфельд А. Электродинамика.* М., 1950.
9. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике: Т.5. Электричество и магнетизм.* М.: Изд-во «Мир», 1966.
10. <http://www.phy.cam.ac.uk/history>
11. <http://www.bungaloos.ru/b/kartsev-maksvell/8/>
12. *Зотиков И. В Кембридже я искал Кембридж.* <http://www.pingvins.com/articles/25/>, <http://www.vokrugsveta.ru>

13. *Pippard A.B.* The Cavendish tradition// Nature. 1974. Vol. 249. P. 602.
<http://www.vivovoco.msk.su>
14. *Дмитриев Б.С., Левин Ю.И.* Об открытии электрона // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1997. Т. 5, № 5, С. 107.
15. Электронная библиотека. Наука и техника. Лауреаты Нобелевской премии.
<http://n-t.ru/nl/fz/>

Поступила в редакцию 29.11.2014

JAMES CLERK MAXWELL: TWO REMARKABLE DATES

O. I. Guslyakova, Yu. I. Levin

Saratov State University

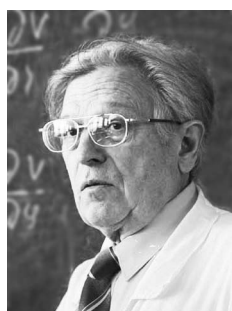
This article considers events in which great Scotchman J.C. Maxwell played principal role and the significance for the evolution of the world culture, which cannot be overestimated. There are two anniversaries in 2014: first, 150 years of the publication of his final work on the theory of the electromagnetic field, and second, 140 years of the organizing Cavendish Laboratory under his leadership, becoming the world centre of science. Questionable dates associated with these events are discussed.

Keyword: James Clerk Maxwell, electromagnetic field, Maxwell's equations, Cavendish Laboratory, University of Cambridge, winner of the Nobel Prize.



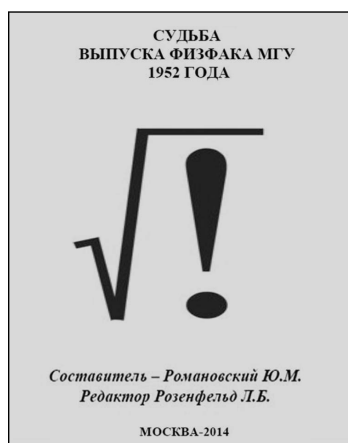
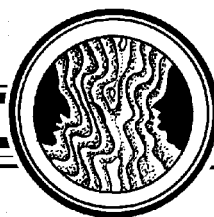
Гуслякова Ольга Игоревна – родилась в Улан-Удэ, Республика Бурятия (1987), окончила факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета (2010). В настоящее время – ассистент кафедры физики открытых систем, ответственный по учебной работе на факультете нелинейных процессов СГУ. Научные интересы: история науки, нелинейная динамика.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: olga-yuki@mail.ru



Левин Юрий Иванович – родился в Саратове (1942), окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1965), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1974). В настоящее время декан факультета нелинейных процессов СГУ, профессор, заведующий кафедрой физики открытых нелинейных систем СГУ. Автор более 100 научных статей, научно-методических пособий и руководств.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: levin@nonlin.sgu.ru



**О «КНИГЕ СУДЕБ»
ВЫПУСКНИКОВ ФИЗФАКА МГУ
1952 ГОДА**

В. К. Новик

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Статья комментирует опыт создания электронной книги-архива, составленной по собственноручно написанным воспоминаниям выпускников 1952 года физфака МГУ им. М.В. Ломоносова. Общий обзор книги дает представление о вкладе этого поколения в создание второй мировой Сверхдержавы.

Ключевые слова: Научные направления, личные мнения, государственные проекты.

Создание Советской сверхдержавы началось в тяжелейшие послевоенные годы. По праву стали легендой словосочетания «атомный проект», «ракетно-ядерный щит», «космос», «мировой океан», отодвинув в тень не менее важные достижения, такие как увеличение производства электроэнергии в шесть раз (1950–1975 годы) и практическое завершение электрификации сельского хозяйства. Откуда же появились люди, которые в считанные годы оказались в состоянии создать с нуля десятки новейших отраслей науки и промышленности? Можно привычно апеллировать к преимуществам советской средней и высшей школы, к достижениям массовой культуры этого времени. Но все искренние заявления такого рода будут легковесны, пока они не опираются на масштабные, живые личные свидетельства людей – создателей жизни.

Стремление сохранить память о людях и предприятиях реализовалось в многочисленных изданиях по истории отдельных заводов и фабрик, публиковавшихся в недавние времена тотальной деиндустриализации. Еще ждет своего самоотверженного автора труд о судьбах людей целых отраслей промышленности. Но на эту

масштабную проблему можно взглянуть и иначе – через судьбы выпускников вузов, связавших свои жизненные пути с различными отраслями науки и промышленности. Конечно, представительными в этом случае могут оказаться только политехнические вузы широкого профиля или университеты.

Опыт собрания автобиографий, написанных на склоне лет, нашел отражение в электронной «Книге судеб» выпускников 1952 года физического факультета МГУ. Текст книги с иллюстрациями представлен на ряде сайтов физфака МГУ:

- сайт «Союза выпускников физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова» <http://upmsu.phys.msu.ru/1952.html>
- Краткий вариант «Книги судеб» можно также скачать по ссылкам:
Часть 1: «82 – выпускники физфака 1952 года»: <https://yadi.sk/i/E9LK6onbcnaZx>
Часть 2: «Групповые фотографии»: <https://yadi.sk/i/NT5772ZWdDzr9>
- Краткий и полный варианты книги размещен на сайте физфака МГУ http://www.phys.msu.ru/rus/about/history/index.php?clear_cache=Y с отсылкой на адрес <https://drive.google.com/file/d/0B6JCzcKohI0INko1VjVqMk1vYm8/edit?usp=sharing>

По форме представления материала «Книга судеб» не является ни книгой, ни сколь либо систематизированной и обработанной коллекцией воспоминаний, ни переработанной составителем авторской версией накопленной информации. В нынешнем виде собрание представляет собой пофамильный архив с минимумом комментариев. И это интересный опыт. Выигрыш этой формы состоит в приобщении читателя непосредственно к первичной информации без ее потерь и искажений.

