



ЛЕКЦИИ

2-ой Международной конференции
с элементами научной школы

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

*Тамбов,
22–24 апреля 2015 года*

ЛЕКЦИИ

2-ой Международной конференции
с элементами научной школы

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

*Тамбов,
22–24 апреля 2015 года*

УДК 658.26
ББК 31.3
Л43

*Рекомендовано к изданию
научно-техническим советом ФГБОУ ВПО «ТГТУ».*

*2-я Международная конференция с элементами научной школы проведена
при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований
(грант РФФИ № 15-08-20162 Г).*

Редакционная коллегия:

Т.И. Чернышова – *ответственный редактор,*
С.Н. Баршутин – *зам. ответственного редактора,*
С.П. Москвитин, Д.Ю. Муромцев, А.П. Пудовкин,
Н.П. Жуков, А.В. Кобелев, С.В. Фролов.

Л43 Лекции 2-ой Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах»: Тамбов, 22–24 апреля 2015 г. / Министерство образования и науки Российской Федерации; Тамбовский государственный технический университет; Т.И. Чернышова, отв. ред. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2015. – 100 с.

В сборник включены лекции ведущих ученых в соответствии с тематикой 2-ой международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах».

Предназначен для преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов и молодых ученых с целью использования в научно-исследовательской работе и учебной деятельности.

© Тамбовский государственный
технический университет, 2015
© Авторы статей, 2015
© Издательство Першина Р.В., 2015

ISBN 978-5-91253-611-3

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1

Зинченко Л.А., Шахнов В.А.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАНОИНЖЕНЕРИИ 4

Лекция 2

Мироненко И.Г., Иванов А.А.

НАНОКОМПОЗИТНЫЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛЁНКИ

В УСТРОЙСТВАХ СВЧ..... 16

Лекция 3

Патрикеев Л. Н.

АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА. ОТ КРЕМНИЯ

К УГЛЕРОДУ 25

Лекция 4

Сахаров Ю.С.

АДАПТИВНОЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ НА

ОСНОВЕ СУБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОХОДА ПРИ

ПРОЕКТИРОВАНИИ 41

Лекция 5

Крюков Ю.А.

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СЕТЬ ПЕРЕДАЧИ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ДАННЫХ 49

Лекция 6

Бородуля В. А., Виноградов Л. М., Гребеньков А. Ж., Михайлов А. А.

РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ

МЕЛКОДИСПЕРСНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

КАРБОТЕРМИЧЕСКИМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ КРЕМНЕЗЁМА В

РЕАКТОРЕ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ 60

Лекция 7

Шпиганович А.Н.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ 74

Лекция 8

Качанов А.Н., Коренков Д.А.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КАМЕР

ДЛЯ ВАКУУМНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СУШКИ 84

Лекция 9

Liepsch D.

INTRODUCTION TO BIOFLUID MECHANICS 92

Зинченко Л.А., Шахнов В.А.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАНОИНЖЕНЕРИИ

*МГТУ им. Н. Э. Баумана
lzinchenko@bmstu.ru*

Аннотация

Обсуждены особенности применения информационных технологий при решении различных задач нанотехнологий. Показано, что использование высокопроизводительных вычислений позволяет значительно упростить решение задач нанотехнологий. Обсуждаются вопросы обработки результатов моделирования и анализа полученных данных. Показано, что применение методов искусственного интеллекта позволяет формализовать извлечение и представление знаний в области нанотехнологий.

Введение

Информация является одним из основных понятий формализованного отражения объективной реальности. При этом понятие информации тесно связано с понятием материи и энергии. Неоднородности распределения материи и энергии хранят и передают информацию.

Учет взаимосвязи между физическими (волновая функция, масса, энергия и т. п.) и информационными характеристиками (бит, информационная энтропия, пропускная способность канала связи и т.п.) объекта особенно важны при решении задач нанотехнологий в связи со значительным влиянием физических явлений на наномасштабе.

Нанотехнология (англ. Nanoengineering) [1] - инженерная деятельность человека, связанная с наномасштабными объектами и с объектами, характеризующимися размерными рядами в десятки или единицы нанометров, создающимися методами нанотехнологий.

Переход от классического мира макроскопической физики к квантовому миру требует использования новых подходов к сбору, хранению и передаче информации. Модернизация понятия вычислимости [2] позволила перейти от эвристического тезиса Черча-Тьюринга к тезису Черча-Тьюринга-Дойча (известный еще как сильный тезис Черча-Тьюринга), базирующемуся на физических явлениях и корректно отражающих фундаментальное свойство информации как

одной из характеристик физической системы. Переход от бинарной системы представления информации, используемой в классических компьютерах, к квантовым вычислениям позволяет преодолеть ряд принципиальных проблем при решении задач наноинженерии. Однако в настоящее время квантовые компьютеры находятся на стадии разработки и в инженерной деятельности основным устройством для хранения, передачи и обработки информации являются классические компьютеры.

Еще одной важной проблемой является ограниченность визуальных возможностей человека при работе с нанобъектами. В связи с этим при проектировании объектов наномира с использованием классических инженерных подходов происходит нарушение связей в треугольнике Фреге [3]. Как следствие, описываемое явление наномира не может быть однозначно определено на когнитивном уровне. Традиционным решением этой проблемы является переход к использованию моделей различных уровней представления наномира, что позволяет восстановить утраченные связи в треугольнике Фреге. Особенно это характерно для инженерных приложений при решении различных задач проектирования. Широкое применение систем визуализации нанобъектов позволяет конструировать виртуальные модели наносистем, которые уже могут быть восприняты и правильно истолкованы инженером в процессе проектирования.

1. Основные понятия и определения наноинформационных технологий

Потребности дальнейшего эффективного развития нанотехнологий и, в частности, наноинженерии, привели к формированию нового направления в области информационных технологий – наноинформационным технологиям [4]. Наноинформационные технологии (англ. Nanoinformatics) – область знаний, связанная с применением информационных подходов на основе использования классических компьютеров в нанотехнологиях. Она включает накопление информации, связанной с нанотехнологиями, и разработку средств, позволяющих использовать эту информацию эффективно.

Наноинформационные технологии находятся на стыке двух научных направлений: информатики и нанотехнологий (рис. 1). При этом они не являются простой частью информационных технологий или нанотехнологий. Взаимное влияние информационных технологий и нанотехнологий привело к формированию нового направления, включающего в себя элементы информационных технологий и нано-

технологий и стимулирующему дальнейшее развитие как информационных технологий, так и нанотехнологий.

В настоящее время наноинформационные технологии включают в себя 4 основные раздела [5]:

- хранение, обработка и управление данными и знаниями, полученными в области нанотехнологий;
- моделирование наноструктур, наноприборов и наносистем;
- проектирование наносистем;
- обмен данными и знаниями между различными пользователями, проводящими исследования в области нанотехнологий.

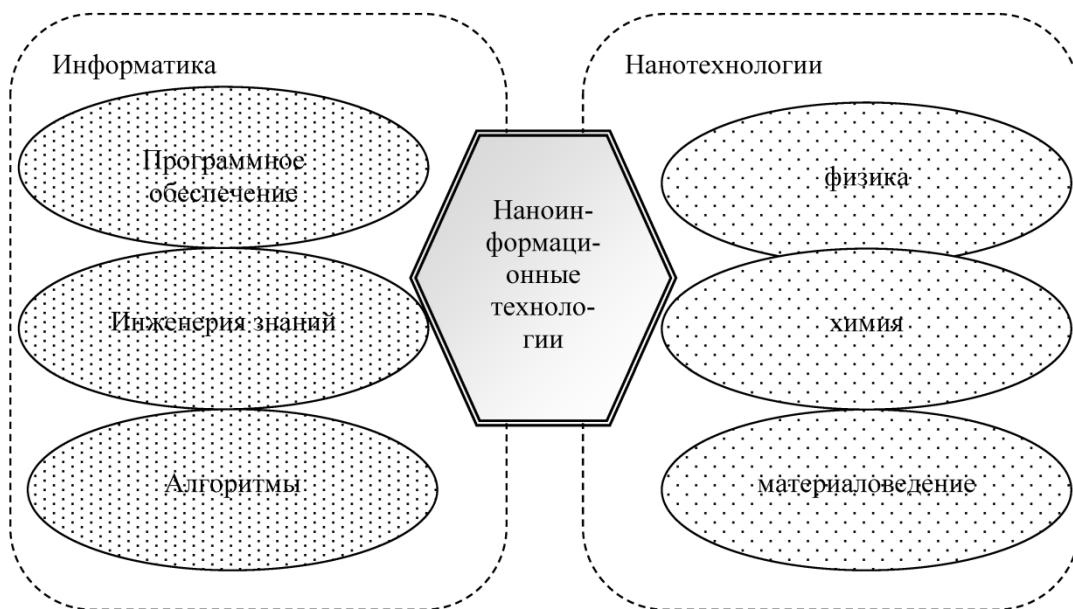


Рис. 1. Наноинформационные технологии

2. Моделирование в наноинженерии

Выбор адекватной модели наносистемы является нетривиальной задачей даже в простейших случаях. Использование точных моделей наносистем приводит к недопустимо большим вычислительным затратам при их проектировании. Использование упрощенных моделей может привести к нахождению неэффективных или даже некорректных проектных решений.

В процессе проектирования традиционно используются: теоретический анализ, экспериментальные исследования и моделирование. Применительно к области наноинженерии применение первых из двух указанных подходов связано с большими сложностями.

При моделировании наносистем используются модели всех уровней иерархии: классические, полуклассические и квантовомеха-

нические. Физические ограничения классического компьютера ограничивают применение квантомеханических моделей при моделировании наносистем большой размерности [9].

Необходимо отметить, что в настоящее время все большее применение находят модели с использованием квантовомеханической коррекции. Они позволяют, с одной стороны, обеспечить достаточную точность вычислений, с другой стороны, не требуют значительных вычислительных затрат.

Одним из способов решения проблемы больших вычислительных затрат при решении задач наноинженерии является использование высокопроизводительных вычислительных систем. С точки зрения авторов, в наноинженерии наибольшее применение могут найти компьютеры с многоядерными процессорами, кластеры и графические процессоры GPU. С одной стороны, они используют достаточно простое программное обеспечение, с другой, позволяют уменьшить временные затраты. Однако применение этих вычислительных систем требует значительной модернизации существующего алгоритмического и программного обеспечения. Это объясняется тем, что не все алгоритмы могут быть успешно реализованы на параллельных вычислительных системах. Использование алгоритмов, которые являются эффективными для последовательных вычислительных систем, может привести даже к повышению вычислительных затрат при их реализации на параллельных вычислительных системах.

Разработка новых, принципиально новых параллельных алгоритмов для решения задач наноинженерии ведется в двух направлениях. Первое направление ориентировано на максимальный учет особенностей конкретной вычислительной системы, на которой будет эксплуатироваться разрабатываемая программная система. Пример удачного применения этого подхода является комплекс QBox [10]. Это программное обеспечение было разработано специально для последующего применения на суперкомпьютере IBM Blue Gene/L, содержащего 131072 процессора. Однако при разработке были выбраны алгоритмы, отличающиеся кубической вычислительной сложностью.

В связи с этим перспективным также представляется разработка принципиально новых алгоритмов для решения задач наноинженерии, отличающихся линейно или квадратичной вычислительной сложностью. Удачным примером такого подхода является разработка специального программного обеспечения MGmol [11], отличающегося линейной вычислительной сложностью алгоритма. На рис. 2 приведены графики временных затрат при решении аналогичных задач в пакете Qbox и пакете MGmol [11]. Здесь t – вычислительные затраты на одну итерацию в секундах, N – число молекул воды.

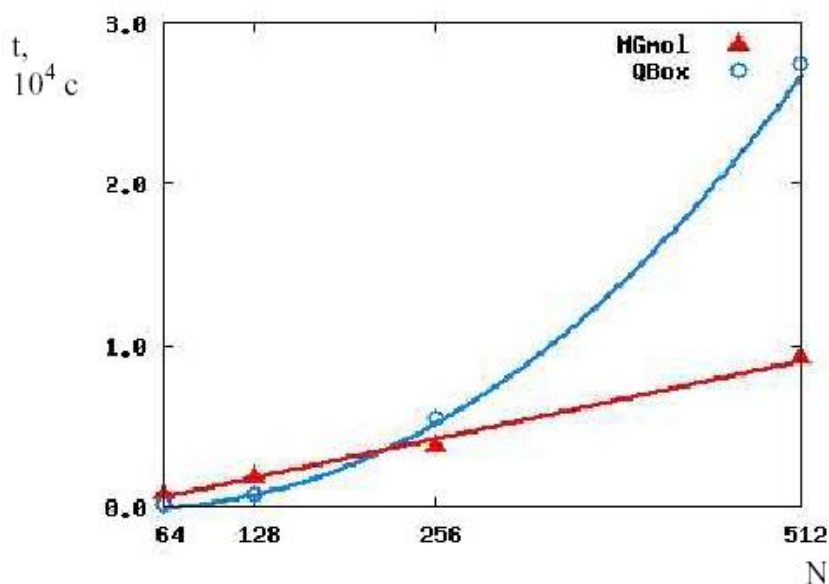


Рис. 2. Графики, характеризующие вычислительную сложность алгоритмов, использованных в программном обеспечении Qbox и MGmol [11].

Необходимо отметить, что аналитические модели практически не используются в нанотехнологиях. Основное распространение получили численные модели, получаемые на основе применения численных методов решения уравнений. Как следствие этого, результатом моделирования наносистем в основном являются наборы численных данных, которые затем должны быть каким-то образом обработаны для извлечения информации. Однако для принятия решения при проектировании полученная информация должна быть обработана и представлена в виде совокупности знаний (учебников, стандартов, инструкций и т. п.).

Математические модели, используемые при выполнении анализа характеристик наносистем, являются сложными для практического применения и вызывают значительные затруднения у инженера-проектировщика. Широкое использование систем автоматизации проектирования позволяет в значительной мере снизить вычислительные затраты, однако приводит к уже указанному выше нарушению связей в треугольнике Фреге в связи с невозможностью оценки человеческим мозгом столь большого объема информации. Использование традиционных для инженера-проектировщика методов анализа влияния того или иного параметра на основе используемой аналитической модели на технические характеристики проектируемого устройства оказывается мало пригодными в связи с применением численных моделей при моделировании наносистем, что приводит к необходимости использования других методов представления данных, полученной при моделировании.

При разработке инновационных продуктов в нанотехнологиях на первый план выходит алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее формализовать процедуру обработки большого объема информации и обеспечить понимание инженером процесса поиска решения.

3. Визуализация и анализ данных в нанотехнологиях

В классическом подходе для анализа результатов моделирования инженером использовались средства визуализации как самые простейшие (графики, диаграммы), так и более сложные. Одним из наиболее популярных подходов является использование стандартных широко распространенных пакетов, например, MATLAB, для визуализации результатов.

Необходимо отметить, что задачи нанотехнологии отличаются многомерностью данных, сложной, неоднородной структурой и большим объемом. При этом результаты моделирования могут оказаться как упорядоченными, так и гетерогенными. На рис. 3 приведены примеры конечно-элементных моделей, которые были использованы при проведении авторами исследований в области разработки микрооптоэлектромеханических систем. Анализируя приведенные модели, несложно убедиться, что использованные сеточные модели являются произвольными, что затрудняет обработку результатов, полученных на их основе. Это приводит к необходимости использования специализированных систем визуализации данных в нанотехнологии.

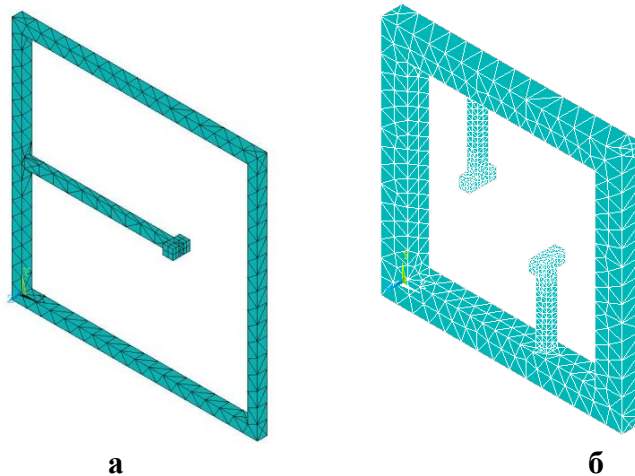


Рис. 3. Конечно-элементные модели, использованные при моделировании микрооптоэлектромеханических систем.

На рис. 4 приведен пример применения различных техник визуализации, использованных при проектировании микрооптоэлектромеханических систем. На рис. 4а показан пример визуализации в про-

граммном комплексе ANSYS [1] результатов моделирования с использованием изолиний, на рис. 4б – с использованием векторов.

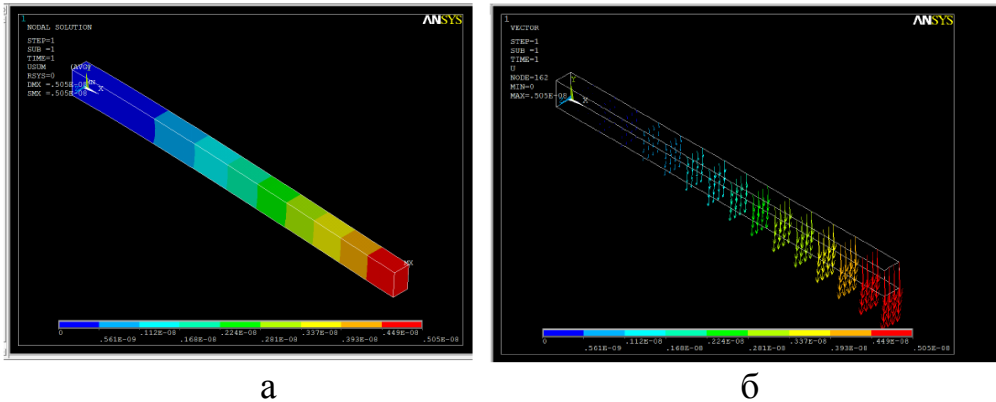


Рис. 4. Примеры визуализации результатов моделирования микрооптоэлектромеханических систем

При решении стандартных инженерных задач необходимо исследование влияния изменения в заданном диапазоне различных параметров системы, например, длины, свойств материала, температуры и т.п. Это приводит к необходимости накопления больших массивов данных, которые невозможно проанализировать традиционными методами, т.к. файлы с полученными результатами моделирования отличаются большим размером. Требование сохранения высокого качества и отображения большого количества деталей требует значительных вычислительных ресурсов для визуализации результатов моделирования задач наноинженерии.

Для решения этой проблемы существуют различные подходы. Одним из возможных решений является использование дисплеев большого формата, проекционных стен и т.п. Однако даже с использованием новейших дисплеев возможен только качественный анализ полученных результатов, особенно в режиме реального времени.

Другой подход базируется на применении суперкомпьютеров не только при моделировании, но и при визуализации результатов. Использование суперкомпьютеров наиболее важно при необходимости визуализации результатов в режиме реального времени, например, в различных приложениях бионаноинженерии. В связи с этим задачи визуализации в наноинженерии могут быть подразделены на три различные задачи.

Первая задача сводится к визуализации уже полученных результатов моделирования. Эта задача в настоящее время хорошо теоретически проработана и применяется во многих промышленных САПР [1].

Другая задача состоит в визуализации текущего состояния процесса вычисления и требует использования соответствующих вычислительных ресурсов.

При решении частных задач наноинженерии, например, исследовании стационарных (установившихся) процессов, также необходимо отслеживать историю процесса моделирования с некоторого времени. Таким образом, третья задача визуализации заключается в возможности указать требуемый диапазон визуализации данных.

Одной из наиболее распространенных библиотек для визуализации является VTK (The Visualization Toolkit) [12] – свободно распространяемая библиотека C++ классов для визуализации. Визуализация базируется на data flow парадигме, что позволяет использовать эту библиотеку для различных данных. Перспективным также представляется подход, базирующийся на использовании графических процессоров (GPU), например, технологии CUDA [13]. Библиотека NanoVIS [14] является примером специализированной библиотеки, разработанной для визуализации различных задач наноинженерии. На рис. 5 показан пример визуализации при моделировании квантовых точек, выполненной с использованием библиотеки NanoVIS.

Все большее применение в наноинженерии находят визуализация с использованием удаленного доступа. В работе [14] показано, что эффективным способом визуализации в наноинженерии является использование комбинации удаленного доступа, визуализации потоков и визуализации задач молекулярной динамики. Необходимо отметить, что в зависимости от приложения могут быть использованы как библиотеки для визуализации общего назначения, так и библиотеки, специально разработанные для визуализации наноэффектов.

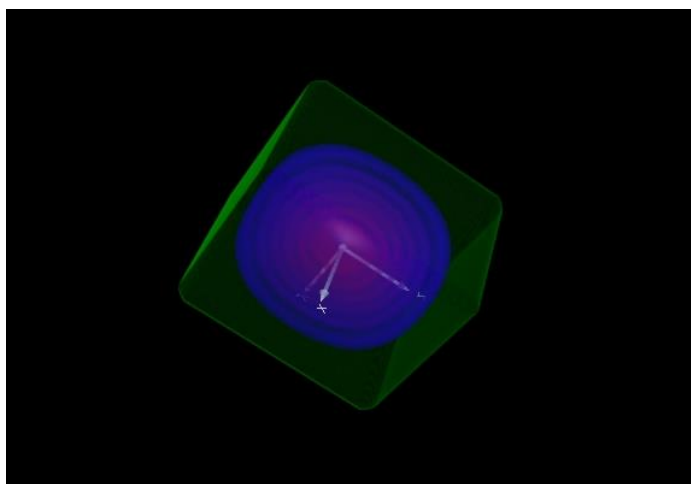


Рис. 5. Пример визуализации при моделировании квантовой точки с использованием библиотеки NanoVIS.

В работе [5] отмечается, что эффективные исследования в области нанотехнологий на текущем этапе невозможны без применения одного из разделов искусственного интеллекта - интеллектуального анализа данных (data mining) [15] как еще одного возможного подхода к обработке данных большой размерности. Широкое использование суперкомпьютеров при решении различных задач наноинженерии приводит к накоплению громадных объемов информации, которая затем должна быть проанализирована инженером для принятия того или иного проектного решения и должна быть извлечена информация, наиболее ценная для принятия того или иного решения. В частности, в ходе выполнения моделирования микрооптоэлектромеханических систем и распределенных микросистем авторам статьи приходилось сталкиваться с необходимостью обработки результатов моделирования с общим объемом свыше одного терабайта, которые хранились в тысячах различных файлов. Визуализация столь больших объемов данных приводит к невозможности выделения трендов и принятия грамотного решения инженером-проектировщиком и требует использование специальных методов интеллектуального анализа данных.

Для обработки данных могут быть использованы различные подходы интеллектуального анализа данных. Перспективными представляются подходы с применением нечеткой логики, нейронных сетей [16], решающих деревьев и вейвлет-анализа [15]. Кластеризация областей, представляющих интерес среди всего множества имеющихся данных, также является перспективной для различных задач наноинженерии.

Особенно важен интеллектуальный анализ данных при проверке корректности результатов моделирования и эксперимента. Сравнение больших массивов данных может быть выполнено с использованием технологий интеллектуального анализа данных за существенно меньшее время по сравнению с ручной проверкой. В работе [17] рассмотрены вопросы интеллектуального анализа данных в бионаноинженерии. Для проведения поиска информации при изучении взаимодействия клетки и подложки предложено использовать следующие метрики: размер наночастицы; расстояние между наночастицами; высота наночастицы.

В работе [18] с использованием техники data mining был выполнен анализ тенденций в области нанотехнологий. Применение информационных технологий позволило установить тренды в области нанотехнологий для различных геоэкономических областей.

Отметим, что каждый из рассмотренных выше подходов к визуализации и анализу данных имеет свои достоинства и недостатки и может быть применен при решении различных задач наноинженерии.

3. Представление знаний в наноинженерии

Развитие информационных технологий позволило разработать принципиально новые подходы к систематизации и классификации информации и получению и хранению знаний.

Традиционно накопление знаний шло по пути выработки определений тех или иных понятий и затем формирования на их основе некоторой совокупности определений в виде словаря предметной области. Для поиска информации использовалась первая буква ключевого слова. При этом ссылки между взаимосвязанными понятиями устанавливались путем ссылки на связанное понятие, которое затем вручную надо было искать в словаре также по первой букве. Подобная система классификации привела к созданию громоздких систем хранения информации, что приводит к значительным временным затратам на поиск нужной информации. При реализации этого подхода на вычислительных системах потребовалась разработка довольно сложных алгоритмов обработки информации и создание больших центров хранения информации.

Развитие теории искусственного интеллекта привело к разработке принципиально нового подхода к представлению знаний – инженерии знаний. Модели хранения знаний, как например, онтологии, концептуальные карты и др. [19] позволяют обеспечить другой уровень информационного обеспечения наноинженерии и значительно повысить эффективность поиска информации за счет использования визуальных компонентов и наличия связей между различными сущностями.

Под моделью онтологии понимается упорядоченная тройка вида [19]

$$O = \langle A, B, C \rangle \quad (1)$$

где A – множество понятий (сущностей, концептов), используемых в предметной области $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$; B – множество связей между понятиями; C – множество функций интерпретации, заданных на множествах A и B .

Использование интерпретации позволяет обеспечить однозначное и корректное толкование знания в формализованном виде.

При построении корректной онтологии для выбора множества сущностей используются только сортирующие понятия. Для сохранения физической корректности, с точки зрения авторов, при выборе сортирующих свойств, учитывая гетерогенность информации в наноинженерии, могут быть использованы как физические, так и информационные характеристики физической системы. Однако для построения корректной онтологии в наноинженерии задание связей типа часть-целое допустимо только для объектов, относящихся к одному и тому же физическому или информационному понятию.

При построении базы знаний по технологиям микро- и наносистем в качестве строгого сортирующего свойства понятий были выбраны физические эффекты, определяющие энергетические процессы в искомом устройстве. Это может быть объяснено тем, что энергия как скалярная физическая величина является единой мерой различных форм материи и единой мерой перехода материи из одних форм в другие. Таким образом, выбор энергетических характеристик позволяет охватить всю предметную область технологий микро- и наносистем и обеспечить построение онтологической модели, имеющей строгий физический смысл.

Необходимо отметить, что выбор строгого сортирующего свойства зависит от инженера по знаниям и может быть различным при решении различных задач наноинженерии.

Заключение

В статье рассмотрены возможные применения наноинформационных технологий. Ограниченный объем статьи не позволяет охватить многие важные аспекты, поэтому авторы ограничились рассмотрением вопросов, связанных с получением данных на основе моделирования физических эффектов в нанобъектах, обработке этих данных и использованию методов инженерии знаний при решении различных задач наноинженерии.

В ходе выполнения Федеральной Целевой программы «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации» на 2008-2011 годы» накоплено достаточно большое количество гетерогенных данных по характеристикам, свойствам наносистем, программному обеспечению и т.д. С точки зрения авторов, дальнейшее эффективное развитие нанотехнологий невозможно без дальнейшей целенаправленной работы по систематизации имеющихся данных в виде баз данных, онтологий и т.д. Необходимо отметить, что на важность проведения исследований в этой области обращается внимание также и в отчете по развитию Национальной нанотехнологической инициативы в США [20]. Одна из 10 рекомендаций была сформулирована следующим образом: «Широкая поддержка распространения и доступности новой информации о свойствах наноматериалов, доступной для общего использования».

В заключение необходимо отметить, что переход к 4-й парадигме научных исследований [7] в наноинженерии невозможен без специальных подходов, позволяющих быстро выполнить поиск и анализ данных, их визуализацию, а также обеспечить механизмы эффективного поиска и обмена информацией и ее распространения. Использо-

вание традиционных методов исследований приведет к отставанию исследователей от общемирового уровня.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (грант НШ-1152.2012.9), грантов РФФИ 10-07-00171-а и 13-07-00073-а.

Библиографический список

1. Библиотека нанотехнологий. Под ред. Шахнова В.А. Москва, 2008.
2. Deutsch D. Quantum theory, the Church-Turing principle and the Universal Quantum Computer. Proceedings of the Royal Society of London. 1985, pp. 97-117.
3. Фреге Г. Смысл и денотат // Семиотика и информатика. –М.: ВИНТИ, 1977. – Вып. 8. – С. 181–210.
4. Nanoinformatics 2020 Roadmap.
5. Шахнов В.А., Зинченко Л.А. Нанотехнологическая информатика – направление развития информационных технологий // Информационные технологии и вычислительные системы. 2012. №3. С. 84-92.
6. Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology. Под ред. M. Rieth, W. Schommers. American Scientific Publishers, 2006.
7. Шахнов В.А., Зинченко Л.А. Особенности математического моделирования в задачах проектирования наносистем. Информационные технологии и вычислительные системы, №4, 2009. с. 84-92.
8. von Baeyer H. C. Information: The New Language of Science. Harvard University Press, 2004.
9. Feynman R. Simulating physics with computers. International Journal of Theoretical Physics, 21, 1982, pp. 467-488.
10. <https://computation.llnl.gov/casc/Qbox>
11. Fattbert J.-L., Gygi F. Linear scaling first-principles molecular dynamics with plane-waves accuracy. Phys. Rev. B, 2006, Vol. 73, pp. 115124.
12. <http://www.vtk.org/>
13. <https://developer.nvidia.com/cuda-gpus>
14. Qiao W., McLennan M., Kennel R. et al. Hub-based Simulation and Graphics Hardware Accelerated Visualization for Nanotechnology Applications. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, Vol. 12, p. 1061-1068.
15. Han J., Kamber M. Data Mining: Concepts and Techniques. Morgan Kaufmann Publishers, 2000. 550 p.
16. Бионические информационные системы и их применение/ под ред. Л.А.Зинченко, В.М.Курейчика, В.Г.Редько. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. - 288 с.
17. Varde A., Liang J., Rundensteiner E. et al. Mining Images of Material Nanostructure Data. Proc. ICDCIT 2006.
18. Coccia M. Evolutionary dynamics and scientific flows of nanotechnology research across geo-economic areas. CERIS Working Paper , 2011, №1, 27 с.
19. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. - С-Пб.: Питер, 2000. - 384 с.
20. Report to the President and Congress on the Third Assessment of the National Nanotechnology Initiative, March 12, 2010. (доступен по адресу www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nni-report.pdf)

Мироненко И.Г., Иванов А.А.

НАНОКОМПОЗИТНЫЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛЁНКИ В УСТРОЙСТВАХ СВЧ

*Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"*

Аннотация

Обоснована возможность создания щелевой линии передачи с температурной стабилизацией фазовой скорости на основе нанокompозитных сегнетоэлектрических пленок и применения ее в качестве базового элемента СВЧ техники. Выполнен электродинамический анализ щелевой многослойной структуры в полноволновом представлении. Представлены численные результаты расчета.

Сегнетоэлектрические пленки, осажденные на диэлектрическую подложку могут найти применение в устройствах сверх- и крайне-высоких частот с электрически перестраиваемыми амплитудно- и фазо-частотными характеристиками. Одним из возможных видов устройств подобного типа является щелевая линия, образованная тонкими металлическими электродами, разделенными узкой щелью, на поверхности сегнетоэлектрической пленки [1-3].

Сдерживающим фактором широкого применения щелевых линий на основе сегнетоэлектрических пленок является температурная зависимость их диэлектрической проницаемости и, как следствие, температурная зависимость характеристик устройств, построенных на их основе.

Экспериментальный поиск компромисса между температурной и полевой зависимостями диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрических материалов в диапазоне сверх-и крайневысоких частот, привел к сегнетоэлектрикам на основе твердого раствора $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BSTO) при $x=(0.4-0.5)$ [4].

Возможность получения нанослоев сложного химического состава дает основания для исследования нанокompозитных сегнетоэлектрических пленок с заданными диэлектрическими свойствами. В конкретном случае, это нанослой BSTO с разным процентным содержанием бария. Термином – нанокompозитная сегнетоэлектрическая пленка мы называем пленку, образованную последовательностью наноразмерных слоев, каждый из которых имеет свой химический со-

став. В конкретном случае, это нанослой BSTO с разным процентным содержанием бария и легирующих добавок.

Сегнетоэлектрические пленки в диапазоне сверх- и крайневых частот в щелевой линии ограничены толщиной $(2 \div 0.5) \times 10^{-6}$ м. Сегнетоэлектрическая пленка такой толщины, в сочетании с высокой диэлектрической проницаемостью (порядка 10^3) приводит к оптимальному замедлению электромагнитной волны в линии и электрическому управлению фазовой скоростью. Таким образом, сегнетоэлектрическая пленка в структуре щелевой линии не является нанообъектом. В нанокompозитной пленке отдельный слой толщиной порядка 50 нм сохраняет свою температурную и полевую зависимость диэлектрической проницаемости и вносит вклад в формирование электромагнитного поля щелевой линии.

Нанокompозитную пленку нельзя характеризовать таким параметром как диэлектрическая проницаемость. Температурная стабилизация фазовой скорости [5] может быть достигнута за счет распределения электромагнитного поля в щелевой линии по толщине нанокompозитной пленки. При этом каждый нанослой сохраняет свойства сегнетоэлектрика с присущей ему температурной и полевой зависимостью диэлектрической проницаемости.

В настоящей работе получена оценка температурной стабилизации фазовой скорости в электродинамической модели щелевой линии на основе нанокompозитной сегнетоэлектрической пленки.

Температурная и полевая зависимости диэлектрической проницаемости в каждом нанослое BSTO была принята на основе модели Ландау-Гинзбурга [4]

$$\varepsilon(\eta, \xi) = \frac{\varepsilon_{00}(x)}{\left[\left(\xi^2 + \eta(x)^3 \right)^{\frac{1}{2}} + \xi \right]^{\frac{2}{3}} + \left[\left(\xi^2 + \eta(x)^3 \right)^{\frac{1}{2}} - \xi \right]^{\frac{2}{3}} - \eta(x)},$$

где $x=(0, \dots, 1)$ – концентрация бария,

$$\varepsilon_{00}(x) = \frac{C(x)}{T_c(x)}, \quad \eta(x) = \frac{\Theta_F}{4 \cdot T_c(x)} \sqrt{1 + \left(\frac{4 \cdot T}{\Theta_F} \right)^2} - 1, \quad \xi = \frac{E}{E_H},$$

где $\varepsilon(\eta, \xi)$ – диэлектрическая проницаемость BSTO в зависимости от концентрации бария, температуры и напряженности электрического поля, E – напряженность электрического поля, E_H – нормирующее поле, Θ_F – температура Дебая, а концентрационная зависимость постоянной Кюри $C(x)$ и температуры Кюри-Вейса $T_c(x)$ была принята в виде

$$C(x) = 10^5 \cdot (0.78 + 0.76 \cdot x^2), \quad T_c(x) = 42 + 439 \cdot x - 96 \cdot x^2.$$

На рис.1 представлено поперечное сечение щелевой линии.

На рисунке обозначено:

d_1 – толщина многослойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры,

d_2 – толщина подложки диэлектрической подложки,

Δ_{1i} – толщина нанослоя, где, $i=1,2,..N$, N – количество нанослоев,

ϵ_{1i} – диэлектрическая проницаемость нанослоя состава x_{1i} .

В этих обозначениях первый индекс указывает на номер области поперечного сечения многослойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры.

Расчет постоянной распространения электромагнитной волны выполнен в полноволновом электродинамическом описании, основные идеи изложены в [1].

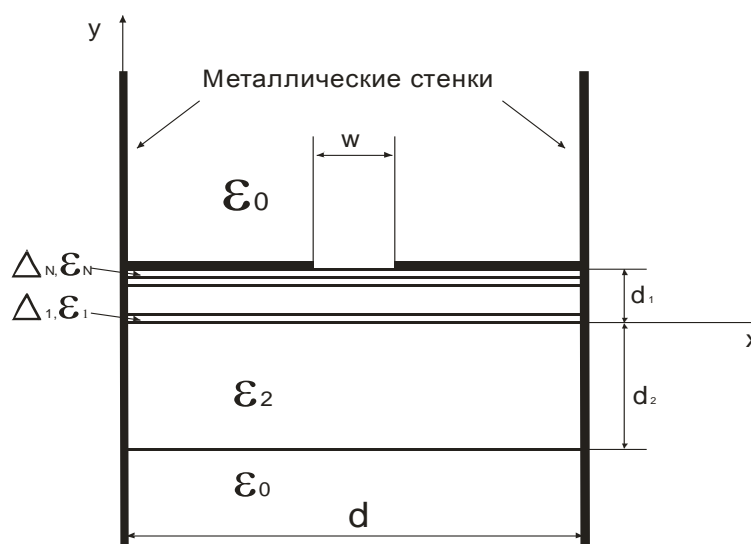


Рис. 1. Поперечное сечение щелевой линии на нанокompозитной сегнетоэлектрической пленке.

Поле в структуре представлено композицией LSE и LSM полей, которые порождаются векторными электродинамическими потенциалами $\vec{A}(x, y, z, t) = \vec{e}_y A(x, y) \cdot e^{-j\gamma z}$, $\vec{F}(x, y, z, t) = \vec{e}_y F(x, y) \cdot e^{-j\gamma z}$, где γ – постоянная распространения электромагнитного поля в линии. Соотношения для векторных потенциалов в областях поперечного сечения линии с учетом граничных условий на металлических стенках могут быть получены в виде [3]

В области над щелью $y > d_1$

$$A_0(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} A_{0n} \cdot e^{k_{0n}(y-d_1)} \cdot \cos(a_n x), \quad F_0(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} F_{0n} \cdot e^{k_{0n}(y-d_1)} \cdot \cos(a_n x), \quad (1)$$

в области подложки $d_1 < |y| < d_2$

$$A_2(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_{2n} \sin(k_{2n}y) + B_{2n} \cos(k_{2n}y)) \sin(a_n x), \quad (2)$$

$$F_2(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} (F_{2n} \sin(k_{2n}y) + D_{2n} \cos(k_{2n}y)) \cos(a_n x).$$

В области i -го нанослоя

$$A_{1i}(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_{1in} \sin(k_{1in}y) + B_{1in} \cos(k_{1in}y)) \sin(a_n x), \quad (3)$$

$$F_{1i}(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} (F_{1in} \sin(k_{1in}y) + D_{1in} \cos(k_{1in}y)) \cos(a_n x).$$

в областях свободного пространства при $|y| > d_{12} = d_1 + d_2$

$$A_3(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} A_{3n} \cdot e^{k_{0n}(y+d_{12})} \cdot \sin(a_n x), \quad F_3(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} F_{3n} \cdot e^{k_{0n}(y+d_{12})} \cdot \cos(a_n x) \quad (4)$$

В этих выражениях использованы обозначения

$$k_{0n}^2 = \gamma^2 - k_0^2 + a_n^2, \quad k_0^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0, \quad a_n = \frac{n\pi}{d},$$

$$k_{2n}^2 = k_0^2 \varepsilon_2 - \gamma^2 - a_n^2, \quad k_{1in}^2 = k_0^2 \varepsilon_{1i} - \gamma^2 - a_n^2, \quad \gamma > k_0.$$

Условия непрерывности векторных потенциалов и их нормальных производных на границах диэлектрических слоев имеют вид:

- на границе при $y = -d_{12}$

$$A_2(x, -d_{12}) = A_3(x, -d_{12}), \quad \frac{1}{\varepsilon_2} \frac{\partial A_2(x, y)}{\partial y} = \frac{\partial A_3(x, y)}{\partial y}, \quad (5)$$

$$F_2(x, -d_{12}) = F_3(x, -d_{12}), \quad \frac{\partial F_2(x, y)}{\partial y} = \frac{\partial F_3(x, y)}{\partial y}.$$

На границе между первым нанослоем и подложкой при $y = -d_2$

$$A_2(x, -d_2) = A_{11}(x, -d_2), \quad \frac{1}{\varepsilon_2} \frac{\partial A_2(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{\varepsilon_{11}} \frac{\partial A_{11}(x, y)}{\partial y}, \quad (6)$$

$$F_2(x, -d_2) = F_{11}(x, -d_2), \quad \frac{\partial F_2(x, y)}{\partial y} = \frac{\partial F_{11}(x, y)}{\partial y}.$$

На границе между i -тым и $(i+1)$ - нанослоем при $y = \Delta_{1i}$

$$A_{1i}(x, \Delta_{1i}) = A_{1(i+1)}(x, \Delta_{1i}), \quad \frac{1}{\varepsilon_{1i}} \frac{\partial A_{1i}(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{\varepsilon_{1(i+1)}} \frac{\partial A_{1(i+1)}(x, y)}{\partial y}, \quad (7)$$

$$F_{1i}(x, \Delta_{1i}) = F_{1(i+1)}(x, \Delta_{1i}), \quad \frac{\partial F_{1i}(x, y)}{\partial y} = \frac{\partial F_{1(i+1)}(x, y)}{\partial y}.$$

Последовательное применение соотношений непрерывности на границах областей приведет к связи произвольных коэффициентов в

разложения потенциалов в соответствующих областях. При большом числе нанослоев эта процедура становится громоздкой. Ее можно упростить, если представить соотношения между коэффициентами в матричной форме, приспособленной к численным процедурам Fortran. В качестве примера приведем матричные соотношения между коэффициентами разложения векторного потенциала $A(x,y)$.

Из соотношений (5), (2) и (4) найдем, что:

$$\begin{bmatrix} A_{2n} \\ B_{2n} \end{bmatrix} = \hat{M}_{23}^{-1} A_{3n},$$

$$\text{где матрица } \hat{M}_{23} = \begin{bmatrix} -\sin(k_{2n}d_{12}) & \cos(k_{2n}d_{12}) \\ \frac{k_{0n}\varepsilon_2}{k_{2n}}\cos(k_{2n}d_{12}) & \frac{k_{0n}\varepsilon_2}{k_{2n}}\sin(k_{2n}d_{12}) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Очевидно, что \hat{M}_{23} имеет обратную матрицу, т.к., ее определитель не равен нулю.

Первая пара из соотношения (6) приводит к связи коэффициентов разложения во второй области и в первом нанослое:

$$A_{2n} = \frac{k_{11n}\varepsilon_2}{\varepsilon_{11}k_{2n}} A_{1n}, \quad B_{2n} = B_{11n}.$$

Подставим полученное соотношение в (8) и найдем связь между коэффициентами в первом нанослое и третьей области в виде:

$$\begin{bmatrix} A_{11n} \\ B_{11n} \end{bmatrix} = \hat{M}_{113}^{-1} A_{3n}, \quad (9)$$

$$\text{где } \hat{M}_{113} = \begin{bmatrix} -\frac{k_{11n}\varepsilon_2}{\varepsilon_{11}k_{2n}}\sin(k_{2n}d_{12}) & \frac{k_{11n}\varepsilon_2}{\varepsilon_{11}k_{2n}}\cos(k_{2n}d_{12}) \\ \frac{k_{0n}\varepsilon_2}{k_{2n}}\cos(k_{2n}d_{12}) & \frac{k_{0n}\varepsilon_2}{k_{2n}}\sin(k_{2n}d_{12}) \end{bmatrix}.$$

На основании первой пары из соотношений (7) и соотношений (3) найдем

$$\begin{bmatrix} A_{12n} \\ B_{12n} \end{bmatrix} = \hat{M}_{1112} \begin{bmatrix} A_{11n} \\ B_{11n} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\text{где } \hat{M}_{1112} = \begin{bmatrix} \sin(k_{11n}\Delta_1) & \cos(k_{11n}\Delta_1) \\ \frac{k_{11n}}{\varepsilon_{11}}\cos(k_{11n}\Delta_1) & -\frac{k_{11n}}{\varepsilon_{11}}\sin(k_{11n}\Delta_1) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sin(k_{12n}\Delta_1) & \cos(k_{12n}\Delta_1) \\ \frac{k_{12n}}{\varepsilon_{12}}\cos(k_{12n}\Delta_1) & -\frac{k_{12n}}{\varepsilon_{12}}\sin(k_{12n}\Delta_1) \end{bmatrix}.$$

Используя соотношения (9) и (10), находим

$$\begin{bmatrix} A_{12n} \\ B_{12n} \end{bmatrix} = \hat{M}_{1112} \hat{M}_{113}^{-1} A_{3n}. \quad (11)$$

На основании соотношения (10) и вида переходных матриц в (11) был разработан алгоритм построения матриц для произвольного числа нанослоев и диэлектрических слоев. Очевидно, что из условий непрерывности на границе N -ого и $(N-1)$ -ого нанослоя можно построить

матрицу связывающую коэффициенты A_{1Nn} , B_{1Nn} с A_{3n} , F_{1Nn} , D_{1Nn} с F_{3n} , так как на предшествующем этапе условия непрерывности (на границе N-1 и N-2 нанослоем) связывали коэффициенты A_{1N-1n} , B_{1N-1n} с A_{3n} , F_{1N-1n} , D_{1N-1n} с F_{3n} . Таким образом, в Fortran были построены последовательно переходные матрицы между коэффициентами разложения векторных потенциалов в каждом слое поперечного сечения линии.

На границе между областями поперечного сечения при $y=0$ на ширине щели выполним условия непрерывности E_x и E_z для полей LSE и LSM типов: $E_{x,LSE}^{(0)} = E_{x,LSE}^{(1N)}$, $E_{x,LSM}^{(0)} = E_{x,LSM}^{(1N)}$. Тогда вдоль всей границы $y=0$ условия для касательных полей можно записать в виде

$$\begin{aligned} E_{x,LSE}^{(0)} + E_{x,LSM}^{(0)} &= \begin{cases} 0 \text{ на электродах} \\ f(x) \text{ на ширине щели} \end{cases}, \\ E_{z,LSE}^{(0)} + E_{z,LSM}^{(0)} &= \begin{cases} 0 \text{ на электродах} \\ g(x) \text{ на ширине щели} \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

В соотношениях (12) неизвестные $f(x)$ и $g(x)$ могут быть аппроксимированы в различных ортогональных базисах. В данной работе были использованы ортогональные полиномы Чебышева и тригонометрический базис. После выполнения условий непрерывности касательных компонент магнитного поля на ширине щели и применение процедуры Галёркина была получена система линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов разложения. Приведем вид системы для тригонометрического базиса

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^M b_m X_{ms}^{(11)} + \sum_{m=0}^M a_m X_{ms}^{12} &= 0, \\ \sum_{m=0}^M b_m X_{ms}^{(11)} + \sum_{m=0}^M a_m X_{ms}^{12} &= 0 \end{aligned}$$

где $X_{ms}^{11} = \sum_{n=0}^{\infty} f_{11,n}(\gamma) J_{mn}^{(G)} J_{sn}^{(G)}$, $X_{ms}^{12} = \sum_{n=0}^{\infty} f_{12,n}(\gamma) J_{mn}^{(F)} J_{sn}^{(G)}$, $X_{ms}^{21} = \sum_{n=0}^{\infty} f_{21,n}(\gamma) J_{mn}^{(G)} J_{sn}^{(F)}$,

$$X_{ms}^{22} = \sum_{n=0}^{\infty} f_{22,n}(\gamma) J_{mn}^{(F)} J_{sn}^{(F)}, \quad J_{mn}^{(F)} = (-1)^m \frac{m\omega}{\pi d} \frac{\sin n\pi\omega/d}{(\frac{\omega n}{d})^2 - m^2}, \quad J_{mn}^{(G)} = (-1)^m \frac{m\omega}{\pi d} \frac{m \sin n\pi\omega/d}{(\frac{\omega n}{d})^2 - m^2},$$

$f_{11,n}(\gamma)$, ... $f_{22,n}(\gamma)$ вычисляются на основе алгоритма с использованием переходных матриц. Определитель матрицы должен быть равен нулю, что даст уравнение для нахождения постоянной распространения γ . Асимптотика рядов в матричных элементах определяется как n^{-2} . Постановка задачи расчета постоянной распространения электромагнитной волны в щелевой линии передачи на основе нанокompозитной сегнетоэлектрической пленки и разработанный метод решения близки к реальной модели щелевой линии.

Расчеты были выполнены для широкого диапазона частот и размеров поперечного сечения щелевой линии. Значения диэлектрической проницаемости в нанослоях были заданы из ряда значений соответствующих температур. Таким образом, результаты расчета позволяют судить о температурной стабилизации постоянной распространения. Результаты расчета представлены на рис. 2, 3. и в таблице.

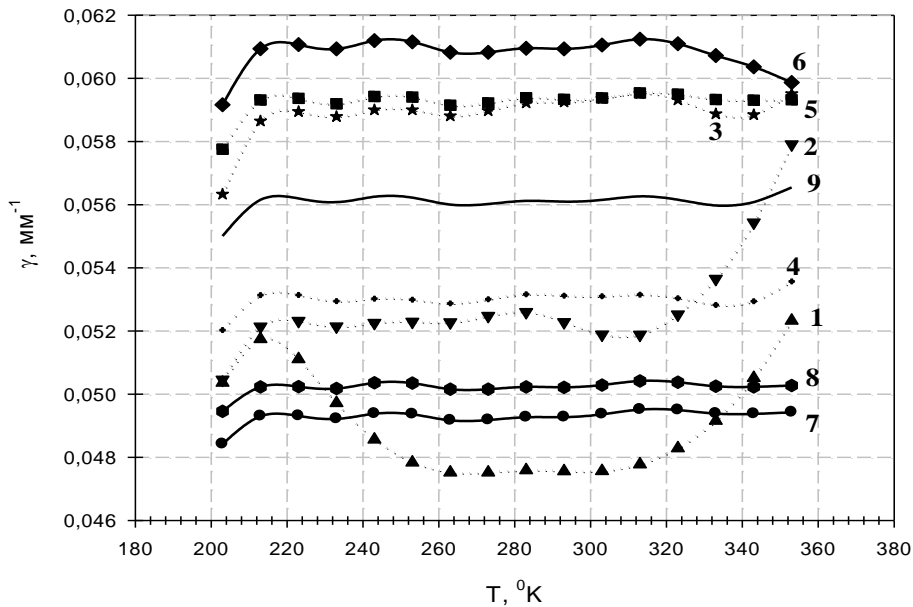


Рис. 2. Зависимость постоянной распространения от температуры в щелевой линии передачи на частоте 1ГГц и ширине щели $w=0.05$ мкм.

1 - трехслойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=2.4$ мкм, состава $x_{11} - 0.5, x_{12}- 0.6, x_{13}- 0.8$.

2 - четырехслойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=3$ мкм, состава $x_{11} - 0.5, x_{12}- 0.6, x_{13}- 0.7, x_{14}- 0.9$.

3 - пятислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=2.5$ мкм, состава $x_{11} - 0.4, x_{12}- 0.5, x_{13}- 0.6, x_{14}- 0.7, x_{15}- 0.9$.

4 - шестислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=2.5$ мкм, состава $x_{11} - 0.1, x_{12}- 0.4, x_{13}- 0.5, x_{14}- 0.6, x_{15}- 0.7, x_{16}- 0.9$.

5 - семислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=2.54$ мкм, состава $x_{11} - 0.3, x_{12} - 0.4, x_{13}- 0.5, x_{14}- 0.6, x_{15}- 0.7, x_{16}- 0.8, x_{17}- 0.9$.

6 - восьмислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=2.45$ мкм, состава $x_{11} - 0.2, x_{12} - 0.3, x_{13}- 0.4, x_{14}- 0.5, x_{15}- 0.6, x_{16}- 0.7, x_{17}- 0.8, x_{18}- 0.9$.

7 - девятислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=1.38$ мкм, состава $x_{11} - 0.1, x_{12} - 0.3, x_{13}- 0.4, x_{14}- 0.5, x_{15}- 0.6, x_{16}- 0.7, x_{17}- 0.8, x_{18}- 0.9, x_{19}- 1$.

8 - десятислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=1.75$ мкм, состава $x_{11} - 0.1, x_{12} - 0.2, x_{13}- 0.3, x_{14}- 0.4, x_{15}- 0.5, x_{16}- 0.6, x_{17}- 0.7, x_{18}- 0.8, x_{19}- 0.9, x_{110}- 1.0$.

9 - одиннадцатислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=2.61$ мкм, состава $x_{11} - 0, x_{12} - 0.1, x_{13}- 0.2, x_{14}- 0.3, x_{15}- 0.4, x_{16}- 0.5, x_{17}- 0.6, x_{18}- 0.7, x_{19}- 0.8, x_{110}- 0.9, x_{111}- 1.0$.

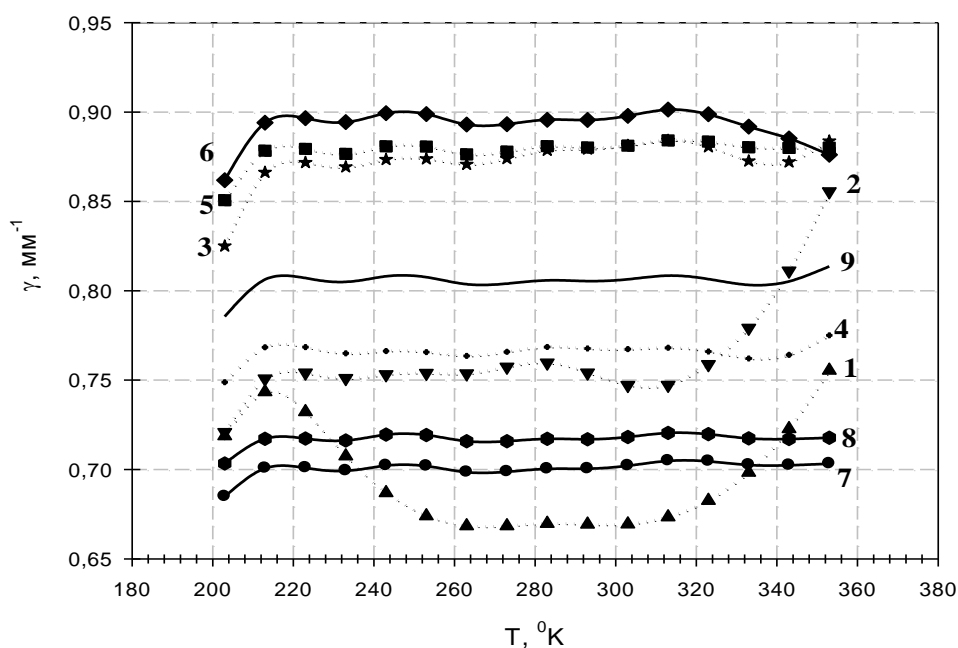


Рис. 3. Зависимость постоянной распространения от температуры в щелевой линии передачи на частоте 10ГГц и ширине щели $w=0.1$ мкм для:

- трехслойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=1.89$ мкм, состава $x_{11} - 0.4$, $x_{12}- 0.6$, $x_{13}- 1.0$.
- четырехслойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=1.95$ мкм, состава $x_{11} - 0.4$, $x_{12}- 0.5$, $x_{13}- 0.6$, $x_{14}- 0.9$.
- пятислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=2.5$ мкм, состава $x_{11} - 0.4$, $x_{12}- 0.5$, $x_{13}- 0.6$, $x_{14}- 0.7$, $x_{15}- 0.9$.
- шестислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=2.5$ мкм, состава $x_{11} - 0.1$, $x_{12}- 0.4$, $x_{13}- 0.5$, $x_{14}- 0.6$, $x_{15}- 0.7$, $x_{16}- 0.9$.
- семислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=2.54$ мкм, состава $x_{11} - 0.3$, $x_{12} - 0.4$, $x_{13}- 0.5$, $x_{14}- 0.6$, $x_{15}- 0.7$, $x_{16}- 0.8$, $x_{17} - 0.9$.
- восьмислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=2.45$ мкм, состава $x_{11} - 0.2$, $x_{12} - 0.3$, $x_{13}- 0.4$, $x_{14}- 0.5$, $x_{15}- 0.6$, $x_{16}- 0.7$, $x_{17} - 0.8$, $x_{18} - 0.9$.
- девятислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=1.38$ мкм, состава $x_{11} - 0.1$, $x_{12} - 0.3$, $x_{13}- 0.4$, $x_{14}- 0.5$, $x_{15}- 0.6$, $x_{16}- 0.7$, $x_{17} - 0.8$, $x_{18} - 0.9$, $x_{19} - 1$.
- десятислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=1.75$ мкм, состава $x_{11} - 0.1$, $x_{12} - 0.2$, $x_{13}- 0.3$, $x_{14}- 0.4$, $x_{15}- 0.5$, $x_{16}- 0.6$, $x_{17} - 0.7$, $x_{18} - 0.8$, $x_{19} - 0.9$, $x_{110} - 1.0$.
- одиннадцатислойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной $d_1=2.61$ мкм, состава $x_{11} - 0$, $x_{12} - 0.1$, $x_{13}- 0.2$, $x_{14}- 0.3$, $x_{15}- 0.4$, $x_{16}- 0.5$, $x_{17} - 0.6$, $x_{18} - 0.7$, $x_{19} - 0.8$, $x_{110} - 0.9$, $x_{111} - 1.0$.

Таблица

f=100ГГц, w=0.02мм, d ₂ =0.5мм, ε ₂ =9.8					f=100ГГц, w=0.01мм, d ₂ =0.5мм, ε ₂ =9.8			
d ₁ , мкм	0.08				0.08			
ε _{1i}	2934	2139	1819	1571	2934	2139	1819	1571
ε _{2i}	2218	3167	3135	2781	2218	3167	3135	2781
ε _{3i}	883	1177	1415	1699	883	1177	1415	1699
ε _{4i}	2934	2139	1819	1571	2934	2139	1819	1571
ε _{5i}	951	788	726	672	951	788	726	672
ε _{6i}	1593	1216	1084	978	1593	1216	1084	978
γ, мм ⁻¹	5.62	5.62	5.62	5.61	6.21	6.22	6.21	6.21

Библиографический список

1. Мироненко И.Г., Иванов А.А. Дисперсионные характеристики щелевых и копланарных линий на основе структуры "сегнетоэлектрическая пленка – диэлектрическая подложка", Письма в ЖТФ, 2001, т. 27, вып.13, с. 22-26.
2. Мироненко И.Г., Иванов А.А. Многощелевые линии передачи сверхвысоких частот на основе структуры "сегнетоэлектрическая пленка - диэлектрическая подложка". ЖТФ 2002, т. 74, вып.2, с. 68-73.
3. Мироненко И.Г., Иванов А.А., Семёнов А.А., Карманенко С.Ф., Назаров И.А. Сегнетоэлектрические пленки и устройства на сверх- и крайне высоких частотах, Санкт-Петербург, изд. "Элмор", 2007г., 161 с.
4. Под ред. О.Г. Вендик, Сегнетоэлектрики в технике СВЧ, М.: Сов. радио, 1979 – 272с.
5. Мироненко И.Г., Иванов А.А., Ястребов А.Н., и др. Положительное решение на Заявку на патент № 2010 148 489 от 19.11.2010

Патрикеев Л. Н.

АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА. ОТ КРЕМНИЯ К УГЛЕРОДУ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Lnp70@mail.ru*

В работе рассматриваются наиболее острые проблемы современной электроэнергетики. К этим проблемам, с одной стороны, относятся задачи развития *альтернативных источников энергии*, малой распределительной энергетики, автономных систем электропитания малых поселений и, наконец, широкого внедрения умных сетей (Smart Grids) на высоковольтных сетевых объектах, то есть построение полноценных *интеллектуальных* сетей.

Решение сетевых задач в значительной степени сдерживается отсутствием мощных энергонакопительных устройств (*суперконденсаторов*). С другой стороны, создание суперконденсаторов непосредственно связано с успехами нанотехнологии, широко анализирующей методы повышения КПД солнечных преобразователей. Успехи разработчиков солнечных батарей связаны с широким переходом к использованию аллотропных форм углерода (*фуллеренов, нанотрубок и графена*), что обеспечивает постоянное повышение КПД, а в будущем и снижение цены альтернативных источников энергии, и одновременно открывают перспективы реализации мощных супернакопителей электрической энергии.

В связи широким развитием в США, Европе и Азии НИР, посвящённых анализу возможностей аллотропных форм углерода, всё большее количество учёных заявляют о неизбежном переходе в ближайшие годы от массового использования кремния, как основного материала современной наноэлектроники и связанных с ней областей техники, к углероду.

