



РОССИЙСКИЙ  
ФОНД  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ISSN 1605-8070

# ВЕСТНИК РФФИ

4 (76) октябрь–декабрь 2012



**ВЕСТНИК**  
**РФФИ**

**№ 4 (76) октябрь—декабрь 2012 года**

**Основан в 1994 году**  
Зарегистрирован Комитетом РФ по печати,  
рег. № 012620 от 03.06.1994 г.

**Учредитель**  
**федеральное государственное бюджетное учреждение**  
**«Российский фонд фундаментальных исследований»**

Главная редакция:  
главный редактор В.Я. Панченко, академик, председатель Совета РФФИ,  
заместитель главного редактора В.В. Квардаков, член-корреспондент РАН, заместитель  
председателя Совета РФФИ

Редакционная коллегия:  
академики: В.А. Геловани, Ю.В. Копаев, Ю.Н. Кульчин, В.П. Матвеев, Е.И. Моисеев,  
А.М. Музафаров, Р.В. Петров, И.Б. Федоров, В.В. Ярмолюк,  
члены-корреспонденты РАН: П.П. Пашинин, Е.Н. Черных, В.А. Шахнов  
Редактор тематического блока Е.П. Велихов, академик

Редакция:  
В.И. Елисеев, директор РФФИ  
А.П. Локтев, начальник издательского управления РФФИ  
А.О. Тимофеева, заместитель начальника издательского управления РФФИ

Адрес редакции:  
119991, Москва, Ленинский проспект, 32а  
Тел.: (495) 952 6053, факс: (495) 952 5541  
e-mail: [pressa@rfbr.ru](mailto:pressa@rfbr.ru)



### **ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК**

Аннотация к тематическому блоку .....	7
О редакторе тематического блока <b>Е.П. Велихове</b> .....	7
<i>Велихов Е.П., Азизов Э.А., Алексеев П.Н., Гуревич М.И., Субботин С.А., Шимкевич А.Л.</i> Зеленая ядерная энергетика .....	9
<i>Цибульский В.Ф.</i> Энергетический масштаб устойчивого развития .....	18
<i>Гагаринский А.Ю.</i> Ядерные источники в мировом и российском энергетическом развитии .....	24
<i>Костюк В.В., Макаров А.А., Митрова Т.А.</i> Энергетика и геополитика .....	30
<i>Воропай Н.И., Ретанц К.</i> Технические проблемы управления либерализованными электроэнергетическими системами.....	43
<i>Воропай Н.И., Курбацкий В.Г., Томин Н.В.</i> Предупреждение и ликвидация аварийных режимов электроэнергетических систем на основе новых методов прогнозирования и управления.....	51
<i>Каганович Б.М., Кейко А.В., Шаманский В.А., Зароднюк М.С.</i> Экологический анализ сжигания топлив и развитие равновесного термодинамического моделирования состояний и траекторий .....	61
<i>Массель Л.В.</i> Создание и интеграция интеллектуальных информационных технологий и ресурсов для комплексных исследований в энергетике .....	74

### **ОПЫТ И РЕЗУЛЬТАТ**

<i>Бронин Д.И., Кузин Б.Л., Ярославцев И.Ю., Береснев С.М.</i> Твердые электролиты на основе галлата лантана и кинетика электродных процессов в топливных элементах с этими электролитами .....	81
<i>Киншт Н.В., Петрунько Н.Н.</i> Диагностические свойства спектров электромагнитных излучений высоковольтного оборудования .....	100
<i>Озеров А.Ю.</i> Механизм периодичностей в динамике фонтанирования раскаленных бомб на базальтовых вулканах .....	106
<i>Нефедьев Ю.А., Шиманский В.В.</i> Современные исследования астрофизики звездных атмосфер.....	115

## **ВЫБОР МОЛОДЫХ**

*Каримуллин К.Р.*

**Viam Supervadet Vadens (Дорогу осилит идущий) ..... 120**

*Пахомова С.В.*

**«Самое синее в мире, Черное море мое...» ..... 128**

*Подшивалина В.Н.*

**Ветвистоусые ракообразные (Crustacea, Cladocera) как объект изучения ..... 133**

**THEMATIC SECTION**

<b>Abstract to the Thematic Section.....</b>	<b>7</b>
<b>About the Editor of the Thematic Section E.P. Velikhov.....</b>	<b>7</b>
<i>Velikhov E.P., Azizov E.A., Alekseyev P.N., Gurevich M.I., Subbotin S.A., Shimkevich A.L.</i>	
<b>Green Nuclear Power .....</b>	<b>9</b>
<i>Tsibulsky V.F.</i>	
<b>Energetic Scale of Sustainable Development.....</b>	<b>18</b>
<i>Gagarinsky A. Yu.</i>	
<b>Nuclear Power Sources in the International and Russian Energy Development .....</b>	<b>24</b>
<i>Kostyuk V.V., Makarov A.A., Mitrova T.A.</i>	
<b>Energy and Geopolitics .....</b>	<b>30</b>
<i>Voropai N.I., Retants K.</i>	
<b>Technical Problems of Managing Liberalized Electric Power Systems .....</b>	<b>43</b>
<i>Voropai N.I., Kurbatsky V.G., Tomin N.V.</i>	
<b>Prevention and Liquidation of Accidents in Electric Power Systems Based on the New Methods of Prediction and Management.....</b>	<b>51</b>
<i>Kaganovich B.M., Keiko A.V., Shamansky V.A., Zarodnyuk M.S.</i>	
<b>Ecological Analysis of Fuel Combustion and Development of Equilibrium Modeling of Conditions and Trajectories .....</b>	<b>61</b>
<i>Massel L.V.</i>	
<b>Creation and Integration of Intellectual Information Technologies and Resources for Complex Research into Energy .....</b>	<b>74</b>

**EXPERIENCE AND RESULT**

<i>Bronin D.I., Kuzin B.L., Yaroslavtsev I. Yu., Beresnev S.M.</i>	
<b>Lanthanum-Gallate-Based Solid Electrolytes and Kinetics of Electrode Processes in Fuel Cells with These Electrolytes.....</b>	<b>81</b>
<i>Kinsht N.V., Petrunko N.N.</i>	
<b>Diagnostic Properties of Electromagnetic Radiation Spectrum of High-Voltage Equipment .....</b>	<b>100</b>
<i>Ozerov A. Yu.</i>	
<b>Periodicity Mechanism in the Dynamics of Eruption of Incandescent Bombs on Basaltic Volcanoes.....</b>	<b>106</b>
<i>Nefedyev Yu.A., Shimansky V.V.</i>	
<b>Contemporary Research into Astrophysics of Stellar Atmospheres .....</b>	<b>115</b>

## ***YOUNG SCIENTISTS CHOICE***

*Karimullin K.R.*

**Viam Supervadet Vadens (The Path Will Be Overcome by the One Who Walks It) ..... 120**

*Pakhomova S.V.*

**«The Bluest Sea in the World, my Black Sea...» ..... 128**

*Podshivalina V.N.*

**Crustacea (Cladocera) as a the Object of Study ..... 133**

## АННОТАЦИЯ К ТЕМАТИЧЕСКОМУ БЛОКУ

Наличие доступного и стабильного энергоснабжения всегда имело фундаментальное значение для развития общества. Принципиальное отличие современной энергетической проблемы от тех, которые приходилось решать ранее, — ее глобальный характер как по масштабам потребностей, так и по ужесточающимся условиям отбора приемлемых решений.

Тема номера выбрана не случайно: Генеральная Ассамблея Организации Объединенных Наций в знак признания важности энергетики для устойчивого развития постановила провозгласить 2012 год Международным годом устойчивой энергетики для всех. Опубликование статей данной тематики представляет собой ценную возможность для повышения уровня осведомленности о важности расширения устойчивого доступа к энергоресурсам, энергоэффективности и возобновляемым источникам энергии на местном, национальном, региональном и международном уровнях.

В настоящем тематическом блоке сделана попытка представить срез фундаментальных проблем, активно обсуждаемых сегодня в энергетическом сообществе, на основе последних работ трех ведущих энергетических институтов страны: Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Института энергетических исследований РАН и Иркутского научного центра СО РАН.

Следует подчеркнуть, что все они либо базируются на математических моделях, либо посвящены совершенствованию предсказательного моделирования энергетических процессов. Область

системного моделирования приобретает возрастающую значимость по мере вовлечения в оборот все больших объемов ресурсов и энергии, а также нарастания сложности инфраструктуры.

Три статьи курчатовских экспертов идеологически объединены стремлением на основе рассмотрения ограничений существующих энергетических технологий и возможных сценариев мирового развития выделить роль и место в этом процессе ядерных источников энергии. При этом в статье «Зеленая энергетика» представляется дальнейший шаг: широко обсуждаемая сегодня, хотя высказанная еще в 70-е гг. прошлого века, идея синергизма ядерного деления и синтеза в виде термоядерного источника нейтронов для работы ядерного топлива реакторов деления.

Также глобальным проблемам мировой энергетики и геополитики посвящена статья специалистов ИНЭИ, где излагается и аргументируется концепция коллективной монографии, недавно выпущенной издательством «Наука».

Цикл статей сотрудников Иркутского научного центра СО РАН демонстрирует перспективы информационных технологий для широкого круга энергетических проблем от исследования развития энергетических систем до обеспечения их безопасного функционирования.

Разумеется, все это лишь очень небольшая часть огромного разнообразия задач, стоящих перед современной энергетической наукой. Представляется, однако, что настоящая подборка наглядно иллюстрирует «вектор» фундаментальных исследований устойчивого энергетического развития.

## О РЕДАКТОРЕ ТЕМАТИЧЕСКОГО БЛОКА АКАДЕМИКЕ ЕВГЕНИИ ПАВЛОВИЧЕ ВЕЛИХОВЕ



Выпускник МГУ им. М.В. Ломоносова, академик РАН, профессор, Герой Социалистического Труда, Лауреат Ленинской премии, Государственных премий СССР и России и ряда иностранных научных премий, Е.П. Велихов 50 лет работает в Курчатовском Институте, в том числе с 1988 г. — директором, а затем президентом РНЦ «Курчатовский Институт». В 1978—1997 гг. — вице-президент АН СССР, затем — Российской академии наук. Почетный член Шведской королевской академии инженерных наук, член Европейской академии наук, иностранный член Национальной Инженерной Академии США, почетный доктор ряда университетов мира.



Е.П. Велихов — физик-теоретик, организатор и руководитель крупных научных коллективов. Выполненные им и под его руководством работы по физике процессов термоядерного синтеза, магнитогидродинамическому методу преобразования энергии и оптическим квантовым генераторам, по теории турбулентной плазмы получили всемирную известность.

С 1973 г. Е.П. Велихов — научный руководитель исследований по управляемому термоядерному синтезу в СССР и в России. С 1985 г. он бессменный лидер международного проекта создания первого в мире экспериментального термоядерного реактора ИТЭР, разработка которого началась более 25 лет назад по инициативе СССР и позволила ведущим странам мира консолидировать свой научный и технический потенциал и финансовые ресурсы на создании нового глобального источника энергии. Базовая научная концепция — ТОКАМАК — была разработана в Курчатовском институте в 1950–1960 гг.

В 1988 г. США, ЕС, Россия и Япония приступили к проектированию ИТЭР. Е.П. Велихов — председатель правления Международного проекта термоядерного экспериментального реактора ИТЭР; с начала реализации этого проекта в Кадараше (Франция) — член Совета Международного проекта ИТЭР от России. В настоящее время ведется строительство реактора.

В 1990-х гг. Е.П. Велихов возглавил процесс организации производства морских нефтегазодобывающих платформ на научной, технологической и производственной базе российского атомного подводного кораблестроения. Под руководством Е.П. Велихова была разработана широкомасштабная программа строительства морских платформ для нефтегазовых месторождений Арктического шельфа на головном российском предприятии атомного подводного кораблестроения ПО «Севмаш» в г. Северодвинске, в рамках которой осуществлено строительство первой в мире морской ледостойкой нефтяной платформы для месторождения Приразломное в Баренцевом море.

Е.П. Велихов — инициатор создания Отделения информатики и вычислительной техники в АН СССР. С 2002 г. он Академик-секретарь Отделения информационных технологий и вычислительных систем РАН.

По инициативе Е.П. Велихова в последние годы осуществлены мероприятия, увеличившие емкость каналов связи России с зарубеж-

ными информационными сетями в 100 раз, реализовано участие России в международном информационном американо-китайско-российском проекте Глориад, в рамках первого этапа которого в 2004 г. построено опоясывающее земной шар кольцо, объединяющее научные информационные сети стран-участниц.

Возглавляемый академиком Е.П. Велиховым НИЦ «Курчатовский Институт» с июля 2001 г. осуществляет научное руководство работами по реализации Инициативы Президента России, выдвинутой на Саммите тысячелетия в ООН в сентябре 2000 г. и ориентирующей мировое сообщество на развитие атомной энергетики. Предложения Е.П. Велихова по международному атомному энергетическому проекту, объединяющему мировой интеллектуальный и индустриальный опыт в этой области, стали основой доклада комиссии «видных деятелей» 2008 г. о будущем МАГАТЭ.

Эти и другие достижения Е.П. Велихова в разработке научных основ и реализации крупномасштабных проектов в области перспективной энергетики и информатики и принесли ему заслуженное признание и вывели его в лидеры современной науки.

Академик Е.П. Велихов большое внимание уделяет подготовке и воспитанию молодой научной смены. С 1966 г. — профессор, он в 1973–1994 гг. возглавлял кафедру ядерной физики на физфаке МГУ; в настоящее время Е.П. Велихов — профессор кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физфака МГУ. В 1984 г. Е.П. Велихов организовал и возглавил кафедру «Физика и энергетика» в московском Физтехе; в 1995 г. создал в системе российского высшего образования Институт естественных наук при Курчатовском институте, в настоящее время — факультет нано-, био-, информационных и когнитивных технологий МФТИ.

Академик Е.П. Велихов удостоен многих орденов СССР и России: трех орденов Ленина, ордена Трудового Красного Знамени, ордена Мужества (за участие в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС), ордена «За заслуги перед Отечеством» (III степени). Среди его многочисленных наград можно выделить приз Лауреата Глобальной энергии 2006 г. и «Орден дружбы», врученный ему в мае 2012 г.

С его именем связано рождение и становление Общественной палаты Российской Федерации, бессменным секретарем которой он является.

## ЗЕЛЕНАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

*Е.П. Велихов, Э.А. Азизов, П.Н. Алексеев, М.И. Гуревич, С.А. Субботин, А.Л. Шимкевич<sup>1</sup>*

На саммите РИО+20 в Рио-Де-Жанейро заявлена необходимость технологических инноваций, в том числе в энергетике, для устойчивого развития общества. Сформулированы требования к «зеленым» (экологически приемлемым) технологиям. Ядерные технологии, при определенных условиях, максимально подходят под это определение.

Во-первых, ядерная энергетика имеет в принципе неограниченную ресурсную базу: урановую, ториевую и дейтериевую (с учетом запасов мирового океана) с предельно высокой удельной энергоемкостью.

Во-вторых, ядерная энергетика в эксплуатационном режиме не засоряет окружающую среду: ни атмосферу, ни воду, ни почву. В ряде случаев, например, в Арктике это единственное приемлемое, с точки зрения охраны окружающей среды, решение.

Однако ахиллесовой пятой ядерной энергетики деления являются запроектные аварии, которые в течение полувека три раза угрожали самому существованию ядерной энергетики: аварии на Три-Май-Айленде, Чернобыле и Фукусиме. Две основные причины неконтролируемый разгон реактора и потеря охлаждения.

Неконтролируемый разгон, к сожалению, связан с самой замечательной чертой ядерного реактора способностью к осуществлению самоподдерживающейся цепной реакции (Чернобыльская авария). Отказ от этого свойства приведет к необходимости использования мощного внешнего источника ней-

At RIO+20 meeting in Rio de Janeiro the need for technological innovation for the sustainable development of society, including energetic, was declared. The demands for “green” technologies (environmentally acceptable) were formulated. Nuclear technologies, under certain circumstances, come under this definition at most.

First of all nuclear power has almost unlimited resource base – uranium, thorium, deuterium (including the reserves of the world ocean) with extremely high specific power consumption.