В основе книги-архива лежит собрание биографических данных однокурсников, судьбы которых удалось проследить составителям книги. Архив включает биографии выпускников (написанные собственноручно авторами или составителем по итогам бесед с потомками, друзьями и близкими), выписки из личных документов отделов кадров, а также извлечения из напечатанных воспоминаний, некрологов и сообщений ИНЕТА. Сопутствующая библиография превышает сотню источников.

Всего в 1952 году физфак окончили 330 студентов, из них около 60 фронтовиков и 60 девушек. По приему в 1947 году курс насчитывал 230 студентов, но на третьем году обучения к нему было добавлено около 100 студентов физических и физико-математических факультетов Воронежского, Ростовского, Свердловского (Уральского) и Саратовского университетов. В конце четвертого года на курс было переведено еще около 30 студентов с физико-технического факультета МГУ, в связи с его преобразованием в Физико-технический институт (ФИЗТЕХ).

Данные о выпускниках размещены в индивидуальных папках по фамилиям. Книга подробно иллюстрирована фотографиями и копиями книжных страниц и авторских свидетельств. Фотографии из папок дополнительно отдельно отображены в общие альбомы.

На сентябрь 2014 года книга-архив содержала информацию о судьбах 181 выпускника, а на февраль 2015 – о судьбах уже более 200 человек. Информация, к сожалению, не проверялась, не корректировалась и представлена в том виде, в котором она попала к составителю. Поэтому архив открыт для исправлений и дополнений, для чего читателям предлагается связаться с составителем – Романовским Юрием Михайловичем по e-mail: yuromanovsky@yandex.ru.

Информационный массив архива допускает множество сечений по самым разным социологическим направлениям. Сообщим главное:

- Никто из выпускников, кроме одного человека, не ушел из науки и вузов.
- Их ум, профессионализм, культура, их труд были всецело востребованы страной Советов.

Выпускниками открыты десятки научных и далее промышленных направлений, что отражено в приводимой ниже таблице, содержащей на 2014 год сведения о 172 выпускниках.

Таблица

Научные направления работы выпускников 1952 года

Названия научных направлений	Число выпускников, работавших по данной тематике	Процент выпускников, работавших по данной тематике
1 Атомная и ядерная физика. Термояд	60	34,8
2 Биофизика, Химическая физика	16	9,3
3 Космос. Астрофизика	15	8,7
4 Научное приборостроение. Разработка наукоемкого технологического оборудования и процессов на основе новейших достижений физики	20	11,6
5 Радиофизика. Радиотехника и электроника. Электронные и ионные приборы. Электронная и ионная оптика и микроскопия	38	22,1
6 Теоретическая физика. Матфизика. Математика	25	14,5
7 Техническая физика. (Акустика. Теплофизика. Гидродинамика. ЭВМ. Компьютерное моделирование и т.п.)	19	11,0
8 Физика земли, атмосферы, океана	21	12,2
9 Физика твердого тела. Полупроводниковые приборы. Магнетизм. Поверхность. Материалы	26	15,1
10 Лазеры. Оптика	19	11,0
11 Синергетика. Кибернетика	6	3,5
12 Преподавание	56	32,6
13 Нет информации о том, в каких научных направлениях работали	17	9,9

Примечание. Многие выпускники со временем изменяли направления своих научных исследований, некоторые работали одновременно в нескольких научных направлениях, почти 32% совмещали научную работу с преподаванием. Поэтому сумма процентов в последнем столбце таблицы превышает 100%, а число различных научных направлений, превышает 172!

Сухая статистика таблицы научных направлений и их разделов скрывает массу интереснейших фактов, связанных с биографиями. Очень было бы интересно проследить и судьбу потомков выпускников 1952. Очень многие из них пошли в науку по стопам родителей.

«Книга судеб» – это, по сути, исповедь наших старших коллег, отчет об их вкладе в создание сверхдержавы. В ней можно прочитать и о запуске первого лазера, и о создании лазерного локатора с радиусом действия 1500 км, и об испытаниях атомного, ядерного и сверхмощного ядерного оружия или, более скромно, о создании сплавов для мощных магнитов и корпусов ракет. Тексты невозможно пересказать. Они несут атмосферу творческого полета, восприятие которой вызывает искреннее восхищение и добрую зависть. Выпускникам 1952 года есть чем гордиться.

Многие из них преподавали в различных вузах страны. Только в МГУ из этого выпуска работали 17 профессоров. Следует отметить, что большинство преподавателей также вели научные исследования, а многие научные работники занимались и преподаванием в вузах. Некоторые выпускники 1952 года всю жизнь проработали в одном научном направлении, многие меняли свои интересы и переходили на новые научные направления, потому что сумма процентов в таблице по всем направлениям превышает 100%.

Деятельность выпускников была высоко оценена страной.

Члены Академии наук СССР и Лауреаты премий СССР

- *Действительные члены АН СССР (5 человек):* Гуревич А.В., Костомаров Д.П., Лазарев В.Б., Прокошкин Ю.Д., Русанов В.Д.
- *Члены-корреспонденты АН СССР (5 человек):* Карлов Н.В., Курдюмов С.П., Прозорова Л.А., Раутиан С.Г., Татарский В.И.
- *Лауреаты Ленинской, Государственной и других премий СССР (32 человека):* Аваев А.М., Ахманов С.А., Барсукова С.А., Богданкевич (Поршнева) Л.С., Борисов В.Т., Вакар (Халимон) Е.М., Веселаго В.Г., Гермогенова Т.А., Гурвич А.С., Гуревич А.В., Днестровский Ю.Н., Зарембо Л.К., Карлов Н.В., Кацнельсон А.А., Курдюмов С.П., Лазарев В.Б., Легошина (Птицына) Н.В., Матвеев А.Н., Мисежников Г.С., Муртазин М.У, Орлов Виктор, Орлов Юрий, Петраш Г.Г., Прокошкин Ю.Д., Русанов В.Д., Соколовская А.И., Стратонович Р.Л., Татарский В.И., Тверской В., Уваров В.Б., Фридкин В.М., Эльцин Г.И.

Обратим внимание на присутствие в списке пяти женщин. Это ли не иллюстрация реального гендерного равенства? Вот краткие рассказы о некоторых ярких судьбах женщин-ученых из этой книги.