1. Мир, в котором мы живём

В актовом зале Тамбовского государственного технического университета сегодня мы встречаемся уже третий год подряд. Весьма показательно, что эта встреча проходит после опубликования Постановления Правительства РФ о широком развитии экономики *Арктической зоны* Российской Федерации. Это Постановление предусматривает широкое развитие *хозяйственной* деятельности в АЗ РФ, развитие опорной и *энергетической* инфраструктуры, обеспечение *эко-*

номической и военной безопасности в АЗ РФ, внедрение информационных систем в хозяйственную деятельность нашей Арктики и т.д.

По нашему предложению в повестку дня Круглого стола, посвящённого реализации упомянутого Постановления и проводимого в Москве в Финансовом университете при Правительстве РФ 8 апреля 2015 г., включены следующие сообщения :

1. Быков В.А., президент Нанотехнологического общества РФ (НОР РФ), гендиректор фирмы NTMDT, «Наноэлектронные компоненты для арктической спецаппаратуры («программа Байкал) »;

2. Дементьев В.В., гендиректор фирмы АСТЕК (Автоматизированные системы Топливо-Энергетического Комплекса), «Суперконденсаторы для интеллектуальных энергосистем АЗ РФ»;

3. Александров П.А., директор института информационных технологий НИЦ «Курчатовский институт», «Раннее предупреждение аварийных и предаварийных ситуаций техногенного характера по мониторингу аэрозолей».

О разрабатываемой фирмой NTMDT технологической **кластерной системе** мало- и среднемасштабного производства специализированных **кремниевых** наноэлектронных чипов с технологическими нормами 24, 16, 12, 8 нм, мы кратко уже рассказывали в этой аудитории в прошлом году и совсем кратко напомним об этой программе сегодня. Это напоминание, с одной стороны, позволит судить об уровне отечественных конструкторско-технологических наноразработок для производства **кремниевых** чипов и **кремниевых** наноструктур. А, с другой стороны, позволит объяснить ранний или поздний отказ от кремния и необходимость перехода к **углеродной** электронике.

О **суперконденсаторах** Дементьева В.В и Долгих В.М., изготовленных на базе активного использования инновационных методов **углеродной** технологии мы кратко проинформируем слушателей во второй части нашего сообщения.

Наконец, сообщение П.А. Александрова основано на разработке высокочувствительных оптических систем измерения плотности аэрозолей, выделяемых при любом производстве, и мы приведём итоговую информацию об их эффективности.

Мир, в котором мы живём, характеризуется необходимостью решения, по крайней мере, 10 важнейших проблем, которые в ближайшие 50 лет обеспечивали и обуславливали наше существование:

1. **Энергетика**
2. **Вода**
3. **Пища** В 2003 г на Земле проживало 6,млрд.человек
4. **Окружающая среда** В 2050 г прогнозируется рост до 10 млрд. человек

5. **Бедность** (С.П. Капица – всего не более 11,3 млрд.человек)
6. **Терроризм и войны**
7. **Болезни**
8. **Образование**
9. **Демократия**
10. **Население**

Что касается альтернативной энергетики, о которой мы подробно рассуждали в прошлом году [1], напомним, что относящиеся к альтернативным возобновляемым методам и технологиям источники энергии способны обеспечить потребителей в следующих объемах :

- Малые гидроэлектростанции – 1,8 ТВт
- Геотермальные производители энергии -- 1, 9 ТВт
- Приливные станции – 0,7 ТВт
- Биомассовые производители энергии – 5 – 7 ТВт
- Ветровые станции – 14 ТВт
- *Солнечные преобразователи – 10 000 ТВт !

Эти возможности нужно сравнивать с уровнями мирового потребления энергии на Земле (в 2014 г – 13 ТВт) и ростом этого потребления (к 2100 г до 33 ТВт). Отметим, кстати, что население США, составляющее 4,8% населения Земли, потребляют 21 % вырабатываемой на планете энергии. В то же время Индия с 16 % населения потребляет всего 3,5 % энергии.

2. Состояние и перспективы кремниевой наноэлектроники

При финансовой поддержке Минпромторга РФ в настоящее время продолжаются интенсивные работы по созданию отечественной технологической базы для мелко- и среднемасштабного производства наноэлементной базы *специального* назначения с использованием *безмасковой* литографии с проектными нормами **22, 14, 8** нм.

Базой проводимой разработки является уже хорошо апробированный в ряде отечественных организаций (Институт кристаллографии РАН, НИЦ «Курчатовский институт», Южный федеральный университет – бывший ТРТИ, Тюменский госуниверситет, ФГУП НИИФИЗПРОБЛЕМ) кластерный технологический комплекс **НАНОФАБ-100** , обеспечивающий изготовление экспериментальных кремниевых структур и микросхем на пластинах диаметром 100 мм. В этом базовом кластере в качестве литографического оборудования используется либо ионная, либо сканирующая зондовая литография. Естественно, что обе эти методики являются и дорогими и медленными и в новом кластере их необходимо заменить.

Ключевой технологией разрабатываемого нового кластера **НАНОФАБ – 200** станет аппаратное обеспечение *многолучевой электронной безмасковой* литографии, в состав оборудования которой входят:

- *Многолучевая (10000 лучей) система экспонирования и совмещения электронной литографии;*
- Модуль нанесения электронного *резиста*;
- Модули проявления, травления и снятия электронного *резиста*;
- Модули загрузки, складирования и подготовки *пластин*.

Современные оценки показывают, что время полномасштабного процесса экспонирования пластин диаметром 200 мм с разрешением 14 нм, включая загрузку, совмещение, экспонирование и выгрузку не будет превышать 15 минут. Это всего 4 - 5 пластин в час (не 100, как в массовом производстве), но для схем специального назначения в условиях 100 %-го «импортозамещения» вполне приемлемо.

Стоимость **НАНОФАБ – 200** не должна превышать 500 млн. рублей. При заявленной заинтересованности в приобретении такого кластера примерно от 100 предприятий общая совокупность его продаж достигает 50 млрд. рублей, что для отечественной электроники последних двух десятилетий является внушительной величиной.

Достижения отечественных специалистов по МЭМС и НЭМС (например, в МИЭТ под научным руководством члена – корр. РАН А.Н. Саурова, или в СПб ЭТУ под научным руководством проф. В.В. Лучинина) наряду со значительными успехами в создании многочисленных информационных и чрезвычайно сложных вычислительных систем, включая *эксафлонные* комплексы, разрабатываемые в НИИСИ РАН и ЗАО «Квант», позволяют с определённым оптимизмом рассматривать Кластер **НАНОФАБ – 200** как прорывной проект отечественной *кремниевой* нанoeлектронной технологии.

Краткое описание состава и структуры **НАНОФАБ – 200** можно найти в сборнике лекций, изданных Тамбовским ГТУ в 2014 г [1].

Современный кремниевый чип на базе МДП - транзистора аккумулирует важнейшие достижения технологической цивилизации и позволяет интегрировать 1 млрд компонентов в одном чипе при *любой* сложности СБИС . При этом стоимость массового производства сверхбольших интегральных схем составляет *4 долл. за 1 кв.см* площади чипа. Другими словами каждый квадратный миллиметр чипа стоит **0,04** долл. и постоянное стремление производителей к снижению технологических норм в диапазоне от **100** нм до **12** и даже 10 нм позволяло снижать стоимость квадратного миллиметра пластины и, следовательно, повышать рентабельность производства [2]. Так было, повторяю, в диапазоне **100 - 10** нм. И так перестаёт быть при

дальнейшем повышении требований к технологическим нормам. При **8 нм** и менее строительство **кремниевых** суперпроизводств резко тормозится!

Описанные проблемы, возникающие в кремниевом производстве с повышением степени интеграции и повышением требований к предельному технологическому разрешению, хорошо известны. **Стоимость** строительства новых заводов при переходе на кремниевые пластины диаметром 450 и 600 мм при технормах менее 12 нм уже сегодня превышает 5 – 8 млрд. долл. и, по- существу, резко тормозит эффективность такого строительства (в 2015 г во всём мире вводятся всего только 2 таких фабрики).

Производителям чипов и ранее приходилось вести поиск базовых материалов для выпуска схем, например, гигагерцового диапазона или других задач, не реализуемых на **кремнии**. Сегодня, когда во всём мире поднялся гигантский бум, связанный с огромными программами исследований аллотропных материалов и, прежде всего ГРАФЕНа, многие учёные указывают на то, что через 10 – 15 лет аллотропные формы **Углерода** заменят **кремний** в производстве элементной базы электроники.

3. Фуллерены, нанотрубки и графен в энергетике

«Прародителем» наноуглеродных структур можно считать графен. Двумерный (2D) лист графена представляет собой «строительный блок» для других углеродных материалов. Наиболее распространённая форма углерода – графит может рассматриваться как стопка листов графена, относительно слабо связанных между собой силами Ван-дер-Ваальса. Широко известные углеродные наноструктуры – нанотрубки и фуллерены – можно рассматривать как свёрнутый в трубку лист графена или, соответственно, как замещение сферы решёткой графена.

Таким образом, графен как ключевая квазидвумерная углеродная наноструктура с точки зрения классификации является основой трёхмерного графита, квазиодномерных нанотрубок и квазинульмерных фуллеренов.

Прародитель химических модификаций. Три наиболее значимые из этих модификаций – **графан**, **флюорографен** и **оксид графена** – радикально меняют свойства исходного 2D материала :

Графан (в узлы графана добавлены атомы водорода). Они превращают графен в диэлектрик и накопитель водорода.

Флюорографен (в узлы графена добавлены атомы фтора). Они превращают графен в полупроводник с шириной запрещённой зоны

до 3 эВ и удельным сопротивлением свыше 1000 Ом.м. Такой материал оказывается устойчивым до 400 градусов Цельсия, он механически прочен (модуль Юнга 0,3 ТПа) и стабилен, как тефлон.

Оксид графена (комбинация атомов углерода, кислорода и водорода) – возможная основа НЭМС.

Уникальные свойства графена объясняются особенностями коллективного взаимодействия электронов в его кристаллической решётке. При таком взаимодействии электроны ведут себя как безмассовые переносчики тока.

Наноматериалы принято характеризовать отношением площади поверхности к массе. Для однослойного графена (самого тонкого во Вселенной материала) этот показатель составляет 2000 кв м/г [3,4].

Гигантская прочность. Графен – самый прочный материал, который когда-либо измерялся (в 100 раз прочнее стали, твёрже алмаза). Прочность одного слоя соответствует модулю Юнга примерно 1,0 ТПа! Коэффициент жёсткости, равный силе, вызывающей единичные перемещения в характерной точке (чаще всего в точке приложения силы), для графена превышает такой же показатель для алмаза. Прочность на разрыв составляет 42 Н/м – это экспериментально подтверждённый теоретический предел.

Эластичность. Несмотря на фантастическую прочность, графен обладает гибкостью и может подвергаться 20% -й деформации без нарушения кристаллической решётки.

Теплопроводность монослоя составляет величину порядка 5000 Вт/м.град, что более чем в 10 раз превышает теплопроводность меди. Обладая такой теплопроводностью, графен может служить в качестве теплоотвода для современных интегральных схем, в которых тепловой разогрев с ростом степени интеграции становится всё более критичным.

Подвижность. Важнейшая характеристика двумерного электронного газа – **подвижность** носителей заряда, характеризует пригодность материала для современной СВЧ электроники. Огромные значения подвижности графена обусловлены нулевой массой носителей заряда – амбиполярных пар «электрон-дырка» в графене.

Максимальная подвижность носителей тока одного слоя графена при гелиевой температуре составляет 20 кв м/В.с!

При комнатной температуре в однослойном «подвешанном» графене подвижность равна 15 кв м/В.с. В случае размещения на поверхности SiO₂ подвижность в графене снижается до 4 кв м/В.с., что в **27 раз больше** соответствующего показателя для **кремния** (0,15 кв м/В.с) и в 5 раз больше, чем у **GaAs** (0,85 кв м /В.с)!

Рекордные значения подвижности и средней длины свободного (без столкновений) пробега носителей в графене свидетельствуют о том, что электроны при комнатной температуре могут перемещаться в графене на субмикронные расстояния без рассеяния – *баллистически!*

Допустимая плотность тока в графене на шесть порядков превышает этот показатель для меди. Графен выдерживает токи величиной 10 ТА/кв см, что объясняется баллистическим токопрохождением, почти не связанным с выделением тепла. При этом обнаружено, что баллистическая проводимость не критична к материалу подложки.

Огромные значения подвижности, допустимой плотности тока и наличие баллистической проводимости делают графен многообещающим материалом для будущих нанoeлектронных систем. На этом, вообще говоря, можно было бы поставить точку характеризуя графен и другие аллотропные формы углерода в качестве перспективных материалов нанoeлектроники. Однако эти материалы настолько интересны, а объёмы финансирования исследовательских работ на их основе настолько внушительны (в США, Европе и в Азии объёмы госпрограмм уже достигли *миллиардных* в долларах уровней), что необходимо хотя бы кратко продолжить обзор состояния и перспектив этих исследований.

Плазменная солнечная батарея. При нанесении на поверхность графена полосок в виде золотой «расчёски» графеновая плёнка становится непрозрачной *60%-й ловушкой* видимого света, преобразующей солнечную энергию в электрическую. При этом такая ловушка теоретически не меняет своих свойств в диапазоне от гелиевых температур до 400 градусов Цельсия. Можно ожидать, что солнечные преобразователи на основе таких ловушек окажутся так же термостойчивыми.

Лучше всего такая ловушка поглощает свет с длиной волны 514 нм – это пик солнечного излучения. Контуров границ металлических полосок и графена – *p – n* переходы. Встреча с фотонами образует на этих контурах добавочные поверхностные плазмоны. Золотая «расчёска» и графен способны дополнять друг друга и позволяют строить высокоэффективные *плазменные графеновые солнечные панели* с КПД недостижимыми не только на кремнии, но и на любых других материалах.

Графеновая электроника. Нет сомнения в том, что *кремниевая* нанoeлектроника в период шестого технологического уклада достигнет пика своего развития.. Уже создаются и будут реализованы сверхсложные интеллектуальные системы (промышленные и специальные супер ЭВМ и персональные супер ЭВМ массового применения). Мас-

сового применения достигнуты однокристалльные «системы на кристалле» (SoC) для беспроводной техники, систем биологической и технической идентификации, обеспечения безопасности, экологического контроля и т.д. Однако миллиметровый и терагерцовый диапазоны *кремневыми* структурами «закрываются» не будут.

Миллиметры и терагерцы. Миллиметровый диапазон длин волн соответствует спектру частот 30 ГГц (10 мм) – 300 ГГц (1 мм). Этот терагерцовый КВЧ участок спектра (Табл. 1) в настоящее время освоен мало. Однако, уже первые экспериментальные *графеновые* транзисторы оказались работоспособными в этом диапазоне!

Терагерцовый (инфракрасный, ИК) диапазон, расположенный между микроволнами и видимым участком спектра, оказался частотной областью, в которой графен проявляет свойства метаматериала, характеризуемого отрицательным коэффициентом преломления света [4]. Поэтому можно говорить о прорыве графена в терагерцы (иногда этот диапазон называют Т-диапазоном, конвергентным с плазмони- кой).

Таблица 1.

Миллиметровый и терагерцовый (ИК) диапазоны

Диапазон частот (длина волны)	Обозначение по ISO 20473	Русская терминология
30 (10 мм) – 300 ГГц (1 мм)	Extra High Frequency (EHF)	Крайне ВЧ (КВЧ)
1 (300 мкм) – 10 ТГц (30 мкм)	Far Infrared (FIR)	Дальний ИК
10 (30 мкм) – 100 ТГц (3 мкм)	Mid Infrared (MIR)	Средний ИК
100 (3 мкм) – №*% ТГц (0,78 мкм)	Near Infrared (NIR)	Ближний ИК

Графеновые транзисторы – база миллиметрового прорыва. При осаждении графена из паровой фазы на подложку меди покрытую плёнкой SiO₂ удалось изготовить несколько транзисторов с предельной частотой до 155 ГГц! Дальнейшее совершенствование таких транзисторов требует как уменьшения контактного сопротивления между электродами и каналом, так и уменьшения длины L канала, поскольку предельная частота пропорциональна 1/L. По программе CERA, финансируемой агентством DARPA, планируется за счёт эпитаксии гра-

фена на двухдюймовую пластину кремния получить транзистор с предельной частотой до 1 ТГц.

Мемристор как революционная схмотехническая структура [4]. Мемристор (от memory - память и resistor – электрическое сопротивление) - пассивный элемент в электронике, способный изменять своё сопротивление. Мемристор может быть описан как двухполюсник с нелинейной вольтамперной характеристикой, обладающей гистерезисом. Теория такого двухполюсника была создана в 1971 году профессором Леоном Чуа, который назвал мемристор «потерянным» схемным элементом.

В отличие от теоретической модели в реализованном в 2008 году экспериментальном мемристоре не накапливался заряд, подобно конденсатору, и не поддерживался магнитный поток, как в катушке индуктивности. Работа устройства обеспечивалась за счёт химических (наноионных) превращений. Например, переключение в экспериментальном мемристоре реализовалось перемещением ионов кислорода в зоне пересечения шин из оксида графена и алюминия.

Наличие гистерезиса позволяет использовать мемристор в качестве ячейки памяти. Резистивное сопротивление мемристора характеризуется наклоном его вольтамперной характеристики. Величина этого сопротивления зависит от того, насколько долго через элемент протекал ток, т.е. от количества заряда, прошедшего через элемент ранее. В нуле кривые ВАХ напряжения и тока мемристора пересекаются. Это значит, что сопротивление покоящегося прибора может быть различным и зависит от его предыстории.

В принципе, во многих случаях мемристоры могут заменить транзисторы. Теоретически они могут быть более емкими и быстрыми, чем современная флеш-память. Их блоки могут заменять собою оперативную память и жёсткие диски. Умение мемристоров «запоминать» заряд позволит отказаться от загрузки системы. В памяти компьютера, отключённого от питания, будет храниться его последнее состояние. Мемристор можно включать и начинать работу с точек остановки работы. Благодаря этой особенности на основе мемристоров можно строить новые реконфигурируемые вычислительные и цифроаналоговые структуры, в том числе системы искусственного интеллекта (ИИ).

Таким образом, мемристор – универсальный схемный элемент, применимый в цифровой, аналоговой и цифроаналоговой электронике и реализуемый в различных технологических базисах. Наконец, можно предположить, что мемристор создаст основу наносистем, воспроизводящих работу мозга и возьмёт на себя функции реконфигурации искусственного интеллекта и организации нейронных сетей,

создавая или разрывая связи между блоками систем искусственного интеллекта.

В настоящее время разработаны и развиваются несколько технологических методов производства графена [3,4]. К числу этих методов относятся :

- * Механическое отщепление от высокоупорядоченного пиролитического графита HOPG;

- * Процесс одновременной сегрегации с какого либо надёжного углеродного источника;

- * Эпитаксиальный рост графена возгонкой на SiC by Si ;

- * Химическое осаждение из паровой фазы;

- * Разложение плёнок окиси графена;

- * Химическое осаждение (CVD) на медной подложке;

- * Синтез нескольких слоёв графена CVD методом на медной фольге;

- * Синтез эпитаксиальных плёнок графена на поверхности кристалла меди (111);

- * Выращивание графена на плёнках Ni and Cu методом давления и переноса;

- * Технология получения ситоподобных плёнок графена.

К одной группе перечисленных методов относятся микромеханические или ультразвуковые методы расщепления графита. К другим – различные способы эпитаксиального выращивания графена, каталитическое дехлорирование гексахлорбензола и методы восстановления оксида графена. «Эффективными» оказываются и способы разрезания и разворачивания углеродных нанотрубок сильными окислителями. «Скотч» метод, отрыва графена от графита, который был использован А. Геймом и К. Новосёловым, даёт наиболее чистые образцы графена, однако ,как впрочем и все остальные современные технологии, является весьма трудоёмким.

Все перечисленные методы позволяют получать очень незначительные по площади графеновые плёнки, вполне пригодные для научного экспериментирования, но абсолютно не пригодные ни для какого - либо масштабирования. Естественно, что стоимость исследуемых сегодня графеновых плёнок исключительно высока.

4. Наноматериалы для суперконденсаторов

Настоящий доклад мы анонсировали как предваряющий в ближайшем будущем переход от *кремниевой* наноэлектроники *к углеродной*. Принятие программы экономического и социального подъёма Арктической Зоны РФ и достигнутые отечественные успехи в созда-

нии сверхмощных отечественных **суперконденсаторов** позволяют рассматривать углеродную нанотехнологию уже не как гипотетическую, а вполне современную.

Какие наноматериалы и с какими требованиями к ним нужны для создания суперконденсаторов? Для ответа на такой вопрос прежде всего необходимо рассмотреть вопрос о практических, прикладных целях разработки суперконденсаторов. Во всём мире эти разработки начинались прежде всего для медицинских целей (для использования в электрокардиостимуляторах), в качестве маломощных электробатарей для бытовой техники (телефонов, планшетов), среднечемощных аккумуляторов для запуска сельскохозяйственных бензиномоторных садовых устройств и только в последнее время для замены топливных элементов легковых автомобилях и, наконец для мощных сетевых систем.

Совершенно особо стояла и стоит проблема создания суперконденсаторов **мегаваттной** мощности для накопления избыточной электроэнергии от сетей непрерывно работающих электростанций. В любом из практических применений суперконденсаторов к наноматериалам и технологиям их создания предъявляются по крайней мере следующие требования: повышенная производительность; улучшенная стабильность и безопасность; большой жизненный цикл; высокий КПД; слабый саморазряд.

Исторически единственным средством для хранения электромагнитной энергии долгие годы оставались свинцово-кислые аккумуляторы. Появление новых технологий хранения привело к следующим изменениям в стоимости и эффективности:

Технология Цена (\$ /kWh)

Электростатический конденсатор 2 500 000

Электролитический конденсатор 1 000 000

Электрохимический конденсатор («суперконденсатор») 20 000

Свинцово-кислый аккумулятор 150

Энергоэффективность и энергосбережение - это два из пяти основных направлений модернизации и экономической политики России. В ближайшем будущем российскую энергетику ожидает широкое внедрение элементов Smart Grids (умных сетей) на высоковольтных сетевых объектах и построение полноценных *интеллектуальных сетей*.

Интеллектуальная сеть придаст качественно новые свойства электрическим сетям за счёт их объединения и информационной интеграции производителей и потребителей энергии и создания автоматизированной сети, управляемой в режиме on-line .

Развитие электроэнергетической системы России на основе технологий интеллектуальных сетей позволит увеличить эффективность функционирования электросетевого комплекса и снизить (не менее чем на 30%) потери электроэнергии при передаче. Одновременно это позволит повысить пропускную способность воздушных и кабельных линий электропередач, сгладит графики нагрузки за счёт использования мощных электронакопителей электроэнергии (суперконденсаторов), изготовление которых основано на применении инновационных материалов и технологий [5,6].

Переход от Единой Энергетической системы к технологиям «Smart Grids». Современная Единая Энергетическая Система Может быть охарактеризована простой логической цепочкой взаимосвязей:



При этом на всех трёх этапах преобразования энергии имеет место её **независимое** измерение и коммерческая документалистика (Smart Metering).

Энергетика ближайшего будущего – (Smart grids), в которых системы накопления и управления энергией **встроены** в энергообъекты генерации, транспортировки и потребления, тесно связанные друг с другом.

Технологии Smart Metering являются неотъемлемой частью Smart Grids. Сейчас отечественные специалисты уже умеют «видеть» параметры сетей и объектов. Следующий шаг – создание систем накопления и управления энергетическими потоками

Значительные суточные перепады нагрузки в сетях и неуправляемые изменения параметров на стороне потребителя энергии – это, по-сути, главные нерешённые сегодня проблемы в управлении режимами энергоснабжения. Очевидно, что с 10 утра до 18 часов вечера сети испытывают избыток потребления, а в ночные часы избыток снабжения. Такая нерациональность требует сглаживания пиков и выравнивания параметров сети.

Для таких целей в порядке экспериментов делались попытки создания различных накопительных систем – от **суперконденсаторов** до приливных электростанций и нагреваемых огромных подземных соляных батарей. Одной из передовых на сегодня разработок в этой области является американская мобильная **суперконденсаторная** бата-

рея на **литий - ионных** аккумуляторах. Одна такая «батарея» на мощность **1 МВт** представляет собой внушительный комплекс на базе трёх 15-метровых контейнеров.

В последние 10 лет в различных странах были разработаны и внедряются наноструктурированные литий-ионные батареи повышенной мощности (**до 4500 Вт/кг**), и повышенной емкости (**до 300 Вт.ч/литр**), которые способны обеспечить более **10 000** циклов заряд – разряд (это около 30 лет непрерывной эксплуатации).

В России ещё в 2011 году на ряде электростанций с напряжением **220 кВ** в порядке эксперимента были установлены системы накопления энергии (**СУПЕРКОНДЕНСАТОРЫ**) на основе литий-ионных аккумуляторов и высоковольтной электроники. В частности одна из таких систем работает на подстанции Волхов – Северная (недалеко от Санкт-Петербурга). Опыт как отечественной, так и зарубежной эксплуатации показал недостаточную безопасность таких литий – ионных накопителей.

Новые **суперконденсаторы** строятся на основе высокотехнологичных батарей с широким использованием как конструкционных, так и электрохимических **наноматериалов** и прежде всего **графена** и его модификаций. Такие накопители становятся всё более безопасными, долговечными и компактными. Однако они остаются весьма **дорогими** для широкого применения.

В приводимых ниже таблицах отражены параметры некоторых отечественных суперконденсаторов, аналогов которым пока нет в мировой практике.

Таблица 2

Батарейные модули и энергонакопители «АСТЭК».
 Спецификация Батарейного Модуля АСТЭК 48V

Тип Батареи	A	B	C	D	
Ёмкость Батареи (Ah)	100	150	200	240	Ah
Полная Энергия	5,1	707	10,3	12,4	kWh
Номинальная Энергия(разрядная мощность 0,5, T=23 ⁰ C)	4,8	7,3	9,7	11,6	kWh
Номинальное Напряжение	51,8				V
Диапазон напряжения	42~58,8				V
Максимальная непрерывная разрядная мощность	5000				W
Импульсная разрядная мощность (Длительность импульса не более 10 сек, T =23±3)	7500				W
Максимальный непрерывный разрядный ток	100	100	100	100	A

Окончание таблицы 2

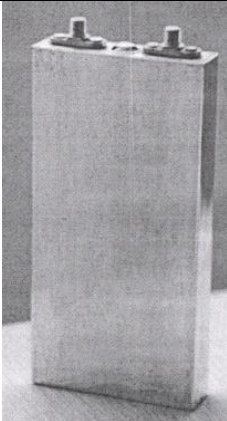
Импульсный разрядный ток (Длительность импульса не более 10 сек, T =23±3)	150	150	150	150	A
Максимальная непрерывная зарядная мощность	5000				W
Импульсная зарядная мощность (Длительность импульса не более 10 сек, T =23±3)	7500				W
Максимальный непрерывный зарядный ток	100	100	100	100	A
Размеры (ШxВxГ)	446*255*630				mm
Вес	36	44	52	59	kg
Объем	72				L

Таблица 3

Батарейные модули и энергонакопители «АСТЭК».
Энергонакопители «АСТЭК» 0,4 кВ, модели 50-100-200 кВт
Спецификация

Энергия(номинал) @0.5P Разряд, 25°C	kWh	47	100	200
Энергозапас (акт)	kWh	50,3	108,7	217
Напряжение (номинал)	VDC	133	360	465
Диапазон напряжения системы	VDC	108-151	295-410	375-530
Ток (DC)	A	370	300	300
Мощность (Непрерывный заряд)	kW	47	100	200
Мощность (Непрерывный разряд)	kW	47	100	200
Пик.Мощность (Разряд)	kW	94	200	300
Количество циклов (DoD 80%, @ 23°C)	cycles	4000	4000	4000
Вес	kg	540	875	2200
Размеры	mm	800*1905*580	1650*1905*580	2050*1905*580
Температура эксплуатации	°C	0-45	0-45	0-45

**Батарейные модули и энергонакопители «АСТЭК»
Батарейные ячейки на основе наноструктурированных электродных материалов и кремний-органических электролитов (рабочий образец)**

Фото	Спецификация	
	Parameter	Value
	Nominal Capacity	17,5Ah
	Nominal Voltage	3,7 V
	Charge Cut-off Voltage	4,2 V
	Discharge Cut-off Voltage	3,0 V
	AC Impedance	1,5mΩ
	Working Temperature	-20 °C – 60 °C
	Storage Temperature	25±5 °C
	Specific Energy (Wh/kg)	≥165
	Volumetric Energy Density (Wh/L)	≥390
	Specific Power (W/kg)	≥800
	Weight	385±5g

Size: 18mm×65mm×140mm

Volume: 0,165 L

Mass: 0,385 kg

Cathode Material: (classified information)

anode Material: (classified information)

В частности ЗАО Инженерно-техническая Фирма «СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ», 22 года присутствующая на рынке разработок и производства систем измерений для самых различных энергетических объектов и сетей, относит все свои внедрения к классу «Smart Metering». Развитие всех объектов этой фирмы идёт по пути создания устройств для интеллектуальных сетей «Smart Grids», в первую очередь высоковольтной электроники и программного обеспечения и систем управления мощными суперконденсаторами.

Разработки мощных суперконденсаторов, как и во многих зарубежных фирмах, в нашей ИТФ «С и Т» начинались с попыток создания наноструктурированных источников тока для медицинских целей. В качестве используемых материалов опробовались как углеродные нанотрубки, так и углеродные нановолокна, а в качестве электродных материалов либо плёнки золота, либо фрагменты графена на никелевой фольге. Золотые лепестки электродных расчёсок в первых экспериментах изготавливались шириной от 20 мкм и толщиной около 1 мкм. В последующих опытах ширина электродных полосок сокраща-

лась до 4 – 5 мкм и, наконец, до 1 мкм при толщине в единицы и десятки нанометров!