In the second place nuclear power does not pollute environment: air, soils, water in operating mode. In some cases, e.g. the Arctic, nuclear power is the only ecologically acceptable decision.

But unplanned accidents which for the half of century three times threatened the very existence of nuclear power (Three Mile Island, Chernobyl, and Fukushima) are the Achilles heel of nuclear power. The two main reasons are uncontrolled reactor acceleration and the loss of cooling.

Unfortunately uncontrolled acceleration is connected with the most remarkable feature of nuclear reactor – the ability to implement self-sustaining chain reaction (the Chernobyl accident). The renunciation of this feature will lead to necessity to use powerful external neutron source and the creation of hybrid (synthesis – fission) reactor as the natural fix.



<sup>1</sup> Велихов Евгений Павлович, академик, Президент Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Азизов Энглен Атакузиевич, доктор физико-математических наук, профессор, руководитель отдела Троицкого института инновационных и термоядерных исследований, e-mail: azizov@triniti.ru.



Алексеев Павел Николаевич, кандидат физико-математических наук, начальник отдела ОтВЭ ИЯР Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», e-mail: apn@dhtp.kiae.ru.

тронов и естественному решению – созданию гибридного (синтез-деления) реактора.

Остается вторая проблема потеря охлаждения (аварии на Три-Май-Айленде и Фукусиме). Кардинальное решение переход к отказу от накопления всех радиоактивных продуктов деления внутри реактора под защитой системы барьеров другой принципиальной составляющей ядерной энергетики. Для этого надо обеспечить постоянную очистку топлива от продуктов деления. Такая технология известна реактор на расплавах солей (Molten Salt Reactor).

Решение, таким образом, здесь сводится к возможному варианту реактора с внутренней самозащищенностью MSHT Жидкосолевого Гибридного Токамак, причем для реализации источника нейтронов достаточен достигнутый сегодня в программе ИТЭР научный и технологический уровень, а также и уровень разработки жидкосолевого топливной технологии.

**Ключевые слова:** ядерные технологии, внутренняя самозащищенность, жидкосолевого подкритический реактор, термоядерный источник нейтронов

The loss of cooling (Fukushima accident) is the second problem. The conversion to the abandonment of all the radioactive fission products accumulation under the protection of the barriers system (another fundamental component of nuclear power) is the cardinal solution. We need to ensure the fuel refinement for this goal. This technology is already known – the Molten Salt reactor.

Thus, the solution of problems of safety of the future nuclear power here is reduced to possibility of realization inherent safety nuclear power plant - MSHT – Molten Salt (MS) Hybrid (H) Tokamak (T). Scientific and technological level, alongside with liquid salt fuel technology level, are enough for implementation of neutron source.

**Keywords:** nuclear technologies, inherent safety, molten salt subcritical reactor, fusion source of neutrons

### Энергия без опасности

Ядерная энергетика в нормальном эксплуатационном режиме не засоряет окружающую среду: ни атмосферу, ни воду, ни почву. В ряде случаев, например, в Арктике в ледовых условиях – это единственное приемлемое с точки зрения охраны окружающей среды решение. Современные технологии позволяют надежно и в течение неограниченного срока хранить отходы ядерного топливного цикла и отработавшее оборудование.

Однако «ахиллесовой пятой» ядерной энергетики стали так называемые запроектные аварии, которые в течение полувека три раза угрожали ее существованию: аварии на американской АЭС «Три-Майл-Айленд», в Чернобыле и в Фукусиме. Причины – неконтролируемый разгон реактора и потеря охлаждения.

Неконтролируемый разгон (Чернобыль), к сожалению, связан с одной из особенностей ядерного реактора – способностью к осуществлению самоподдерживающейся цепной



Гуревич Михаил Исаевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», e-mail: gur.m@mail.ru.



Субботин Станислав Анатольевич, кандидат технических наук, руководитель отдела Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», e-mail: subbotin@dhtp.kiae.ru.



Шимкевич Александр Львович, доктор физико-математических наук, профессор, руководитель отдела Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», e-mail: shall@dhtp.kiae.ru.

реакции. Отказ от этого приведет к необходимости создания мощного нейтронного источника. В таком случае естественное решение – гибридный термоядерный реактор. Однако остается вторая проблема – сьем остаточного энерговыделения реактора (Фукусима), проще говоря – отвод тепла. Кардинальным решением здесь может быть отказ от накопления радиоактивных продуктов в топливных стержнях активной зоны реактора – второй «священной коровы» современной ядерной энергетики. Это возможно только при непрерывной очистке циркулирующего топлива, например, в расплавленной соли. Дополнительное преимущество такой схемы – отсутствие давления в первом контуре реактора, что позволит уменьшить массу конструкций в реакторе и устранить источник механической аварии, внутренне присущей системам с газовым или водяным охлаждением. Охлаждение жидким металлом исключается из-за его взаимодействия с магнитным полем.

Технологической платформой для такого гибридного реактора может стать ITER, причем для него достаточен достигнутый сегодня в программе ITER научный и технологический уровень.

Таким образом, решение проблем безопасности будущей ядерной энергетики здесь сводится к возможности реализации внутренне самозащищенного ядерного энергоисточника – MSHT – жидкосолевого (MS) гибридного (H) токамака (T).

### Платформа

Выполненные ранее разработки концепций крупных гибридных реакторов [1-7] показали, что достаточная эффективность наработки топлива начинается с уровня нейтронных потоков на бланкет (система из лития, урана или тория, окружающая реактор)  $0,2-1,0$  МВт/ $m^2$ . Первые предложения были основаны на весьма серьезных допущениях о параметрах и процессах в плазме и свойствах применяемых материалов. Их принципиальным недостатком стало постоянное наличие в активной зоне гибридного реактора-токамака большого избыточного количества делящегося материала и накопленных продуктов деления, что неприемлемо из-за серьезной потенциальной угрозы тяжелых аварий.

В более поздних работах, выполненных в российских лабораториях, были предложены компактные стационарные источники – токамаки

с теплыми и сверхпроводящими магнитными системами, которые в стационарных условиях при дополнительной инжекции нейтральных пучков с энергией более 100 КэВ в плазму должны генерировать потоки нейтронов  $0,2-0,3$  МВт/ $m^2$ . Предложение по компактным нейтронным источникам достаточно хорошо обосновано современной базой данных по физике и технологии токамаков и компьютерным моделированием. Основная проблема для такого типа источников заключается в том, что подобные сценарии работы рассчитаны на быстрый прогресс в создании эффективных методов неиндуктивного поддержания тока и материалов для высокоресурсной первой стенки реактора и дивертора (специального устройства, служащего для приема потоков частиц и излучений с периферии плазменного шнура). Существуют и другие проблемы, препятствующие развитию таких систем.

ITER – проект экспериментального токамака-реактора, в котором на современном уровне впервые соединены плазмофизические, электрофизические и ядерные технологии. Это позволит к 2030 г. продемонстрировать достижение мощности 500 МВт термоядерных реакций в 400-секундном рабочем цикле. Разработка ITER была выполнена ведущими научными институтами и лабораториями, инженерными, конструкторскими и технологическими центрами мира на основе мировой базы данных и теоретических исследований. К работе над реализацией проекта ITER привлечены крупные многопрофильные промышленные компании, созданы новые производства, материалы, новейшие эффективные технологии, информатика, физическая и технологическая диагностика. Для моделирования процессов в ITER были использованы программы высокого уровня и возможности суперкомпьютеров. В результате теоретических и экспериментальных исследований физики горячей плазмы в токамаках были определены основные характеристики ITER в индуктивном, или «гибридном», и стационарном сценариях.

### Реализация

Из разработок следует, что ITER может генерировать нейтронные потоки на бланкеты от  $0,35$  до  $0,78$  МВт/ $m^2$  при большой длительности, что позволяет использовать такие потоки как для наработки топлива и энергии в гибридной

схеме, с бланкетами, содержащими делящиеся ядра, так и для демонстрации использования энергии «чистого» термоядерного синтеза.

### Жидкосолевая технология для бланкетов

Кроме решения проблемы безопасности, развитие крупномасштабной ядерной энергетики в XXI в. предусматривает переход к полному использованию энергетического потенциала урана-238 и тория-232 и устранение проблемы ресурсных ограничений, т.е. к необходимости эффективного бридинга (воспроизводства) ядерного топлива. Такую задачу наилучшим образом решают термоядерные источники нейтронов с подкритическим жидкосолевым бланкетом [8]. Согласно представленной здесь концепции, для безопасного производства энергии предлагается использовать токомак с жидкосолевым бланкетом с ураном-233, а для эффективного бридинга ядерного топлива-токомак с жидкосолевым бланкетом с торием-232. Возможно совмещение этих процессов в различных секциях одного бланкета.

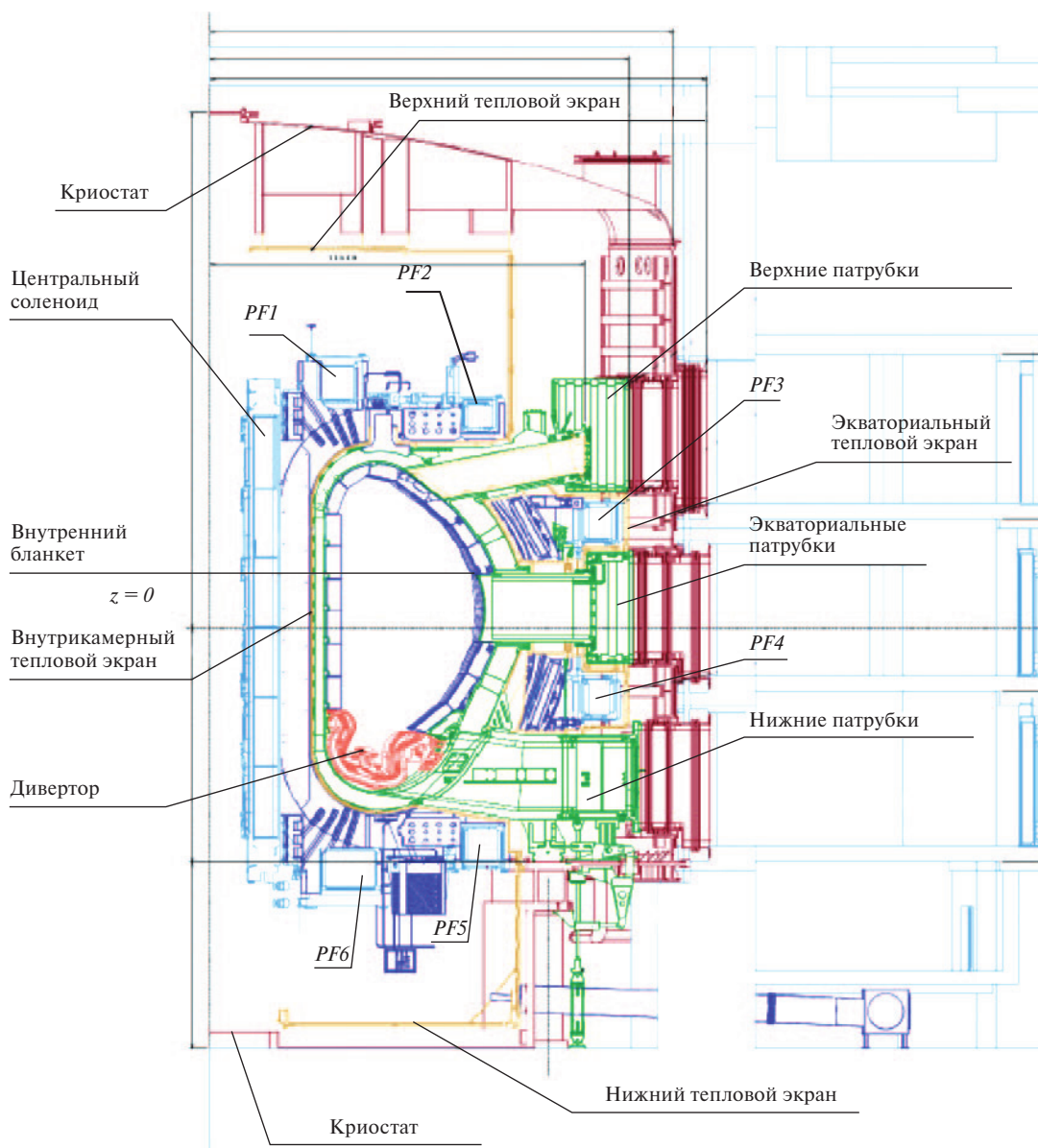
Концепция жидкосолевых реакторов (ЖСР) имеет примерно тот же возраст, что и ядерная энергетика в целом [9-12]. Однако эта ядерно-химическая концепция принципиально отличается от традиционной концепции твердотопливных реакторов, поскольку может допускать коррекцию состава ядерного топлива без остановки реактора и позволяет исключить накопление продуктов деления в активной зоне. В одной установке высокотемпературный энергоисточник может органично сочетаться с замкнутым ядерным топливным циклом.

Стартом использования жидкого топлива такого типа можно считать начало 50-х гг. прошлого века, когда в Оук-Риджской национальной лаборатории (США) была принята программа исследовательских работ в целях создания высокотемпературного ядерного реактора с циркулирующим топливом для авиационного двигателя. Первый экспериментальный расплавно-солевой реактор ARE начал функционировать в США в 1951 г. В рамках этой программы в 1965 г. в той же лаборатории (США) был запущен реактор MSRE с расплавно-солевым циркулирующим топливом тепловой мощностью 8 МВт. Цель – проверить работоспособность отдельных узлов конструкции, отработать технологию топлива и теплоносителя, изучить динамику реакторов такого типа.

В процессе четырехлетней кампании реактор успешно работал без изменения конструкции на всех основных видах делящегося топлива  $^{235}\text{U}$  –  $^{238}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$  –  $^{232}\text{Th}$ . (После остановки реактора и длительной выдержки топлива осуществлен его вывод из эксплуатации.) Позже концептуальные проекты и технические предложения были выполнены в Японии, Франции, СССР (России), КНР, ЧР. Жидкосолевая реакторная технология разрабатывается в рамках шести перспективных реакторных технологий международного проекта «Поколение-4». В соответствии с задачами этого проекта, к 2030 г. должны появиться демонстрационные реакторы по каждому из этих направлений.

Ядерно-химическая концепция жидкосолевых реакторов развивается в НИЦ КИ совместно с ГК «Росатом», РАН и Чешской Республикой. На серии экспериментальных петель, включая реакторные петлевые исследования, была доказана принципиальная возможность практической реализации данной концепции и достижения высоких термодинамических параметров. Интерес к расплавно-солевому топливу – теплоносителю на основе фторидов – связан с такими его свойствами, как пожаробезопасность, высокая температура кипения, низкое давление при высоких рабочих температурах, высокая радиационная стойкость и химическая инертность по отношению к воде и воздуху, возможность обеспечить всережимную естественную циркуляцию в контурах ядерно-энергетической установки, устойчивость к воздействию магнитных полей.

Для наработки новых делящихся материалов целесообразно использовать воспроизводящий жидкосолевым бланкет в такой конфигурации, чтобы он генерировал минимальное количество энергии, концентрируясь на производстве нейтронов. Здесь применяется мультиплицирующий эффект энергопроизводства. Непосредственно в термоядерной реакции создается энергия в форме высокоэнергетичного нейтрона (~ 14 МэВ). С учетом последующих ядерных реакций на сырьевых изотопах можно получить примерно 1,7 новых ядер делящихся изотопов, которые после деления в делительных бланкетах позволят выработать около 350 МэВ энергии. В качестве сырьевого изотопа целесообразно рассматривать Th-232, тогда тепловая энергия, выделяемая непосредственно в термоядерном источнике, минимальна, а наработка урана-233 для делительных бланкетов будет производиться



**Рис. 1.** Принципиальная конструкция ITER

Размеры тороидальной вакуумной камеры ITER: внешний диаметр ~ 19,4 м, внутренний диаметр ~ 6,5 м, высота камеры ~ 11,3 м, толщина оболочки ~ 60 мм, расстояние между стенками камеры на внешней и внутренней стороне ~ 1,0 м и ~ 0,5 м соответственно. Оболочка камеры прогревается до 200° С, патрубки — до 250° С. Значительное место в камере отводится защитным бланкетам, покрывающим внутреннюю поверхность камеры, за исключением патрубков и дивертора. Они совместно с двухоболочечной вакуумной камерой экранируют от нейтронного потока сверхпроводящие катушки тороидального магнитного поля. Размеры защитных модулей blankets: 1,40 x 1,00 x 0,45 м, общее количество модулей — 440. При разработке жидкосолевого гибридного токамака без изменения внешних габаритов вакуумной камеры ITER, возможно за счет уменьшения метаоболочного пространства более эффективной радиационной защиты и сокращения числа патрубков использовать большее пространство для размещения жидкосолевого blankets. Толщина blankets может быть выбрана в диапазоне от 0,45 м до 1,00 м. При этом необходимо учитывать ограничения на температуру первой стенки. Она не должна превышать 600° С. Создание высокоресурсного дивертора пока остается нерешенным для ITER. В настоящее время разработан ряд вариантов, которые позволяют надеяться на решение этой проблемы. Важной составляющей работы жидкосолевого гибридного токамака выступает воспроизводство трития, достаточного для его обеспечения топливом.