Научное направление «Радиофизика»

Барсукова Софья Александровна родилась 25 ноября 1929 года в городе Копейске Челябинской области. Жизненный путь одаренной уралочки из глубинки для советских времен поистине хрестоматиен. В 1947 году она поступила в Уральский государственный университет на физический факультет. В 1950 году была переведена на физический факультет Московского государственного университета, который закончила в декабре 1952 года по кафедре распространения радиоволн и в 1953 году была направлена на работу в Московский научно-исследовательский институт министерства радиопромышленности СССР (НИЭМИ или Алмаз-Антей).

В НИЭМИ Софья Алексеевна работала начальником лаборатории, начальником крупного научно-исследовательского отдела, главным конструктором по техни-

ческому направлению, заместителем главного конструктора по большинству крупных разработок НИЭМИ (в том числе широко известных в мире систем ПВО «С300В» и «ТОР»), научным руководителем ряда научно-исследовательских работ. Она имеет большое количество публикаций, авторских свидетельств на изобретения и патентов, в том числе и в зарубежных странах. Она – кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Барсукова С.А. награждена Орденом Ленина, Орденом Трудового Красного Знамени. Ей присуждена Государственная премия СССР, почетное звание Заслуженный машиностроитель Российской Федерации, вручен знак «Почетный Радист СССР», ее имя занесено в энциклопедию «Лучшие люди России» (2002, т. 1, вып. 4).

Выпускница физфака МГУ 1952 года, ветеран труда С.А. Барсукова, проработав в НИЭМИ 55 лет, закончила трудовую деятельность в 2008 году. Софья Алексеевна была счастлива в браке с однокурсником Василием Александровичем Смирновым, за которого вышла замуж еще студенткой и прожила с ним 30 лет (вплоть до его кончины). Их сын Алексей Васильевич Смирнов успешно продолжает работу родителей.

Так что, читатель, когда ты увидишь на экране отечественные противоракетные комплексы и их антенны с фазированными решетками помяни добрым словом «уралочку», выпускницу физфака МГУ 1952 года и ее наследников в профессии.

Хочу представить еще двух однокурсниц Софьи Барсуковой. Такие замечательные и очень разные жизни!

Научное направление «Математическая физика»

Гермогенова Татьяна Анатольевна (10.04.1930–27.02.2005)¹. «Мать, Морозова (Гермогенова) Екатерина Андреевна (1899–1974) – детский врач, родом из села Дубасово (Владимирская обл.). Отец, Гермогенов Анатолий Васильевич (1895–1985), родом из села Куриловка (Ряжский р-н, Рязанская обл.), окончил в 1920 году физмат Московского университета. Как сын священника не был оставлен в университете. После войны работал редактором в Издательстве Иностранной литературы. У Тани была сестра, Гермогенова Ольга Анатольевна (1934–1988). Окончила физфак МГУ в конце 1950-х годов. Но это уже другая история.

Жили в коммунальной квартире (полторы комнаты с одним окном) на Якиманке. Дом звался Паньшевка или что-то в этом роде. Сейчас его уже нет, на этом месте стоит большой торговый дом. Окончила школу в 1947 году с золотой медалью. Это был второй год присуждения медалей. В том же году поступила на физфак МГУ. В университете вступила в комсомол. Училась отлично, без четверок. Была членом редакции стенгазеты «Советский Физик». Диплом делала у Евграфа Сергеевича Кузнецова. Он работал в МГУ и ИПМ. Аспирантуру проходила также у него. В 1953 году вышла замуж за однокурсника Днестровского Юрия Николаевича. Их дети – Наташа (1956) и Алексей (1965). После аспирантуры пошла на работу в ИПМ и это уже до конца жизни. Ходила много раз в походы: Алтай (1952), альплагерь на Кавказе (1953 – медовый месяц), Тянь-Шань (1954), Приполярный Урал (1955), Восточный Саян (1958), Прибайкалье (1959), Нижняя Волга (1960), Кавказ (1961), опять Алтай (1962), опять Восточный Саян (1963). Потом опять походы, с детьми и

¹По воспоминаниям супруга, Ю.Н. Днестровского.

без, на байдарках и пешком (до 1983). Позже – уже на машине.

Вся ее научная, трудовая жизнь прошла в ИПМ. Там защищала диссертации (1957 и 1972), там же и получала Государственную Премию (1987). Долгие годы была заведующим сектором. Среди ее учеников Оля Николаева и Леня Басс. В 1970–80-е годы объединяла многих людей, работавших в разных Институтах над проблемами распространения излучения в разных средах, над прямыми и обратными задачами. Любимым ее делом было искать асимптотические формулы для сложных задач, хотя разработка алгоритмов для решения этих задач на ЭВМ была ее основной специальностью. Небеса дали ей большой талант, и она считала, что своим трудом она лишь отдает долг.

Научная деятельность Т.А. Гермогеновой связана с решением физических, математических и расчетных проблем теории переноса излучения нейтронов в реакторах. Ее кандидатская диссертация (1957) была посвящена решению транспортных уравнений с сильно вытянутым сечением рассеяния. В 1962 году она доказала принцип максимума для линейных уравнений переноса излучения. Этот общий результат был использован ею, в частности, для доказательства сходимости разностных схем. Докторская диссертация (1972) была посвящена краевым задачам для транспортного уравнения и локальным свойствам их решений. Результаты, полученные Гермогеновой при математическом изучении разрешимости краевых задач, свойств гладкости и сингулярности решений в зависимости от геометрии среды и источников излучения, собраны в ее монографии «Локальные свойства решений транспортных уравнений» (1986). В эти же годы она руководит семинаром по решению прикладных задач (по закрытым темам) теории переноса с участием многих организаций. Затем она включается в решение прямых и обратных задач атмосферной оптики. Здесь она доказала, что множество решений задачи о поляризованном свете в представлении Стокса–Пуанкаре является конусом в соответствующем функциональном пространстве 4-х мерных вектор-функций. Это свойство в дальнейшем было использовано для доказательства неотрицательности матрицы рассеяния и для исследования характеристического уравнения, вытекающего из уравнения переноса для поляризованного света. Ей удалось построить множество асимптотических аппроксимаций для решений уравнений переноса в оптически толстой неоднородной среде конечных размеров. Некоторые из них используются для решения обратных атмосферных задач. Большое внимание она уделяла развитию численных методов в теории переноса. Под ее руководством были развиты 1D, 2D и 3D коды для решения задач переноса излучения на параллельных компьютерах. В 1987 году ей была вручена Государственная премия СССР за «Развитие математических методов теории переноса».