Библиографический список

1. Патрикеев Л.Н. Альтернативная энергетика. Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В.,2014.
2. Красников Г.Я.,Шелепин Н.А. Развитие отечественного производства кремниевых СБИС. ousnano.sbras.ru/userfiles/file/Krasnikov-shelepin.ppt
3. Раков Э.Г, Неорганические наноматериалы: учебное пособие. -М.:БИНОМ. Лаборатория знаний. 2013. -437 с.; ил.
4. Алексенко А.Г. ГРАФЕН. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний.2014. - 168с: ил.
5. Зайченко В.М. Концепция развития малой распределённой энергетика. Тамбов: Изд-во Ип Чеснокова А.В.,2014 .-с. 4-16.
6. Крюков Ю.А., Сахаров Ю.Е. Автономная система электропитания малых поселений. Тамбов : Изд-во ИП Чеснокова А.В. 2014. – с. 17-32.

Сахаров Ю.С.

**АДАПТИВНОЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ
ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ
СУБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОХОДА
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ**

*Международный университет природы, общества и человека «Дубна»
sakharovu@yandex.ru*

При принятии решений при проектировании различают бинарное решение, стандартное решение, многоальтернативное решение, непрерывное решение, инновационное решение и т.д., все эти виды решений дифференцируются в зависимости от количества альтернатив.

Принятие решений – процесс выбора наиболее предпочтительного решения из допустимого множества решений. Для этого используется МАУТ(многокритериальная теория полезности), МАИ (метод анализа иерархий), ELECTRE (метод ранжирования многокритериальных альтернатив), эвристические методы и другие.

Проведенный анализ методов принятия решений показал, что особенности лиц, принимающих решения, не учитываются в существующих методах принятия решений.

Природа индивидуальных особенностей человека двойка. Такие индивидуальные особенности как интересы и увлечения, характеризуются непостоянством, колебаниями, изменчивостью. Есть и другой тип индивидуальных особенностей. Они довольно устойчивы и изменить их практически нельзя. К таким особенностям относятся черты, связанные с индивидуальными проявлениями основных свойств нервной системы, а также стиль деятельности ЛПП.

Для повышения эффективности процесса принятия решений необходимо учитывать именно устойчивые характеристики. На основе анализа принятых в психологии характеристик индивидуальных особенностей человека, относящихся к интеллектуальной деятельности, была выбрана характеристика индивидуального стиля деятельности.

Основная характеристика индивидуального стиля деятельности – соотношение познавательной, ориентировочной и исполнительной компонент деятельности. Под познавательной и исполнительной компонентами понимаются суммарные затраты времени на поиск решения (обдумывание, прогнозирование своих действий, оценка промежуточных результатов, затраты времени на непосредственное осуществление задуманного). Сообразно характеристикам индивидуаль-

ного стиля деятельности испытуемые делятся на аналитиков, которым свойственен познавательный стиль действий, и синтетиков, отличающихся исполнительным стилем действий.

Для оценки индивидуальных особенностей человека предлагается метод оценки стилевых особенностей деятельности ЛПР, основанный на игровых программах и отличающийся повышенной степенью достоверности оценки стиля деятельности. Для определения особенностей человека в психологии существует множество приемов (тесты способностей, умений навыков; опросники; проективные тесты; ситуационные тесты; случайные наблюдения; игры и пр.). Особенности стиля деятельности ЛПР лучше всего проявляются при решении задач типа игровых программ, особенно, если испытуемые не встречались ранее с программами подобного рода. Относительно простая структура игровой задачи и достаточно высокий мотивационный компонент обеспечивают более дифференцированное проявление стилевых черт. Поэтому многие игры включаются психологами в состав объективных тестов, что обуславливает выбор игровой программы в качестве диагностического метода.

Гистограммы, как правило, содержат несколько выраженных максимумов, отражающих, соответственно, исполнительную, ориентировочную и познавательную составляющие в распределении времени шага или разности времени соседних шагов (рис. 1).

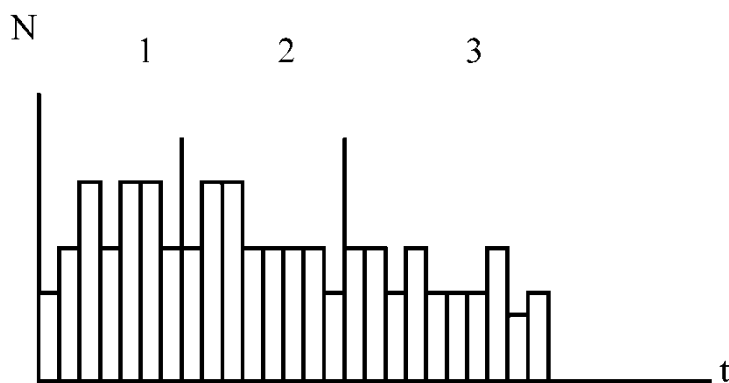


Рис 1. Гистограмма времени решения.

Составляющие времени решения: 1 – исполнительная, 2 – ориентировочная, 3 – познавательная, t – время отклика, N – частота.

Относительное преобладание познавательной или исполнительной компонент указывает на склонность испытуемого к познавательному или исполнительному стилю. Ориентировочная компонента относится к временным интервалам, соответствующим моментам совершения пробных шагов.

Стиль деятельности определяется на основе решающего правила, анализирующего результаты обработки последовательности

элементарных шагов, полученных при решении испытуемым тестовых задач.

Решающее правило учитывает оценки математического ожидания и дисперсии отношения компонент времени решения, самого времени решения и числа шагов решения, и на основе найденных доверительных интервалов оцениваемых параметров деятельности принимает решение о типе стиля деятельности. То есть определение стиля деятельности ЛПР производится на основе автоматизированного анализа его деятельности при решении тестовой задачи.

Предлагается адаптивный метод многокритериального принятия решения и показатели эффективности разработанного метода и работы адаптивной СППР (Система принятия проектных решений) принятия решения. Идея этого метода показана на рис. 2.

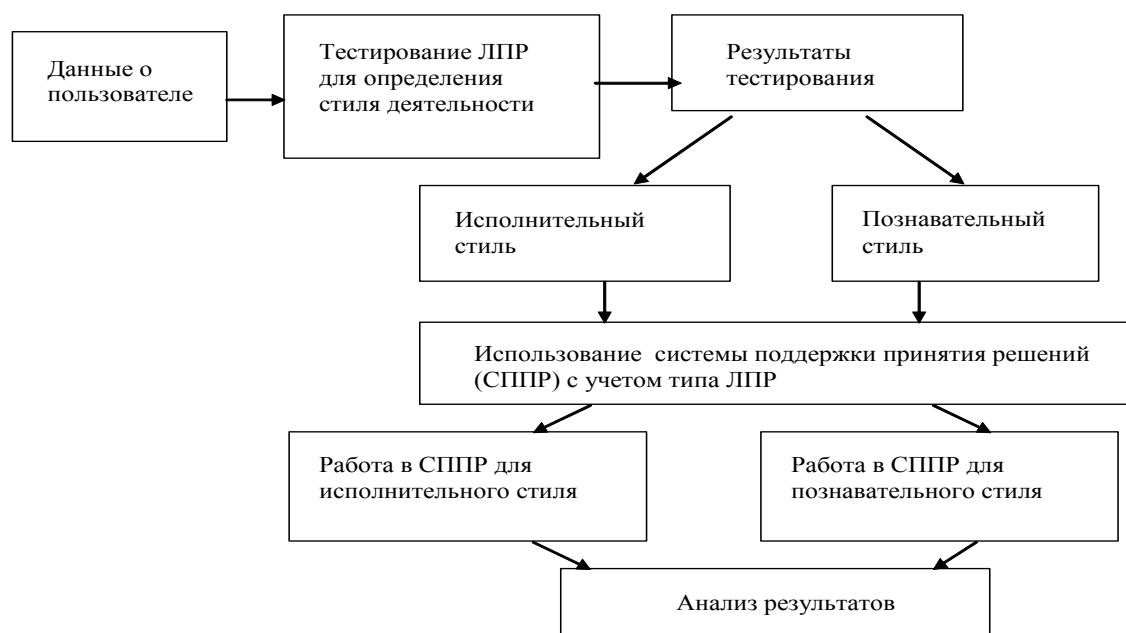


Рис. 2. Схема разработанного адаптивного метода принятия решения

Суть метода заключается в определении стиля деятельности и, с учетом особенностей стиля деятельности, внесения корректировок в существующую обобщенную схему принятия решений.

Для реализации метода разработана структурная схема СППР. Она предназначена для решения задач классификации большого количества вариантов (альтернатив) или выбора из них наилучших вариантов на основе информации, получаемой от лица, принимающего решения (ЛПР).

Сначала ЛПР проходит тестирование по определению стиля деятельности. Результатом тестирования будет являться заключение о склонности испытуемого к познавательному или исполнительному

стилю деятельности. В зависимости от стиля деятельности меняется структура СППР.

Познавательный стиль основан на аналитическом способе оценки материала путем выяснения взаимодействий между внутрисктурными элементами информационного содержания. Для такого стиля деятельности характерно применение интуиции и суждений. В результате такой оценки происходит формирование полной, обобщенной и адекватной ориентировочной основы действий, обеспечивающей построение целостного концептуального представления о структуре задачи. Реализация данной стратегии приводит к эффективным решениям, отличающимся наличием многообразных продуктивных тактик, а также малым количеством ошибочных действий. Процесс решения характеризуется преобладанием познавательно-прогнозирующих действий над контрольно-ретроспективными. Планирование осуществляется как дальнейшее, осознанное, увеличивающее тенденцию к усложнению предметной деятельности по мере формирования ориентировочной основы действий. Контроль процесса решения осуществляется в двух формах: контроль, включенный в познавательную структуру действий, и итоговый контроль, завершающий период преобразования содержания задачи.

Исполнительный стиль связан с направленностью субъекта на анализ внешних признаков информационного содержания, что приводит к образованию неполной, неадекватной, конкретной ориентировочной основы действия, выработке ложных гипотез. Реализация стратегии оказывается неэффективной, сопряженной с множеством ошибочных действий. В процессе решения проявляется неорганизованность ЛПР, его зависимость от информационного поля самой задачи, что обуславливает большое количество периодов с ориентацией поискового типа. Планирование в данном случае осуществляется нерегулярно, на ближайшие один-два хода и при том не является обязательным ЛПР для решения задачи. Функциональное пространство предметной деятельности ограничивается фрагментом решения «в дискретный момент», Контроль носит ситуативный, обособленный характер. Решение построено на простых тактиках, не отличающихся разнообразием и полнотой.

Пунктиром выделены те блоки, которые исключены из схемы процесса принятия решений. Это связано с принципиальными различиями в поведении ЛПР - аналитиков и ЛПР - синтетиков при принятии решений (для ЛПР с исполнительным стилем деятельности необходима детальная проработка проблемы; интуитивные способности, в отличие от ЛПР с познавательным стилем деятельности, у них развиты слабо).

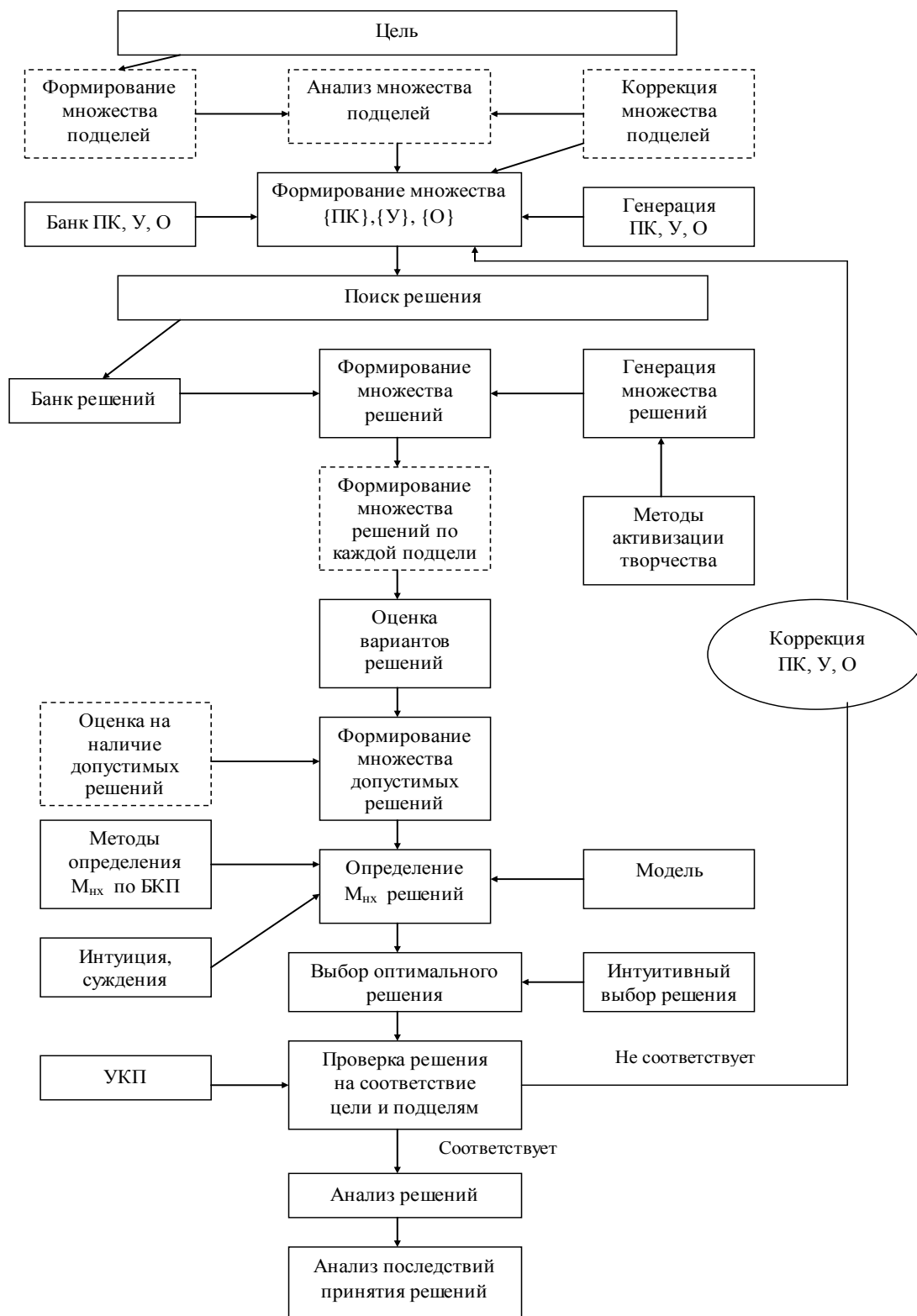


Рис.3. Этапы работы ЛПР с системой поддержки принятия решений при познавательном стиле деятельности

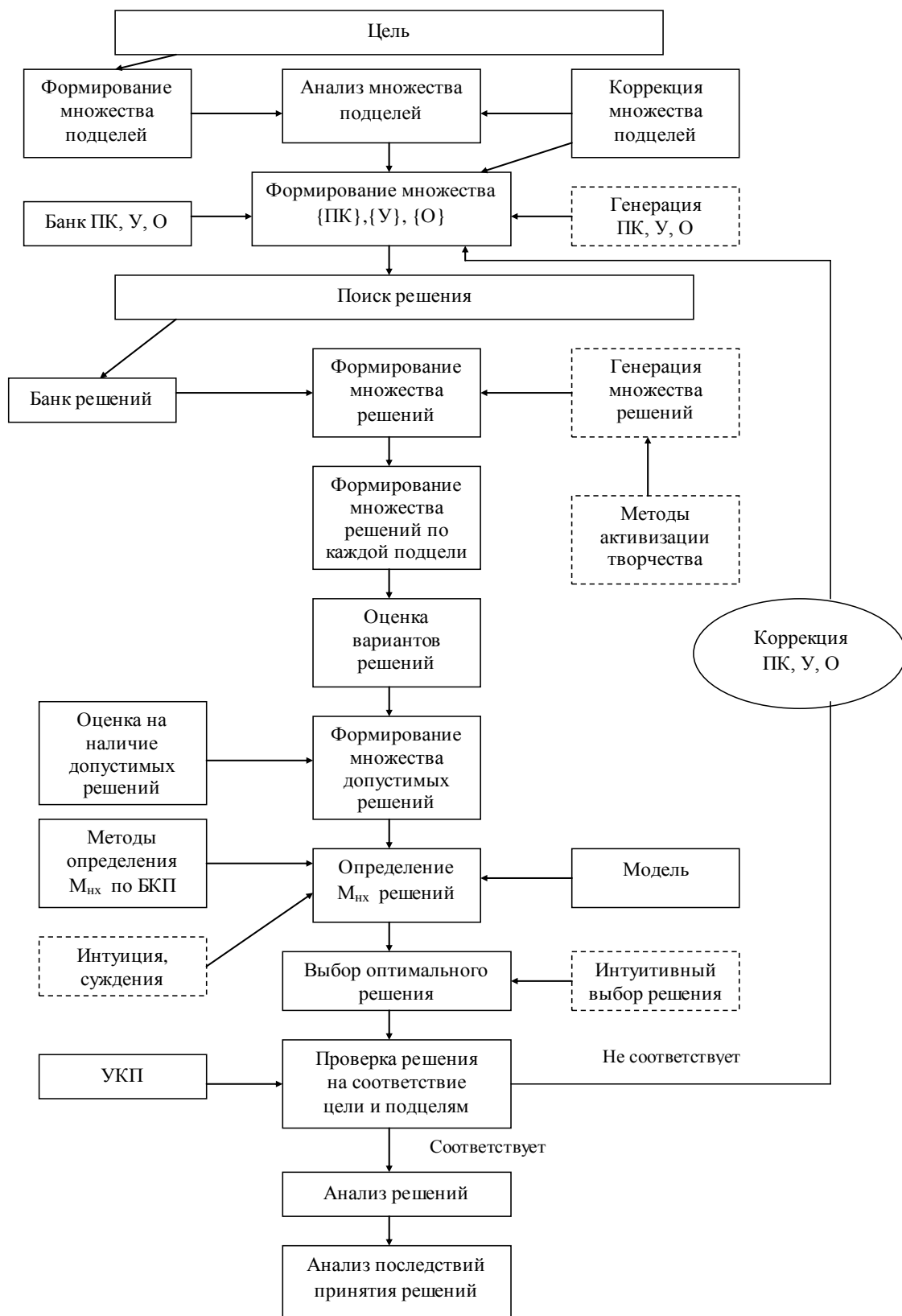


Рис.4. Этапы работы ЛПР с системой поддержки принятия решений при исполнительном стиле деятельности

Для оценки эффективности разработанного метода и работы адаптивной СППР предлагаются следующие показатели:

1. *Время решения:*

а) время решения задачи(в часах)

T – отношение среднего времени выполнения задания в группе при работе с СППР, не учитывающей стиль ЛПР, к среднему времени выполнения задания в группе при работе с СППР, учитывающей стиль ЛПР.

б) время анализа альтернатив(в часах)

$T_{ан}$ –отношение среднего времени анализа альтернатив в группе при работе с СППР, не учитывающей стиль ЛПР, к среднему времени выполнения задания в группе при работе с СППР, учитывающей стиль ЛПР.

2. *Уровень комфортности (К)*

Измеряется в баллах от 1 до 5, оценивается уровень комфортности при работе с СППР, учитывающей стиль деятельности и при работе с СППР, не учитывающей стиль деятельности.

Отношение полученных величин и будет показателем эффективности разработанного метода с точки зрения комфортности при работе с СППР.

3. *Среднеарифметическая успешность в группе (U).*

Среднеарифметическая успешность:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n},$$

где x_i – успешность i -го индивида ($i = 1, \dots, n$), n – объем группы.

Успешность (то есть правильность выбора альтернативы) определяется величинами 1 и 0 (правильно/неправильно).

4. *Качество решения*

В качестве показателя качества предложен средний риск R выработываемого системой решения:

$$R = P(A_{10}) \cdot r_{10} + P(A_{01}) \cdot r_{01} = P(1 - P_d) \cdot r_{10} + (1 - P)P_f \cdot r_{01}$$

где $P(A_{10})$ – вероятность события, когда система выдает решение «информации нет» при наличии на ее входе достоверной информации; $P(A_{01})$ –вероятность события, когда система выдает решение «информация есть» при отсутствии на ее входе достоверной информации; P – вероятность наличия достоверной информации на входе системы; P_d – вероятность принятия системой правильного решения; P_f –вероятность принятия системой неправильного решения, соответствующая событиям A_{10} и A_{01} ; r_{10} , r_{01} – стоимость принятия системой решений, соответствующих событиям A_{10} и A_{01} .

В реальных условиях выбор величин r_{10} и r_{01} проводится с помощью метода экспертных оценок. В то же время для качественной оценки величины R могут быть заданы значения вероятности принятия системой правильного решения $P_d > 0.9$ при условии вероятности $P_f < 0.1$. Учитывая необходимость минимизации риска, его оценку для различных структурных схем СППР можно производить путем оценки величины P_f , связанной с событиями, при которых системой могут приниматься неправильные решения.

Таким образом, качество решения (средний риск вырабатываемой системой решения) $R \in [0, 0.1]$.

5. Надежность работы адаптивной СППР

Надежность работы всей системы определяется работой каждого отдельного элемента: сбой в работе хотя бы одного из элементов приводит к нарушению работы всей системы в целом. Поэтому величина P_f для СППР (с линейным расположением элементов) определяется следующим образом:

$$P_f = (1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{fi}) P_i),$$

где P_f – вероятность принятия системой неправильного решения, N – число элементов в системе, P_i – вероятность наличия достоверной информации на входе элемента i системы; P_{fi} – вероятность неправильного решения этим элементом. P_f – надежность работы адаптивной СППР (вероятность принятия системой неправильного решения).

Надежность работы адаптивной СППР (вероятность принятия системой неправильного решения) является качественным показателем, $P_f \in [0, 0.1]$.

Предложенные критерии позволяют оценить эффективность работы адаптивной к ЛПР системы поддержки принятия решений либо по отдельным показателям, либо используя аддитивную свертку.

Предложен адаптивный метод и алгоритм принятия решения, учитывающий деятельностные особенности ЛПР при принятии решений, а также предложена структура СППР, позволяющая повысить эффективность процесса принятия решений с учетом особенностей деятельности ЛПР, а именно его исполнительного или познавательного стиля.

Библиографический список

1. Сахаров Ю.С., Дьячкова И.Е. Адаптивный метод принятия решений с учетом особенностей ЛПР // Прикладные задачи моделирования и оптимизации: Межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 2003. С. 25-32.

Крюков Ю.А.

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СЕТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ДАННЫХ

*ГБОУ ВПО Московской области «международный университет природы,
общества и человека «Дубна»
kua@uni-dubna.ru*

Концепция построения систем передачи электроэнергии применяется на практике более 100 лет. Новации при модернизации элементов существующих технологий дают косметический эффект и не способны радикально улучшить ситуацию в стареющей электроэнергетике, создать конкурентную среду среди поставщиков. Низкая эффективность энергетического комплекса сдерживает темпы модернизации промышленности и сферы услуг. Разработки университета «Дубна» призваны объединить множество разрозненных кабельных сетей в единую высокоэффективную систему, обеспечить привлекательность инвестиций со стороны бизнеса и населения.

Ключевые слова: сети электроснабжения, сети передачи данных, однопроводные технологии передачи электроэнергии, резонансные технологии, оптоволоконные коммуникации, цифровое неравенство, конкурентная среда, интеллектуальные сети.

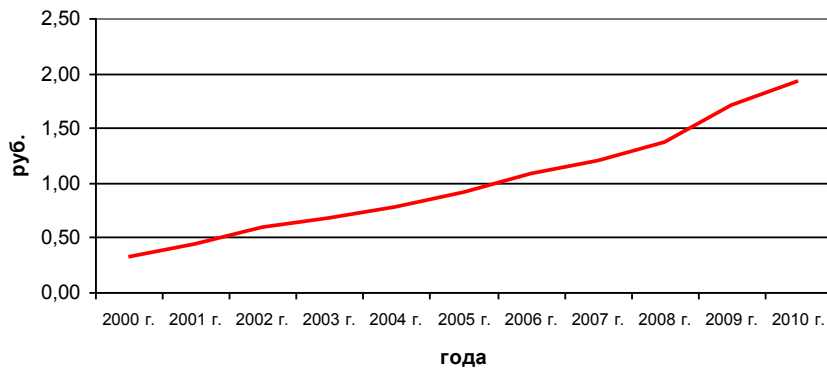
The concept of construction of electric power transmission systems is applied in practice, more than 100 years. Innovations in the modernization of the elements of the existing technologies provide cosmetic effect and are not able to radically improve the situation in the aging electric power industry, create a competitive environment among providers. Low efficiency of energy complex inhibits the pace of modernization of the industry and sphere of services. The development of university "Dubna" are designed to combine the many disparate cable networks into a single high-performance system, to ensure the attractiveness of the investment on the part of businesses and population.

Вопросы электроэнергетики

Одной из основных задач развития производственных сил страны является опережающее наращивание мощности электроэнергетического комплекса России. Курс на модернизацию основных фондов предприятий предполагает повышение выработки продукции на одного работающего путем снижения объемов ручного труда, автоматизации производственных процессов, то есть повышения энергоёмкости

и эффективности производств. Одним из факторов, сдерживающих процессы модернизации, переоборудования производств остается отсутствие у большинства компаний очевидной коммерческой эффективности инвестиций в условиях роста тарифов на энергоносители (рис.1).

Электроэнергия в квартирах без электроплит, за 100 кВт×ч



Газ сетевой, за месяц с человека

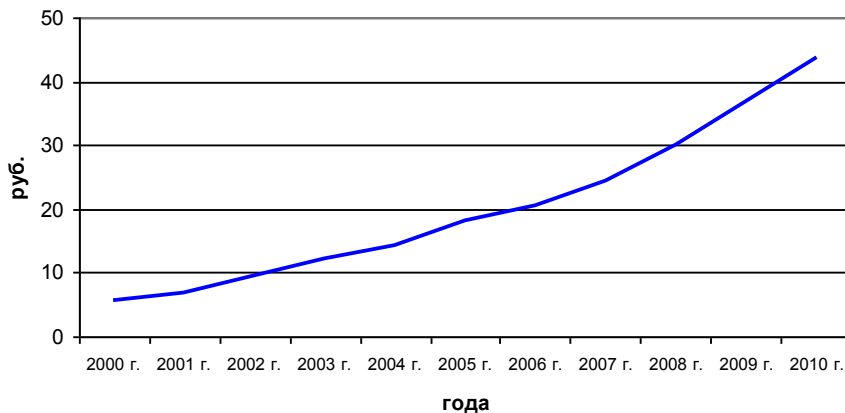


Рис.1. Динамика роста тарифов (по данным Росстат)

Как и в предыдущие периоды в текущем году предполагается повышение тарифов на газ на 15 процентов, приближающее стоимость этого сырья к уровню цен на западном рынке, а стоимость электроэнергии вырастет за год на 11,5 процента. При этом эффективность генерации и, что не маловажно, доставки электроэнергии потребителю в России находится на крайне низком уровне. По данным Федеральной сетевой компании (ОАО «ФСК ЕЭС») 15% подстанций 6-10/0,4 кВ находится в неудовлетворительном состоянии, а более 40% воздушных и масляных выключателей отработали свои сроки эксплу-

атации. По причине изношенности электросетей потери при транспортировке энергии достигают 20-30% вместо обычных для Европы 6-8%. Около 60% электросетей и вовсе нуждаются в перекладке. Проблема не только в высоком уровне морального и физического износа основных электроэнергетических фондов. Наша страна заметно отстает от Европы и по ряду других показателей: надежности, экономичности, эффективности использования топлива, техническому уровню систем мониторинга.

Значительную долю инвестиций при создании новых производств в России составляют затраты на подключение к электросети, где цены формируются в условиях монопольного положения на региональном рынке энерготранспортных компаний, высоких издержек при производстве и передаче электроэнергии потребителям, ориентации на западно-рыночное ценообразование на углеводороды и электроэнергию. При этом необходимо учитывать разницу в климатических условиях и, соответственно, в коммунальных издержках на большей территории России в сравнении со странами западной Европы, Японии и Китая (Рис.2).

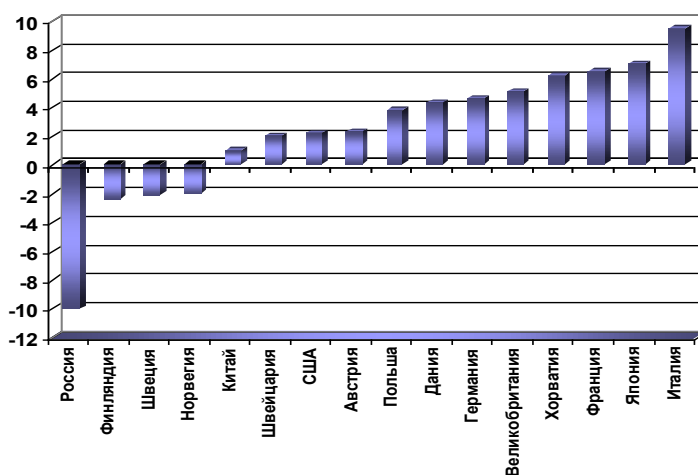


Рис.2. Среднегодовая температура по территории стран

В результате можно сделать вывод – в условиях паритета цен на энергоносители, конкурентоспособность страны на мировом рынке при производстве продукции отечественными компаниями будет ниже даже при условии внедрения самого современного западного оборудования [1].

Высокие риски будущих периодов, связанные, в том числе, и с ежегодным существенным ростом цен на энергоносители, невозможностью достоверно просчитать окупаемость дорогостоящего оборудования в долгосрочной перспективе, заставляют компании жить «сегодняшним днем», эксплуатировать физически и морально устаревшие

основные фонды, а строительство высокоэффективных производств начинать за рубежом (Рис 3).