ся в жидкотопливных ториевых бланкетах с глубоко подавленным делением (выведение проактиния-233 в онлайн-режиме из бланкетов с расплавом фторидов FLiNaK и последующее использование урана-233 в бланкетах с расплавом FLiBe). Поскольку и во FLiBe, и во FLiNaK присутствует достаточно лития, облучаемого нейтронами, то «зеленая» ядерная энергетика будет самообеспечиваться тритием, сжигаемым в жидкосолевом гибридном токамаке.

Несмотря на большой опыт использования солевых расплавов в различных промышленных технологиях [11-14], мало внимания уделялось изучению их электронной структуры, не говоря уже о тонком влиянии нестехиометрических солей или их окислительно-восстановительного потенциала (redox) на структурные, термодинамические, физико-химические, кинетические и коррозионные свойства жидких солей.

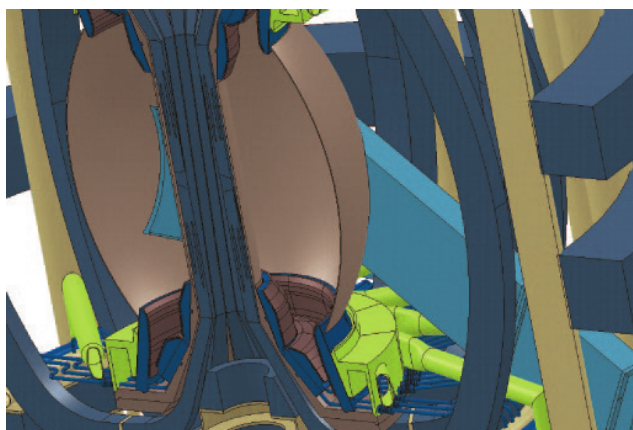


Рис. 2. Пространство для размещения бланкета ТИН

### Концепция очистки соли в онлайн-режиме

Специалистами предлагается метод потенциометрического контроля и тонкого регулирования redox-потенциала солевого бланкета на основе расплава фторида лития путем кулонометрического титрования через твердый электролит катионов лития. Этот метрологически детерминированный метод позволяет не только измерять redox-потенциал с высокой точностью ( $\pm 5$  мВ), но и с такой же точностью его поддерживать на заданном уровне тонким и реверсивным дозированием (тысячными долями ppm) атомов лития [17].

Для точного контроля окислительно-восстановительного потенциала расплава соли следует использовать электрохимический датчик термодинамической активности лития на твердом электролите с униполярной прово-

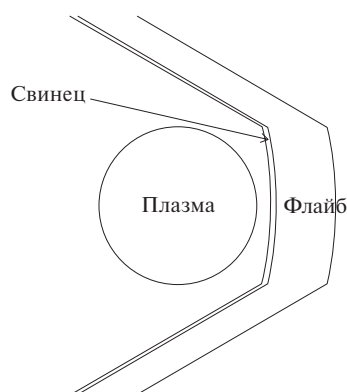


Рис. 3. Расчетная модель бланкета жидкосолевого гибридного токамака

В качестве исходной модели для гибридной схемы токамака рассматриваем ITER (рис. 1). Расплавосолевой бланкет располагается между первой стенкой и катушками тороидального магнитного поля (рис. 2). Бланкет состоит из отдельных заменяемых модулей.

Модельные расчетные оценки коэффициента размножения, наработки трития и побочных радионуклидов в нейтронном поле ITER проводились в расплавосолевых бланкетах из FLiBe и FLiNaK по схеме, представленной на рис. 3. Температура расплава соли на входе в бланкет составляет  $\sim 550^\circ\text{C}$ . Температура расплава соли на выходе из бланкета —  $\sim 600^\circ\text{C}$ . Максимальная температура расплава соли —  $\sim 700^\circ\text{C}$ . Материал стенки сосуда, содержащего расплав соли, — хастеллой (Cr — 7 % масс., Fe — 4 % масс., Ni — 72 % масс., Mo — 17 % масс.), плотность —  $\sim 8,89\text{ г/см}^3$ , средняя температура —  $\sim 620^\circ\text{C}$ . Состав расплава солей в делительном и воспроизводящем бланкетах (в молярных %) ( $1,0\text{ UF}_4 + 57,0\text{ LiF} + 42,0\text{ BeF}_2$ , плотность соли —  $\sim 2,3\text{ г/см}^3$  и ( $30,0\text{ THF}_4 + 32,5\text{ LiF} + 8,1\text{ NaF} + 29,4\text{ KF}$ ), плотность соли —  $\sim 4,6\text{ г/см}^3$  соответственно. Использован природный литий с содержанием Li-6  $\sim 7,5\%$  ат. Расчетные оценки проводились с помощью программы MCNP5 [15], библиотеки файлов оцененных ядерных данных ENDF/B-VI и программы подготовки ядерно-физических данных NJOY99 [16] для бланкетов толщиной 70 см. Результаты расчетных оценок показывают возможность создания энергосистемы на базе жидкосолевых гибридных токамаков как с самообеспечением топливом, так с расширенным воспроизводством топлива, включая тритий.

димостью по этому катиону. Такую мембрану можно сделать из  $\text{Li}^+-\beta''$ -глинозема, что обеспечивает однозначное соответствие генерируемой на мембране ЭДС и термодинамической активности лития в жидкой среде, если в качестве электрода сравнения используется чистый жидкий литий [17].

Чтобы использовать твердую мембрану  $\text{Li}^+-\beta''\text{-Al}_2\text{O}_3$  в качестве чувствительного элемента датчика термодинамической активности лития в жидких солях, следует исключить непосредственный контакт твердого электролита и расплавленной соли, одновременно обеспечив их эффективный обмен. Такая техническая задача решается, если отделить электролит  $\text{Li}^+-\beta''\text{-Al}_2\text{O}_3$  от расплавленной соли жидкометаллическим измерительным электродом (например, из свинца или висмута) в слое войлока толщиной не более 0,1 мм из коррозионно-стойкого в расплавленных солях материала [17].

Использование жидкометаллического измерительного электрода позволяет создать инструмент прецизионного измерения и эффективное средство регулирования redox-потенциала солевого расплава в электрохимической ячейке типа [17]  $\text{Mo}|\text{Li}||\text{Li}^+-\beta''\text{-Al}_2\text{O}_3||\text{Mo}|\text{Pb}|\text{Li}|\text{соль}[\text{Li}]$  (1), когда измерительный электрод  $\text{Pb}|\text{Li}$  кинетически организован так, что активность натрия в нем совпадает с активностью натрия в соли. Это легко обеспечить в тонком слое жидкого свинца между твердым электролитом и солью. Принцип действия такого датчика основывается на измерении ЭДС электрохимической ячейки (1) высокоомным вольтметром. Измерительный электрод, непосредственно контактирующий с расплавом соли, обменивается с ней атомами лития, обеспечивая тем самым термодинамическое равновесие и защищая твердый электролит от коррозионного воздействия жидкой соли. ЭДС датчика лития определяется его термодинамической активностью в жидком свинце, соответственно, в жидкой соли, поскольку они находятся в термодинамическом равновесии по литию, что легко достигается благодаря высокой диффузионной подвижности его атомов и в расплаве соли, и в тонком слое жидкого свинца.

Датчик лития, позволяющий прецизионно измерять redox-потенциал солевого расплава, можно также использовать в качестве реверсивного насоса атомов лития в жидкую соль и обратно из нее. Поскольку между твердым электролитом и расплавом соли помещен тон-

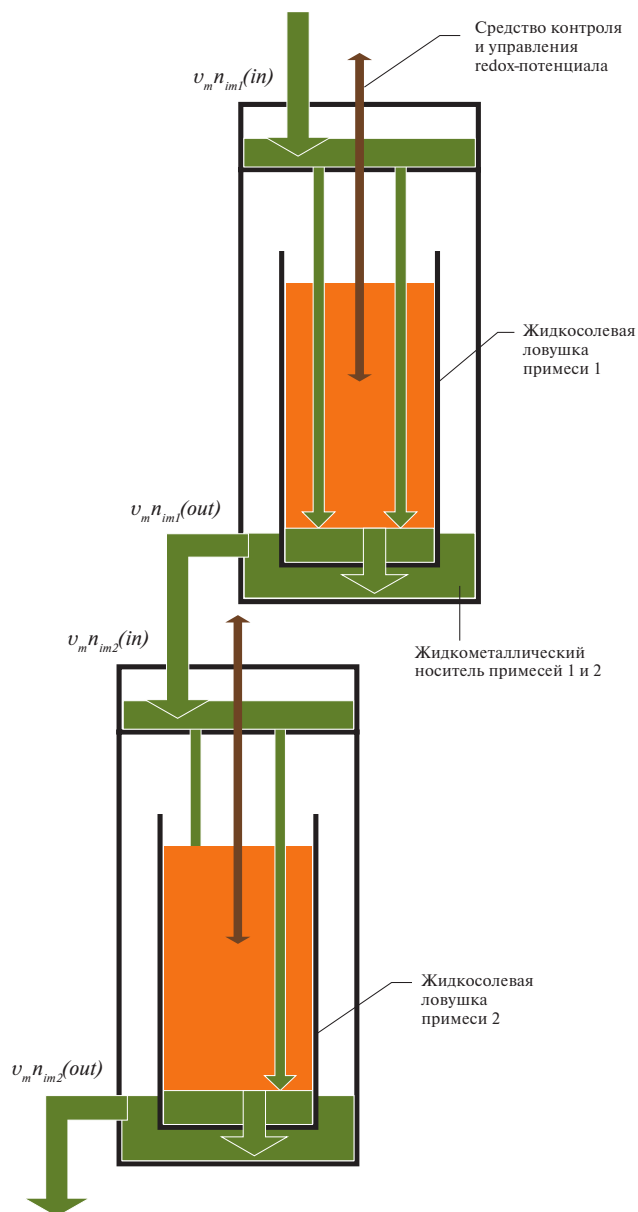


Рис. 4. Принципиальная схема каскадной жидкосолевой ловушки примесей, работающей в «диодном» режиме

кий жидкометаллический электрод, то приложение к ячейке (1) небольшого избыточного положительного (или отрицательного) потенциала приведет к переносу катионов лития из электрода сравнения в измерительный электрод (и наоборот).

Таким образом, можно тонко регулировать redox-потенциал солевого расплава и поддерживать его на любом уровне с высокой точностью ( $\pm 5$  мВ). Важно, чтобы контроль и регулирование этого параметра обеспечивали поддержание заданного качества солевой композиции, минимизировали скорость коррозии конструкцион-



ных материалов во всем контуре и гарантировали эффективную экстракцию из нее заданных.

Чтобы эффективно управлять составом жидкой соли в бланкете и эффективно удалять радионуклиды, которые возникают в нем за счет ядерных реакций при облучении соли нейтронами, нужно предельно минимизировать потенциал электроосаждения. Для этого примеси должны находиться в соли в состоянии, близком к нейтральным атомам металлов, растворимость которых в солях не превышает  $10^{-6}$  атомной доли. Тогда схема переноса металлического радионуклида при его гальванической экстракции концептуально выражается рис. 5 [17]. Видно, что справа в массообменнике (рис. 5) уровень Ферми располагается выше уровня примеси, а слева в ловушке (рис. 4) — ниже его. Это означает, что в правом солевом электроде все примеси находятся в виде атомов металлов, а в левом солевом электроде одна из них может существовать только в виде молекул соли. Тогда эта примесь через жидкометаллический носитель концентрируется в первом каскаде ловушки, показанной на рис. 4.

Особенность каскадной ловушки в том, что redox-потенциал соли в каскадах разный. Первый настроен так, чтобы уровень Ферми оказался ниже самого высокого энергетического уровня одной из удаляемых примесей и выше всех остальных. Тогда они не принимаются этим каскадом, который представляет собой сток только первой примеси, поскольку ее

равновесная термодинамическая активность в этом каскаде оказывается существенно меньше, чем в жидкометаллическом носителе.

Таким образом, каскад ловушки выступает как диод, для одной примеси потенциал Ферми открывает сток, а для других — его «запирает». На втором каскаде открывается сток для второй примеси и продолжает работать сток для первой и т.д.

При эффективной экстракции примеси из соли в массообменнике и из жидкометаллического носителя в каскадной ловушке лимитирующим фактором очистки бланкета становится расход его соли через массообменник.

Современные вызовы обуславливают необходимость создания нового поколения ядерных гибридных энергетических систем с исключением проблем, связанных с угрозами разрушительных аварий и распространения оружейных материалов, накоплением долгоживущих радиотоксичных отходов, угрозами существенных инвестиционных потерь в условиях ограниченности капитала, экономических кризисов, быстрых инфляционных процессов и быстрого истощения ресурсов ядерного топлива. Такая «зеленая» ядерная энергетика может быть реализована, например, на основе концепции внутренне самозащищенных ядерных энергоисточников — жидкосолевых гибридных токамаков (расплавосолевых подкритических бланкетов с внешними источниками термоядерных нейтронов), в которых осуществляются самообеспечение топливом и эффективное

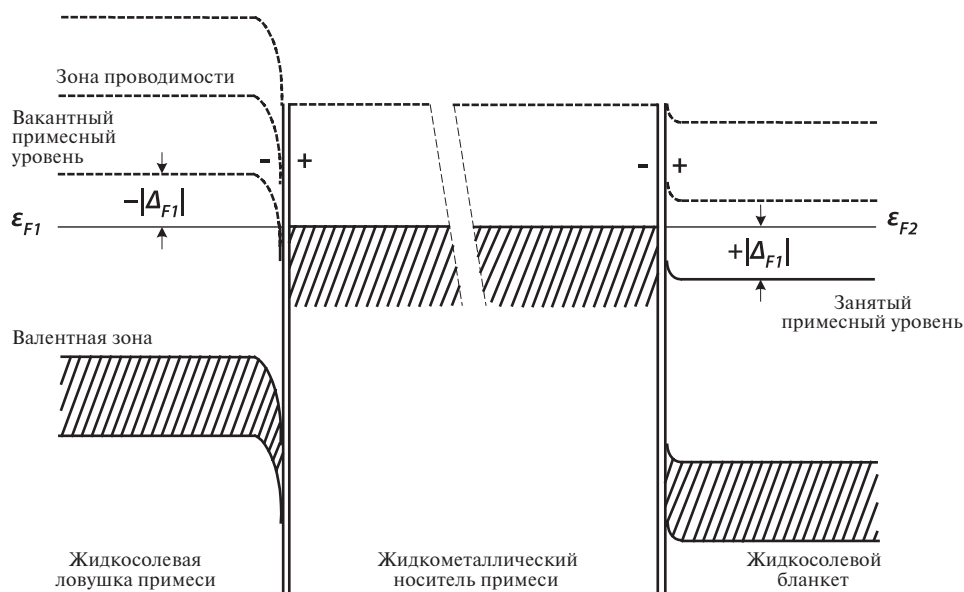


Рис. 5. Схема гальванической ячейки из двух массообменников соль/жидкий металл (свинец), правый солевой электрод является источником металлической примеси, а левый — ее стоком в связанное состояние

преобразование энергии. В будущем подобные жидкосольевые гибридные термоядерные реакторы разных типов смогут гораздо больше – экологически чисто и безопасно удовлетворить все основные требования человечества. Для запуска этого поколения термоядерных гибридных энергетических систем достаточно использовать современные и появляющиеся сегодня ядерные технологии, разработку которых нужно начинать прямо сейчас.