В девяностые годы начала осваивать дальние страны. В Стране Советов по характеру задач она была ограничена в связях с людьми за рубежом. После распада Союза успела установить связи со многими дальними учеными, которых она хорошо знала по работам. Техас, Пенсильвания – вот теперь адреса, куда шли ее письма, и откуда она получала не только приветы, но и идеи. В начале 1990-х успела там побывать несколько раз и много раз принимала гостей оттуда. В середине 1990-х, когда жизнь стала полегче, мы с ней побывали в Англии, Германии, Италии, Париже. Ну а дальше болезнь. Ее поведение во время болезни я только могу назвать героическим. Ни слова о жалости, ни слова о боли. Летом 2004 года мы с ней ездили в Питер, она – на Конференцию, а я – так. Она руководила там Секцией, и это требовало обычной непрерывной работы по согласованию всех со всеми. В Эрмитаж мы в этот раз не попали. Уже в ноябре на пределе сил она поехала в Обнинск опять на Конференцию,

к своим старым друзьям. Сделала там доклад и произнесла оптимистические тосты. 12 января 2005 я уехал в Англию, оставив ее на неделю одну. Она опять пошла на работу, но ее на этот раз прямо с работы увезли в больницу. Потом дома она держалась еще месяц, пытаясь садиться за стол и работать. Потом сил и на это уже не стало».

Научное направление «Геофизика»

*Русанова Наталья Владимировна*². «Родилась я 24 августа 1924 года в городе Киров (Вятская обл.) в семье математиков. Отец преподавал в вузе, а мама в школе. Два старших брата участвовали в Отечественной войне и также впоследствии стали математиками. В школу пошла в Вятке. Однако в начале войны жизнь изменилась – в Вятку из Москвы эвакуировали ряд учреждений и им отдали площади папиного института, а сам институт был переведен в райцентр, где отец и мать продолжали преподавать математику, а я оканчивала десятилетку. В 1944 году родители перевелись на работу в город Вольск (Саратовская обл.). В 1947 году я поехала в Москву сдавать экзамены на физический факультет МГУ. То, что принята по конкурсу на первый курс с предоставлением общежития, я узнала в Вольске. В извещении (эта интересная бумага сохранилась) было сказано, что я должна прибыть со своей подушкой, посудой и т.д. Во время учебы жила в общежитии на Стромынке с моими подругами, Галей Зайцевой, Майей Аверьяновой и позже с болгаркой Стойчевой. Увлекалась парусным спортом, ходила летом 1951 года в лодочный поход под парусами по озеру Селигер, по речке Селижаровке и далее по Волге до Ржева. Вместе с подругами окончила (1952) кафедру магнетизма. На распределении предложили ехать в Ленинград в Институт сверхвысоких частот, согласилась, так как там жили братья. Работа в Институте меня не увлекала. Зато рядом был Финский залив и яхты – это вам не подмосковные водоемы.

Случайно увидела объявление, что Академия наук и Институт земного магнетизма, ионосферы и радиоволн (ИЗМИРАН) готовит экспедицию на немагнитной шхуне «Заря». Решила, это – судьба. Подала заявление на работу в Питерский филиал этого института. В то время институтом руководил замечательный человек – Н.В. Пушков. Он взял меня в Институт, и с 1956 года я включилась в активную работу по созданию аппаратуры для «Зари». Для этого ездила в Троицк в сам ИЗМИРАН в командировку. В конце концов, оказалась в экипаже «Зари» вместе с восемью мужчинами, научными сотрудниками, и семнадцатью членами экипажа. В экипаже было всего три женщины. Мой отчет об экспедиции находится в музее в Калининграде³.

Вплоть до выхода на пенсию в 1984 году я проработала в Ленинградском отделе ИЗМИРАН. На «Заре» больше не ходила. Но разрабатывала аппаратуру для больших судов, типа «Седов». Немагнитная аппаратура теперь размещалась в специальных «гондолах», которые тянулись за кораблем на больших расстояниях от корпуса. В 1969 году, по настоянию начальства, защитила кандидатскую диссертацию».

Три женщины, три профессии, три судьбы взглянули на тебя, читатель, с этих страниц. В книге-архиве этих судеб около двухсот и каждая достойна изложения.

² Автобиография, записанная по мобильному телефону Ю.М. Романовским со слов Н.В. Русановой.

³ Полуторогодовое плавание (1957–1958) на «Заре» вокруг Земного шара подробно описано в книгах А. Юдович. Под парусами в XX веке: Плавание шхуны «Заря». Путевые записки. Худ. Б.А. Диодоров. М.: Географиздат, 1960. 176 с., илл. и Л.Г. Касьяненко, А.Н. Пушков. Магнитное поле, океан и мы. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 192 с., илл. (*Прим. ред.*).