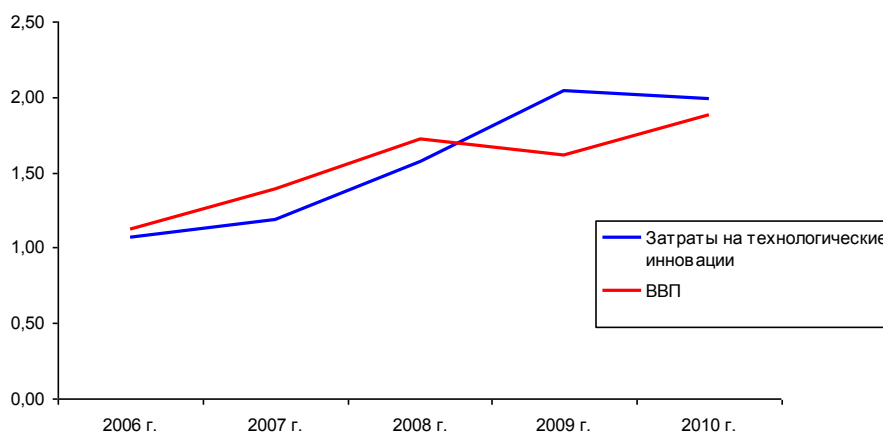


Рис.3. Динамика затрат на технологические инновации и роста ВВП в России

Обсуждаемая концепция развития электроэнергетики на основе крупных генерирующих станций [3], опирающихся на магистральные линии электропередачи с огромной протяженностью, не сможет обеспечить прорывное повышение динамики развития регионов страны. Инвестиции в строительство «умных распределительных сетей», являющиеся главным посылом концепции, призванным изменить ситуацию с надежностью и эффективностью электропередачи, непременно лягут тяжким бременем на потребителей в виде инвестиционной составляющей тарифов на период реализации в несколько десятилетий. Такое положение вещей ставит под сомнение саму возможность выполнения в обозримой перспективе планов по модернизации промышленности.

Существуют ли альтернативные решения по наращиванию мощности относительно более дешевой энергии? Усилиями западных энергетиков, ученых и властей мировая энергетическая отрасль выдвинула новую концепцию - интеллектуальные электроэнергетические системы (Smart Grid - «умные сети»), базовым элементом которых становятся возобновляемые (альтернативные) источники энергии. Понятие Smart Grid связывают с интеграцией модернизированных электроэнергетических систем с наложенными телекоммуникационными сетями и формированием на основе обмена информацией активных и адаптивных свойств распределительных сетей (например, самодиагностика и самовосстановление). Кроме того, акцент делается на переоборудовании сетей электропередачи с однонаправленной схемой, предназначенной для передачи электрической мощности от больших генерирующих установок до многочисленных потребителей,

в двунаправленные системы. Концепция формирует возможность подключения и учета мощности многочисленных источников возобновляемой энергии, соединенных в единую информационную сеть и позволяющих оптимизировать генерацию и расход энергии в разное время суток. Массовое внедрение генерирующих мощностей альтернативной энергетики позволяет приблизить источники к объектам потребления и, тем самым, существенно снизить затраты на транспортировку. Предлагаемый подход позволяет создать на уровне муниципального образования конкурентную среду среди производителей электроэнергии, возместить дефицит мощностей в развитых регионах, значительно снизить ценовой порог входа в отрасль для новых генерирующих компаний.

Реализация подобного подхода в России не поддерживается существующей стратегией развития электроэнергетики и требует разработки нетрадиционных технологий, позволяющих представить строительство интеллектуальных сетей в виде высокоэффективного бизнеса, реализация которого возможна силами малых компаний с невысоким стартовым капиталом. Такие технологии должны аккумулировать в себе целый спектр прорывных идей позволяющих:

- начать строительство с уровня деревенской улицы;
- привлечь инвестиции населения для развития распределенных генерирующих мощностей и энерготранспортных сетей на муниципальном уровне;
- сформировать муниципальный рынок электроэнергии и обеспечить прозрачность формирования цены на основе информационных и телекоммуникационных систем;
- снизить общую стоимость создаваемой инфраструктуры и текущие эксплуатационные расходы;
- повысить доходность путем расширения спектра предлагаемых сетью услуг.

Вопросы телекоммуникационных технологий

Еще одной задачей современной России является устранение «цифрового неравенства». Проблема связана с существенным отставанием развития телекоммуникационных сетей за пределами крупных городов. Увеличение пропускной способности линий связи в основном реализуется прокладкой оптоволоконных коммуникаций, позволяющих транслировать данные со скоростью до сотен гигабит в секунду. Производительность таких линий на 2-3 порядка превышает максимально возможную пропускную способность других наземных коммуникаций, а также спутниковой и мобильной радиосвязи, что

обеспечивает интеграцию в рамках единой оптоволоконной среды всех общественных и ведомственных сетей связи – телефонии, кабельного телевидения, Интернет, диспетчеризации лифтов, видеонаблюдения, технологических сетей и д.р.

Сложившаяся практика работы кабельных операторов связи показывает высокую коммерческую эффективность внедрения существующих оптоволоконных стандартов передачи данных при строительстве магистральных линий в густонаселенных городских районах с многоэтажной застройкой. При этом внутридомовые линии связи выполняются медными кабелями, позволяющими снизить временные затраты и стоимость подключения в расчете на одного абонента. Конкуренция в этой нише рынка чрезвычайно высока. Часто можно наблюдать ситуацию, когда в многоквартирном доме одновременно построены 5-6 кабельных сетей связи разных провайдеров, имеющих сопряжение между собой только на уровне Интернет и полностью дублирующих основные функции. Несмотря на очевидную избыточность, в конечном итоге выигрывает потребитель, который может выбрать наиболее качественную, полноценную и дешевую услугу. Стандартом становится и отсутствие платы за подключение к сети, что приводит к высокой миграции пользователей от одного провайдера к другому, что в еще большей степени обостряет конкуренцию. В настоящее время не редкость, когда клиент в России получает услуги более богатые всевозможными сервисами и по меньшей цене, чем его коллега в развитых западных странах. При этом норма прибыли предприятий, работающих в сфере телекоммуникаций, остается более высокой, чем в ряде других отраслей промышленности, что говорит о высокой производительности труда, связанной с автоматизацией большинства рутинных процессов, высокой степенью внедрения технологий мониторинга и телеуправления сетевым оборудованием.

Однако в частном секторе городов и населенных пунктов России наблюдается прямо противоположная ситуация. Значительно более низкая плотность населения не позволяет использовать медные кабельные линии для высокоскоростного подключения абонентов в связи с большими междомовыми расстояниями. Использование же оптоволоконной магистрали с множественными ответвлениями приводит к существенно большим затратам при создании кабельной инфраструктуры, установке дорогого оптоволоконного оборудования в каждое домовладение, что в конечном итоге, ведет к формированию цены на кабельное подключение, неприемлемой для большинства жителей. Таким образом, сельское население страны находится в неравноправных социально-экономических условиях при подключении и эксплуатации высокоскоростных сетей передачи данных по отноше-

нию к населению городов. В результате, наибольшей популярностью здесь пользуются технологии мобильной связи с низкой ценой подключения, но с несоизмеримо меньшей скоростью передачи и высокой стоимостью интернет-трафика.

В целом же по стране наблюдаются тенденции к насыщению рынка услуг связи в густонаселенных районах, где за последние 3-5 лет произошло значительное снижение количества вновь вводимых в эксплуатацию сетей передачи данных, идут процессы слияния и поглощения крупными операторами более мелких. Однако, несмотря на очевидную коммерческую заинтересованность расширения имеющихся зон покрытия кабельными операторами, каких либо прорывных изменений ситуации с распространением высокоскоростных сетей связи в районах с низкой плотностью застройки не происходит. Незрелость сферы телекоммуникаций регионов является еще одним существенным фактором, сдерживающим экономическое развитие территорий России.

Интеллектуальная распределительная сеть передачи электроэнергии и данных

Исходя из анализа ситуации, складывающейся на региональных и муниципальных рынках электроснабжения и передачи данных, можно сделать вывод о неполном соответствии существующих технологических, организационных, экономических подходов к решению наиболее значимых проблем в энергетике и связи. Современное развитие общества и технологий требует внедрения новых решений традиционных задач, в большей степени соответствующих глобальным законам сохранения энергии, гармонизирующим развитие значимых отраслей экономики.

В этих условиях, с учетом задач по привлечению в отрасли инвестиций населения, созданию рыночных механизмов ценообразования, необходимо заново сформулировать набор требований, предъявляемых к любым территориально-распределенным кабельным сетям, обеспечивающим спектр современных услуг:

– технологические и организационные особенности развития кабельной системы должны обеспечивать возможности для строительства сетей «снизу», с уровня муниципальных образований и районных центров. Только в этом случае возможно создать экономическую заинтересованность широкого круга населения во вложении собственных средств в создание и развитие высокотехнологичной инфраструктуры региона, начать масштабное переоснащение и модернизацию устаревающего оборудования и кабельных линий

электропередачи, решить задачу качественного энергоснабжения малых населенных пунктов, предоставить современные высокоскоростные услуги связи;

- принципиальные, структурные и топологические схемы территориально-распределенных сетей должны обеспечивать возможность обмена генерируемой мощностью в двух направлениях не только на уровне магистральных линий, но и на уровне распределения. Данное требование необходимо для подключения в общую энергосистему объектов малой и альтернативной энергетики, находящихся в частной собственности компаний и населения. Это позволит наращивать совокупную мощность генерации экологически чистой электроэнергии на уровне страны без существенных материальных затрат со стороны бюджета и монополий с государственным капиталом, создаст условия снижения стоимости электроэнергии для конечного потребителя;

- передача электроэнергии по линиям должна обеспечиваться с повышением потребительских характеристик сетей - значительным снижением металлоемкости линий передачи для цветных металлов, потерь на разогрев проводников, повышением травмо- и пожаробезопасности при эксплуатации электросетей. Данное требование принципиально необходимо для снижения стоимости погонного метра линий электропередач и потенциальной возможности финансирования строительства линий на основе привлеченных населением средств с учетом параметров средних заработных плат в регионах России;

- трансляция потоков мощности вдоль кабельной системы должна совмещаться с высокоскоростной передачей данных. Реализация этого требования позволит существенно повысить рентабельность эксплуатации таких интегрированных систем, поднять заинтересованность инвесторов в софинансировании работ, развивать и обслуживать единую кабельную систему для всего спектра услуг с минимальными затратами на создание и текущее обслуживание;

- существенно снизить организационные издержки компаний и населения не только при присоединении потребителей к сетям передачи электроэнергии для объектов нового строительства, но и при подключении к сетям генерирующих мощностей объектов альтернативной энергетики. Учитывая неразрывную зависимость развития производительных сил России от наличия на территории источников энергоснабжения, данное требование позволит обеспечить дальнейший рост среднего класса населения – собственников оборудования генерации электроэнергии;

- обеспечить непрерывный и дифференцированный учет выданной и потребленной электроэнергии всеми участниками рынка.

Требование позволит организовать автоматизированный выбор «умной» розетки наиболее приемлемого источника по заранее определенным параметрам (цене, мощности, надежности), осуществлять взаимные расчеты и платежи в условиях долевого обеспечения энергией потребителя от множества различных источников. Прозрачность осуществления расчетов является гарантией формирования зрелого ресурсного рынка;

– обеспечить динамическое управление параметрами сложно структурированной сети с присоединенными разнородными источниками и потребителями электроэнергии с целью оптимизации процессов перетока энергии и сокращения технических потерь. Оснащение генераторов и электрических розеток высокопроизводительными контроллерами управления и мониторинга, объединенными оптоволоконной магистралью, позволит создать эффективную распределенную цифровую систему централизованного управления распределительной сетью в целом.

На первый взгляд некоторые из сформулированных требований противоречат друг другу. Например, требование по снижению стоимости погонного метра сетей несовместимо с интеграцией функций передачи электроэнергии и данных, оснащением каждой электрической розетки программируемым вычислительным устройством, формированием двунаправленного перетока электроэнергии. А строительство сетей «снизу», со случайно возникающими связями без предварительного проектирования (ячеистая топология, применяемая при строительстве линий Интернет) противоречит требованию динамического управления многочисленными электрическими параметрами в централизованной системе, резко усложняет организацию динамического учета в доленом энергообеспечении потребителя. Однако, новые подходы к передаче электрической энергии, применение новых конструктивных решений при создании электрораспределительных сетей позволяют дать положительный ответ на вопрос о возможности обеспечения всех вышеизложенных требований в рамках одной кабельной системы. Причем начало строительства таких сетей возможно не в замен, а параллельно с ныне существующими сетями.

Удивительно, но все новое – хорошо забытое старое. В работах Н.Тесла (Tesla N. Apparatus for transmission of electrical energy. US Pat № 349621, 15.05.1900) был предложен метод передачи активной мощности с помощью реактивного емкостного тока с использованием резонансных свойств однопроводной линии, изготовленной из металлического проводника. Этот метод был незаслуженно забыт по причине сложной организации управления резонансными характеристиками линии на основе доступной на тот момент элементной базы. Значи-

тельный прогресс по снижению стоимости и одновременному росту производительности однокристальных микропроцессорных систем позволяет строить резонансные системы электропередачи с учетом экономической эффективности. Подходы к конструктивным решениям, используемым при строительстве интеллектуальных систем передачи электроэнергии разработаны в Международном университете природы, общества и человека «Дубна» и защищены соответствующими патентами.

Конкурентоспособность используемых технологий однопроводной передачи электрической энергии обеспечивается более высоким КПД передачи из-за малых потерь на поглощение и излучение энергии. Проводящий канал на основе силового стального компонента стандартного оптоволоконного кабеля в резонансном режиме имеет квазисверхпроводящие свойства. Объяснением этого эффекта является отсутствие активного тока в проводнике с низкой удельной проводимостью и доминирующей ролью в передаче энергии токов смещения, для которых закон Джоуля-Ленца не выполняется. Ток высокочастотного преобразователя расходуется на потери в проводах цепи питания и сердечнике трансформатора Тесла, которые составляют менее 2% и на создание реактивного тока в проводящем канале линии. В режиме резонанса напряжений потери от прохождения емкостного зарядного тока через активное сопротивление проводящего канала самой линии ничтожно малы. Использование телекоммуникационной инфраструктуры на основе оптоволоконного кабеля позволяет интегрировать в единой системе передачу электрической энергии и данных, предоставить потребителю значительную электрическую мощность с малыми потерями при передаче, значительно увеличить длину линии без установки повышающих подстанций.

Первая интеллектуальная система передачи электрической энергии и данных развернута на территории кампуса университета «Дубна» в июле 2011 года и с момента запуска эксплуатируется в непрерывном режиме. Система прошла тестирование в условиях аномально высоких температур летнего периода, в условиях дождей, множественных переходов нулевой отметки температур при высокой влажности воздуха осенью, а также низких температур, наледи в зимний период и показала высокую эффективность и надежность электроснабжения. Система построена на основе оптоволоконного кабеля со стальным несущим тросом, подвешенным на столбах освещения территории университета. Потребители электроэнергии - светильники уличного освещения, видеокамеры, точки беспроводного доступа Wi-Fi, подключаются собственными оптическими волокнами к серверам мониторинга, биллинга, управления и обеспечиваются электропита-

нием на основе цифровых подстанций, формирующих прохождение емкостного зарядного тока вдоль трассы прокладки кабеля. Модульные преобразователи, необходимые для питания устройств, рассчитанных на стандартные сети электропитания, снабжены контроллерами автономного и дистанционного управления параметрами работы при формировании устойчиво резонансных колебаний в линии. Программное обеспечение систем мониторинга и управления, предназначенное для сбора и хранения текущих параметров энергоснабжения и формирования управляющих команд, разрабатывается с учетом возможности работы в режиме распределенных вычислений в случае потери связности с сервером. Свободные оптические волокна кабеля используются для объединения сетей различных зданий университета в единую сеть передачи данных, телефонии, видеонаблюдения, системы контроля и управления доступом.

Положительные результаты эксплуатации тестового полигона на территории университета «Дубна» дают основания предполагать, что дальнейшее развитие технологий интегрированной передачи электроэнергии и данных позволит открыть новую страницу в формировании эффективной и широко востребованной инфраструктуры обмена энергией и информацией в современной России.

Библиографический список

1. Кузнецов О.Л., Большаков Б.Е. Устойчивое развитие: Научные основы проектирования в системе природа-общество-человек. – СПб.: Гуманистика, 2002. – 615 с.
2. Большаков Б.Е. Закон природы или как работает Пространство-Время. – М.: Российская академия естественных наук, 2002. – 328 с.
3. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, Сайт Министерства энергетики Российской Федерации, <http://minenergo.gov.ru/activity/energostategy/>

*Бородуля В.А., Виноградов Л.М.,
Гребеньков А. Ж., Михайлов А.А.*

**РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ
МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ
МЕЛКОДИСПЕРСНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ
КАРБОТЕРМИЧЕСКИМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ
КРЕМНЕЗЁМА В РЕАКТОРЕ
ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ**

*ГНУ «Институт тепло- и массообмена
имени А.В.Лыкова НАН Беларуси, Республика Беларусь,
dsl@hmti.ac.by*

Существенное технологическое обновление и создание новых наукоемких производств являются важнейшим условием успешного развития современной экономики.

В последние годы карбид кремния (SiC) благодаря своим высоким механическим, электротехническим и физико-химическим характеристикам становится одним из наиболее перспективных и востребованных компонентов при реализации современных конструктивно-технических решений в самых известных областях высокотехнологических производств – керамические и полимерные композитные материалы, авиа- и ракетно - космические технологии, атомная промышленность, электроника и полупроводниковая техника [1-3].

Традиционный способ промышленного производства карбида кремния заключается в длительном карботермическом восстановлении кремнезёма углеродом, который проводится в крупнотоннажных электрических печах при температуре свыше 1800°C (способ G.Acheson). Для получения мелкодисперсного и однородного по составу и чистоте порошка карбида кремния образующийся кусковой продукт подвергается дальнейшей обработке со значительным объемом ручного труда. Производство характеризуется значительным энергопотреблением, низким выходом карбида кремния и повышенными вредными выбросами в окружающую среду [4-6].

Техническое совершенствование отрасли направлено главным образом на снижение издержек производства SiC и на получение мелкодисперсных порошков, поскольку используемый в составе конструкционных материалов карбид кремния должен удовлетворять достаточно жестким требованиям по дисперсности, фазовому и химическому составу.

Среди предложений дальнейшего развития технологии синтеза карбида кремния и других тугоплавких соединений (карбиды, нитриды) заслуживает внимание использование реактора электротермического кипящего слоя (ЭТКС) который по сравнению с лучшими зарубежными технологиями и существующими производствами позволяет контролировать морфологию и состав получаемого материала, обеспечить его однородность и чистоту, высокую производительность, снизить затраты энергии, автоматизировать технологический процесс [7-13]. Авторами разработана технология синтеза мелкодисперсного карбида кремния методом карботермического восстановления кремнезёма в реакторе ЭТКС и проведена ее апробация на созданной автоматизированной экспериментальной установке.

Особенностью реактора ЭТКС является наличие высокореакционной среды в кипящем слое восстановителя – углеродных частицах, через которые проходит электрический ток. Выделяющаяся при этом энергия обеспечивает протекание эндотермических реакций, а электрические разряды между псевдоожигаемыми частицами создают область микроплазмы и разрушают химические связи в молекулах реагирующих веществ. Происходит высокоэнергетическая активация реагентов, в реакторе достигаются высокие температуры (1200°C и выше). Следует отметить, что внутренний нагрев углеродных частиц при протекании электрического тока принципиально более эффективен для теплообмена, чем их нагрев при обтекании горячим газом. Все это позволяет значительно интенсифицировать протекающие химические реакции [8].

В числе основных отличий осуществления химических превращений в реакторе ЭТКС по сравнению с их проведением в струе газовой плазмы является высокая эффективность нагрева частиц посредством резистивного нагрева, чем в случае распространения тепла от плазмы к частице. Из-за большей массы частицы по сравнению с газом плазмы существует разница в коэффициентах их нагрева и за короткое время пребывания внутри факела газовой плазмы может не произойти прогрев всей твердой частицы. В последнем случае разница температуры между поверхностью и центром частицы может составлять до 1000°C .

Процесс получения мелкозернистого карбида кремния осуществляется в вертикальном графитовом реакторе с ЭТКС при температурах $1400\text{--}1800^{\circ}\text{C}$. Непрерывная загрузка исходных материалов – кремнезёма (кварцевого песка) и углеродного восстановителя производится в верхней части реактора, выгрузка продукта – через выводной канал в его нижней части. Образование карбида кремния происходит путем взаимодействия углерода с промежуточными кремнийсодержащими газообразными компонентами (рисунок 1).

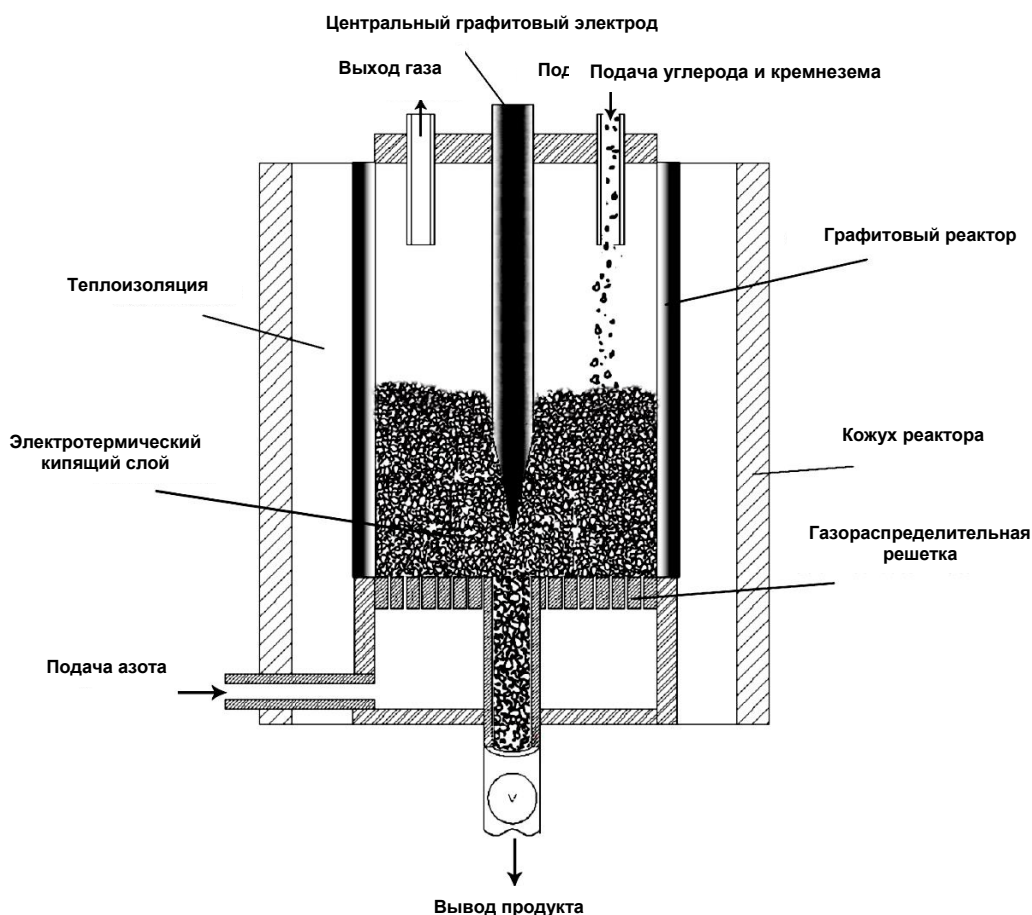
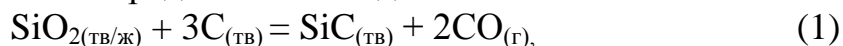


Рис. 1. – Реактор с электротермическим кипящим слоем (ЭТКС)

Исходным сырьем для получения мелкодисперсного карбида кремния являются измельченные размером 0.1–0.4 мм кварцевый песок SiO_2 и углеродный восстановитель С в виде нефтяного кокса или малозольного угольного карбонизатарексила.

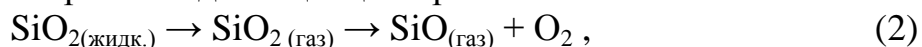
Получаемый в результате карботермического восстановления кремнезёма мелкодисперсный карбид кремния представляет собой частицы размером до 0.4 мм различной пористости, а непрореагировавшая шихта - мелкодисперсная смесь прокаленного углеродного восстановителя с полным удалением влаги и летучих, образовавшегося карбида кремния и, в некоторых случаях, кремнезёма. Выделяющийся в процессе образования карбида кремния оксид углерода СО в смеси с азотом направляется по газопроводу на выброс в вентиляционную систему.

Суммарную эндотермическую реакцию карботермического восстановления SiO_2 можно представить в виде:



однако она не отражает сложного механизма образования карбида кремния, который включает ряд последовательных стадий и па-

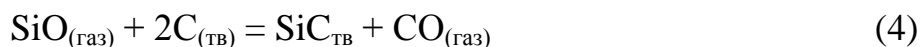
раллельных реакций. Основным участником карботермического восстановления SiO_2 считается летучий монооксид кремния SiO , образующийся при испарении и диссоциации кремнезёма:



а также при взаимодействии расплава SiO_2 с углеродом при температуре выше 1750°C .



Монооксид кремния SiO поглощается углеродом с образованием карбида кремния



При данном механизме образования карбида кремния наиболее важной стадией является первоначальная генерация монооксида кремния и его последующее взаимодействие с углеродом. Наиболее медленной стадией, лимитирующей скорость карботермического восстановления, является стадия образования $\text{SiO}_{(\text{газ})}$ [14,15]. Синтез карбида кремния происходит на поверхности частиц углеродного восстановителя, к которой проникают пары монооксида кремния путем диффузии через слой образующегося SiC .

Свыше 2200°C начинается реакция прямого разложения карбида кремния и его графитизация:



В соответствии с предложенным химизмом два процесса играют существенную роль в механизме образования карбида кремния:

- а) испарение кремнезёма и диссоциация с образованием SiO ;
- б) поглощение паров SiO углеродным восстановителем с образованием карбида кремния.

Для повышения выхода карбида кремния желательно, чтобы скорость поглощения паров SiO (б) была выше, чем процесса (а). В противном случае частично SiO будет отгоняться. На скорость поглощения SiO с образованием карбида кремния существенное влияние оказывает близость расположения частиц углеродного восстановителя к частицам кремнезёма, а также величина поверхности их соприкосновения: чем больше последняя, тем полнее поглощение и более интенсивнее процесс испарения. Поглощение паров SiO зависит в основном от величины удельной поверхности углеродных частиц, которая в свою очередь зависит главным образом от микропористости, а также крупности частиц, возрастая с увеличением тонкости помола, и свойств поверхности углеродистого материала. Существенную роль играет количество золы и ее состав, поскольку увеличение зольности ухудшает условия процесса, затрудняя контакт между кремнезёмом и углеродом.

Разработанная автоматизированная экспериментальная установка с реактором ЭТКС (рис. 2) содержит следующие составные части:

- реакторный блок;
- герметичный кожух реактора;
- система газораспределения;
- система продувки всех узлов установки;
- система вывода и утилизации газообразных продуктов реакции;
- система газоанализа;
- система подачи исходных материалов;
- система вывода из реактора и сбора твердых продуктов;
- система измерения температур;
- регулируемый источник электропитания;
- система автоматизированного управления и контроля.



Рис. 2 – Экспериментальная установка с реактором ЭТКС (внутренний диаметр реактора 180 мм, напряжение на электродах ДС0-200 В, электрический ток до 150 А)

Принцип работы реактора ЭТКС заключается в создании электротермического кипящего слоя из смеси мелкодисперсных частиц SiO_2 и углеродного восстановителя С заданного массового состава. В

условиях ЭТКС происходит сложное взаимодействие электрических, тепловых и химических процессов, которое приводит к определенным особенностям образования промежуточных соединений и конечных продуктов. Поэтому существенная роль при использовании реакторов с ЭТКС отводится оптимизации режимных параметров.

В реакторе ЭТКС существенную роль играют характеристики материала кипящего слоя. Состав, размер и форма частиц, пористость внутри слоя как следствие влияния псевдоожижающего газа, специфика сопротивления – определяющие факторы проводимости ЭТКС. Общая проводимость состоит из проводимости между электродами и кипящим слоем и проводимости частиц, управляющее сопротивление зависит от площади контакта между электродами и слоем.

При высоких температурах газовая фаза может обеспечить удовлетворительную проводимость. Это будет зависеть не только от температуры, давления и типа газа, но и от качества частиц и прилагаемого напряжения. Форма частиц играет важную роль в определении степени передачи заряда в месте контакта частиц или путем ионизации газа. Высокое напряжение может создать дуговой разряд от электрода к слою, а так же от одного электрода к другому через слой.

Электрическое сопротивление большинства твердых токопроводящих материалов возрастает с увеличением температуры и с быстрым ростом проводимости газовой фазы. Суммарное сопротивление кипящего слоя падает. Как следствие, могут происходить резкие изменения сопротивления системы с изменением температуры. Возрастает тенденция появления дуговых разрядов, т.к. газовая фаза становится более проводящей. Поэтому для передачи мощности на высоких температурах используют более низкое напряжение и больший электрический ток [16].

Метод получения мелкодисперсного карбида кремния карбо-термическим восстановлением кремнезёма посредством технологии ЭТКС предполагает следующую последовательность стадий.

Первоначально в реактор загружается исходное количество мелкодисперсных частиц углеродного восстановителя с заданным распределением частиц по размерам. Проводится продувка инертным газом (азот) реактора и газовых магистралей для удаления из технологической среды следов воздуха и влаги. В процессе вывода реактора на рабочий температурный режим (1400–1800 °С) в нижнюю его часть через газораспределительную решетку с заданной скоростью подается ожижающий инертный газ для создания кипящего слоя частиц, а затем - электрический потенциал на электроды. После достижения кипящим слоем рабочей температуры и прокалики исходного углеродного восстановителя в реактор подаются мелкодисперсные

частицы SiO_2 . На поверхности нагретых частиц прокаленного углеродного восстановителя происходит химическая реакция с образованием карбида кремния. При этом частицы увеличиваются в весе и опускаются в нижнюю часть реактора и выводятся из реактора при помощи устройства выгрузки. Для возмещения массы кипящего слоя и обеспечения непрерывности процесса в реактор через устройство загрузки подаётся определенное количество частиц SiO_2 и углеродного восстановителя.