### Литература

1. *Велихов Е.П., Глухих В.А., Гурьев В.В., Кадомцев Б.Б., Колбасов Б.Н. и др.* Гибридный термоядерный реактор-токамак для производства делящегося топлива и электроэнергии. – Атомная энергия, 1978. – Т. 45, вып. 1. – С. 3–9.
2. *Azizov E.A., Dokuka V.N., Kovan L.A.* Investigations of VNS for minor actinides transmutation on base of spherical tokamaks with aspect ratio  $A = 2$ . – In: Workshop on Blanket and Fusion Reactor Concepts for Transmutation of Minor Actinides. San Diego. – USA. – 2001.
3. *Azizov E.A., Arefiev Yu.P., Gladush G.G., Dokuka V.N. et al.* The VNS concept on the base of tokamak JUST-T for transmutation of minor actinides. – Plasma Devices and Operations. – 2003, vol. 11. – P. 279.
4. *Azizov E.A., Arefiev Yu.P., Buzhinskij O.I., Gladush G.G., Dokuka V.N. et al.* Plasma-physical and electrophysical aspects of the compact stationary neutron source on the basis of tokamak. – Plasma Devices and Operations. – 2005, vol. 13. – P. 167
5. *Азизов Э.А., Гладуш Г.Г., Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р. и др.* Использование компактных токамаков в качестве источника нейтронов для решения проблем ядерной энергетики. – ВАНТ, серия Термоядерный синтез. – 2009, вып.3. – С.3–9.
6. *Азизов Э.А., Гладуш Г.Г., Лопаткин А.В., Лукасевич И.Б.* Гибридные системы на основе токамака для наработки топлива и утилизации отработавшего ядерного топлива. – Атомная энергия. – 2011. – Т. 110, вып. 2. – С. 84–88.
7. *Новиков В.М., Прусаков В.Н., Блинкин В.Л., Чувиллин Д.Ю.* Жидкосольевые blankets термоядерного реактора: преимущества и проблемы. – ВАНТ, серия Термоядерный синтез. – 1985, вып.4. – С.19–23.
8. *Алексеев П.Н., Азизов Э.А., Велихов Е.П., Лопаткин В.А., Смирнов В.П., Стребков Ю.С., Субботин С.А., Филатов О.Г., Цибульский В.Ф., Шимкевич А.Л.* Использование термоядерных нейтронов в ядерной энергетике / XXXVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 9–13 февраля 2009 г.
9. *Grimes W.R.* Reactor chemistry division annual progress report for period ending. ORNL-3913. – Oak Ridge National Laboratory. – Oak Ridge, TN. – December 31, 1965.
10. *Powers W.D., Cohenj S.I., Greene N.D.* Physical properties of molten reactor fuels and coolants // Nuclear science and engineering. – 1963, 71. – pp. 200–211.
11. MSR Program Semiann. Progr. Rept. Feb. 29, 1968, ORNL-4254.
12. *Spiewak I., Weinberg A.* Inherent Safety Reactors. Ann. Rev. Energy. – N 10, 1986. P. 431–460.
13. *Алексеев П.Н., Дудников А.А., Прусаков В.А., Субботин С.А., Шимкевич А.Л., Яковлев В.В.* Расчетно-экспериментальные исследования высокопоточного расплавно-сольевого реактора. – В сборнике трудов XIII Российской конференции по физической химии и электрохимии расплавленных шлаков и твердых электролитов, Екатеринбург: УОРАН 2004.
14. *Alekseev P.N., Shimkevich A.L.* On voltage-sensitive managing the redox-potential of MSR fuel composition // In Proceedings of “16th International Conference on Nuclear Engineering” (ICONE16). – Orlando, Florida, USA. – Paper ICONE 16-48176. – 2008.
15. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. X-5 Monte Carlo Team. – Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-03-1987 (April, 2003).
16. NJOY99.0 Code System For Producing Pointwise And Multigroup Neutron And Photon Cross Sections From ENDF/B Data. RSICC Peripheral Shielding Routine Collection. – Oak Ridge National Laboratory. Documentation for PSR-480/NJOY99.0 Code Package (March 2000).
17. *Alekseev P.N., Shimkevich A.L.* On fine management of fuel composition in molten salt reactors // International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering (IJNESE), final paper NESE-10020. – 2012. – Vol. 2, No. 2. – 2012 PP. www.ijnese.org, World Academic Publishing.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МАСШТАБ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Цибульский В.Ф.<sup>1</sup>

В статье рассмотрены вопросы, связанные с проблемами энергетического развития современной цивилизации и возможности перехода к устойчивому развитию. Представлены оценки текущего состояния мировой экономики и энергетики и сделаны оценки ближайшей перспективы. Для достижения критериев устойчивого развития представлены модельные расчеты варианта будущей структуры энергопотребления с учетом крупномасштабного развития атомной энергетики.

**Ключевые слова:** энергетика, экономика, устойчивое развитие, атомная энергетика, возобновляемая энергетика, кризис, мировой валовой продукт.

Problems connected with energy development of modern civilization and ability of transition to sustainable development are discussed in the article. Assessment of current situation of world economy and energy are given. Also prognosis assessment for near-term outlook is given in the article. Model calculations were carried out to determine criteria of sustainable development of future energy consumption structure and large scale nuclear energy development were taken into account.

**Keywords:** energy, economy, sustainable development, nuclear energy, renewable energy, world GDP.

Обсуждая проблему устойчивого развития и современное состояние, все чаще приходится соотносить представление о перспективе с потенциальными возможностями надежного ресурсного обеспечения цивилизации. Все чаще приходится ориентироваться на оптимистические воззрения, выражая надежду на то, что в будущем удастся построить экономическую структуру, работающую в замкнутом цикле, в котором не будет необходимости постоянно пополнять утраченный ресурс новым, черпаемым из природы. В принципе, это возможно, за исключением, пожалуй, единственного ресурса — энергетического, использовать который можно только один раз. Значимость именно этого ресурса обусловлена тем, что, рассматривая историческую ретроспективу, можно уверенно констатировать — развитие экономики с хорошей точностью коррелировано с потреблением ею первичной энергии. Без надежного энергетического сопровождения современной технократической цивилизации существовать не удастся.

Сказанное в этом коротком введении означает, что философия устойчивого развития неявным образом предполагает формирование такой энергетической базы цивилизации, которая могла бы соизмеряться по ресурсному масштабу со временем существования Солнечной системы. В современной системе понятий это в наибольшей степени ассоциируется с энергетикой, построенной на использовании возобновляемых ресурсов или проще — Солнечной энергии. Люди испокон веков пользуются этой энергией, создавая для этого гидросооружения, ветряные генераторы (мельницы), используют термальное тепло. Но по мере развития, освоения новых технологий, облегчения условий труда и повышения качества жизни, этой энергии стало мало. Точнее можно сказать так, что оказалось недостаточно той части солнечной энергии, которую можно преобразовать в работу с учетом освоенных к тому времени технологий. Но здесь обнаружилась новая возможность, оказалось, что природа запасла большое количе-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-09-813535).

<sup>2</sup> Цибульский Виктор Филиппович, доктор технических наук, главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский Институт», e-mail: unk@dhtp.kiae.ru.



ство энергии в химической форме, полезных ископаемых, их использование позволило получать существенно больше полезной энергии при меньших затратах.

С начала прошлого века, когда началась эпоха индустриализации, за один век люди израсходовали энергии около 600 млрд тнэ — много больше, чем за два предыдущих тысячелетия, построив современную индустриальную экономику. Она приобрела столь большой масштаб, что ее собственную эволюцию уже нельзя рассматривать в отрыве от преобразования природы, которое обусловлено ее деятельностью и оказывает значимое влияние на окружающую нас экосистему. В дополнение к этому следует отметить, что развитие цивилизации вышло на такой уровень, когда ее дальнейшая динамика преимущественно подчиняется объективным закономерностям, на фоне которых субъективные действия отдельных участников процесса проявляют себя лишь как статистические флуктуации. Иными словами, любые локальные воздействия на глобальную экономическую систему, которые вступают в противоречие с доминантными тенденциями ее развития, будут быстро подавлены самой системой, и тренд ее развития восстановится. По существу это означает, что траектория нашего движения уже в значительной степени предопределена, и важнейшей задачей научного познания становится проблема понимания перспективы не только с целью ее преобразования, а и с позиций приспособления к предстоящим переменам.

С этой точки зрения мы имеем все основания сосредоточиться на анализе существующих тенденций развития, постараться смоделиро-

вать их динамику и представить некоторую прогностическую картину перспективы в контексте феномена, обозначаемого как устойчивое развитие.

В энергетическом плане, как уже это было сказано выше, следует определить условия развития экономики и общества и возможно представить некоторый временной горизонт, который можно было бы идентифицировать признаками устойчивого развития. В докладе международной комиссии при ООН по окружающей среде и развитию в 1987 г. устойчивое развитие было определено следующим образом: *устойчивое развитие* — это такое развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего времени, но не ставит под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности. В такой формулировке его сложно использовать для численных оценок, и в этой связи, ограничив широту определения, разумно использовать другое определение: необходимым условием достижения состояния устойчивого развития является формирование экономики такого уровня, при котором дальнейшая эволюция цивилизации уже не сдерживается ограничениями ресурсного и экологического характеров.

Сейчас можно достаточно надежно выделить три основных признака состояния экономики и энергетики, которые как доминантные величины определяют развитие материальной базы современного экономического уклада. Значительная часть этих исследований представлена в книге [1].

Как уже отмечалось, современный экономический уклад отличает прямая корреляция

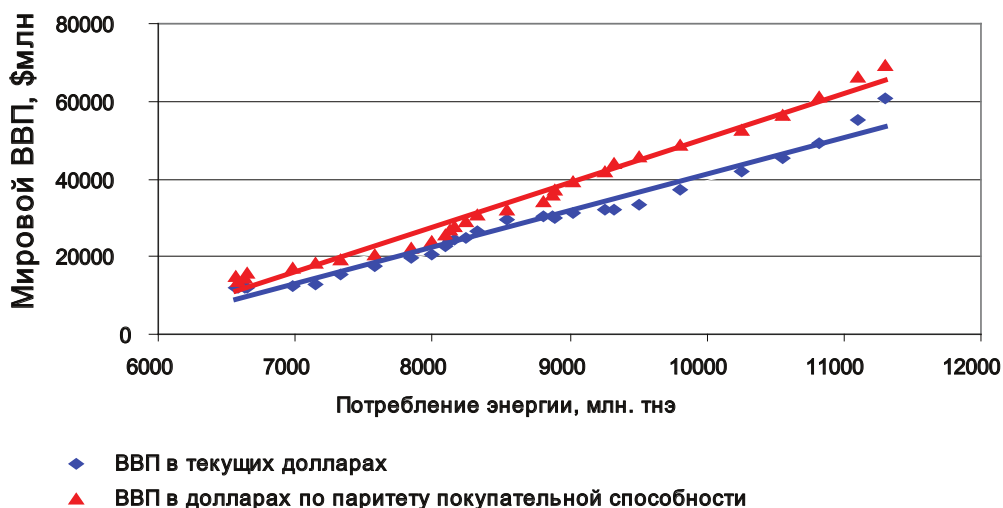
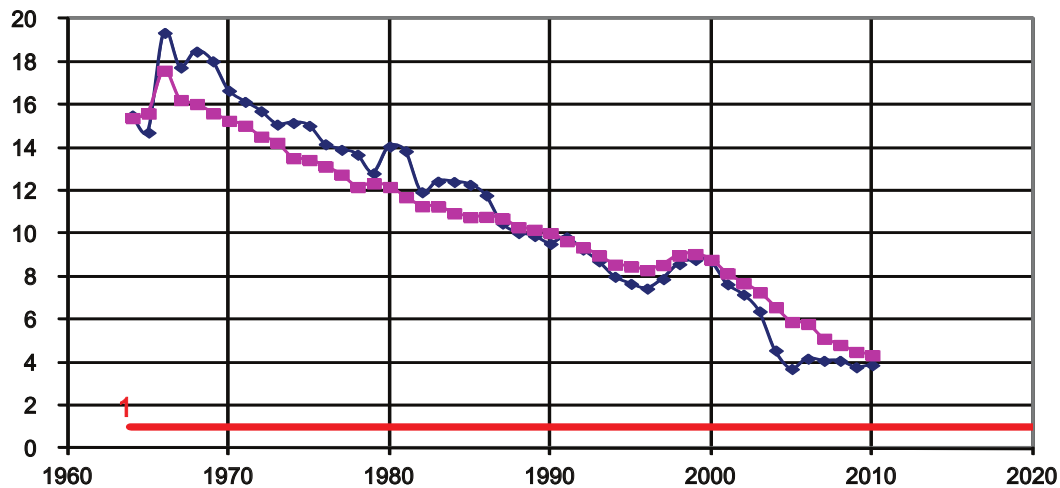


Рис. 1. Зависимость мирового ВВП от потребления первичной энергии



**Рис. 2.** Изменение со временем отношения удельного потребления первичной энергии в развитых странах к развивающимся

между масштабом потребления первичной энергии и мировым валовым продуктом, она надежно подтверждается статистическими данными (рис.1).

Постепенно эффективность использования энергии в мире повышается. Опираясь на статистические данные за предыдущие 30 лет, легко подсчитать, что темп роста эффективности использования первичной энергии приблизительно равен 0,8 % в год. Хотя в разных странах эффективность использования первичной энергии отличается иногда в разы, причина этого не только в том, что одни страны энергозаточительны, а другие очень бережливы. Основная причина такого положения заключается в том, что в мире произошло разделение труда. В результате одни страны ориентировались на производство продукции начального передела, производство которой требует больших энергетических затрат при относительно низкой стоимости продукции. Другие страны, с дефицитом природных ресурсов, ориентировались на выпуск конечной продукции, которая стоит дорого, но ее производство не требует больших энергетических затрат. Таким образом, сравнение по энергоэффективности ВВП разных стран следует выполнять с учетом структуры производства в них товаров разного уровня передела. Страны, которые производят много продукции начального передела, экспортируют эту продукцию, а в месте с ней и энергию, которая была затрачена при ее изготовлении. Это указывает на то, что существует и обмен энергией в товарной форме. Если его учесть при составлении энергетического баланса, то

получается, что ВВП всех стран прямо пропорционален потреблению в них энергии (в форме первичной энергии + энергию в товарной форме). Т.е. рисунок 1 справедлив и для мира в целом, и для отдельной страны с хорошей степенью точности.

Второй важный признак современного состояния: удельное потребление первичной энергии в развитых и развивающихся странах постепенно сближается. Обработка статистических данных за последние полвека показывает, что если в 60-х гг. прошлого века удельное потребление в развитых и развивающихся странах различалось примерно в 20–25 раз, то в 2010 г. это различие сократилось до 5 раз (рис. 2). Процесс глобализации привел к интенсивному росту индустрии в развивающихся странах с соответствующим ростом потребления первичной энергии (уголь, нефть, газ, гидроэнергия, и т.д.).

На этом рисунке по оси ординат отложено отношение удельного потребления первичной энергии в развитых странах к удельному потреблению первичной энергии в развивающихся странах. Приведены две линии, отличающиеся различными методиками обработки статистических данных для расчета удельного потребления. По существу, именно это обстоятельство: интенсивный рост потребления первичной энергии в развивающемся мире с населением более 6 млрд человек — привело в последние годы к большому напряжению на энергетическом рынке. Его следует рассматривать как фундаментальный фактор роста спроса на энергетические ресурсы в ближайшие десятилетия.

### Доля затрат на первичные энергоисточники в мировой экономике



Рис. 3. Доля первичной энергии в мировом ВВП

Третьим важным свойством современной экономики является то обстоятельство, что экономика привыкла нормально развиваться при относительно низких ценах на первичную энергию.

Как показывают статистические данные, если плата за первичную энергию превышает 10 %, то это с большой вероятностью ведет мир к экономическому кризису. Превышение доли затрат на первичную энергию в валовом продукте свыше 10 % приводит к нарушениям в нормальном экономическом развитии и провоцирует кризисные явления. Представленные на рис. 3 статистические данные подтверждают сказанное, в то же время нельзя утверждать, что только энергетические проблемы провоцируют кризис. Вероятно, есть и другие причины, способные привести к сбоям в развитии экономики.