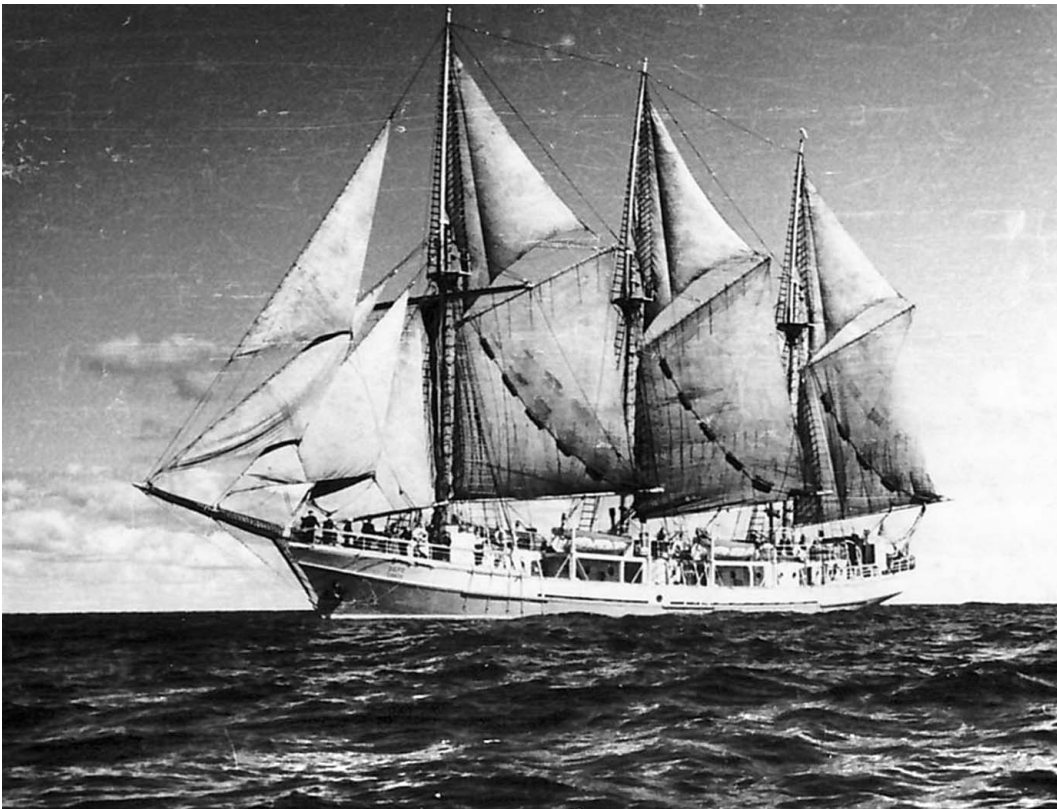
С.А. Барсукова



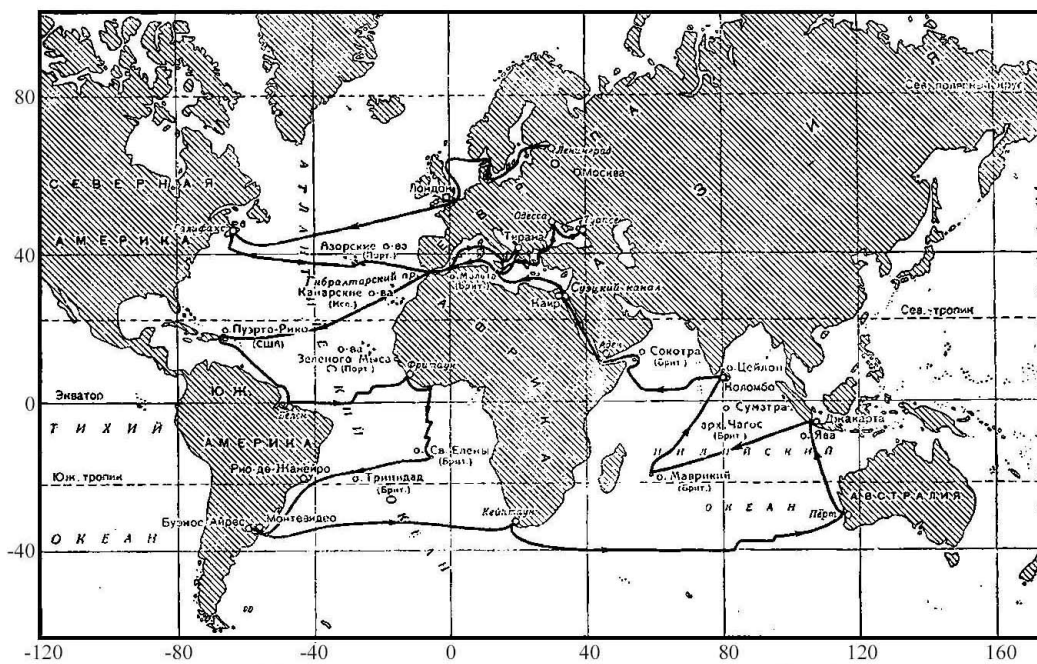
Т.А. Гермогенова



Наши однокурсники Михаил Цетлин и Наталья Русанова, 1951



Научно-исследовательская шхуна "Заря"



Маршрут научно-исследовательской шхуны "Заря"

Книга начинается предисловием, написанным ее составителем профессором физфака МГУ Ю.М. Романовским. В «неформальном стиле» описаны условия учебы курса с 1947 по 1952 год еще в старом здании МГУ на Моховой. Приведен список профессоров и преподавателей, которые преподавали на курсе. Отметим, что в разделе «ИСТОРИЯ» на сайте физического факультета можно скачать и прочесть десятки книг, посвященных ученым и педагогам физфака МГУ. В самой книге найдется и список мемуаров и научных монографий, написанных сокурсниками.

В заключение выразим надежду, что подобные книги-архивы будут использованы как источники для создания в вузах, наряду с памятными досками ветеранов войны, памятных досок создателей Советской сверхдержавы, достижения которых в подписях под фотографиями уже не будут скрыты за общими словами ныне ненужной секретности.

От имени и по просьбе составителя «Книги судеб», здесь необходимо выразить глубокую благодарность многим и многим людям, без которых было бы немислимо ее создание. Это, прежде всего, однокурснику – редактору книги Л.Б. Розенфельду, помощнику редактора М.Б. Салицкой, многим здравствующим однокурсникам и их близким. Неоценимую и всестороннюю помощь оказал в создании «Книги» «Союз выпускников физического факультета МГУ» и персонально Президент «Союза выпускников» декан физического факультета МГУ профессор Н.Н. Сысоев, руководитель сайта «Союза выпускников» профессор Н.С. Перов, зам. декана физфака профессор В.Н. Задков, работники отдела кадров физфака МГУ.

Поступила в редакцию 18.12.2014

ABOUT THE «BOOK OF DESTINIES» OF PHYSICS FACULTY MSU GRADUATING STUDENTS 1952

V. K. Novik

M.V. Lomonosov Moskow State University

This article comment experience of making electronic book-archives, that was composed by self-writing reminiscence of Physics Faculty MSU graduating students 1952. The general review presents contribution of the generation in creating the second world Superstate.

Keywords: Scientific direction, personal opinions, government projects.



Новик Виталий Константинович – родился в 1936 году, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник физического факультета МГУ. Лауреат Государственной премии СССР (1989), автор свыше 300 публикаций, включая 6 книг.