Исходные мелкодисперсные кремнезем и углеродный восстановитель могут подаваться в реактор как отдельно, так и в виде предварительно подготовленной смеси. Количество углеродного восстановителя берется в значительном избытке по отношению к кремнезёму, а продолжительность процесса подбирается таким образом, чтобы весь SiO_2 прореагировал с образованием SiC .

Добавление в реактор ЭТКС углеродного восстановителя и кремнезёма можно повторять несколько раз до тех пор, пока значительная часть псевдоожижаемых углеродных частиц превратится в карбид кремния. При этом электрическое сопротивление реакционной смеси возрастает и становится трудно поддерживать необходимый температурный режим. Обычно это происходит при содержании в продукте 50–60% SiC .

При реализации технологического процесса в реакторе ЭТКС образуется мелкодисперсная шихта, содержащая некоторое количество (до 50%) углеродного восстановителя (несвязанный углерод), который можно удалить путем окисления. Для этого образовавшуюся шихту следует поместить в реактор с кипящим слоем более крупных частиц кремнезёма. При температурах 800–900°С несвязанный углерод при подаче воздуха, сгорает, а частицы карбида кремния уносятся из реактора газообразными продуктами сгорания, отделяются и собираются в сепараторе.

На рисунке 3 представлена мнемосхема управления установкой ЭТКС с дисплея ПК, на рисунке 4- характерные зависимости параметров ЭТКС, а на рисунке 5 - внешний вид полученных в реакторе ЭТКС и по способу G. Acheson образцов мелкодисперсных шихты и карбида кремния.

Проведена апробация технологического процесса [17]. В качестве исходных материалов использовались кварцевый песок фракции 0,05-0,10 мм (91,2 % SiO_2) и углеродный восстановитель – рексил фракции 0,25-0,40 мм (93,5-97 % $\text{C}_{\text{ТВ}}$), полученный из угля методом высокоскоростной термоокислительной карбонизации [18].

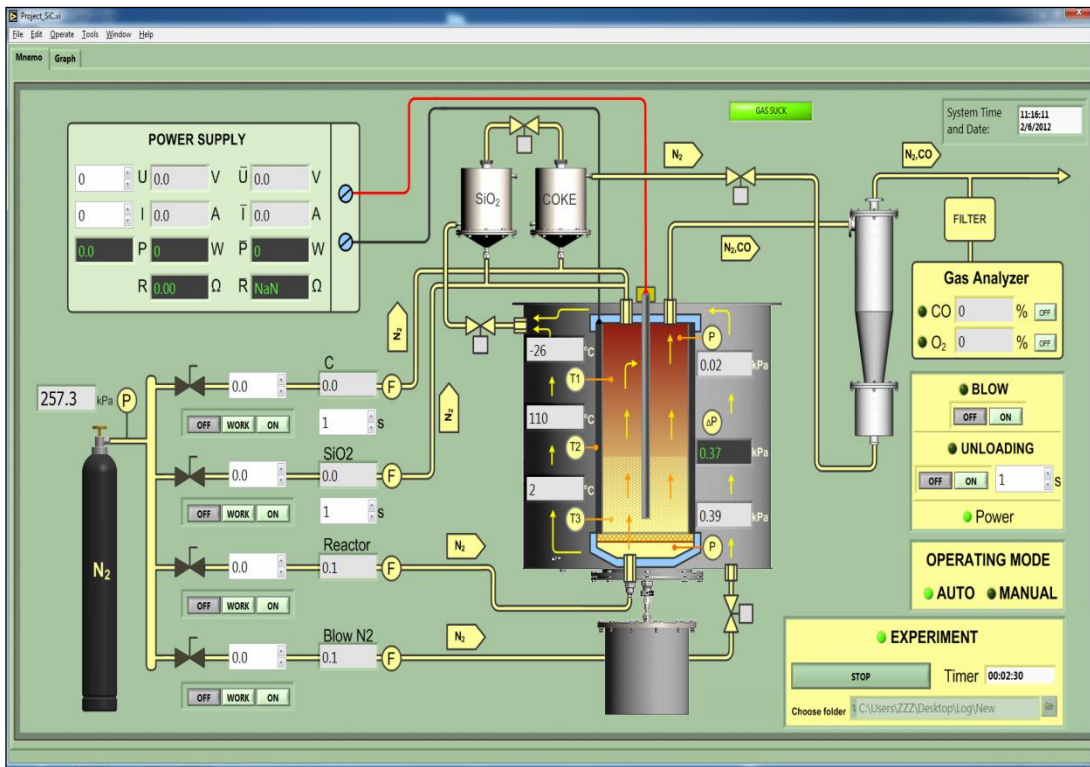


Рис. 3 – Мнемосхема управления установкой ЭТКС с дисплея ПК

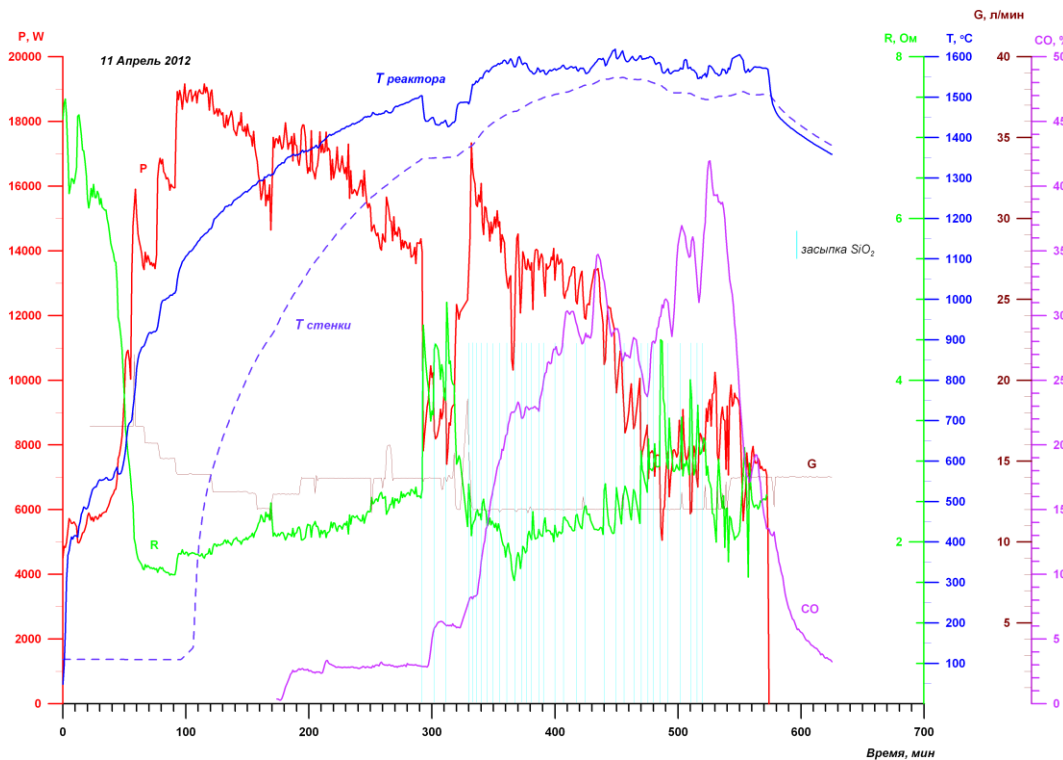


Рис. 4– Характерные зависимости температуры кипящего слоя T , его электрического сопротивления R , концентрации CO , мощности нагрева P и расхода азота G



Рис. 5—Образцы карбида кремния и шихты.

Для анализа элементного и фазового состава полученных в реакторе ЭТКС образцов использовались аттестованный рентенофлуоресцентный спектрометр ЕД2000 фирмы «OxfordInstrumentsAnalytical» (Великобритания) (элементный состав), рентгеновский дифрактометр «Дрон-3.0» в $\text{CuK}\alpha$ -излучении (РФА-спектры), экспресс-анализатор АН-7529 (углерод), экспресс-анализатор АС 7932 (сера), сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (микроструктура) (рисунки 6-9).

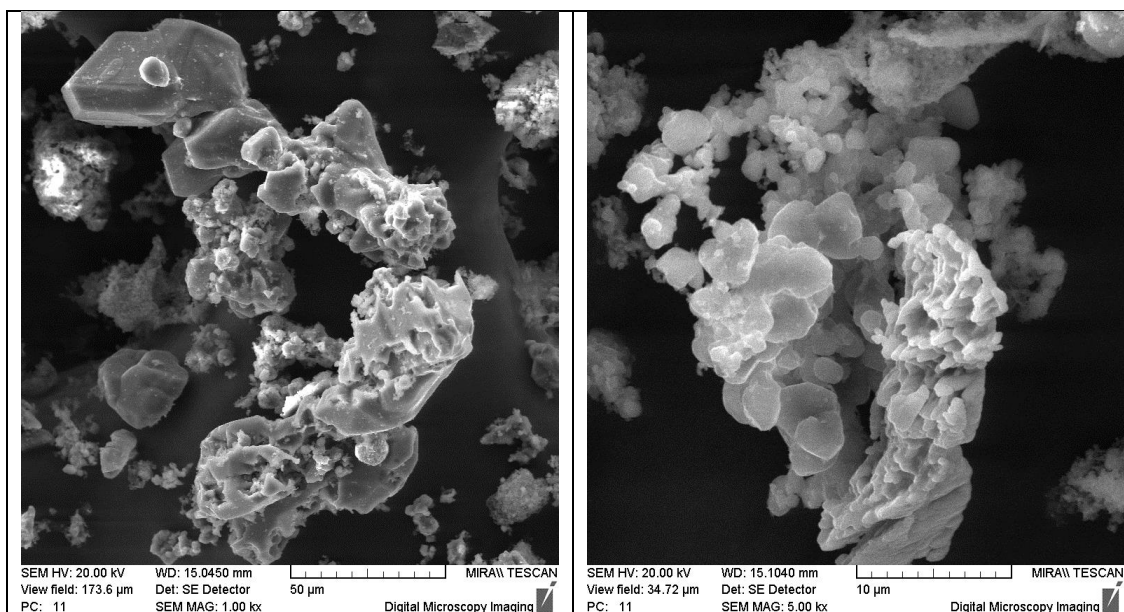


Рис. 6 – Морфология образца полученного в ЭТКС мелкодисперсного карбида кремния (свыше 99 % SiC).

Процесс образования карбида кремния начинается при 1400°С и выше после плавления, испарения и диссоциации SiO_2 с образованием летучего монооксида кремния SiO , который взаимодействует с углеродным восстановителем. Постоянное удаление из реактора ЭТКС образующегося монооксида углерода CO и избыток углерода смещают равновесие в сторону образования SiC . Использование рексила с развитой пористой структурой, низким содержанием летучих веществ и примесей по сравнению с нефтяным коксом способствует повышению эффективности процесса. Дополнительное взаимодействие на выход SiC оказывает нагрев материала кипящего слоя за счет пропускания электрического тока. Морфология образца с выходом SiC свыше 99 % (после выжигания углерода) представлена на рисунке 6.

В результате исследования фазового состава полученных образцов после выжигания избыточного углерода установлено, что один из них состоит свыше 99 % из SiC кубической модификации, а другой содержит 98,5 % SiC и 1,5 % SiO_2 (рис. 6).

Полученный карбидокремниевый порошок имеет широкие области практического применения.

Технология электротермического кипящего слоя может эффективно применяться при реализации других высокотемпературных процессов, например, карботермическое восстановление оксидов титана, вольфрама, циркония с образованием соответствующих карбидов и нитридов (рис. 9).

Предлагаемый метод синтеза карбидов и нитридов в реакторе ЭТКС обладает конкурентными преимуществами по сравнению с известными: снижение затрат энергии, высокая производительность и возможность автоматизации технологического процесса.

Разработка соответствует перспективным тенденциям технологического развития и предполагает высокую долю использования местных ресурсов (кварцитов и углеродных восстановителей) при производстве новой продукции.

Таким образом, экспериментально показана возможность реализации в реакторе электротермического кипящего слоя высокотемпературного синтеза перспективных тугоплавких мелкодисперсных материалов – карбида кремния, карбидов и нитридов циркония и титана путем карботермического восстановления их оксидов. Предлагаемая технология обладает конкурентными преимуществами по сравнению с известными: снижение затрат энергии, высокая производительность реактора и автоматизация технологического процесса.

Разработка «Синтез мелкозернистого карбида кремния методом карботермического восстановления кремнезёма в электротермическом кипящем слое» удостоена Диплома I степени и золотой медали в но-

минации «Лучший инновационный проект в области материалов и химических продуктов» в рамках Петербургской технической ярмарки 12-14 марта 2014 г.».

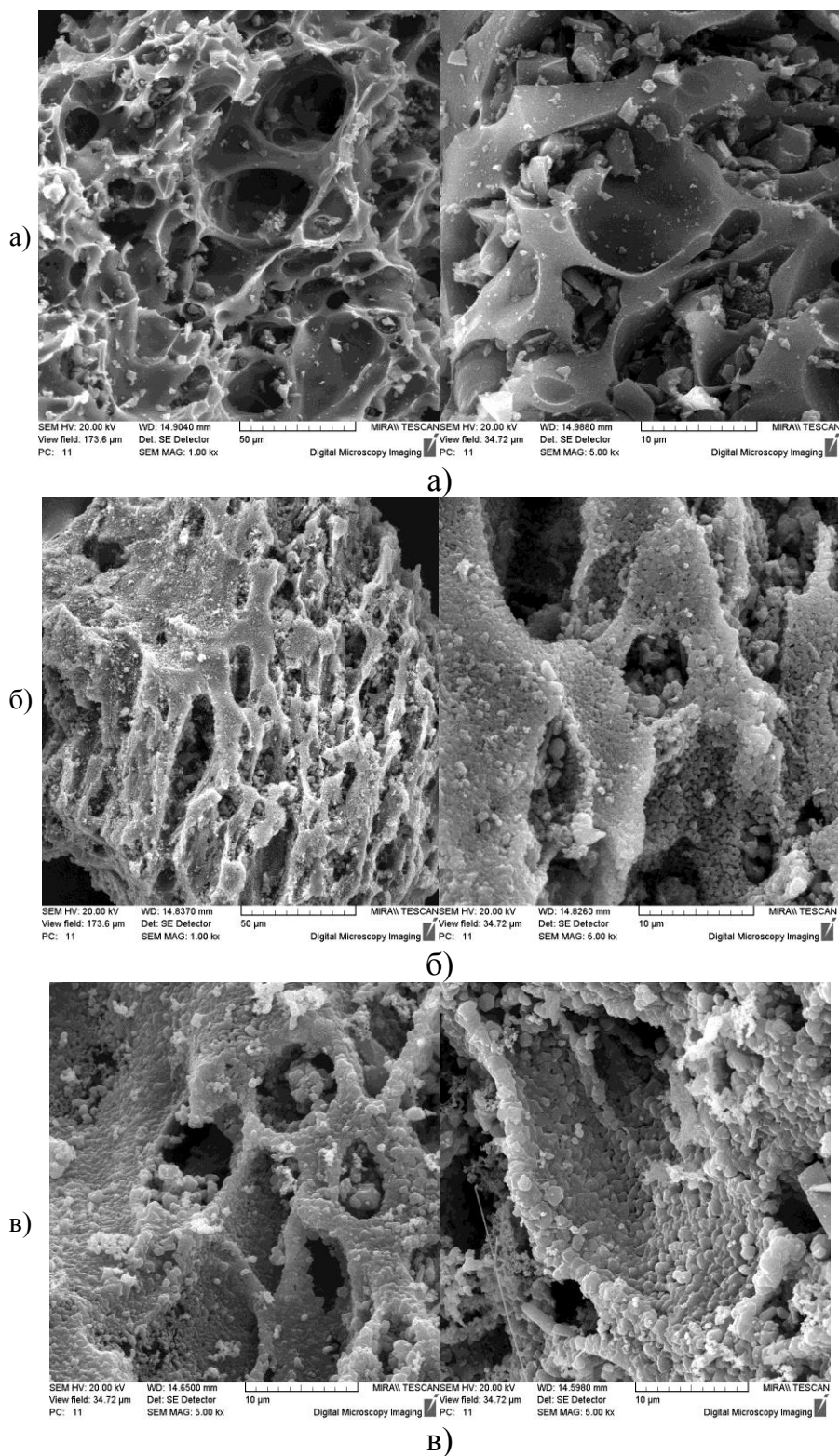


Рис. 7—Морфология мелкозернистых образцов: исходного рексила (а), получаемых шихты (б)и карбида кремния (в)

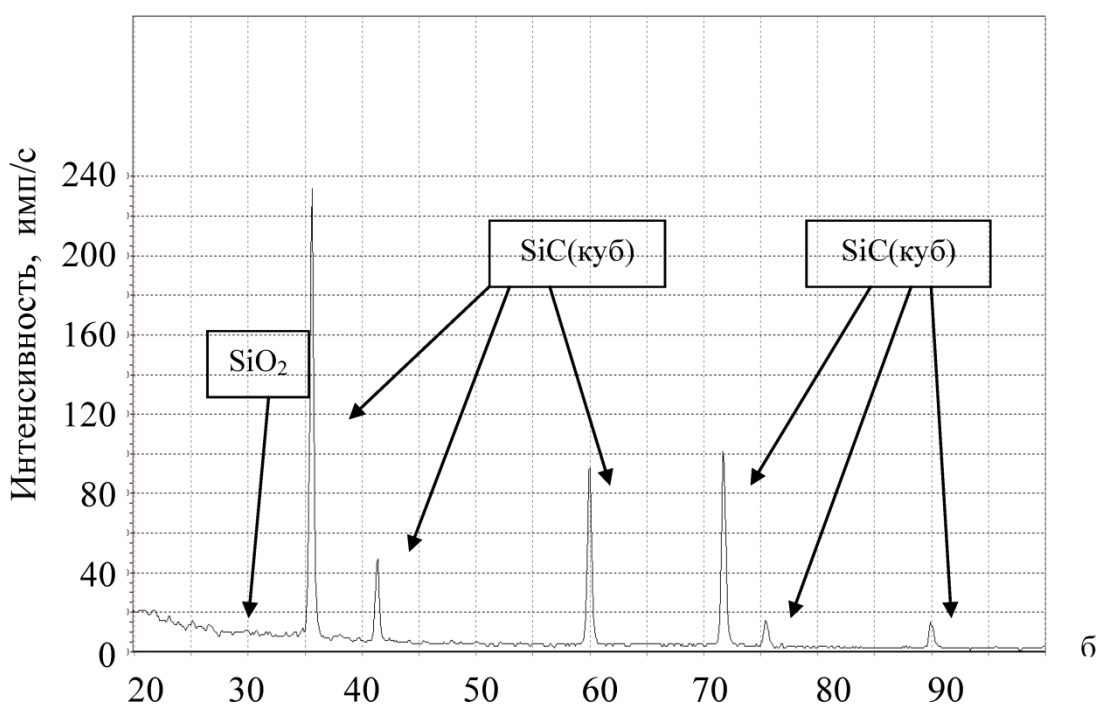
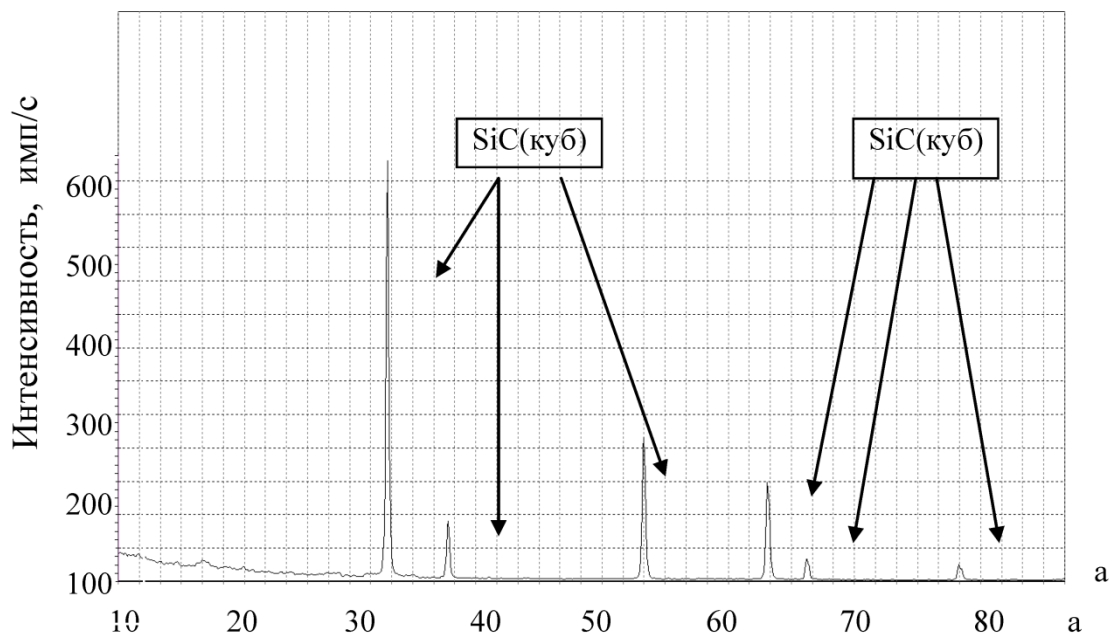
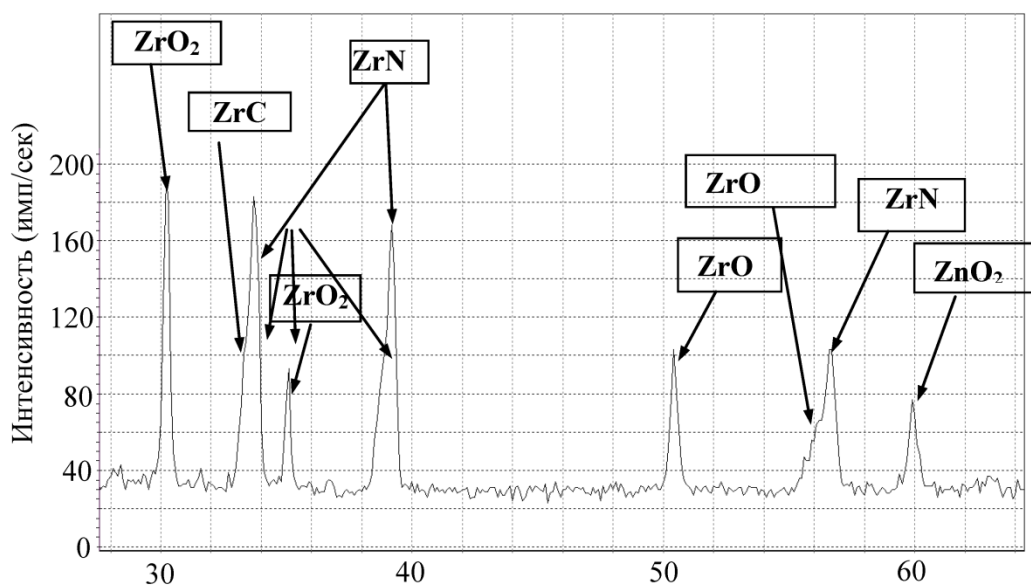
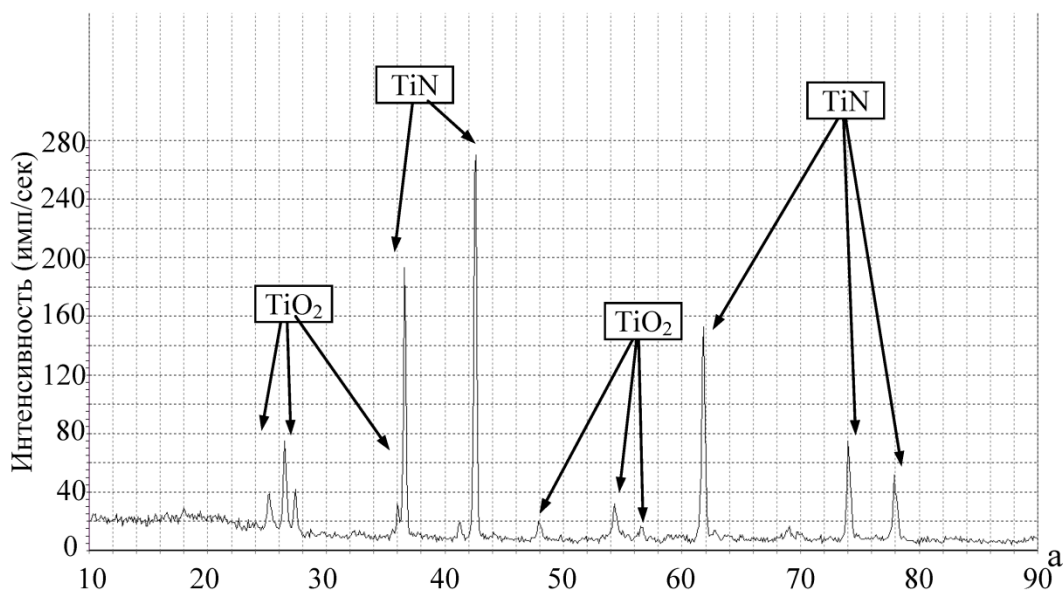


Рис. 8 – РФА – спектры полученных в ЭТКС мелкодисперсных образцов карбида кремния – 100% SiC (а) и 98,5% SiC и 1,5% SiO₂ (б)



б

Рис. 9 – РФА – спектры полученных мелкодисперсных образцов нитрида титана (79% TiN) и нитрида циркония (38%ZrN + 13%ZrC)

Библиографический список

1. Лучинин В., Таиров Ю. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету//Электроника. 2009. № 7. С. 12–15.
2. Ермакова Ж. С., Мансуров З. А., Абдулкаримова Р. Г., Мукасян А. С. Карбид кремния: способы получения и применение (обзор)//Горение и плазмохимия. 2010. Т 8. № 1. С. 32–54.
3. Руднева В. В., Галевский Г. В., Юркова Е. К. Компактирование карбида кремния и композиций на его основе: анализ отечественного и зарубежного опыта//Изв. Вузов. Цветная металлургия. 2009. № 3. С. 56–60.

4. Каменцов М. В. Искусственные абразивные материалы. Основы технологии//М., Машгиз, 1950, часть II, Карбид кремния. С. 81–170.
5. Богданов С. П., Козлов К. Б., Лавров Б. А., Соловейчик Э. Я. Электротермические процессы и реакторы: учеб.пособие. СПб.: Проспект науки, 2009. – 424 с.
6. Порада А. Н., Гасик М. И. Электротермия неорганических материалов. М.: Metallurgy, 1990. – 232 с.
7. Забродский С. С. Высокотемпературные установки с псевдооживленным слоем. М.: Энергия, 1971.– 328 с.
8. Бородуля В. А.Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое. Минск : "Наукаитехника", 1973.
9. Goldberger, W. M., Reed, A. K. and Snavelly, C. A. Electrical Resistivity Control In Fluidized Beds. 3448234 US, 1969.
10. Paquet, J. L. and Foulkes, P. B. Calcination of fluid coke in an electrically heated fluidized bed//The Canadian J. Chem. Eng. 1965. T. 45. No. 2. Pp. 94–96
11. Goldschmidt, D. and LeGoff, P. Electric resistance of fluidized beds – average resistance of conducting particles fluidized by air – preliminary results//Chem. Eng. Sc. 1963. Vol. 18. No. 12. Pp. 805–806
12. Graham, W. and Harvey, E.A. The Electrical Resistance of Fluidized Beds of Coke and Graphite//The Canadian J. Chem. Eng. 1965, Vol. 43, No. 3. Pp. 146–149.
13. Goldberger W. M., Hanway J. E., Langston B. G. The electrothermal fluidized bed.//Chem. Enging. Prog. 1965. Vol. 61.№ 2. P. 63-67.
14. Ростовцев С. Т., Ашин А. К., Анкудинов Р. В. и др. Равновесные фазы и кинетика реакций в системе Si – O - C.//Известия Академии наук СССР. Металлы. 1972. Т. 6, С. 34–41.
15. Севастьянов В. Г., Павелко Р. Г., Ежов Ю. С., Кузнецов Н. Т. Термодинамическое обоснование и экспериментальное исследование транспорта карбида кремния при карботермическом восстановлении SiO₂//Неорганические материалы. 2007. Т. 43. № 7. С. 1–5.
16. Кожан А. П., Махорин К. Е., Гориславец С. П. Электросопротивление кипящего слоя графитовых частиц//ИФЖ. 1968, Т. 15 № 4. С. 648–652.
17. Бородуля В. А., Виноградов Л. М., Гребеньков А. Ж., Михайлов А. А. Разработка и исследование метода получения мелкодисперсного карбида кремния в электротермическом кипящем слое //Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии. Материалы X Международной научно-технической конференции, 2014, С. 122-130.
18. Щербатовский В. Д., Ким В. А.//Углеродные восстановители нового поколения для выплавки кристаллического кремния. Metallurgical кремний-2012 «Физико-химические процессы и технологии получения металлургического кремния». Материалы Международной научно-практической конференции.г. Караганда. 2012. С. 31–34.

Шпиганович А.Н.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

*Липецкий государственный технический университет
(kaf-eo@stu.lipetsk.ru)*

Основным видом энергии, используемой в быту и промышленности, служит электрическая энергия. Даже в тридцатые годы прошлого столетия планом ГОЭЛРО предусматривалась полная электрификация страны. Этот план с изменением технологического развития производств предприятий претерпевал изменения, которые были направлены на построение единой энергетической системы.

В тоже время оказывается, что использование тепловых, гидро и атомных электростанций, даже при полной электрификации страны, не решает все вопросы обеспечения электрической энергией, особенно, малых предприятий или поселков, которые расположены на значительном расстоянии от энергосистемы. Чтобы обеспечить электрической энергией такие объекты необходимо применять альтернативные источники: термальные воды, приливы или отливы, солнечные батареи, ветроустановки, даже ручьи и маленькие речки. Для Тамбовской области, как показывают многочисленные исследования возможности использования альтернативных источников, выполненные на основании российских и зарубежных данных, могут использоваться солнечные батареи, ветроустановки и небольшие гидроэлектростанции. Именно комплекс этих источников позволяет круглогодично получать электрическую энергию объектам, расположенным вдали от энергосистем.