Весь 2011 г. и первую половину 2012 г. мир живет при ценах на первичную энергию около 10 % мирового валового продукта. И как можно наблюдать, мировая экономика находится в состоянии, близком к стагнации. Для того чтобы преодолеть нынешний кризис, на рынок должны прийти большие поставки первичной энергии по низким ценам, однако пока такого источника нет. Определенные надежды связывают с интенсивным развитием новых технологий добычи сланцевого газа, но пока, за исключением США, масштабного развития эта технология в мире не получила. Хотя в современных условиях именно низкая цена на природный

газ (около 3 \$ за миллион британских тепловых единиц) позволяет США еще демонстрировать какой-то экономический рост, в Европе цена природного газа заметно выше — около 10 \$ за миллион btu, и признаки стагнации очевидны.

Пока нет очевидных вариантов того, как именно будет мировая экономика выбираться из существующего положения. Доля расходов на первичную энергию весьма высока, дополнительных масштабных поставок первичных энергетических ресурсов не видно, а финансовые ограничения, предпринимаемые в разных странах и направленные на преодоление задолженностей, ведут к сокращению ВВП этих стран, а следовательно, еще больше усугубляют ситуацию, сокращают экономический рост.

Интересное положение еще состоит и в том, что заинтересованность стран-экспортеров энергоресурсов держать высокие цены становится все более очевидной. И это обстоятельство также препятствует увеличению поставок на мировой рынок. Возможно, в недалекой перспективе решение проблемы будет найдено с помощью масштабного развития технологии добычи сланцевых нефти и газа, но пока для практической реализации этих прогнозов сделано очень мало. В целом можно констатировать, что мировая экономика вошла в циклическую фазу своего развития.

Расчеты изменения мирового валового продукта были сделаны несколько лет назад, и оценки на 2010 г. и 2011 г. пока неплохо со-

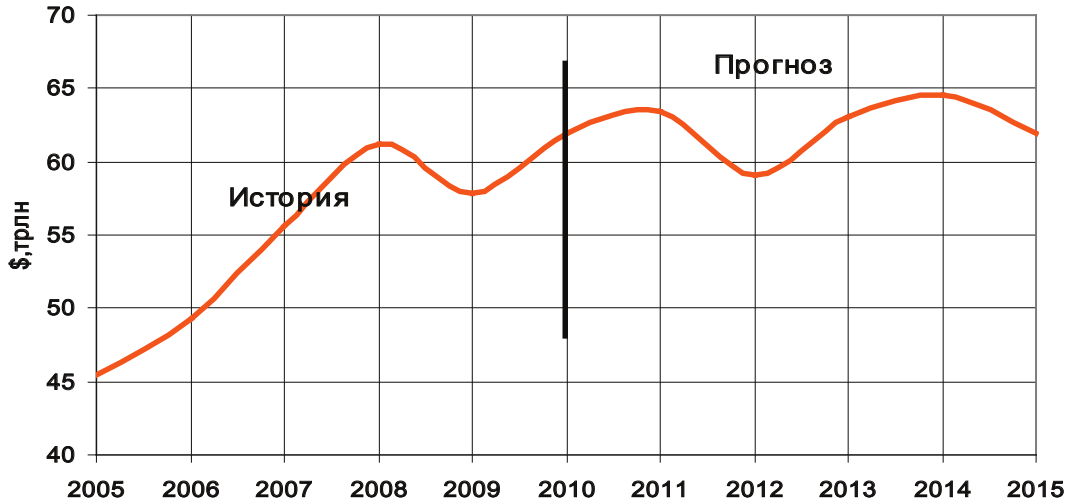


Рис. 4. Прогноз изменения мирового ВВП

гласуются с практикой. Получается так, что высокие цены на первичную энергию не позволяют нормально развиваться экономике, и при достаточно высоких возмущениях она попадает в кризис, который приводит к снижению спроса, а следовательно, и цен на первичную энергию. Более низкие цены позволяют экономике опять начать расти, вслед за этим растут и цены, тормозя рост экономики по мере приближения к 10 % барьеру. Из того, что здесь нарисовано (рис. 4), следует, что

мировая экономика вступила в циклическую фазу поочередного роста и падения с периодом около 4 лет, и с большой вероятностью в 2012 г., как и в 2008 г., нам опять придется переживать острую фазу экономического кризиса со всем букетом неприятностей, ей соответствующих. По всей видимости, ближайшие годы станут определяющими с точки зрения выбора генерального направления развития всей цивилизации на очередную столетнюю перспективу.

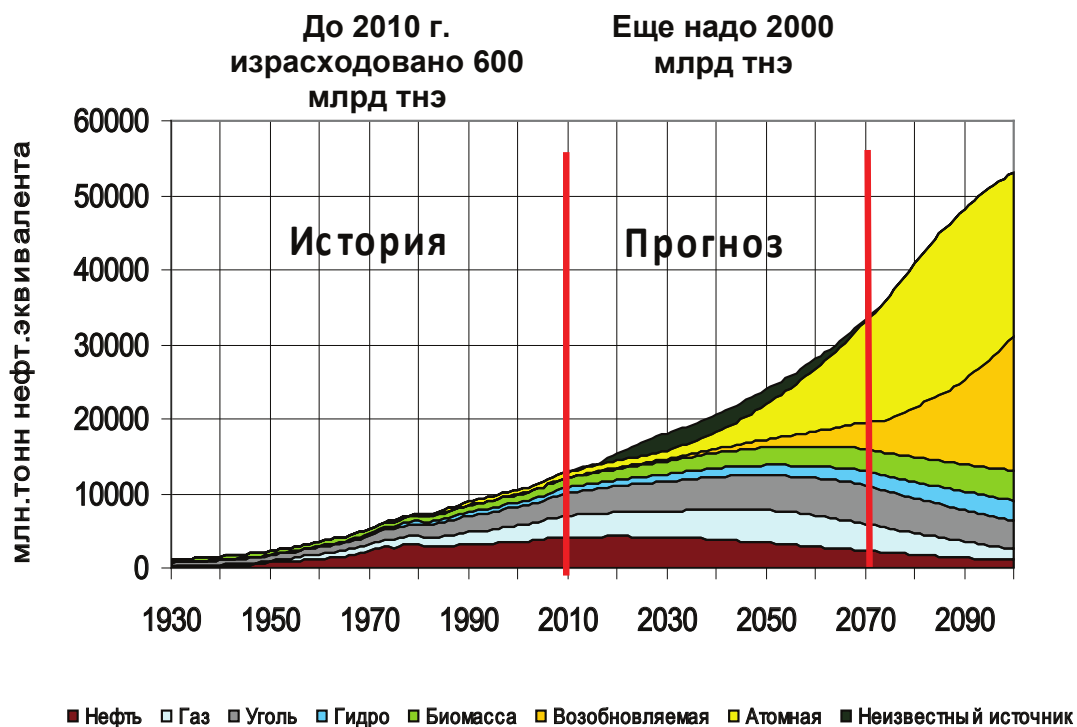


Рис. 5. Прогноз структуры потребления первичной энергии в XXI в

В какой степени сейчас готова экономика к переориентации на возобновляемую энергетику, можно оценить. Европейские страны проявляют к ней большой интерес, но если провести непредвзятые расчеты в предположении, что все энергообеспечение сейчас будет базироваться на этом ресурсе, то получается, что за энергию придется платить как минимум в 2–3 раза больше в сравнении с современным состоянием. Т.е. тогда доля первичной энергии в ВВП составит около 20–30 %. Это совершенно неприемлемо для нынешнего уклада экономики. Чтобы задействовать этот энергетический ресурс, необходимо или его сделать в 2–3 раза дешевле, или нарастить экономику в таком же масштабе.

Но для развития экономики нужна дополнительная энергия. И здесь, кроме масштабной атомной энергетики, трудно что-то предложить. Т.е. интенсивное развитие атомной энергетики в текущем столетии способно

обеспечить экономику цивилизации необходимым объемом энергии, чтобы поднять ее до состояния, когда станет приемлемой возобновляемая энергетика. На рис. 5 представлен один из вариантов прогноза изменения со временем структуры первичной энергии в течение XXI в., когда атомная энергетика взяла на себя основное бремя энергообеспечения роста экономики.

Этот прогноз сбалансирован в тех консервативных приближениях, о которых было сказано выше, а именно: рост экономики пропорционален росту энергопотребления, эффективность использования энергии растет с темпом 0,8 % в год, численность населения Земли к 2070 г. составит около 12 млрд человек.

Конечно, такой прогноз следует рассматривать весьма критично, но есть и небольшая польза от этого рассмотрения, которая заключается в том, что все же оптимистическую картинку перспективы все же нарисовать можно.

#### Литература

1. Велихов Е.П., Гагаринский А.Ю., Субботин С.А., Цибульский В.Ф. Энергетика в экономике 21 века. — ИздАТ. — 2010 г. — Москва.
2. Пономарев-Степной Н.Н., Цибульский В.Ф. Проблемы мировой энергетики начала века. — ИздАТ. — 2008 г. — Москва.



## ЯДЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ В МИРОВОМ И РОССИЙСКОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ

Гагаринский А.Ю.<sup>1</sup>

Обсуждаются сценарии мирового энергетического развития до середины века и роль в них ядерных энергетических источников. В этом контексте кратко излагается стратегия технологического развития ядерной энергетики России с представлением взгляда на «дорожную карту» освоения этих технологий.

**Ключевые слова:** сценарии ядерно-энергетического развития, ядерно-энергетические источники, российская ядерная энергетика.

This paper discusses world energy development scenarios up to mid-century and the respective role to be played by nuclear energy sources. In this context, the strategy of Russia's nuclear energy development is briefly described, including the vision of relevant technologies' development presented as a roadmap.

**Keywords:** nuclear energy development scenarios, nuclear energy sources, Russian nuclear energy.

Современный уровень востребованности энергетических ресурсов главным образом сосредоточен на потреблении органического топлива, запасенного за миллионы лет «удачно» расположенной в Солнечной системе планеты, возобновляемых ресурсов (ветер, гидро-, геотермальные источники, энергия океана и т.д.). В скромных масштабах включены в этот цикл и процессы деления ядер.

В течение огромного периода своей истории человечество развивалось без расходования исчерпаемых ресурсов, пользуясь только возобновляемыми процессами, питаемыми солнечной энергией. Сегодня огромный и прогнозируемый на многие годы поток энергии, используемой человечеством, определяется органическим топливом: нефтью, газом, углем.

За последние тридцать лет XX в. мировое потребление энергетических ресурсов выросло почти в два раза и к 2012 г. составляет 13 млрд т нефтяного эквивалента. По данным Мирового энергетического агентства Организации экономического сотрудничества и развития (МЭА ОЭСР), органическое топливо составляет по-

рядка 90 % в структуре мирового потребления первичной энергии, причем 80 % из них приходится на ископаемую органику – нефть, газ, уголь, 10 % – на биотопливо (растения, отходы животноводства и др.), используемое в развивающемся мире (заметной части которого пока даже не доступно электричество) в качестве энергетического источника для энергообеспечения – обогрева и приготовления пищи. На все остальное – атомную энергию, гидростанции, другие возобновляемые источники – приходится те же 10 %.

Сегодня ископаемое углеводородное топливо – главный источник энергии и будет таковым еще долго. При этом необходимо подчеркнуть, что человечество очень надежно «сидит на нефтяной игле» – нефть на 95 % покрывает все транспортные потребности в мире.

Угрозу цивилизации со стороны сжигания ископаемой органики видят не столько в принципиальной исчерпаемости этого ресурса, сколько в его влиянии на угрожающие изменения климата планеты. Глобальное потепление в связи с большим антропогенным воздействи-

<sup>1</sup>



Гагаринский Андрей Юрьевич, доктор физико-математических наук, советник директора Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», e-mail: agagarin@kia.ru.

ем на окружающую среду современной экономики — один из наиболее веских аргументов в пользу развития как возобновляемой, так и ядерной энергетики. Несмотря на то, что споры по факту влияния антропогенных выбросов, в первую очередь диоксида углерода, на процесс глобального потепления продолжают, большинство исследователей склоняются к мнению, что именно антропогенное воздействие является доминирующим фактором климатических изменений.

Именно факт быстрого нарастания концентрации диоксида углерода в атмосфере, хорошо коррелирующего с ростом энергопотребления, позволяет делать вывод о преобладающем влиянии антропогенного воздействия на климат, в первую очередь, на рост глобальной температуры, который составил за предыдущее столетие около  $0,7^{\circ}\text{C}$ .

На встрече G8 в июле 2009 г. было заявлено, что изменение климата представляет собой реальную опасность, и признано, что глобальная средняя температура не должна превысить доиндустриальный уровень более чем на  $2^{\circ}\text{C}$ . Такое ограничение роста температуры потребует сокращения эмиссий  $\text{CO}_2$  минимум на 50 % к 2050 г. Конечно, в принципе существуют еще технологии улавливания (секвестрации) углерода. Но, как считают эксперты, им еще понадобится не один десяток лет до коммерческой жизнеспособности.

Надежды на решение энергетических проблем человечества в условиях противодействия климатическим изменениям за счет возобновляемых источников энергии широко распространены в современном обществе и популярны среди политиков (но не среди специалистов-энергетиков).

Возобновляемые источники энергии (без гидроэнергетики и биомассы) в 2010 г. обеспечивали около 1,5 % потребностей человечества в первичной энергии. Однако все ближние прогнозы указывают на рост доли возобновляемых видов энергии в общей выработке электричества, особенно стремительный в Западной Европе, где эти источники имеют большую государственную поддержку, хотя их применение не может гарантировать ни стабильной генерации, ни экономически оправданных тарифов.

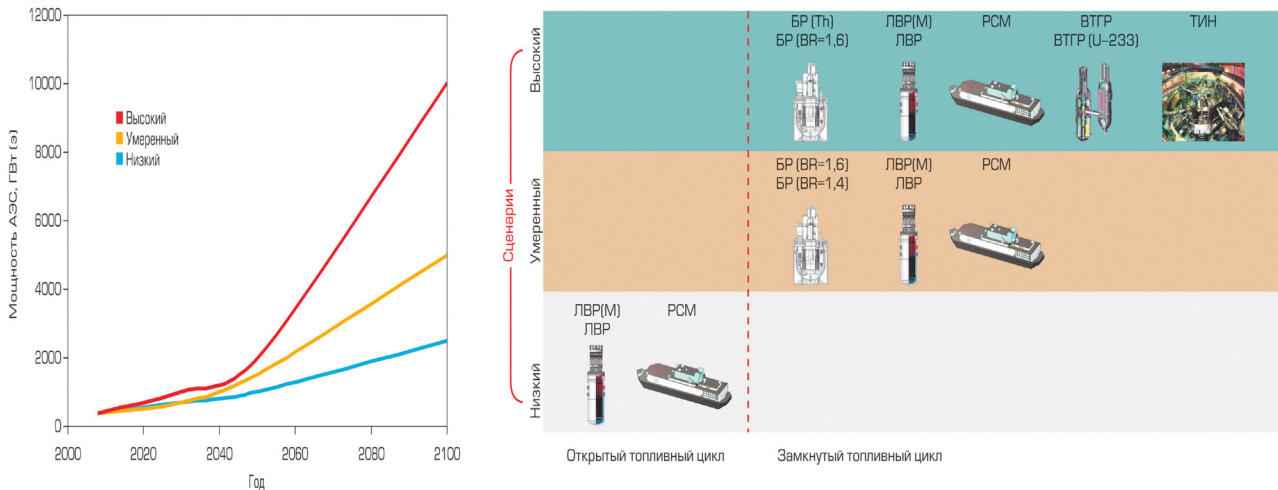
Популярна идея добиться подавляющего преимущества возобновляемой энергетики над всеми остальными источниками энергии уже к середине века. Здесь самая радикальная

точка зрения — известный мировым экспертам сценарий «зеленой революции», предлагаемый «Гринпис» [1]. В этом сценарии использование атомной энергии прекращается уже к 2030 г. Доля возобновляемых источников доходит к середине века до 55 % всей первичной энергии (и до 70 % — в электроэнергетике). Заметим, что даже в таком сценарии нефть остается в энергетическом наборе, хотя составляет лишь 20 % в первичной энергии.