119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
E-mail: novikmp@orc.ru



Серия «Синергетика: От прошлого к будущему» № 24

ПУТЬ В СИНЕРГЕТИКУ:

Экскурс в десяти лекциях

Б. П. Безручко, А. А. Короновский, Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов

© Издательская группа URSS, 2014

© Коллектив авторов, 2005, 2014

© ЛЕНАНД, 2014

М.: ЛЕНАНД, 2015. 304 с.

ISBN 978-5-9710-1245-0

Книга посвящена одному из наиболее перспективных междисциплинарных подходов – теории самоорганизации, или синергетике. Известный физик и замечательный писатель Чарльз Сноу в середине XX века сетовал на опасную пропасть в науке, которая пролегла между естественно-научной и гуманитарной культурами. Одна из целей синергетики – перебросить мост через эту пропасть.

Понятия, идеи, концепции синергетики сейчас все шире используются в экономике и социологии, в политике и бизнесе, в психологии и государственном управлении, оказывая тем самым влияние на наше мировоззрение. Книга знакомит всех интересующихся и, прежде всего, представителей гуманитарного знания с естественно-научными корнями синергетики, с развитием и приложением этих идей в науках о человеке и обществе.

В основу книги положены курсы лекций, которые читались на социально-гуманитарном, философском, биологическом, геологическом факультетах и факультете компьютерных наук и информационных технологий Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского. Опыт авторов показывает, что материал книги успешно и с интересом осваивается и школьниками. Представленные лекции во многом соответствуют программе курса «Синергетика: Новое мировидение» для 11-го класса общеобразовательных школ, гимназий и лицеев, рекомендованного Министерством образования РФ. Поэтому круг читателей этой книги может быть достаточно широк.

Содержание

От редакции

Предисловие. Шпаргалка по проектированию будущего. *С. Миров*

Предисловие. Через тернии к звездам. *Г. Малинецкий*

Введение

Лекция первая

Что такое «синергетика»?

Смысл вложенный в Смысл, вложенный в название. Дата «крещения» синергетики как самостоятельного научного направления. Трудности признания синергетики. Дифференциация науки и синергетика. Как строится здание синергетики: фундамент (теория колебаний и волн, теория автоволн, теория бифуркаций и катастроф, теория

динамического хаоса, термодинамика открытых систем...), каркас (математика), инструменты (вычислительная техника, эксперименты, обобщения). Обстановка вокруг синергетики

Контрольные вопросы к первой лекции

Лекция вторая

Моделирование – универсальный инструмент синергетики (или что общего у груза на пружинке с зайцами и лисами)

Понятие модели и моделирования. Познавательная роль моделей. Какие бывают модели и как они рождаются. Особая роль математических моделей и чем это объясняется. Одинаковые модели явлений и процессов – общее, что находит синергетика в системах различной природы

• Понятие модели • Познавательная роль моделей • Какие бывают модели и как они рождаются • Особая роль математических моделей • В чем причина исключительной эффективности математики? • Что общего находит синергетика в системах различной природы?

Контрольные вопросы ко второй лекции

Лекция третья

Математические понятия, без которых не обойтись

Почему в нашем курсе много физики и математики. Характерные масштабы и масштабы наблюдения (масштабы процессов в физических и социальных системах; почему для изучения синергетики удобна физика). Численные значения характеризующих систему величин. Переменные и параметры. Функция; табличное, графическое и аналитическое представление. Динамический и статистический подходы к описанию объектов и явлений (детерминизм, случайность, непредсказуемость). Линейность и нелинейность. Линейность и нелинейность функций и уравнений. Принцип суперпозиции. Линии, поверхность, фрактал. Примеры фракталов. Фрактальная размерность

• Почему в нашем курсе много физики и математики? • Численные значения характеризующих систему величин • Переменные и параметры • Динамический и статистический подходы к описанию объектов и явлений • Линейность и нелинейность • Фракталы

Контрольные вопросы к третьей лекции

Лекция четвертая

Динамическая система

Динамическая система; задайте состояние и укажите оператор эволюции. Фазовая плоскость, фазовое пространство, изображающая точка, фазовая траектория. Динамические системы с дискретным временем: отображения, диаграмма Ламерея. Динамические системы с непрерывным временем: производная и скорость, обыкновенные дифференциальные уравнения, уравнения в частных производных. Динамические системы со сосредоточенными и распределенными параметрами

• Что такое «динамическая система» • Динамические системы с дискретным временем • Динамические системы с непрерывным временем • Распределенные системы

Контрольные вопросы к четвертой лекции

Лекция пятая

Колебания

Основные понятия и определения. Колебания маятника. Модель гармонического осциллятора и модель линейного осциллятора с затуханием. Основные характеристики колебаний (частота, период, амплитуда). Явление резонанса. Нелинейные колебания. Фазовая плоскость, фазовая траектория, аттракторы, репеллеры, фазовый портрет. Автоколебания: основные понятия, примеры автоколебательных систем различной природы. Хаотические автоколебания. Колебания в экономике и истории. Колебания климата на Земле. Колебания в химических, биологических и геофизических системах

- Основные понятия и определения теории колебаний
- Линейные колебания и их свойства
- Явление резонанса
- Нелинейные колебания
- Представление колебаний в фазовом пространстве
- Автоколебания и их свойства
- Примеры колебаний

Контрольные вопросы к пятой лекции

Лекция шестая

Волны

Что такое волна. Различные определения волны. Свойства волновых движений (перенос энергии, наличие импульса, образ и скорость волны, дисперсия). Волны на воде. Нелинейные волны. Простые и ударные волны. Уединенные волны (солитоны)

- Что такое волна?
- Свойства волн
- Волны на воде
- Нелинейные волны
- Ударные волны
- Уединенные волны (солитоны)

Контрольные вопросы к шестой лекции

Лекция седьмая

Примеры процессов самоорганизации в различных системах

Понятие структуры и паттерна. Свободные, вынужденные структуры. Автопаттерны. Статические структуры Тьюринга. Неустойчивость Тейлора. Ячейки Бенара. Рябь Фарадея. Вихри за движущимся объектом. Процессы самоорганизации в человеческом обществе

- Структуры Тьюринга
- Вихри Тейлора в течении Куэтта
- Ячейки Бенара
- Рябь Фарадея
- Вихри за движущимся объектом
- Процессы самоорганизации в человеческом обществе