Наибольшее количество электроэнергии от солнечных батарей можно получать летом. Ветроустановки наиболее эффективны в зимнее время, а микрогидроэлектростанции во время паводка в весеннее время или осенью во время дождей.

Элементы солнечной батареи. Модули солнечной батареи наземного применения, как правило, конструируются для зарядки свинцово-кислотных аккумуляторных батарей с номинальным напряжением 12 В. При этом последовательно соединяются 36 солнечных элементов. Затем они собираются в модуль. Полученный пакет обрамляют в алюминиевую раму, облегчающую крепление к несущей (опорной) конструкции. Мощность модулей может достигать 10-300 Вт. Электрические их параметры отражаются в вольтамперной характеристике, определенной при стандартных условиях.

С целью получения требуемой мощности и рабочего напряжения модули необходимо использовать как последовательное, так и параллельное соединение элементов батарей. Нельзя получить модули, у которых вольтамперные характеристики абсолютно одинаковы. Чем тщательнее подобраны модули в батарее, тем ниже потери.

Затенение одного модуля, или части элементов в модуле естественно приводит к потерям. Такое явление при последовательном соединении модулей принято называть "эффектом горячего пятна". Затененный модуль излучает производимую освещенными модулями мощность. В результате он нагревается и выходит из строя. Для устранения этого эффекта параллельно с каждым модулем (или его частью) устанавливаются шунтирующий диод.

Солнечные батареи оснащаются регуляторами отбора мощности. Регуляторы позволяют формировать импульсы постоянного тока, ширина и частота следования которых зависят от мощности, производимой солнечной батареей. Для того, чтобы осуществлять стабилизацию выходной мощности от солнечных батарей, их оснащают аккумуляторными батареями. Аккумуляторные батареи накапливают энергию, а в случае понижения напряжения на нагрузке отдают ее в сеть. Аккумуляторы, специально предназначенные для солнечных батарей, существенно отличаются от других видов аккумуляторов, например, от стартерных автомобильных аккумуляторов. Аккумуляторы, работающие в системе солнечных батарей должны быть стойки к циклическому режиму работы, способны переносить без последствий глубокий разряд, низкий саморазряд аккумулятора, не критичность к нарушению условий зарядки и разрядки, долговечность, простота в обслуживании, компактность и герметичность. Они должны быть только одного типа, произведенные одним производителем. Их необходимо эксплуатировать одновременно, не осуществляя отводов от отдельных аккумуляторов, составляющих батарею. Нельзя объединять аккумуляторы с разницей в дате выпуска более чем на месяц, обеспечивать разницу температур отдельных аккумуляторов не более 3°C.

Управление процессом зарядки и выбора оптимального режима, в состав солнечных электростанций включают контроллеры зарядки-разрядки аккумуляторных батарей. Защита батарей от перезарядки осуществляется ограничением зарядного тока при достижении напряжения завершения зарядки. Применение компьютеров позволяет применять постоянный мониторинг за работой элементов с записью значений освещенности, температуры, тока и напряжения для дальнейшего анализа.

Солнечные генераторы предназначены для выработки постоянного тока. Для преобразования постоянного тока в переменный в си-

стемах электроснабжения с источниками солнечных батарей используют инвертор. В настоящее время инвертор представляет полупроводниковый аппарат. Для систем с солнечными батареями инверторы должны оснащаться фотоэлектрическими устройствами. Они отличаются от инверторов для сетевого использования также и схемами управления. К выходному сигналу сетевых инверторов предъявляются жесткие требования. Для понижения потерь на преобразование инверторы работают при высоких входных напряжениях. Поскольку их входные цепи запитываются напрямую от солнечной батареи, инверторы имеют регулятор отбора максимальной мощности. Сетевые инверторы оснащаются блоком контроля мощности солнечной батареи.

Разработано большое количество ветрогенераторов. В зависимости от ориентации оси вращения по отношению к направлению потока ветрогенераторы могут быть классифицированы следующим образом: - с горизонтальной осью вращения, параллельной направлению ветрового потока; - с горизонтальной осью вращения, перпендикулярной направлению ветра; - с вертикальной осью вращения, перпендикулярной направлению ветрового потока. Ветрогенераторы с горизонтальной осью вращения могут использоваться для преобразования энергии ветра в подъемную силу или силу сопротивления. Устройства, использующие подъемную силу, предпочтительнее, поскольку они могут развить в несколько раз большую силу, чем устройства с непосредственным действием силы сопротивления. Последние, кроме того, не могут перемещаться со скоростью, превышающей скорость ветра. Вследствие этого, лопасти, на которые действует подъемная сила (ветроколеса), могут быть более быстроходными и иметь лучшее соотношение мощности и массы при меньшей стоимости единицы установленной мощности.

Ветроколесо может быть выполнено с различным количеством лопастей; от однолопастных ветрогенераторов с контргрузами до многолопастных (с числом лопастей до 50 и более). Ветроколеса с горизонтальной осью вращения выполняют иногда фиксированными по направлению, т.е. они не могут вращаться относительно вертикальной оси, перпендикулярной направлению ветра. Такой тип ветрогенераторов используется лишь при наличии одного, господствующего направления ветра. В большинстве же случаев система, на которой укреплено ветроколесо (так называемая головка), выполняется поворотной, ориентирующейся по направлению ветра. У малых ветрогенераторов как правило применяются для этой цели хвостовые оперения, у больших - ориентацией управляет электроника. Для ограничения частоты вращения ветроколеса при большой скорости ветра используется ряд методов, в том числе установка лопастей во флюгерное по-

ложение, использование клапанов, установленных на лопастях или вращающихся вместе с ними, а также устройства для вывода ветроколеса из-под ветра с помощью бокового плана, расположенного параллельно плоскости вращения колеса. Лопастни могут быть непосредственно закреплены на валу генератора, или же вращающийся момент может передаваться от его обода через вторичный вал к генератору, или другой рабочей машине.

Перпендикулярное направление действия ветра на установки с горизонтальной осью вращения оказалось малоэффективным, так как также требует использования систем ориентации и сравнительно сложных методов съема мощности, что ведет к потере их эффективности. В 1920 г. во Франции Дарье предложил новый тип ротора, интенсивной разработкой которого начали заниматься с 1970 г. Сейчас ветрогенератор Дарье может рассматриваться в качестве основного конкурента ветрогенераторов крыльчатого типа. Ротор Дарье относится к ветрогенераторам, использующим подъемную силу, которая появляется на выгнутых лопастях, имеющих в поперечном сечении профиль крыла. Ротор имеет сравнительно небольшой начальный момент, и большую быстроходность, в силу этого - относительно большую удельную мощность, отнесенную к его массе или стоимости.

Сегодня в США, Великобритании, Дании и Канаде производятся ветровые турбины мощностью 1 МВт электроэнергии (этого хватает, чтобы мгновенно вскипятить 500 чайников). Самые большие ветрогенераторы в мире - английская LS-1 на острове Оркни и американская MOD5-B на Гавайских островах. Лопастни английской турбины имеют размах 60 метров, она производит приблизительно 3 МВт электроэнергии. Американская еще больше: размах лопастей 96 метров.

Однако вряд ли ветровая энергетика будет развиваться по пути гигантизма. Скорее, будущее принадлежит средним турбинам, более удобным в производстве и эксплуатации. Как бы, не были велики и мощны современные ветрогенераторы, они пока не могут полностью обеспечить потребности крупных городов. Непостоянство силы ветра требует надежной аккумуляции (сохранения) энергии на периоды затишья. Однако существующие аккумуляторы электроэнергии очень дороги и могут работать с хорошей отдачей лишь с малыми ветрогенераторами. Вследствие этого, энергию ветра лучше аккумулировать в самом продукте, который она производит, - в смелотой муке, измельченных кормах, воде, наполнившей водонапорную башню. Все это повышает ценность применения ветровой энергии именно в сельском хозяйстве.

Сегодня, когда экологические проблемы постепенно становятся одной из главных забот человечества, использование разных источни-

ков энергии рассматривается не только с точки зрения их мощности и экономичности, но и влияния на окружающую среду. На первый взгляд ветровая энергия абсолютно чиста экологически и не наносит ущерба природе и людям. Но это не совсем так. Мощные ветровые электростанции с сотнями и тысячами ветровых турбин приносят немало проблем: они производят невообразимый шум, могут служить помехой для радио- и телетрансляций. Кроме того, огромные вышки нередко препятствуют миграции птиц. Разумеется, по сравнению с тем огромным ущербом природе, который наносят тепловые электростанции, вред от ветрогенераторов почти незаметен, однако если мы хотим в будущем иметь абсолютно "чистую" энергетику, проблемы влияния ветроустановок на окружающую среду надо решать уже сейчас. Одним из таких решений - и наиболее перспективным - является установка ветрогенераторов в открытом море, на большом удалении от берегов. Это повысит не только безопасность, но и экономичность, так как на просторах Мирового океана ветры дуют с особой силой. Разумеется, установка ветрогенераторов в открытом море требует больших затрат. Первая ветряная электростанция в открытом море уже действует. Это установка Эбельтофф в Дании. 16 ее турбин производят 55 кВт электроэнергии - вполне хватает для полного снабжения поселка из 600 домов.

Главной проблемой применения ветровой энергии является непостоянство ветра. Имеется несколько способов аккумулировать энергию на случай безветренных дней. Простейший из них - создать систему двух резервуаров, один из которых залегает ниже другого. В ветреные дни производимое электричество можно использовать для закачки воды из нижнего резервуара в верхний. А когда ветрогенератор бездействует, достаточно открыть перемычку - и вода устремится из верхнего резервуара в нижний, вращая по пути турбину, которая будет давать электроэнергию. Еще один способ аккумуляции - использование ветровой энергии для электролиза воды - получения водорода и кислорода из воды. Водород - идеальное топливо, которое может заменить любой тип горючего. Теплота его сгорания втрое выше, чем у бензина. Если в ветреные дни создать достаточный запас водорода, его можно транспортировать в любое место по газопроводам, а затем использовать в топливных элементах.

Ученые подсчитали, что общий ветроэнергетический потенциал земли приблизительно в 30 раз превосходит годовое потребление электричества во всем мире. Разумеется, весь этот запас энергии использовать не удастся. Для нормальной работы ветроустановок скорость воздушных потоков не должна в среднем за год падать меньше

4-5 м/с, и в то же время не должна превышать 50 м/с. Впрочем, максимальная скорость ветра может быть и выше.

На малых предприятиях альтернативные источники энергии могут быть использованы для производства удобрений, для получения сжатого воздуха, который будет направляться в водоемы - повышения содержания кислорода, необходимого для его обитателей и в многих других случаях. Разные отрасли промышленности все активнее делают заявки на энергию альтернативных источников.

Основными недостатками использования солнечных батарей и ветроустановок - это непостоянство получения энергии. Поэтому в большой энергетике эти источники надо рассматривать как один из путей получения дополнительной энергии, позволяющий сократить расход органического топлива. В тоже время для малых предприятий и удаленных от систем энергоснабжения они являются основными источниками. Чтобы использовать солнечную и ветроэнергетику, необходимо, особенно для солнечной электроэнергетики, открытые пространства. Для центрального Черноземья использование таких пространств практически невозможно, чтобы их соорудить, необходимы средства. Этот процесс довольно сложный и дорогостоящий. До развития единой энергетической системы еще в Советское время в центральном Черноземье довольно широко использовались мини-ГЭС. Потом эти ГЭС были брошены. Постепенно мини-ГЭС пришли в упадок, их никто не ремонтировал. В настоящее время из-за развития малых предприятий и расположения их на большом расстоянии от систем электроснабжения, мини-ГЭС могут быть восстановлены. Вызвано это тем, что солнечные батареи и ветроустановки не могут в полной мере гарантировать необходимое количество выработки электрической энергии даже для малых предприятий. Особенно, если на предприятии осуществляется поточный производственный цикл. В Тамбовской области наибольшая интенсивность излучения солнца приходится на май-август (3 месяца в году), а наибольшая скорость ветра ноябрь-март (4 месяца). Именно непостоянство выработки электрической энергии таких источников требует дополнительного использования новых источников альтернативной энергии, в том числе и мини-ГЭС.

Во всем мире на основании мини-ГЭС вырабатывается 1/3 всей энергии возобновляемых источников. В нашей стране наиболее перспективными являются такие районы: Сибирь, Дальний Восток. Но и Центральный Федеральный округ, который включает в себя среднюю полосу Черноземья, имеет большие ресурсы по использованию ГЭС малой мощности.

В настоящее время маломощных ГЭС в России используется достаточно малое количество, общая их мощность не превышает 1 МВт.

Соотносительно небольшая стоимость и постоянство выработки электрической энергии мини-ГЭС будут прогрессивно развиваться. В тоже время надо помнить, что по сравнению с ветроустановками и солнечными батареями их стоимость будет в несколько раз дороже. Основным критерием выбора альтернативного источника служит, кроме экономических показателей, надежность обеспечения электрической энергией применяемого источника.

Известных видов альтернативных источников энергии достаточно большое количество. Естественно, наибольшее применение относится к источникам, выработка электроэнергии которых требует наименьших затрат. Однако, оценивать применение альтернативных источников по затратам не всегда оказывается правильным. По-видимому, здесь необходимо использовать ряд критериев. Основным из них является критерий, отображающий наличие ресурсов по используемому источнику. Необходимо учитывать мощность, потребляемую приемниками предприятия. Может оказаться, что мини-ГЭС не обеспечит энергией предприятие, в данном случае следует строить каскад электростанций, а это естественно дорогостоящий вариант. Также следует учитывать при использовании мини-ГЭС ее удаление от предприятия. Если применять ветроустановки, то следует знать скорость ветра. Скорость ветра не является величиной постоянной. Для солнечных батарей непостоянна инсоляция. Для ветроустановок необходимо учитывать их высоту. Оказывается, что с увеличением высоты, скорость ветра становится больше. Если использовать ветроустановки в наших условиях, то их высота в среднем не будет превышать 15-20 м. В соответствии с опытными данными средняя скорость ветра в этом случае для Центрального Черноземья приведена в таблице 1.

Таблица 1

**Средняя скорость ветра на высоте 15-20 м.
над поверхностью Земли**

Месяц наблюдения	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Средняя скорость ветра, м/с.	4,6	4,8	4,6	4,2	3,9	3,6	3,3	3,5	3,8	3,9	4,1	4,2

В таблице 2 приведена средняя солнечная инсоляция в день по месяцам.

Таблица 2

Средняя солнечная инсоляция в день по месяцам

Месяц наблюдения	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Средняя инсоляция в день, кВт·ч/м ²	1,0	1,9	3,2	3,9	5,1	5,2	5,1	4,5	2,9	1,7	1,0	0,7

Естественно определяющим в потреблении электрической энергии от альтернативных источников является потребитель. Потребитель может быть с поточным производством выпускаемой продукции. Может нагрузка меняться в зависимости от времени суток. Поэтому источники должны дополнять друг друга, а если нет такой возможности, то необходимо использовать даже аккумуляторные батареи. Стоимостные параметры также оказывают существенное влияние на выбор источника. Обычно стоимость складывается из трех основных параметров. Это стоимость альтернативной установки C_y , стоимость ее монтажа C_m , срок эксплуатации установки T . Если использовать выражение

$$C = (C_m + C_y) \cdot (T)^{-1},$$

то путем сравнения стоимости вырабатываемой электроэнергии в кВт·ч. от разных установок можно выбрать наиболее дешевый вариант.

Немаловажным фактором при оценке выбора установок альтернативной энергии служит надежность их эксплуатации. Надежность не зависит от мощности установки. Может оказаться, что установки меньшей мощности обладают более высокой надежностью по сравнению с установками более высокой мощности. Естественно это немаловажный фактор. Во многих случаях он может оказаться определяющим. К сожалению, в литературных источниках он не нашел должного отражения.

Можно для выработки электрической энергии применять биогаз или использовать деревосодержащий мусор лесных массивов. Биогазовые установки в центральной части России в настоящее время практически не применяются. Их целесообразно использовать для сельскохозяйственных производств. Основой получения газа является биогазовая установка. Это самая активная система биологической очистки. Система, которая выполняет функцию утилизации и переработки отходов. В производственных условиях она очень быстро самоочищается. В качестве сырья можно использовать навоз крупного ро-

гатога скота, навоз свиней, птичий помет, отходы бойни, отходы растений, силос, прогнившее зерно, канализационные стоки, жиры, биомусор, отходы пищевой промышленности, твердый сепарированный осадок станций флотации городских очистных сооружений, водоросли. Большинство видов сырья можно смешивать с другими видами сырья. Переработка отходов на биогазовой установке дает следующие выгоды: экологическая очистка, газ, биоудобрения, экономия капитальных затрат (для новых строящихся предприятий), электричество, тепло, топливо для автомобилей и т.д.

Производство электрической энергии за счет использования дровосодержащего мусора лесных массивов является первоочередной задачей. В центральной части России достаточно большую территорию занимают лесные угодья. Каждый, кто бывал в лесу, видел огромное количество поваленных деревьев, раскиданных веток и другого дровосодержащего мусора. Очисткой леса должны заниматься работники соответствующих служб. Однако все понимают, что бюджету не под силу иметь такое количество работников. В этом случае такой мусор целесообразно применять для получения древесного угля и деревянной щепы. Для этой цели можно использовать мобильные установки серийного производства. Кроме того, получения щепы необходимого качества подойдут отходы деревопереработки. А уголь и щепу затем использовать для отопления, нагрева воды и получения электрической энергии небольших объектов, либо реализовывать на рынке в нерасфасованном и расфасованном виде. Выгоды такого проекта очевидны.

Выполненный анализ позволяет сделать вывод, что не все вопросы, по использованию альтернативных источников для малых предприятий изучены в полной мере. Фундаментальных исследований по использованию таких источников для конкретных областей России вообще не проводилось. На сегодняшний день практически отсутствуют комплексные решения по выбору и использованию альтернативных источников для центрального Черноземья. Чтобы исключить такой недостаток, следует обладать статистическими данными не только о количественных характеристиках источников, но и климатических условиях региона. Это позволяет обеспечить электрической энергией малые предприятия, удаленные от центральных линий электропередач.

Библиографический список

1. Шпиганович А.Н. Оценка электроснабжения предприятий малой мощности / А.Н. Шпиганович, Н.А. Шарапов. – Липецк: ЛГТУ, 2015. -96 с.

2. Шпиганович А.А. Математическое описание функционирования элементов систем электроснабжения / В.И. Зацепина, А.А. Шпиганович. Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. № 2. С. 239-242.
3. Зацепин Е.П. Перспективы развития распределенной генерации с использованием мини - ГЭС в Центральном Черноземье / Е.П. Зацепин, А.Б. Косолапов. – Вести высших учебных заведений Черноземья, 2011, № 2. С. 3-5.
4. Зацепина В.И. Электроснабжение потребителей с использованием возобновляемых источников энергии / В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, В.В. Телегин. - Вести высших учебных заведений Черноземья. 2013. № 2. С. 33-35.

*Качанов А.Н. *, Коренков Д.А. ***

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КАМЕР ДЛЯ ВАКУУМНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СУШКИ

**ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», Россия, г. Орёл,
kan@ostu.ru*

***ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», Россия, г. Орёл,
dimas.corenkov@yandex.ru*

Интенсивный путь развития экономики подразумевает применение современных научно-технических достижений, позволяющих повысить производительность труда и энергоэффективность производства. Снижение объёма потребления топливно-энергетических ресурсов за счёт их эффективного использования является важнейшей задачей современной экономики России. Это обусловлено её отставанием от экономик ведущих европейских стран по показателю энергоёмкости валового внутреннего продукта. Энергоемкость ВВП России в 2,5 раза выше среднемирового уровня и в 2,5 - 3,5 раза выше, чем в развитых странах [1]. Этот показатель в значительной степени отражает конкурентоспособность отечественных товаров, поскольку их себестоимость включает затраты на ТЭР. Уровни энергоёмкости производства важнейших отечественных промышленных продуктов выше среднемировых в 1,2 - 2 раза и выше лучших мировых образцов в 1,5 - 4 раза [1]. В 2010 году была утверждена Государственная программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», в рамках которой поставлена задача снижения энергоёмкости ВВП на 40 % к 2020 г. Таким образом, совершенствование существующих, а также, разработка и внедрение новых энергоэффективных технологий и оборудования является актуальной научно-технической задачей, от успешного решения которой зависит экономическая безопасность государства.

Значительный экономический эффект от внедрения энергоэффективного технологического оборудования может быть получен в отраслях промышленности с большими объёмами потребления ТЭР. Особенно это относится к деревообрабатывающей промышленности, где сушка пиломатериалов является энергозатратным и неотъемлемым этапом всего технологического процесса их производства. Влажность свежесрубленной древесины для разных пород составляет 60 ÷ 100 %. При обезвоживании в зависимости от назначения и технологии сушки она может быть снижена до 8 ÷ 20 %. Некоторые технологии сушки позволяют получить и более сухой пиломатериал, одна-

ко, это не рационально по двум основным причинам. Во-первых, со снижением влажности увеличивается энергия связи влаги с материалом, т.е., чтобы высушить древесину от 8 до 6 % необходимо затратить больше энергии, чем при сушке от 10 до 8 %. Во-вторых, при нормальных условиях окружающей среды внутри помещений равновесная влажность составляет $6 \div 10$ %, и более сухой материал начинает поглощать влагу до состояния равновесия. Высушенный пиломатериал обладает повышенными эксплуатационными свойствами: механической прочностью, биостойкостью, формо- и размеростабильностью и т.п.

Технологии сушки по способу подведения тепловой энергии классифицируют на следующие: конвективную, кондуктивную, радиационную и диэлектрическую. Первые три способа сушки обладают одним существенным недостатком, а именно, тепло поступает к нагреваемому телу из внешней среды, нагревая в первую очередь его поверхность. Учитывая, что древесина имеет низкий коэффициент теплопроводности, нагрев центральной зоны идет с временной задержкой, которая зависит от толщины и свойств материала. Для пиломатериала толщиной 50 и более мм наблюдается неравномерное распределение температурного поля по сечению древесины не только на стадии нагрева, но и в течение всего процесса сушки. При этом градиент температуры всегда направлен навстречу потоку влаги, что отрицательно влияет на скорость сушки. Ввиду указанных недостатков технологии сушки, основанные на подводе тепловой энергии из внешней среды, являются менее перспективными по сравнению с диэлектрическим способом сушки. Известно, что применение диэлектрического нагрева во многих случаях имеет экономические и экологические преимущества по сравнению с использованием традиционных видов энергии и материальных ресурсов [2-4].

При диэлектрическом нагреве тепловая энергия выделяется непосредственно в самом материале за счёт релаксационно-поляризационных явлений. Интенсивность нагрева не зависит от теплофизических свойств нагреваемого тела и определяется только его диэлектрическими характеристиками и параметрами электромагнитного поля, что обеспечивает высокую скорость нагрева. При этом, температура в центре превышает температуру поверхности материала, а градиент температуры совпадает с направлением потока влаги, что и обеспечивает возможность получения высоких скоростей сушки. Ещё одним достоинством диэлектрического нагрева является возможность получения в однородном материале равномерного температурного поля путем выбора оптимальной частоты тока высокочастотного генератора.

В ряде источников [5-7] отмечается, что более эффективно применять комбинированные технологии сушки – вакуумно-диэлектрическую и конвективно-диэлектрическую. Большее предпочтение с точки зрения качества конечного продукта следует отдать высокочастотной сушке в вакууме, где процесс протекает в среде насыщенного пара. Это позволяет не использовать увлажненный воздух для поддержания небольшого перепада влажности по сечению материала, что необходимо для устранения внутренних механических напряжений. В вакууме влага закипает при более низких температурах (при остаточном давлении 10 кПа температура кипения воды составляет 45 °С), это обеспечивает некоторое сокращение расхода энергии на нагрев, а также предотвращает химические реакции, приводящих к деколоризации и снижению качества древесины. В материале образуется положительный градиент давления, интенсифицирующий процессы массопереноса и увеличивающий скорость сушки. Так, например, время сушки пиломатериалов толщиной 25÷63 мм до влажности 15% составляет 3÷6 часов, что в 15÷20 раз меньше продолжительности конвективной сушки по низкотемпературным режимам до такой же влажности в камерах непрерывного действия [8].

Несмотря на имеющиеся преимущества, вакуумно-диэлектрические комплексы не находят широкого применения из-за трудностей, связанных со сложностью настройки и эксплуатации оборудования и его высокой стоимости. Основная причина – большой расход электроэнергии, в то время как теоретически без учёта тепловых потерь и КПД оборудования для осуществления процесса сушки данным способом необходимо затратить меньшее её количество [9] по сравнению с другими. Удельные затраты электроэнергии на 1 кг удаленной влаги, как показатель, целесообразно использовать для анализа энергоэффективности сушильного оборудования. Данный показатель по разным оценкам составляет 2,5 ÷ 4,0 кВт·ч/кг, тогда как у паровоздушных камер он равен 1,4 ÷ 1,8 кВт·ч/кг. Поэтому вакуумно-диэлектрическая технология используется только для сушки трудносохнущих и ценных пород древесины и сортамента большой толщины, а также в тех случаях, когда требуется низкотемпературный нагрев [10].

Вакуумно-диэлектрическая сушка осуществляется в специальных электротехнологических комплексах, типовая структурная схема которых приведена на рис. 1.

К основному электрооборудованию вакуумно-диэлектрических комплексов (рис. 1) относятся высокочастотный генератор, вакуумный и циркуляционные насосы. Поскольку на их работу расходуется практически вся электроэнергия, то здесь и стоит искать возможные пути повышения энергоэффективности камер данного типа.

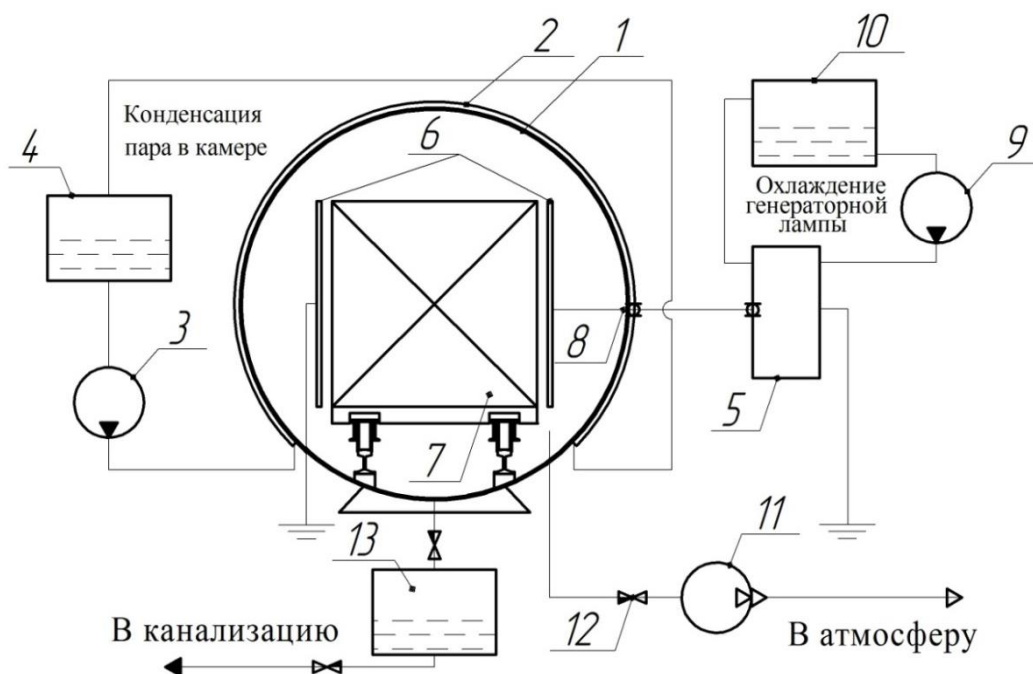


Рис. 1 Структурная схема вакуумно-диэлектрической камеры:

- 1 – вакуумная камера; 2 – охлаждающая рубашка; 3, 9 – циркуляционный насос;
- 4 – бак охлаждающей технической воды; 5 – высокочастотный генератор;
- 6 – электроды; 7 – штабель древесины; 8 – высокочастотный фидер;
- 10 – бак охлаждающей дистиллированной воды; 11 – вакуумный насос;
- 12 – обратный клапан; 13 – конденсатосборник.

Рассмотрим подробнее высокочастотное оборудование комплекса. В промышленности для целей диэлектрического высокочастотного нагрева используются следующие частоты: 0,44; 0,88; 1,76; 5,28; 13,56; 27,12; 40,68; 81,36; 152,5; 300 МГц. Известен также сверхвысокочастотный нагрев, который проводят на частотах 915, 2450 МГц, однако, он малоприменим для сушки крупногабаритного сортамента из-за малой глубины проникновения. Нагреваемый материал при высокочастотном нагреве помещается между электродами, которые могут быть либо пластинчатыми, либо сетчатыми. К электродам подводится напряжение в несколько киловольт. Его максимальная амплитуда выбирается исходя из требования предотвращения электрического пробоя материала и может достигать 10 кВ. Рабочая частота выбирается из стандартного ряда по условию обеспечения достаточной интенсивности и равномерности нагрева. Основная длина пиломатериалов хвойных пород составляет 6,5 м, поэтому предпочтение отдаётся частоте 13,56 МГц. За рубежом вакуумно-диэлектрические комплексы производятся для работы на частоте 6,78 МГц. Для получения таких напряжений используются высокочастот-

ные генераторы, основным элементом которых является электронная лампа (триод). В процессе работы анод лампы сильно нагревается электронами, поэтому его необходимо охлаждать. В генераторах, применяемых для сушки, предусмотрено водяное охлаждение, так как они имеют большую мощность (в среднем 60 кВт). Коэффициент полезного действия лампового генератора определяется как потерями в самой лампе, так и потерями в элементах его колебательных контуров, при синусоидальных импульсах тока анода составляет $0,65 \div 0,8$.