Мировое экспертное сообщество обоснованно отказывается признать подобный сценарий реалистичным из-за невыполнимости его ключевого положения — немедленной стагнации энергопотребления при сохранении экономического роста. К тому же авторы сценария исходят из маловероятного снижения к 2050 г. стоимости возобновляемой энергии до уровня 20-50 % от современного (замедление технологического прогресса по мере насыщения рынка неизбежно) и даже не рассматривают необходимые огромные затраты на аккумуляцию энергии и перестройку электроэнергетических систем.

Последние 50 лет в мире существуют статистические данные о росте мировой экономики и стоимости энергии, которая этот рост обеспечивает. Как показано в [2], если вместо «среднестатистических» 5 % цена энергии возрастает до 10 % от мирового валового продукта, это совпадает по времени с мировым кризисом. Так было и в 1980-е гг., и в 2009 г.

Дорогая энергия просто недоступна современной экономике. Этот эмпирический факт, подтвержденный полувековым опытом, позволяет сделать «оценку сверху» приемлемости для человечества известных ему источников энергии. Темпы роста мировой экономики довольно устойчивы. Это значит, что доступные сегодня и в перспективе затраты на необходимое людям количество энергии можно более или менее надежно оценить. Тогда появляется база для оценки возможностей различных энергетических технологий, так как цены единицы энергии от разных источников известны энергетикам неплохо. В мировой ядерной энергетике приемлемая в настоящее время удельная стоимость АЭС — 4000 дол./кВт, но уже к 2030 г. она вырастет до 8000 дол./кВт. В экономических условиях России приемлемая цена атомных мощностей к 2030 г. составит 4000 дол./кВт, что позволяет рассматривать довольно широкий круг технических



**Рис. 1.** Структура мировой ядерной энергетики в зависимости от сценариев ее развития

Обозначения:

- ЛВР – легководные реакторы,
- ЛВР(М) – модернизированные легководные реакторы,
- РСМ – реакторы средней мощности,
- БР – реакторы на быстрых нейтронах,
- ВТГР – высокотемпературные реакторы,
- ТИН – термоядерные источники нейтронов

предложений в качестве перспективных технологий.

В то же время, чтобы справиться с ценой возобновляемой энергетики (даже при очень оптимистической оценке ее стоимости), человечеству пришлось бы утроить либо валовой продукт, либо долю в нем энергетических затрат. Так что ожидать «полной победы» возобновляемых источников, по крайней мере, в этом веке, не приходится.

Разумеется, в этих оценках учитываются перспективы повышения энергетической эффективности экономики. В настоящее время удастся повышать эффективность использования энергии с темпом 0,8 % в год. Даже если этот показатель вырастет, как надеются энергетики, до 2-2,5 %, все равно количество затрат энергии на единицу мирового валового продукта (МВП) не упадет более, чем на 40 % к 2035 г. [3].

Согласно достаточно консенсусным реалистическим сценариям мирового энергетического развития [1-4], ответственные за эмиссию парниковых газов органические источники энергии (включая биомассу) до середины века останутся преобладающими в энергетическом наборе человечества: ископаемая органика – 60 % (при стабилизации роли нефти и значительном росте потребления угля), биомасса –

еще 10-15 %, остальные возобновляемые источники – чуть больше биомассы.

Перспективы ядерной энергетики в наибольшей степени зависят от политических решений. Тем не менее, ядерный источник может рассчитывать к середине века на 10-15 % в первичной энергии, а это уже трехкратный рост от сегодняшнего состояния.

Сегодня ядерная энергетика – это апробированная, не дающая эмиссий технология производства энергии, обеспечивающая в высшей степени стабильное энергоснабжение по сравнению с возобновляемыми источниками, доказавшая свою работоспособность и уже сейчас развернутая в широком масштабе. Оценки возможного масштаба развития ядерной энергетики весьма противоречивы и сильно зависят от экспертных групп, которые ими занимаются. Исследования, представленные в Международном агентстве по атомной энергии (МАГАТЭ) экспертами из Курчатовского института в рамках Международного проекта по инновационным реакторам и топливным циклам (ИНПРО) (рис. 1), дают оценки возможных сценариев ядерно-энергетического развития мира [5].

НИЗКИЙ сценарий предполагает, что доля атомной энергетики в общем объеме энергопотребления сохранится примерно на современ-

ном уровне. Сферой использования атомной энергии останется электроэнергетика.

УМЕРЕННЫЙ сценарий предполагает, что масштаб роста ядерной энергетики будет ориентироваться на замещение различных видов органического топлива в электроэнергетике, и, возможно, наибольшей мотивацией такого решения станут экологические преимущества.

ВЫСОКИЙ вариант ориентируется на крупномасштабное развитие ядерной энергетики с высокими темпами во второй половине текущего столетия. При этом, кроме сферы электроэнергетики, атомная энергия начнет использоваться и для неэлектрических целей (производство пресной воды, искусственное моторное топливо, технологические процессы, требующие высокого температурного потенциала).

Следует отметить, что данный сценарный вариант развития ядерной энергетики в текущем столетии следует оценивать как верхнюю границу ее возможностей. В то же время такой высокий масштаб развития ядерной энергетики не следует считать запредельным с точки зрения удовлетворения энергетических потребностей, которые могут сложиться в мире к концу века. Нарастание проблем, связанных с использованием органического топлива, только повышает требования к развитию альтернативных энергоисточников.

Следует отметить, что в таком «максимальном», но еще теоретически возможном сценарии развития атомная энергия давала бы к концу века порядка 25 % первичной энергии для мировой экономики.

Принципиально то, что существует четкая корреляция между масштабами развития и структурным наполнением ядерной энергетики. Для реализации достаточно высоких сценариев ядерно-энергетического развития интенсивные ядерные программы должны начинаться сейчас, а перестройка структуры на замкнутый топливный цикл – в ближайшие десятилетия.

Россия примерно так и поступает, развернув сегодня второе в мире (после Китая) ядерное строительство. При этом события на АЭС «Фукусима» не привели к какому-либо изменению российских генерирующих мощностей и не оказали заметного влияния на планы нового ядерного строительства в ближайшей перспективе (до 2020 г.), в основном базирующиеся на модификациях водо-водяного энер-

гетического реактора (ВВЭР) мощностью 1000-1300 МВт(э).

Основу российской, как и мировой, ядерной энергетики составляют корпусные водоохлаждаемые реакторы на тепловых нейтронах. В России, где весомую долю ядерного электропроизводства пока обеспечивают графитовые реакторы РБМК<sup>2</sup>, они дорабатывают свой ресурс, а перспектива связывается с прогрессом направления корпусных ВВЭР. При этом, если базовая линия – разработка блоков большой мощности, то уже на видимом горизонте – дополнение ее серийным промышленным производством реакторов средней и малой мощности для регионального и локального энергообеспечения.

Создание системы ядерной энергетики средних мощностей в топливно-энергетическом комплексе России опирается на наличие достаточного потенциала необходимых реакторных технологий и машиностроения.

Блочно-модульное исполнение атомных станций большой мощности позволяет формировать при серийном производстве энергоблоки средней мощности с приемлемыми для этого сектора энергетики экономическими показателями.

Россия обладает уникальным опытом промышленного серийного производства ядерных энергетических установок для атомных подводных лодок, надводных кораблей, ледоколов и судов, общая наработка которых превышает 6000 реакторо-лет, и мощной научной, проектной и производственной инфраструктурой атомного судостроения, которая может быть вовлечена в общегражданское ядерное энергетическое строительство.

На базе технологий атомного судостроения предложены ядерные энергетические установки и плавучие и наземные атомные электростанции малой – от 6 до 100 МВт(э) и средней мощности – до 600 МВт(э). Это открывает путь к серийному промышленному производству реакторных установок малой и средней мощности с чрезвычайно высоким уровнем безопасности и надежности, в том числе для снабжения стран, которые пожелают их приобрести.

Второе стратегическое направление модернизации ядерной энергетики – реакторы, способные снабжать всю ядерно-энергетическую систему новым топливом, превращающим

<sup>2</sup> Реактор большой мощности канальный

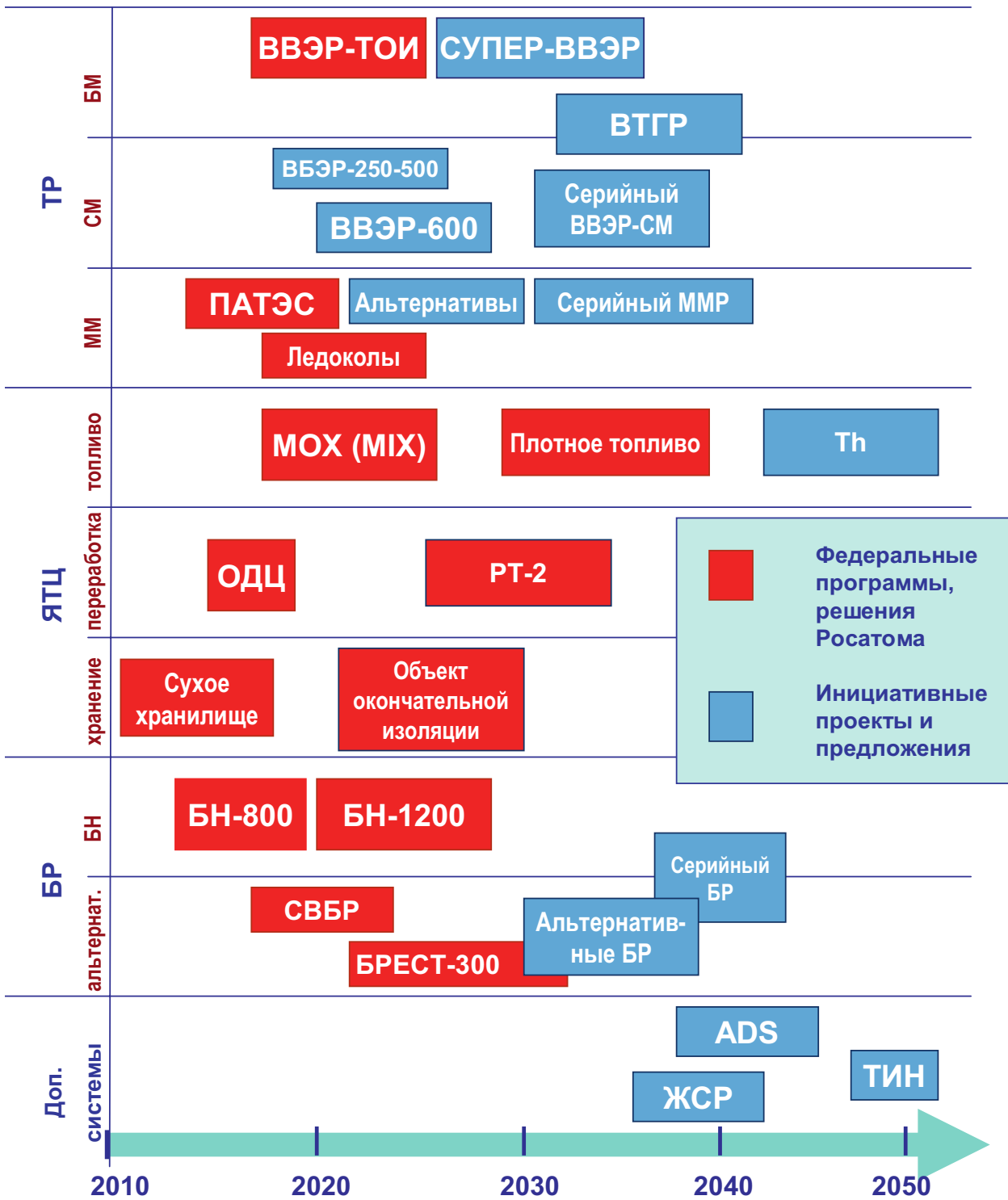


Рис. 2. Дорожная карта освоения ядерных технологий в России

- ПАТЭС – плавучая атомная теплоэлектростанция;
- ММР – реактор малой мощности;
- МОХ (МІХ) – смешанное уран-плутониевое топливо;
- Th – включение тория в ядерный топливный цикл;
- ОДЦ – опытно-демонстрационный центр;
- СВБР – свинцово-висмутовый быстрый реактор;
- ADS – ускорительно управляемые системы (accelerator-driven systems);
- ЖСР – жидкосолевой реактор;
- ТИН – термоядерный источник нейтронов

ядерную энергетику в квазивозобновляемую, было задумано практически одновременно с рождением мирного использования ядерной энергии. За 60 лет мировым реакторным сообществом (начало было положено в США, но лидерство по результату, безусловно, принадлежит России и Франции) был разработан и реализован тип реактора, обеспечивающий эту линию развития – охлаждаемые натрием реакторы на быстрых нейтронах.

Роль России в развитии этого направления весьма впечатляюща: только у нас имеется двадцатилетний опыт эксплуатации реактора БН-350 с опреснительной установкой, более 30 лет успешно эксплуатируется реактор БН-600. Это направление поддерживается практически всем «реакторным миром»: в Индии, Китае, Японии, в той же Франции, после многих лет отторжения пробивает себе дорогу в США.

Научный задел по высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам, предназначенным для производства высокопотенциального тепла (950 °С) и электроэнергии, в стране составляет около 50 лет НИОКР<sup>3</sup>, доведенных до технических проектов для энерготехнологического применения, а также действующего прототипа

космической двигательной установки с уникальной температурой на выходе 3100 К.

Надо сказать, что развитие этого направления в мире и России подзадержалось. В период 1960-1980 гг. в США и Европе действовали пять высокотемпературных реакторов. Остановка этих реакторов в конце 1980-х гг. существенно затормозила развитие направления. В настоящее время экспериментальные установки небольшой мощности такого типа действуют или строятся в Японии и Китае. Тем не менее, выход мирного атома за пределы электроэнергетики, в область широкого набора энергетических технологий, связывается именно с этим направлением.

Так в общих чертах выглядит стратегическая линия технологического реакторного развития ядерной энергетики, недавно вновь проанализированная курчатовскими экспертами [6].

Предложения Курчатовского института по «дорожной карте» освоения ядерных технологий в России представлены на рис. 2. Они учитывают как федеральные программы и решения Росатома, так и инициативные проекты разной степени обоснованности, существующие в российском ядерном сообществе.

### Литература

1. «Мировая энергетика – 2050» («Белая книга»). Международный центр устойчивого развития под эгидой ЮНЕСКО. – Институт энергетической стратегии. – 2011.
2. Велихов Е.П., Гагаринский А.Ю., Субботин С.А., Цибульский В.Ф. «Энергетика в экономике XXI века». – М: – ИздАт. – 2010.
3. World Energy Outlook 2011, OECD/IEA.
4. «ТЭК и экономика России: вчера, сегодня, завтра» (под редакцией Ю.К. Шафраника), Институт энергетической стратегии, Издательский центр «Энергия». – М. – 2011.
5. Nuclear Energy Development in the 21<sup>st</sup> Century: Global Scenarios and Regional Trends, IAEA Nuclear Energy Series, NP-T-1.8. – 2010.
6. О стратегии ядерной энергетики России до 2050 года. – М. – НИЦ «Курчатовский институт», УДК 621.039. – 2012.

<sup>3</sup> Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы

## ЭНЕРГЕТИКА И ГЕОПОЛИТИКА

Костюк В.В., Макаров А.А., Митрова Т.А.<sup>1</sup>

Одноименная коллективная монография под редакцией В.В. Костюка и А.А. Макарова, подготовленная при поддержке Российского гуманитарного научного фонда, выпущена издательством «Наука» на русском и французском языках. В статье излагается и кратко аргументируется базовая концепция книги.

**Ключевые слова:** геополитика, энергетика, технологический прогресс, нетрадиционные энергоресурсы, энергосбережение.

Collective monograph of the same name, edited by Kostyuk V.V. and Makarov A. A., prepared with the support of the Russian Foundation for the Humanities, released by «Science» in Russian and French. The article describes and briefly argued the basic concept of the book.