Контрольные вопросы к седьмой лекции

Лекция восьмая

Бифуркации

Основные определения. Состояния равновесия. Устойчивость и неустойчивость. Мультистабильность. Что может происходить в динамической системе при малых изменениях управляющих параметров. Влияние малых флуктуаций в окрестности точки бифуркации

Контрольные вопросы к восьмой лекции

Лекция девятая

Клеточные автоматы

Клеточные автоматы. Игра «Жизнь» как простейшая модель для описания процессов структурообразования. Основные правила игры «Жизнь». Некоторые основные конфигурации игры «Жизнь». Искусственная жизнь (Artificial Life). Клеточные автоматы и моделирование динамики биологических популяций

- Что такое «клеточный автомат»?
- Искусственная жизнь
- Клеточные автоматы и моделирование динамики биологических популяций

Контрольные вопросы к девятой лекции

Лекция десятая

Динамический хаос

Как возникает случайность в динамической системе. Неустойчивость фазовых траекторий динамических систем и динамический хаос. Сценарии перехода к хаосу. Универсальность перехода к хаосу по Фейгенбауму. Развитая вихревая турбулентность: спектр Колмогорова–Обухова. Уравнение вязкой жидкости (уравнение Навье–Стокса) и одномерное отображение: опять сценарий Фейгенбаума? Переход к хаосу через перемежаемость и разрушение квазипериодических колебаний

- Как возникает случайность в динамической системе?
- Сценарии перехода к хаосу
- Другие сценарии возникновения хаоса: перемежаемость и разрушение квазипериодических колебаний

Контрольные вопросы к десятой лекции

Приложение А

Вступительное слово на конференции «Нелинейная динамика открытых систем в гуманитарных и общественных науках»

Приложение Б

Список рефератов по курсу «Синергетика»

Приложение В

Библиография избранных статей в журнале «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика», посвященных приложению методов синергетики в гуманитарных, экономических, биологических и других нефизических науках

Основная рекомендуемая литература

Предисловие

Через тернии к звездам

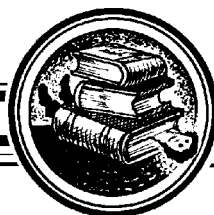
Мы живем в эпоху больших перемен. В мировой динамике, в технологиях в восприятии мира. Реальность быстро и необратимо меняется на наших глазах, Возможностей, которые открываются сейчас, не было в прошлом и, видимо, никогда не представится в будущем.

На что же можно опираться в эпоху перемен? Авторам этой книги, представляющим Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, нам в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и многим нашим коллегам очевидно, что опираться следует, прежде всего, на подходы, сработавшие раньше. Сработавшие при разработке и реализации крупных научно-технических проектов, выработке стратегий. На прикладную математику, компьютерные модели, алгоритмы прогноза и мониторинга, на научное мировоззрение.

Однако этого недостаточно. Строя и исследуя модели, мы должны упрощать реальность, отбрасывая одни факторы и процессы и сосредотачиваясь на других. На каких, нельзя сказать, не привлекая профессионалов в различных областях. Поэтому особенно важными становятся междисциплинарные подходы. Они позволяют разным специалистам – математикам и медикам, физикам и биологам, психологам и системным аналитикам – говорить на одном языке. Они помогают увидеть единство в разнообразии, ввести и в науку, и в общественное сознание несколько очень важных представлений, меняющих отношение к миру. Зачастую они помогают переходить от анализа к синтезу, решать проблему целостно и системно, не утопая в частностях.

Одним из наиболее глубоких и перспективных подходов, развивающихся в последнее десятилетие, представляется теория самоорганизации или синергетика. Эта замечательная книга, которую вы держите в руках, помогает начать знакомство с этим захватывающим предметом. Ее ценность, необычность, оригинальность заключается в том, что она доступна и школьникам, и студентам-гуманитариям, и всем, кто интересуется синергетикой. Чтобы начать путь, хватит знаний, не выходящих за пределы школьной программы. Удивительно, что 10 лекций позволяют обсудить так много. Прекрасно, что по небольшому пути, предлагаемому авторами, можно забраться на вершину, с которой видно так далеко.

*Председатель редколлегии Серии «Синергетика:
от прошлого к будущему» Г.Г. Малинецкий*



Серия «Синергетика: От прошлого к будущему» № 62

НАУКА О СЛОЖНОСТЯХ В ЛИЦАХ, ДАТАХ И СУДЬБАХ

Как закладывались основы синергетики: Пиршество духа и драма идей

Д. И. Трубецков

© Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012
М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 312 с.
ISBN 978-5-397-02793-9

Удивительные открытия в области нелинейной науки в последние десятилетия привлекли к ней большое внимание. Этот интерес в какой-то мере удовлетворяется многочисленными изданиями монографий, учебных пособий, научно-популярных книг – только в серии «Синергетика: От прошлого к будущему» Издательства URSS вышло более 60 книг. Лишь один вопрос остается практически неосвещенным – вопрос о возникновении нелинейной науки, развитии ее идей, о судьбах, порой трагических, ее создателей. Между тем особенно увлекает и интригует именно процесс становления нелинейной науки, динамика ее развития, вытеснение одних представлений другими, жизнь ее создателей – иными словами, история нелинейной науки.

В настоящей книге сделана попытка составить календарь важных событий, связанных с развитием нелинейной науки на фоне биографий ее создателей, начиная с тех времен, когда термина «нелинейная наука» еще не было. Математический аппарат книги прост: главным образом используется анализ размерностей.

Книга предназначена для студентов и аспирантов, изучающих историю естественных наук. Она также может быть полезной для учителей, школьников старших классов, преподавателей высшей школы и всех, кому интересна история науки.