Чтобы свести к минимуму мощность рассеяния анода и получить максимально возможный КПД, необходимо обеспечить оптимальный режим работы генераторной лампы. Такой режим возникает, когда её выходное сопротивление с учётом коэффициента трансформации анодного контура равно резонансному сопротивлению нагрузочного контура, а также, когда коэффициент обратной связи контуров принимает значение, обеспечивающее требуемое напряжение на сетке триода [11]. В установках диэлектрического нагрева в состав нагрузочного контура входит рабочий конденсатор, образованный электродами и нагреваемым материалом, расположенным между ними. При сушке древесины конденсатор имеет воздушные зазоры. В процессе нагрева и уменьшения влажности диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь древесины значительно уменьшаются (значение ϵ падает в $15 \div 20$ раз), что приводит к изменению сопротивления нагрузки. Этому способствует также и усушка древесины, в результате которой увеличиваются воздушные зазоры. Для поддержания оптимального режима работы высокочастотные генераторы обычно оснащаются устройством согласования. Оно также может выполняться в виде отдельного блока. В зависимости от схемы генератора (одноконтурный или многоконтурный, второе предпочтительнее ввиду стабильности частоты при изменении режима работы) согласующее устройство может состоять из параллельно или последовательно подключенных переменных реактивных элементов. Одной из наиболее распространенных стабилизирующих мер является введение или изменение воздушного зазора рабочего конденсатора [12]. Однако из-за изменения активного сопротивления конденсатора этой меры не достаточно, к тому же привод для перемещения электродов может сильно усложнить конструкцию и увеличить стоимость вакуумно-диэлектрической камеры. Большинство генераторов не имеют специальных устройств для контроля согласования (КСВ-метры) и соответствующей автоматики. В идеальном случае для каждого технологического процесса схема устройства должна рассчитываться отдельно, с учётом объёма и зависимостей диэлектрических параметров материалов от температуры и влажности. Однако изготовление еди-

ничных мощных генераторов под индивидуальные особенности производства не всегда оправдано. Вместо этого в выпускаемых генераторах предусматривается возможность регулировки согласования в некотором диапазоне, ширины которого бывает недостаточно. Это приводит к тому, что на практике КПД использования высокочастотной энергии оказывается недопустимо низким ($< 10\%$). Тем не менее, существуют технические предложения, направленные на решение отмеченных проблем, например, специальная схема колебательных контуров [13] и модульный метод [14]. В последнем рекомендуется выбирать размеры электродов исходя из условий согласования, а не габаритов изделия. При этом для нагрева крупногабаритных материалов предполагается использовать несколько модулей, в состав каждого входят высокочастотный генератор меньшей мощности, согласующее устройство и электроды. За счёт правильного выбора параметров устройств модуля может быть получен КПД, близкий к теоретически возможному.

Существенной особенностью высокочастотной сушки длиномерных материалов является неравномерный характер распределения напряженности электрического поля по длине рабочего конденсатора. Нагрев в поле токов высокой частоты считается равномерным, если габариты пиломатериала меньше длины волны в нём в 20 раз, что соответствует изменению напряженности электрического поля не более чем на 5% [11]. К примеру, на частоте 13,56 МГц при температуре 20 °С и влажности 10 % длина волны для сосны равна ≈ 14 м. При длине пиломатериала 6,5 м соотношение $\lambda/l \geq 20$ не выполняется. Это приводит к неравномерному распределению влажности и неравномерной усушке. В конечном итоге снижается качество сушки и увеличивается процент брака продукции. Для устранения эффекта стоячей волны генератор подключают к рабочему конденсатору в середине электродов. Известен другой способ достижения равномерности – разбиение конденсатора на несколько участков путём включения дополнительных индуктивностей, настроенных в резонанс с данным участком. Однако следует помнить, что в процессе сушки диэлектрические параметры материала меняются, поэтому индуктивности нужно подстраивать. К тому же, введение в нагрузочный контур дополнительного индуктивного сопротивления необходимо учитывать при настройке генератора на согласованный режим. Таким образом, сокращение брака и повышение качества сушки за счёт обеспечения равномерности распределения электромагнитного поля в материале следует рассматривать как один из путей повышения энергоэффективности вакуумно-диэлектрических комплексов.

Существует точка зрения, что технология диэлектрической сушки древесины всё ещё находится на стадии опытно-промышленной разработки. Объясняется это недостаточной изученностью механизма тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах, помещённых в ВЧ или СВЧ электромагнитное поле. Как в России, так и за рубежом проводятся исследования в этой области, но к решению этой проблемы привлекается недостаточное количество учёных из-за кажущейся бесперспективности технологии ввиду низкого КПД использования высокочастотной энергии. В настоящий момент не существует математических моделей, на основе которых могут быть решены задачи оптимизации режимов работы вакуумно-диэлектрических камер, обеспечивающих повышение их эффективности. Не достаточно изучены физические свойства разных пород древесины, необходимые для моделирования высокоинтенсивных процессов тепломассопереноса (коэффициент молярного переноса пара, критерий фазового превращения). Подтверждением тому является отсутствие технических регламентов, определяющих значения параметров технологических режимов высокочастотной сушки в вакууме.

Исследования, проведенные на опытно-промышленной установке, показали, что при завышении мощностей комплектующего оборудования камера работает в режиме не соответствующем максимальному КПД и, как следствие, к снижению технико-экономических показателей [4].

Сдерживающим фактором для широкого промышленного внедрения рассмотренного в статье вакуумно-диэлектрического способа сушки древесины является отсутствие теоретических основ и инженерных методов расчета данных установок.

При дальнейшем развитии теории электромагнитных и тепловых процессов в вакуумно-диэлектрических камерах особое внимание необходимо уделить следующим вопросам, направленным на повышение энергоэффективности камер:

- совершенствования оборудования для генерации, согласования и передачи высокочастотной энергии;
- разработке и применению научно-обоснованных оптимальных режимов сушки;
- разработке инженерных методик расчета энергоэффективных камер;
- разработка технических и технологических мер для сокращения брака конечной продукции.

Библиографический список

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 2446-р г. Москва [Электронный ресурс] // Российская газета.ru. URL: <http://www.rg.ru/2011/01/25/energoberejenie-site-dok.html> (дата обращения 27.03.2015)
2. Данилов Н.И. Основы энергосбережения: учебник / Н.И. Данилов, Я.М. Щелоков; под ред. Н.И. Данилова. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 564 с.
3. Качанов А.Н. Техничко-экономический анализ способов сушки древесины / А.Н. Качанов, В.Г. Сальников, М.Н. Чукумов // Проблемы энергетики Казахстана. Алматы: Изд-во “Гылым”, 1994. – С. 60 – 61.
4. Качанов А.Н. Повышение качества сушки на ПМО “Арай” / А.Н. Качанов, М.Н. Чукумов // Проблемы комплексного развития регионов Казахстана. Материалы международной научно-практической конференции. Часть 1. Алматы, КазгосИНТИ, 1996. – С. 131 – 134.
5. Богданов Е.С. Справочник по сушке древесины / Е.С. Богданов, В.А. Козлов, В.Б. Кунтыш, В.И. Мелехов; под общ. ред. Е.С. Богданова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 304 с.
6. Княжевская Г.С. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / Г.С. Княжевская, М.Г. Фирсова, Р.Ш. Килькеев; под ред. А.Н. Шамова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 64 с.: ил.
7. Watanable K. Softwood heating in radio frequency fields / K. Watanable, A. Abubakari, C. Lazarescu, S. Avramidis // European Journal of Wood and Wood Products. – 2011. – № 69. – P. 295–301.
8. Соколов П.В. Лесосушильные камеры / П.В. Соколов, Г.Н. Харитонов, С.В. Добрынин. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 184 с.
9. Качанов А.Н. Оценка энергоэффективности вакуумно-диэлектрического способа сушки древесины / А.Н. Качанов, Д.А. Коренков // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век.: Сборник материалов XI международной научно-практической интернет-конференции. – Орел: Госуниверситет-УНПК, 2013. – С.124–126.
10. Качанов А.Н. Контроль влажности древесины в вакуумных сушильных камерах / А.Н. Качанов, Д.А. Коренков // Ползуновский вестник. – 2014. – № 1. – С. 123–128.
11. Нетушил А.В. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А.В. Нетушил, Б.Я. Жуховицкий, В.Н. Кудин. – М.: Гоэнергоиздат, 1959. – 480 с.
12. Васильев А.С. Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева / А.С. Васильев; под общ. ред. А.Н. Шамова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 80 с.
13. Пат. 2210874 Российская Федерация, МПК⁷ H05B6/02, F26B3/347. Установка для нагрева в поле токов высокой частоты древесины и других диэлектриков (варианты) / Рыболовцев В.П.; заявитель и патентообладатель Рыболовцев Владимир Павлович. – № 2001108732/09 ; заявл. 02.04.2001; опубл. 20.08.2003. – 2 с.: ил.
14. Рыболовцев В.П. Технология ускоренного склеивания деревянных конструкций / В.П. Рыболовцев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2008. – №3. – С. 84–86.

Liepsch D.

INTRODUCTION TO BIOFLUID MECHANICS

*Munich University of Applied Sciences, Munich, Germany
(liepch@hm.edu)*

Introduction. Biofluid mechanics describe the kinematics and dynamics of body fluids in humans, animals and plants. We distinguish between external flow around bodies as in bird flight or the airflow around bodies in air conditioning situation, and internal flow through bodies such as blood flow through blood vessels.

Hemodynamics deals with body fluids in humans. Classical hemodynamics deals with *in vivo* and *in vitro* measurements of pressure, flow and resistance. Modern biofluid mechanics measures and analyzes local time- dependent velocities and flow in blood vessels, the respiratory system, the lymphatic system and the microcirculation.

Biofluid mechanic factors must be taken into consideration in clinical areas such as end-to-end and end- to-side anastomoses; artificial heart, organ and vessel development; urological measurements and artificial urethra; shock wave treatment of kidney stones; blood rheology; mass and material transport through membranes, wave spreading, diffusion processes, and the influence of airflow around bodies. To investigate all these processes, it is important to do model experiments. Models have many advantages compared to *in vivo* and *in vitro* experiments; most importantly, the experiments are reproducible. Individual flow parameters, such as geometry, non-Newtonian flow characteristics, wall elasticity, steady and pulsatile flow can be studied individually. Practical applications include testing of catheter techniques and stents, and training for stent implantation.

The most important application of biofluid mechanics is in research into atherosclerosis and aging. Fundamental studies analyze the flow parameters mentioned above. Hemodynamics, the consistency and rheology of blood and, finally, the geometry of the blood vessels all contribute to atherogenesis.

The entire flow field in bends and bifurcations must be measured to obtain exact velocity vectors. At present, MRI *in vivo* velocity measurements take far too long, requiring patients to remain motionless for extended periods. Color Doppler ultrasound techniques look promising but the local resolution is still not high enough. So, model experiments with high spatial and temporal resolution techniques such as laser-Doppler- anemometry are necessary. We have studied the flow in various silicon rubber mod-

els of the aortic arch with abdominal aorta and kidney arteries; femoral arteries, coronary arteries, and carotid artery. From these detailed macroscopic measurements it is possible to calculate shear stresses very precisely. Shear stresses act not only on endothelial cells, but also affect the intermedia. Particles and blood cells in re-circulation zones must be investigated more closely. Normally, they do not remain inside flow separation areas for long periods, however, a few particles or an agglomeration of particles, occasionally rotate over several periods in these zones, as visualized with our photoelasticity apparatus with a birefringent solution.

Flow parameters and experimental methods. Many scientists have studied the flow behavior in bends and bifurcations; however, most studies have been done in rigid or simplified models.

We used true-to-scale, 1:1 models, so that the geometry of both pathological and healthy blood vessels was correct. The following flow parameters were studied: geometry, steady/unsteady flow, viscosity, and elasticity of the vessel wall. Our study methods were: (1) flow visualization using dyes and photoelasticity apparatus with birefringent solutions; (2) laser sheet techniques; (3) pressure measurements of the - pressure drop with inductive flow meters; and (4) velocity measurements with a high spatial and temporal resolution laser- Doppler-anemometer. In addition to the LDA, a particle image velocimeter with the pulsed Doppler ultrasound and MRI was also used for comparison measurements in vivo.

The flow was measured with inductive flow meters. The viscosity of the model fluid, a polyacrylamide aqueous solution, was controlled with a low shear viscometer. The Reynolds and Strouhal number in the model experiment were the same as that found in vivo.

Fig. 1 is a schematic representation of the experimental setup for laser-Doppler-anemometer measurements. The numbers in parentheses below refer to this figure. The fluid is forced from a pressure tank with compressed air into a reservoir (3). From there it flows into an overflow container (4). To maintain a constant static pressure in the model, overflow fluid flows back into the liquid container (1). The fluid streams through the model (6) and flow meters with small regulation flow tanks (8) back into the liquid container (1). The regulation flow tanks can be raised or lowered and the flow rate ratio (different Reynolds number) can be simulated without wave reflections caused by valves. The average flow over time per pulse period was also measured by weighing and measuring the time. The fluid is transported from the liquid container over a backflow into the pressure tank. From here the fluid is pressed with a compressor into the reservoir (3). A computer-driven piston pump (14) superimposes an oscillatory pulse on the steady flow creating pulsatile flow. The piston stroke can be changed by computer, creating various pulse waveforms and flow. To

avoid pressure shocks caused by piston, a buffer tank (7) is installed in front of the model as a filter. The temporal flow was measured with inductive flow meters and the pressure drop was measured with inductive pressure transducers.

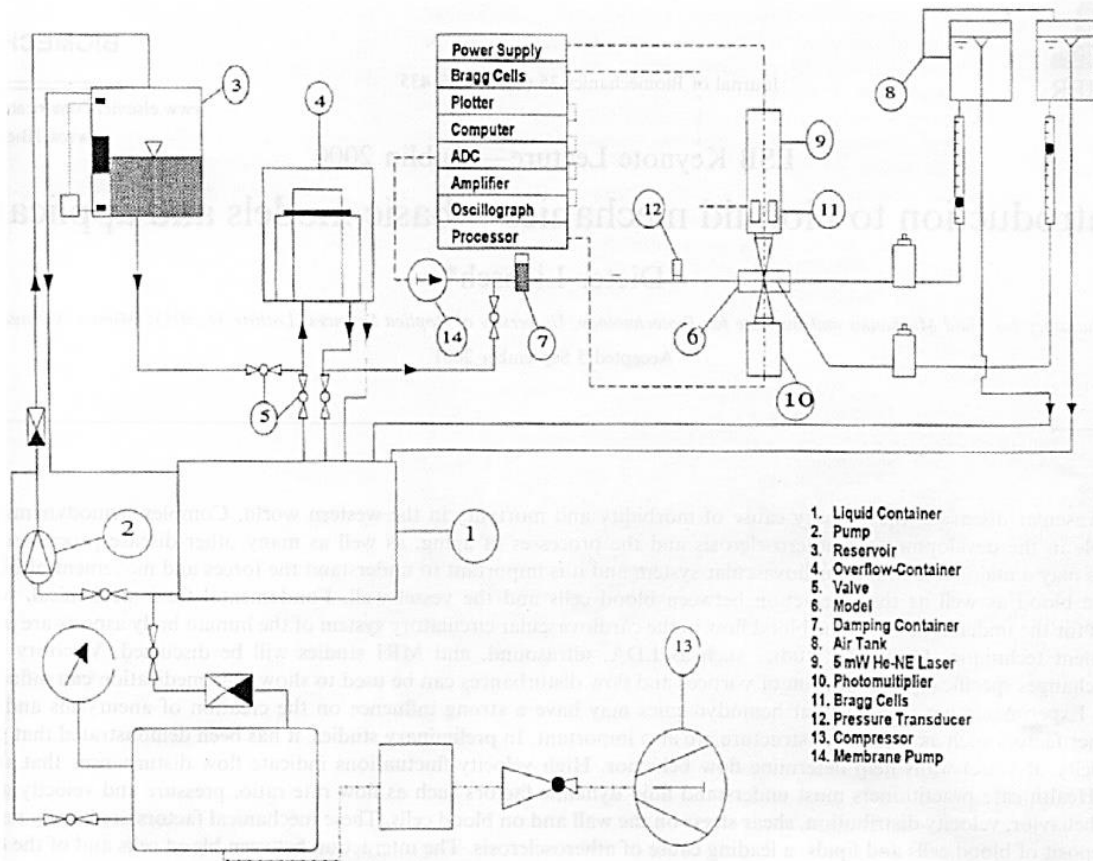


Fig.1 Scheme of the experimental setup.

Model fluids. To simulate the flow characteristics of blood, a blood analog was developed which has a refraction index identical to that of the model wall. The fluid consists of 51% by weight aqueous Dimethylsulfoxide into which various polyacrylamides are added (0.0035% Separan AP-302 and 0.0025% AP-45, Dow Chemical). The rheological behavior of this fluid is nearly identical to that of blood with a hematocrit of 46%. Fig. 2 (top) compares the viscosity over the shear rate of the model fluid at 21°C with the values for human blood, with hematocrits of 46% and 42% at 37°C. The viscosity of the model fluid and the blood samples were measured at the respective temperatures with this viscosimeter. The density of the mixture was equal to 1050 kg/m³ of that of blood.

The representative viscosity, the representative shear rate and the corresponding flow volume for various Reynolds numbers were calculated using the measured viscosity curve and shear gradient.

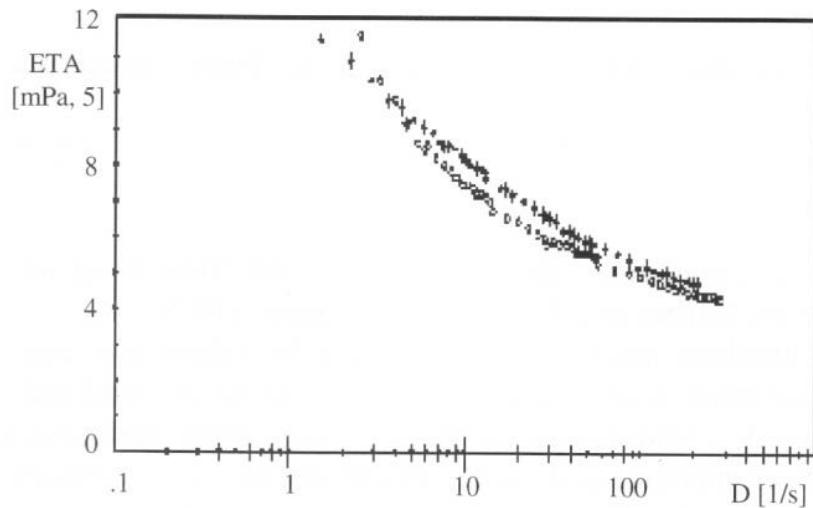


Fig 2. Viscosity over shear rate for the blood

external carotid arteries. In addition to flow visualization techniques with dyes and a birefringent solution with a photoelasticity apparatus, the velocity distribution was measured with a 3D LDA. The flow, pressure and velocity curve used for the experiments is shown in Fig. 3. The average Reynolds number over a pulse cycle in all models without stenosis was $Re = 250$. In the stenosed models, the Reynolds number decreased to $Re = 180$ under identical experimental conditions. Large velocity fluctuations with vortices were found in the stenosed model. These high frequency velocity fluctuations can lead to a hammer effect at the wall, causing damage over time. This might be one cause of aneurysm development.

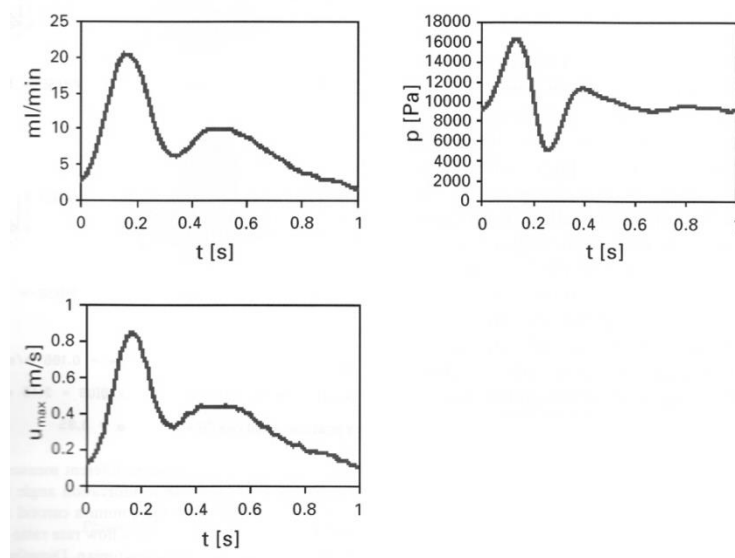


Fig 3. Volumetric flow rate and pressure curve over time

Aneurysm hemodynamics studies. Many flow studies have been done in rigid and elastic models with aneurysms. While the wall structure must be considered in any study of the genesis of aneurysm, the flow probably has the greatest influence. Current considerations include how to determine which aneurysms will grow and rupture and which will not. These questions play an important role in determining a course of therapy or surgery. The forces caused by the flow influence all these factors.

Different types of stents were tested in the carotid artery models. Stent 1 was a Schneider wall stent with a diameter of 7 mm and the length was shortened from 25 to 15 mm. The stent was placed completely in the ICA. Stent 2 was a 15 mm long Schneider wall stent with a 6 mm diameter, which was placed to extend from the ICA into the bulbous of the carotid artery, covering the ECA branch. Stent 3 was a Schneider wall stent, 9 mm in diameter and 25 mm long which was implanted in the CCa, extending into the ICA.

Fig. 4 shows the positions of the stents. The velocity distribution at phase out = 60° close to the peak systolic velocity, as shown in Fig. 5 for all three stents compared with a healthy carotid artery model without stent. The measured cross section was 5 mm distal to the apex in the ICA. Stent 3 shows the best velocity distribution whereas Stents 1 and 2 create velocity disturbances.

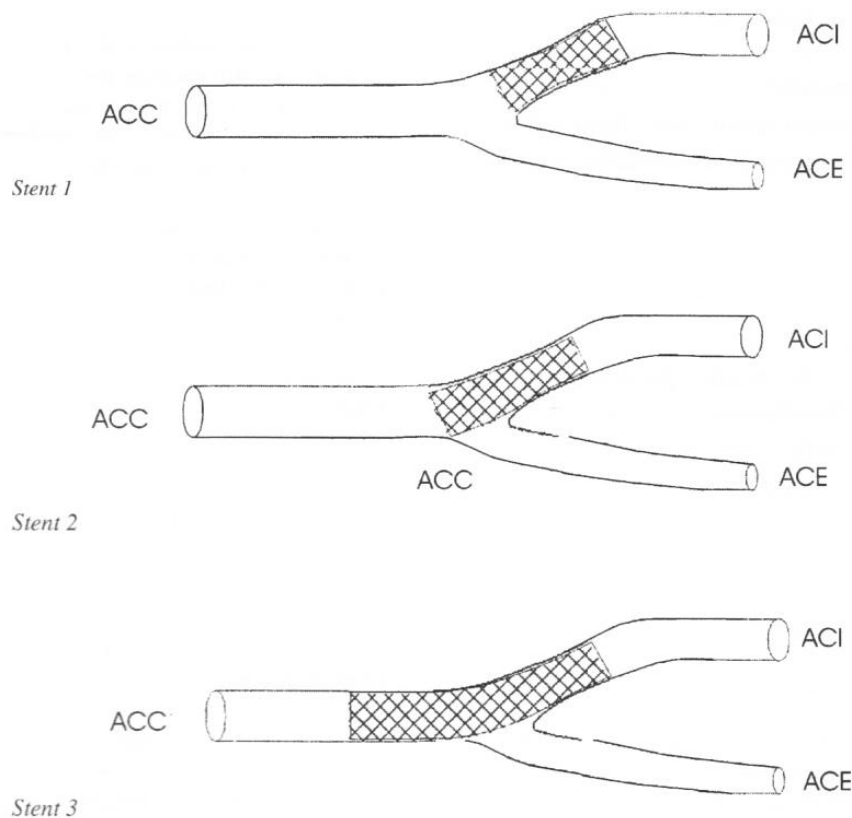


Fig 4. Three different stent positions

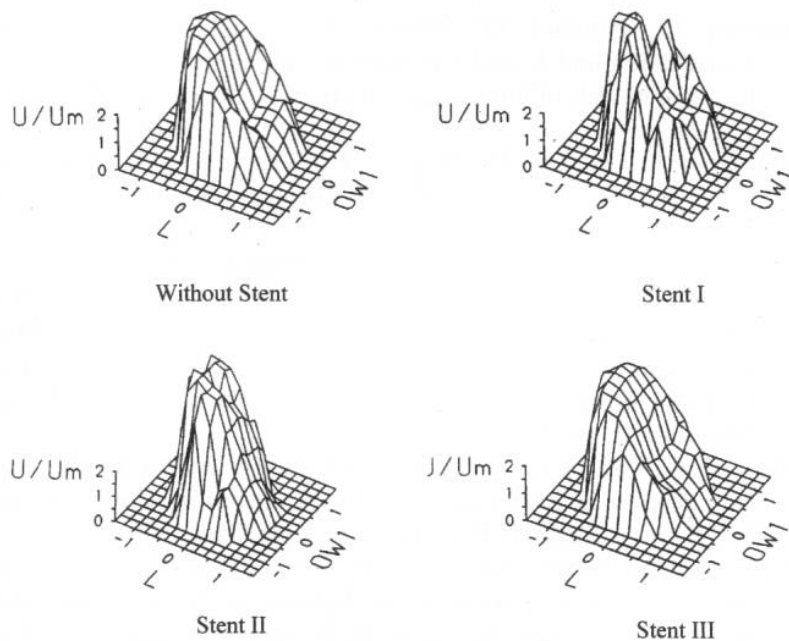


Fig. 5. Velocity distribution 5 mm distal to the apex in the ICA for three stents compared with a healthy ICA model

The position and structure of the stent strongly influences the flow. Again, the physician should be careful to position the stent so that no additional or only slight flow disturbances are caused. Normally in a healthy model, a flow separation zone is created at the beginning of the diastolic phase in the ECA. The flow separation region disappears and moves, in the form of loose vortices, downstream. After insertion of the stent, this flow separation region becomes much smaller and exists over a shorter period of time, because the grid of the stent reduces the flow separation and has a dampening effect. The woven wire causes only slight flow disturbances. Distal to the stent, small vortices are observed which fade quickly. Models were also used to study the high-pressure dilatation of multi-link stents.

Flow studies have also been done in 1:1 true-to-scale varicose veins. These experiments showed the influence of flow from arteriovenous communications on the vessel wall. Sometimes during the systolic phase, a jet-like flow from the arterial venous shunt hits the vein wall on the opposite side of the shunt. The forces from the jet onto the wall are up to 10 times higher than normal and may, over a longer period, damage the vein wall at this point causing the varicosity.

Numerical studies. It is also possible to use the fundamental equations for computational fluid dynamics. Numerical results come very close to physiological flow conditions if the boundary conditions are known. Scientists now use numerical programs to simulate flow behavior. This is done, for example, with finite element methods. In such studies, it is im-

portant that the geometry is precisely reproduced. With modern laser and computer techniques, a precise reproduction of the vessel can be achieved. Although it will be many years before a complete and accurate simulation of the complexities of the human circulation system can be fully demonstrated by computer, current studies are promising.

Conclusion. Velocity distribution and the hemodynamic forces acting on the vessel wall and blood cells are very important. Normally, under physiological flow conditions, the flow is usually developed laminar flow nor turbulent flow. It can be described as laminar flow with periodically rearing, vortices. These vortices are created at the beginning of the diastolic phase. Flow separation regions form only in specific areas of the circulatory systems i.e. at bends and bifurcations especially in the carotid artery. Significantly, these areas are also the areas where atherogenesis takes place. Flow separation regions exist for a short time and for a specific phase range of the pulse cycle. In rigid models, these flow separation regions remain over the whole pulse cycle. As long as the vessel remains elastic, there is no danger.

The non-Newtonian behavior of blood in low shear regions also minimizes the danger of large re-circulation zones. With Newtonian fluids, the re-circulation zone extends almost into the center of the cross section. With a non-Newtonian fluid, the re-circulation zone exists only along a certain distance close to the wall. In vessel surgery, it is crucial to avoid geometry changes that may result in large velocity disturbances. This can be determined by studying the flow field before and after surgical alteration in physiologically correct models. An experimental setup allowing the visualization and measurement of various flow parameters should be present in hospitals as standard equipment for testing and training physicians for catheter placement, ultrasound and MRI measurements, for the testing of artificial devices such as heart valves, stents, and patches, and for practicing various surgical procedures. The methods described here can also be used for other physiological fluids e.g. in the urethra or in the lungs. A complete understanding of fluid dynamic fundamentals is of utmost importance for physicians dealing with cardiovascular system disorders. Physicians and clinical personnel must be trained in these fundamentals. Complications leading to impairment or death could be avoided if the influence of flow were clearly understood and correctly applied.

It is time to expand beyond fundamental studies in wall elasticity and non-Newtonian fluids and to concentrate on the clinical applications of cardiovascular fluid dynamics. Future studies should include the physico-chemical and rheological mechanism of atherogenesis. Factors of atherosclerosis such as blood viscosity at different concentrations, smoking and air pollution can be studied systematically in models. Fluid dynamics can

also be used to evaluate the reaction and influence of medications. Viscosity and flow behavior changes, specifically the creation of vortices and flows disturbances, can be used to show how medication can influence flow behavior. Experiments have shown that hemodynamics may have a strong influence on the creation of aneurysms and varicose veins. Other factors such as vessel wall structure are also important. Geometry and elasticity of vessels walls play an important role in determining flow behavior. It is important the clinicians understand that high velocity fluctuations are an indication for flow disturbances that should be avoided.

Научное издание

ЛЕКЦИИ

2-ой Международной конференции
с элементами научной школы

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

*Тамбов,
22–24 апреля 2015 года*

Материалы, вошедшие в сборник, сохраняют авторскую редакцию.

Издательство Першина Р.В.,
392002, Тамбов, ул. Советская, 21, а/я 7.
email: izdat1@tamb.ru, тел. 8-909-232-81-01.

Формат 60x90/16. Бумага офсетная.
Печать электрографическая. Гарнитура Times.
Объем – 6,25 усл. печ. л. Тираж 300 экз.