**Keywords:** geopolitics, energy, technological advances, unconventional energy sources, energy conservation.

### Индустриальная энергетика как важный фактор геополитики

Социально-экономические и геополитические вызовы ускоряющейся глобализации настоятельно требуют видения перспектив, возможностей и стратегических приоритетов развития *антропогенной энергетики* — охватывающей всю планету совокупности средств преобразования энергии в формы, полезные для человеческой жизнедеятельности. На протяжении тысячелетий антропогенная энергетика практически не влияла на политику, поскольку не испытывала дефицита энергоресурсов. Глав-

ной задачей внешней политики держав был передел уже поделенных и захват «свободных» территорий, а владение ими автоматически обеспечивало природной энергией население, которое могли прокормить эти земли. Конечно, шла борьба за обладание энергетическими технологиями: от греческого огня до бездымного пороха, от косых парусов (плавание против ветра) до пароходов — но она не выделялась из вечного стремления заимствовать правдами и неправдами любые знания и технические достижения других.

Энергетика стала геополитическим фактором только с началом XX в., поскольку бурный

<sup>1</sup>



Костюк Валерий Викторович, доктор технических наук, академик, главный ученый секретарь Президиума РАН, профессор, e-mail: kostyuk@pran.ru.



Макаров Алексей Александрович, доктор экономических наук, академик, директор Института энергетических исследований РАН, e-mail: makarov\_ire@zmail.ru.



Митрова Татьяна Алексеевна, кандидат экономических наук, заведующая отделом Института энергетических исследований РАН, e-mail: mitrovat@rambler.ru.

рост потребностей индустриального общества в размерах и особенно в качестве энергии выделил эксклюзивные (по территориям и областям применения) энергоресурсы: сначала определенные сорта угля (особенно коксующиеся), а затем нефть, которая при всех достоинствах характеризуется большой неравномерностью размещения по территории (и акватории) Земли. Эта эксклюзивность практически сразу породила коммерческих монополистов в снабжении потребителей нефтепродуктами, а затем и государства, контролирующие мировые рынки нефти (на рубеже XIX и XX вв. – США и Россия). Так нефть надолго стала одним из важных факторов геополитики.

Возможно, это совпадение, но тогда же врожденное стремление людей, осмысливая историю, предвидеть будущее и создавать руководство для его устройства нужным (для каждого – своим) образом привело к возникновению образа мысли и идей, объединяемых понятием *геополитика*. Геополитика предполагает, что внешняя политика государств предопределяется в основном географическими факторами (конфигурация территории и положение конкретной страны в географическом регионе, выход к морю, доступ к судоходным рекам, морским проливам, территориям, пригодным для различных видов хозяйственной деятельности, природными ресурсами, климатом и другими).

Ее основоположники [1-5] заложили основы концепции глобализации как естественного и достаточно универсального объяснения движущих сил истории. И что особенно важно, они разработали своего рода «эффективную геополитическую формулу», с помощью которой весьма удачно предсказывали будущий состав, расклад сил и мотивации основных держав в наступающем XX в. и, главное, конечные результаты их драматических взаимодействий. В итоге геополитика, «...не будучи принятой в содружестве классических наук, оказалась чрезвычайно эффективна на практике, а ее значение в некоторых аспектах превосходит многие конвенциональные дисциплины» [6].

Согласно классической геополитической модели, развитой в конце XIX – начале XX вв. англичанином Хэлфордом Джоном Макинделом и американцем адмиралом Мэханом, существует два фундаментальных геополитических образования, тяготеющих к глобальному формату: силы Суши (теллуократия, евразийство) и силы Моря (талассократия, атлантизм).

Основой полюса Суши является так называемый *heartland*, «сердцевинная земля», которая лежит в центральной части Евразии. Противоположное «морское могущество» находится либо в береговом секторе (*rimland* – зона от европейского пространства через Ближний Восток к Дальнему Востоку и Тихоокеанскому побережью), либо, на более поздних этапах, в океаническом секторе. Фундаментальный дуализм выражается в противопоставлении теллуократии и талассократии: между этими двумя геополитическими началами разворачивается геополитическое противостояние, связанное с цивилизационными, технологическими, стратегическими, культурными сторонами жизни.

К середине XX в. идеи зачинателей геополитики были развиты и четко поляризованы по интересам ведущих держав. Новая плеяда рассматривала геополитику как важнейший инструмент конкретной международной политики, как аналитический метод и систему формул, позволяющих выработать наиболее эффективную стратегию [12-19]. Обсуждаемые стратегии сохранили от основоположников дуализм («Суша» против «Моря» [8]), но стали антагонистичны в определении доминирующих в мире полюсов: от изначально признаваемой Евразии [9-11] до береговых зон (*rimland*) и «морской силы» атлантистов.

В 1990 г. история, казалось бы, решила вековой спор геополитиков победой атлантизма (талассократии) и тяжелым поражением Евразии (теллуократии). Неожиданный и по историческим меркам мгновенный геополитический коллапс даже родил концепцию «конца истории». Но в ответ почти сразу же появились новые идеи дальнейшего развития мира [20-21], и проблематика геополитики ныне не только сохраняет остроту и актуальность, но и уходит от упрощенного дуализма к более сложному представлению политических процессов в цивилизации.

О необходимости же более сложных, «многокрасочных» представлений о движущих силах международной политики говорит, в частности, следующее. Странно, но теоретики геополитики, обсуждая в разных ракурсах политическое значение положения государств на континентах, рельефа их территории и даже почвы [22], в отличие от международной практики, фактически обошли своим вниманием энергетический фактор. Основоположники, конечно, могли не заметить только нарождав-



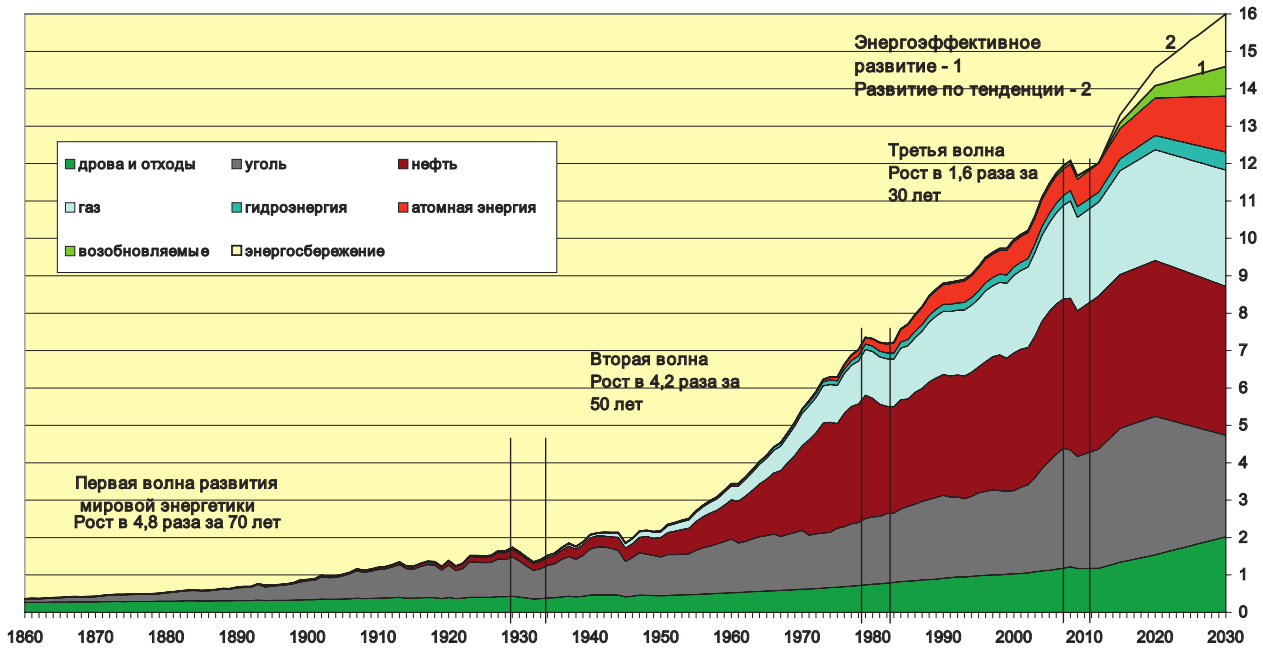


Рис. 1. Динамика мирового производства энергоресурсов

шуются в их время эксклюзивность отдельных энергоресурсов как причину политических раздоров. Но в середине и тем более в конце XX в. игнорировать роль энергетики в геополитике можно было только на запредельных уровнях абстракции. Анализ текущих процессов однозначно показывает, что внешняя политика главных мировых игроков тесно связана с проблемой энергетической безопасности, в ней присутствует постоянная составляющая – соперничество за контроль над территориями, располагающими природными ресурсами, транзитной инфраструктурой и пр. Растущее

значение энергоресурсов в мировой политике провоцирует как скрытое, так и открытое военно-политическое противоборство между ведущими державами за контроль над ними. Однако только в последнее время большому влиянию энергетики не просто на международные отношения, но и на геополитику, стало уделяться достойное внимание [23-25].

По мнению современных исследователей, «тематика природных ресурсов, географического положения крупнейших месторождений с точки зрения их отдаленности от рынков сбыта, а также возможности транспортировки этих

Таблица 1. Лидеры мирового энергопотребления

Место по энергопотреблению	1980 г.		1995 г.		2009 г.	
	страна	доля, %	страна	доля, %	страна	доля, %
1	США	25,1	США	22,9	КНР	18,5
2	СССР	15,4	КНР	11,5	США	18,3
3	КНР	8,3	Россия	6,8	Индия	5,5
4	ФРГ	5,0	Япония	5,3	Россия	5,3
5	Япония	4,8	Индия	4,2	Япония	3,8
6	Индия	2,9	ФРГ	3,7	Германия	2,6
7	Британия	2,8	Канада	2,6	Бразилия	2,0
<b>Итого</b>		64,3		57,0		56,0

Источник: расчеты ИНЭИ РАН по данным IEA Energy Balances 2010

**Таблица 2.** Обеспеченность ведущих потребителей энергии собственной добычей нефти и газа и отношение их запасов к добыче (R/P) в 2010 г.

Страна	нефть		газ	
	Обеспеченность	R/P, лет	Обеспеченность	R/P, лет
США	39 %	11	89 %	13
Китай	45 %	10	89 %	29
ЕС	14 %	9	36 %	14
Россия	202 %	26	142 %	63
Индия	25 %	30	82 %	29
Япония	0 %	0	0 %	0
Бразилия	82 %	18	54 %	29

Источник: расчеты ИНЭИ РАН по данным BP Statistical Review of World Energy 2011

ресурсов, маршрутов доставки, рынков сбыта, вписанная в конкретные пространства, где живут народы, пролегают конкретные политические, этнические, религиозные, национальные культурные, цивилизационные границы (как и все, что связано с пространством, землей и почвой), должно быть важнейшим качественным параметром, имеющим отношение к человеческому обществу и логике пространственного развития человеческой истории» [7]. Осмысление сложившейся и ожидаемой в обозримом будущем роли энергетики в геополитике еще не дозрело до построения стройной теории, но уже позволяет выдвинуть *базовую концепцию*, суть которой кратко состоит в следующем.

На протяжении тысячелетий энергетика не играла существенной роли в международной политике. Но положение радикально изменилось в XX в. при небывалом росте мощности и усложнении структуры антропогенной энергетики по мере использования все более качественных энергоресурсов.

Анализ особенностей развития энергетики и потока политических и экономических кризисов в это бурное столетие позволил установить пять конкретных особенностей развития антропогенной энергетики (факторов), которые вывели ее в состав важных объектов геополитики. Эти особенности объединяет понятие *эксклюзивности* (ограниченной доступности) *энергетических ресурсов, инфраструктуры и технологий*, порождающей высокие риски для экономической жизнеспособности и государственной безопасности многих стран, что делает энергетику важным мотивом геополитики. Рассмотрим кратко их состав и проявления.

**Первым** фактором является достаточно *быстрый и очень неравномерный* по странам и регионам мира рост спроса на энергию. Первые две волны наиболее бурного развития мировой энергетики (рис. 1) обеспечивали главным образом индустриальные страны, но уже в конце второй волны (1980 г.) в семерку наиболее крупных потребителей (почти две трети общего энергопотребления) входили Китай и Индия (табл. 1). С переходом к постиндустриальному этапу и распадом СССР рост мировой энергетики кратно замедлился, семерка лидеров уменьшила долю в мировом энергопотреблении до 57 % и изменилась по очередности в пользу развивающихся стран. Еще большие изменения состав и доля лидеров претерпели в ходе последнего глобального кризиса: Китай опередил США, а Индия – Россию, в семерку вошла Бразилия, а ее общая доля в мировой энергетике еще несколько уменьшилась – (табл. 1).

**Вторым** фактором воздействия энергетики на политику служит *большая неравномерность размещения по миру геологических запасов наиболее качественных энергоресурсов*: нефти и газа. В сочетании с первой особенностью это рано или поздно порождает недостаток собственных ресурсов в наиболее развитых странах (табл. 2), формируя озабоченность этих ведущих держав своей энергетической независимостью и соответствующую внешнюю политику.

**Третья** особенность энергетики состоит в том, что высокое качество (концентрированность и управляемость) новых энергоресурсов породило *монопольное их использование в ведущих секторах экономики и для нужд обороны*. В последние 35 лет гражданский и военный

транспорт на 93–94 % обеспечивался нефтепродуктами (при постепенном вытеснении из оставшейся части угля газом и биотопливом), а транспорт и химическая промышленность потребляли 60–65 % всей нефти в 1990-е гг. и 82 % в 2008 г. Это сделало зависимость от внешних поставок нефти и отчасти газа объектом государственной безопасности, усилив соответствующие политические мотивации ведущих держав.

**Четвертый** фактор эксклюзивности связан с тем, что растущая неравномерность обеспечения стран собственными энергоресурсами должного качества вызвала небывалый *рост их межрегиональных потоков и развитие соответствующей энерго-транспортной инфраструктуры*, а вместе с этим — стремление государств к контролю за ее ключевыми элементами в интересах своей безопасности.

Совокупность названных факторов и быстрый рост международной торговли энергоресурсами при определенных возможностях мировых финансовых центров управлять стихией цен на нефть и газ — все это сделало энергетику одним из мощных рычагов воздействия на экономику (и, следовательно, политику) государств. В частности, именно этот механизм был использован (наряду с другими) для развала СССР.

**Пятая** особенность обусловлена тем, что в XX в. энергетика стала одной из самых технологичных сфер человеческой деятельности. Электричество преобразовало все стороны жизни людей и сделало возможными электронную связь и информационные технологии, нефтетопливо и затем ядерная энергия революционизировали военное дело и т.д. Новые энергетические технологии приобретают эксклюзивность, поскольку многократно расширяют ресурсную базу энергетики и повышают эффективность всех стадий ее преобразования. Поэтому «гонка технологий» в энергетике и их межстрановые трансферты сделались целями и средствами внешней политики государств, а распространение ядерного оружия (одного из «плодов» антропогенной энергетики) с середины XX в. стало важнейшей геополитической проблемой.

Многоаспектный анализ становления на рубеже XIX и XX вв. и последующего усиления политического значения энергетики позволил обобщить разные аспекты и понять механизмы ее использования как инструмента геополитики

и неменьшего обратного влияния политических интересов на развитие энергетики. Неординарные объяснения обусловленных энергетикой прежних и прогнозы возможных новых политических рисков в разных регионах планеты помогают выявить «горячие проблемы» энергетики, способные породить политические напряженности в текущем десятилетии и определить новые вызовы, возникшие при глобализации экономики и энергетики и возможные ответы на них мирового сообщества. Эти проблемы трактуются не только традиционно с позиций энергетической безопасности государств, но и в ракурсе возможности обеспечения глобальной энергетической безопасности, хотя процесс поиска сбалансированных политических решений еще оставляет желать лучшего.

В частности, подробный анализ энергетических политик и взаимоотношений Европейского Союза и Российской Федерации демонстрирует коллизии между этими крупными государственными образованиями, которые природой (географией и геологией) «обречены» на сотрудничество в области энергетики, но их отношения еще омрачаются подозрениями и напряженностями в политике.