Содержание

От редакции

Предисловие автора

Глава 1. 2004 год в датах нелинейной динамики

Литература к главе 1

Глава 2. 2005 год в датах нелинейной динамики

2.1. Созвездие гидродинамических дат. 2.1.1. Даниил Бернулли 2.1.2 Гидродинамика Эйлера и Навье–Стокса. Другие гидродинамические даты. 2.2. Созвездие фрактальных дат. 2.3. Даты, которые не имеют отношения к гидродинамике и фракталам, но важны для нелинейной динамики

Литература к главе 2

Глава 3. 2006 год в датах нелинейной динамики

3.1. Бенджамин Франклин – 300 лет со дня рождения. 3.1.1. Вместо введения. 3.1.2. Впереди времени и вне времени. 3.1.3. О некоторых электрических опытах, в том числе забавных. *Литература к разделу 3.1.* 3.2. «Электронные» даты как зеркало нелинейной науки. 3.2.1. Джозеф Джон Томсон – 150 лет со дня рождения. 3.2.2. Ирвинг Ленгмюр – 125 лет со дня рождения. 3.2.3. Ли де Форест. Триод. *Литература к разделам 3.2.1–3.2.3.* 3.2.4. Генератор Баркгаузена–Курца – первый электронный мазер. 3.2.5. Звездное скопление «магнетронных» дат. 3.2.6. Даты других важных событий, относящихся к нелинейной динамике. *Литература к разделам 3.2.4–3.2.6*

Глава 4. 2007 год в датах нелинейной динамики

4.1. Леонардо да Винчи как нелинейное явление. 4.2. Код да Винчи и числа Фибоначчи. 4.2.1. Что такое код да Винчи? 4.2.2. Геометрическое определение золотого сечения. 4.2.3. Замечательные тождества для золотой пропорции. 4.2.4. Золотая геометрическая прогрессия. 4.2.5. Представление золотой пропорции в виде цепной дроби. 4.2.6. Уравнения золотой пропорции n -й степени. 4.2.7. Золотое сечение в пирамиде Хеопса, в греческой культуре и в искусстве эпохи Возрождения. 4.2.8. Ряды Фибоначчи. 4.2.9. Вариации на тему Фибоначчи. 4.2.10. Вместо заключения. 4.3. Леонардо да Винчи и нелинейная наука. 4.3.1. Течения, струи, турбулентность. 4.3.2. Код да Винчи и современная нелинейная динамика. Разрушение квазипериодического движения. 4.3.3. Квазикристаллы и плитки Пенроуза. 4.3.4. Вместо заключения: Леонардо да Винчи «О своих трудах, талантах и знаниях». *Литература к разделам 4.1–4.3.* 4.4. Другие нелинейные даты 2007 года. *Литература к разделу 4.4*

Глава 5. 2008 год в датах нелинейной динамики

5.1. «Некруглые» даты 2008 года. *Литература к разделу 5.1.* 5.2. «Какие даты круглыми назвать?». Заключительные замечания. *Литература к разделу 5.2*

Глава 6. Синхронизация и конкуренция глазами классиков

6.1. Эволюция определений. 6.2. Христиан Гюйгенс. Первое наблюдение синхронизации. 6.3. Рэлей и синхронизация в органых трубах и камертонах. 6.4. Ван дер Поль, Андронов и ламповый генератор. Синхронизация автогенераторов в радиотехнике. 6.5. Конкуренция и сосуществование видов в экологии. 6.6. Фазовая синхронизация по Роберту Адлеру. 6.7. Вместо заключения

Литература к главе 6

Глава 7. Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц и три задачи теории колебаний и волн

7.1. Детские и юношеские годы Гельмгольца (1821–1848). 7.2. Гельмгольц – преподаватель анатомии в Академии художеств и профессор анатомии и физиологии в Кенигсберге (1848–1855). 7.3. 2000 год – 150 лет со дня опубликования статьи «Скорость распространения нервного возбуждения». 7.4. Офтальмоскоп. 7.5. Элементы теории автоволн в средах с восстановлением. 7.6. Аксиоматическая модель Винера–Розенблюта. Ревербератор и ведущий центр. 7.7. Гельмгольц – профессор анатомии и физиологии в Бонне (1855–1858) и профессор физиологии в Гейдельберге (1858–1871). 7.8. Резонатор Гельмгольца. 7.9. Неустойчивость Гельмгольца. 7.10. Последние годы жизни (1871–1893)

Литература к главе 7

Заключение

Предисловие автора

...История науки не может не интересовать ученых-естественников: ученый находит в ней ... многочисленные уроки и, умудренный собственным опытом, он может лучше, чем кто-либо иной, истолковать со знанием дела эти уроки.

Луи де Бройль

В последние годы в университеты возвращается преподавание истории физики, правда, в виде части весьма широкого курса «История и методология науки», в связи с чем книга может быть полезна при изучении этого курса¹. В ней сделана попытка рассказать о великих, радостных и печальных событиях, связанных с развитием нелинейной динамики, и событиях из жизни ее создателей со времен, когда термина «нелинейная динамика» еще не было. Разумеется, выбор событий и героев, а также число выделенных дат и внимание, уделенное разным персонажам, на совести автора книги.

Календарному стилю изложения событий нелинейной динамики предшествовали работы автора, написанные в ином стиле. Однако решено было включить в книгу и их: они насыщены описанием и драм идей, и драм людей.

Поскольку библиографический список весьма велик, он разделен на списки к главам и разделам глав, а в некоторых случаях и к подразделам, объединенным по смыслу.

В каждой строке книги незримо присутствует, увы, покойный, друг автора Юлий Александрович Данилов, который сделал необычайно много для популяризации идей нелинейной динамики в нашей стране. Он не только знал историю науки, но и умел блистательно писать и рассказывать о ней. Для него и с ним мир науки был поистине прекрасным. Юлий Александрович жил в нем вместе с героями, злодеями и конформистами науки, по-разному создающими ее историю². Его влияние на автора в смысле интереса к истории науки неоценимо...

Одним из героев книги стал Бенджамин Франклин, который очень гордился изданием знаменитого Календаря, ставшего популярным во всем мире и принесшего пользу просвещению во многих странах. Не претендуя на мировую славу и, тем более, не сравнивая себя с великим Ученым, Человеком, Просветителем, автор надеется, что и этот календарь принесет пользу всем интересующимся историей науки и, в первую очередь, историей нелинейной динамики.

¹В 2008/9 учебном году лекции, соответствующие содержанию книги, были прочитаны автором в Саратовском государственном университете на факультете нелинейных процессов магистрант-радиофизикам последнего года обучения.

²См. книгу С.Э. Шноля «Герои, злодеи, конформисты российской науки», написанную применительно к биологии и биологам (3-е изд. М.: URSS, 2012. 720 с., серия «Наука в СССР. Через тернии к звездам»).