#### **Технологический прогресс уменьшит роль энергетики в геополитике**

В ближайшее десятилетие роль энергетики в геополитике не уменьшится, а может даже возрасти. Но уже достаточно подготовленные ресурсные и технологические прорывы способны в более долгосрочной перспективе изменить ситуацию. Они позволяют существенно увеличить экономически приемлемые запасы углеводородов, диапазоны их взаимозаменяемости (например, замещение нефти газом на транспорте) и, главное, пределы конкурентоспособности с ними остальных (в том числе возобновляемых) энергоресурсов — в основном через дальнейшую электрификацию всех сфер человеческой деятельности.

Но влияние технологического прогресса на уменьшение эксклюзивности энергетических факторов и смягчения порождаемой ими политической напряженности проявится раньше или позже в зависимости от того, какими темпами будут расти потребности в энергии по странам и миру в целом. В этом отношении человечество стоит на важной развилке.

Таблица 3. Ресурсы органического топлива и ядерного горючего, млрд тнэ

Энергоресурсы	Нефть и конденсат	Природный газ	Газовые гидраты	Уголь	Итого органическое топливо	Уран и др.	Реакторы-размножители	Всего
Извлеченные	146	66		159	371	27		398
Доказанные	150	141		606	897	57	3390	4344
Возможные	145	279		2800	3224	203	12150	15577
Итого традиционные*	441	486		3565	4494	287		20319
Использовано, %	33	14	0	4	8	9	1540	2
Нетрадиционные**	525	850	18650		20025	150	8900	29075
Всего ресурсы	966	1336	18650	3565	24519	437	4440	49396
Использовано, %	15	5		4	2	6		1

\* Ресурсы, доступные по приемлемой цене при использовании современных технологий

\*\* Ресурсы, освоение которых будет экономически приемлемо только на новых технологиях

Источники: Energy Information Administration US 2007, British Petroleum 2007, ИНЭИ РАН

Действительно, на волне экономического либерализма международные организации два последних десятилетия давали все более оптимистические прогнозы мирового ВВП, а вслед за этим повышались и прогнозы энергопотребления. Так, в последних предкризисных прогнозах Международного энергетического агентства (IEA-МЭА) спрос на энергию в мире рос с 2006 г. в 1,45 раза к 2030 г. и почти удваивался к 2050 г. Глобальный финансово-экономический кризис понизил прирост спроса на энергию к 2030 г. на 1 млрд тнэ, но и такой тренд представляется опасным [26-27].

Между тем, с переходом в 1980-е гг. к постиндустриальному развитию возникла обнадеживающая тенденция стабилизации среднемирового энергопотребления на душу населения, но с 2002 г. оно опять стало расти, и восходящая тенденция продолжается в сценарии *новой политики* МЭА (рис. 2). Снижение душевого потребления хотя бы до середины между трендом последнего двадцатилетия XX в. и предкризисного 2007 г. (*гипотетический* сценарий на рис. 2) уменьшило бы прирост мирового спроса на энергию в 2010–30 гг. почти вдвое, что, видимо, утопично. Но представляется возмож-

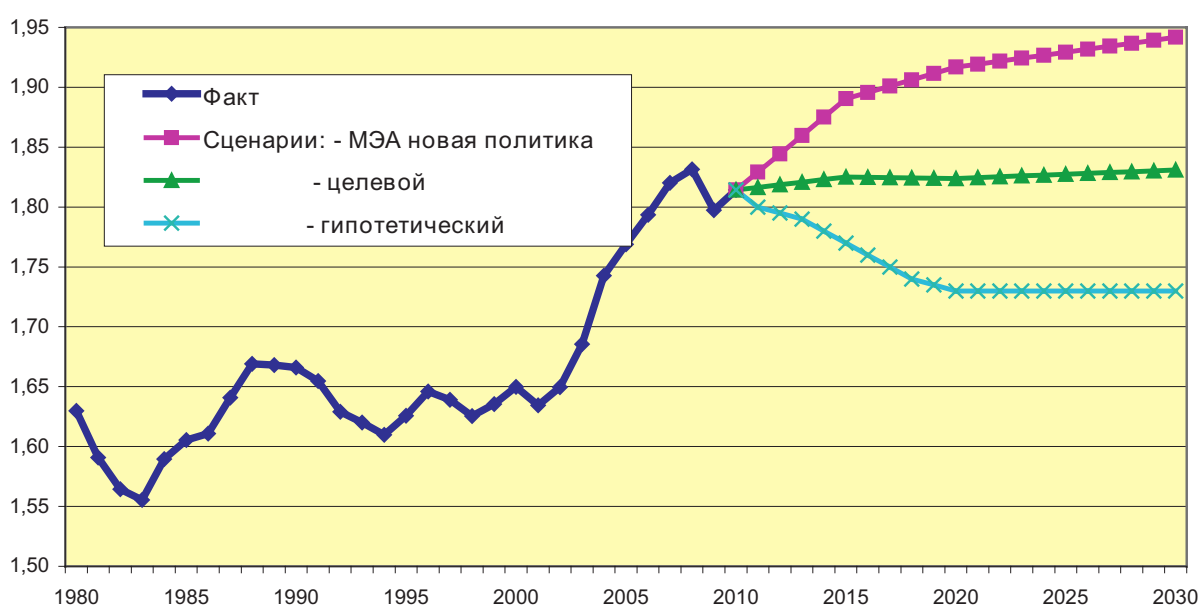


Рис. 2. Среднемировое энергопотребление на душу населения

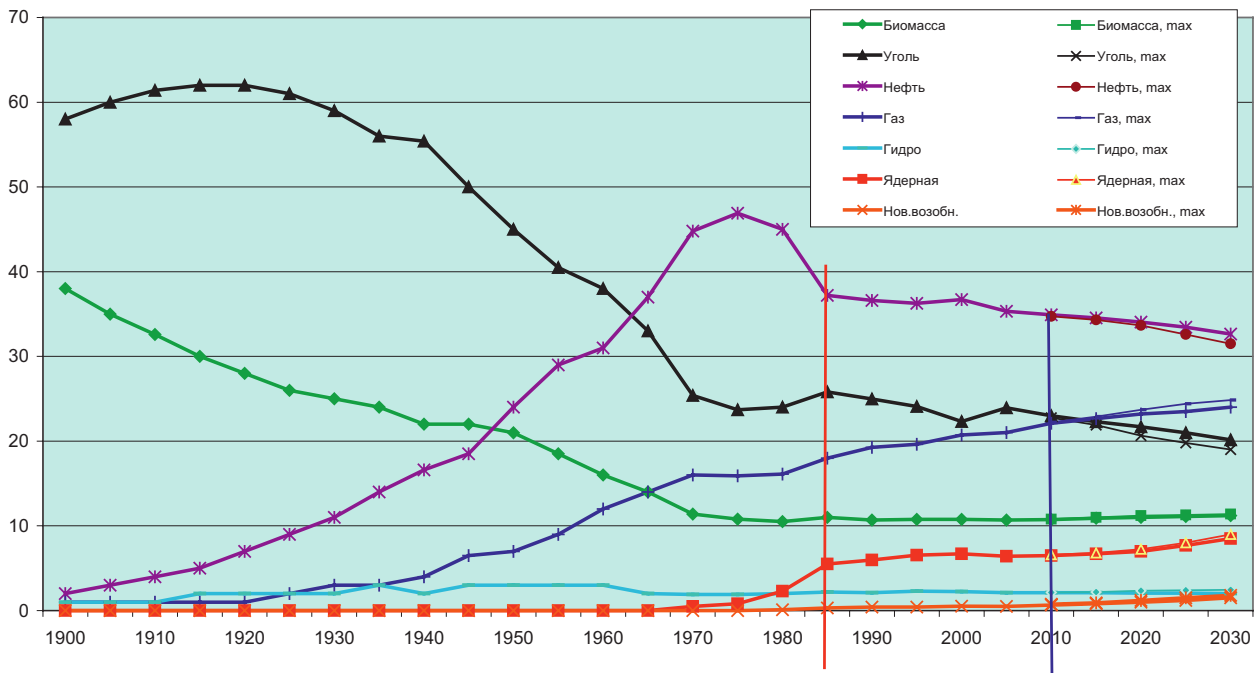


Рис. 3. Структура производства энергоресурсов

ным (с учетом необходимого повышения благосостояния и энергообеспеченности населения развивающихся стран) показанный на (рис. 3) целевой сценарий с практической стабилизацией душевого энергопотребления до 2030 г. Его реализация существенно нивелирует рассмотренный выше первый фактор энергетической эксклюзивности, но потребует сдерживания потребления развитых стран и умеренного его роста в развивающихся странах.

Второй фактор – обеспеченность природными энергоресурсами – с позиций физики и геологии не вызывает сомнений: за последние 150 лет использовано только 8 % традиционных (доступных применяемым технологиям) ресурсов органического топлива и лишь 2 % его общих запасов на Земле, включая нетрадиционные ресурсы (требующие применения новых технологий). Широкое применение новых технологий использования солнечной, ядерной

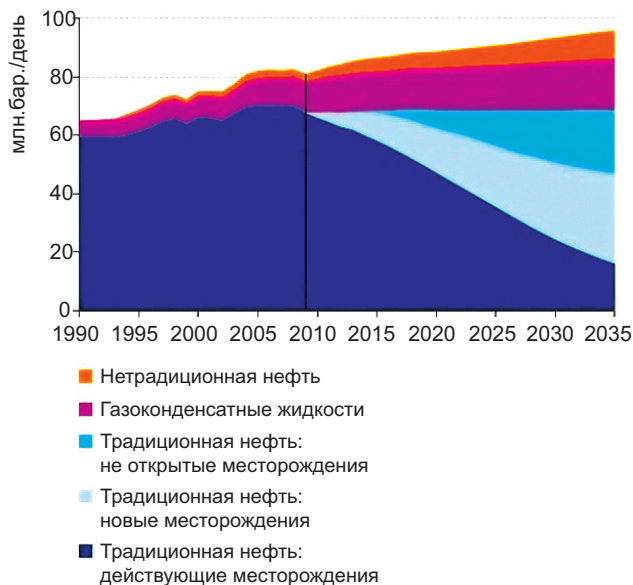


Рис. 4. Мировая добыча нефти по видам

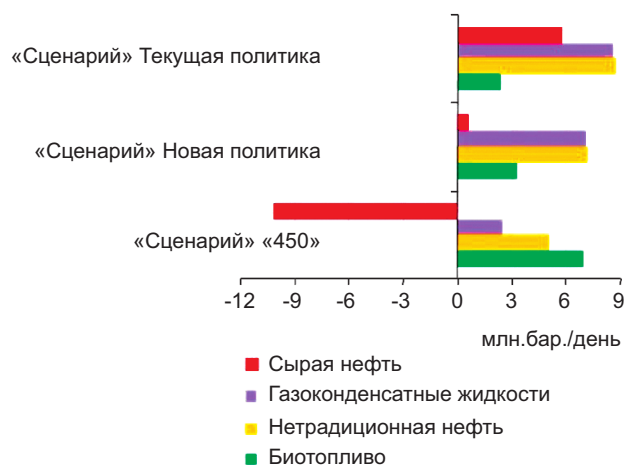


Рис. 5. Изменение добычи нефти и производства биотоплива в 2009–2035 гг.

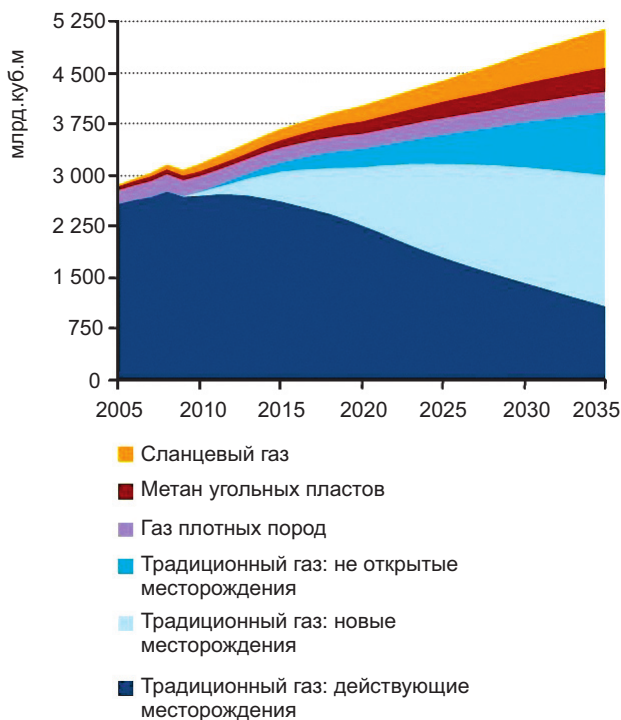


Рис. 6. Мировая добыча газа по видам

(с реакторами-размножителями и вторичным топливным циклом) и в перспективе — термоядерной энергии даст окончательное решение энергетической проблемы человечества на многовековую перспективу.

Таким образом, угрозы общей нехватки энергоресурсов на Земле нет, но существует реальность исчерпания запасов экономически приемлемой нефти, то есть проблема перемещается из области геологии в сферы готовности новых технологий, их экономической приемлемости и инвестиционного задела. Так, за полтора века использована уже треть ресурсов традиционной (самой дешевой) нефти (табл. 3), что по опыту отработки ее месторождений свидетельствует о наступлении фазы падающей добычи. К тому же в последнее десятилетие сложилось нарастающее отставание подготовки новых запасов нефти от объемов ее добычи и сильное недофинансирование отрасли в целом. Не за горами очередь и природного газа, традиционные ресурсы которого использованы пока на 14 %.

Несмотря на высокую долю извлечения, нефть остается доминирующим энергоресурсом мировой энергетики: в последнем прогнозе МЭА ее добыча в период до 2030 г. стабилизируется при энергоэффективном развитии (линия 1 на рис. 1) и увеличится на 24 % при со-

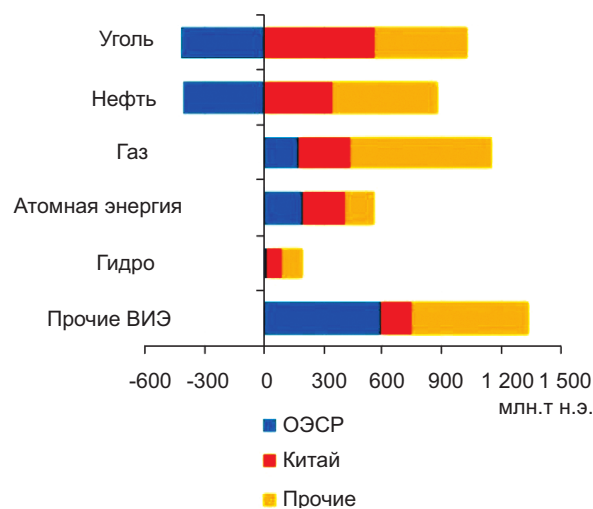


Рис. 7. Прирост потребления первичной энергии в 2008–2035 гг.

хранении сложившихся тенденций (линия 2). Предусматривается также рост добычи природного газа на 20–43 % к 2030 г. В результате, как показано на рисунке 3, в предстоящий период усилится сложившаяся в предыдущие 25 лет тенденция *диверсификации мирового энергетического баланса* путем сближения долей основных энергоресурсов в производстве первичной энергии: уменьшение доли нефти и угля будут компенсировать природный газ, атомная и разные виды возобновляемой энергии. Уже это несколько ослабит порождаемые энергетикой политические напряженности.

Между тем, увеличение добычи нефти не может опираться на существующие запасы — они обрушат ее втрое уже к 2020 г. (рис. 4). Вовлечение в разработку разведанных запасов позволит поддерживать сегодняшнюю добычу до 2015–20 гг. Следовательно, весь прогнозируемый прирост придется обеспечивать сначала прогнозными традиционными, а затем и нетрадиционными ресурсами нефти. По базовому прогнозу МЭА к 2035 г. мировое производство нефти достигнет 96 млн бар./сутки в первую очередь за счет растущей добычи газовых жидкостей и нетрадиционных нефтей (особенно — канадской тяжелой нефти), тогда как добыча традиционной сырой нефти будет фактически стагнировать. Развитие нетрадиционной неф-тедобычи будет подкреплено также ростом производства биотоплива, которое при определенной политической поддержке может даже компенсировать необхо-

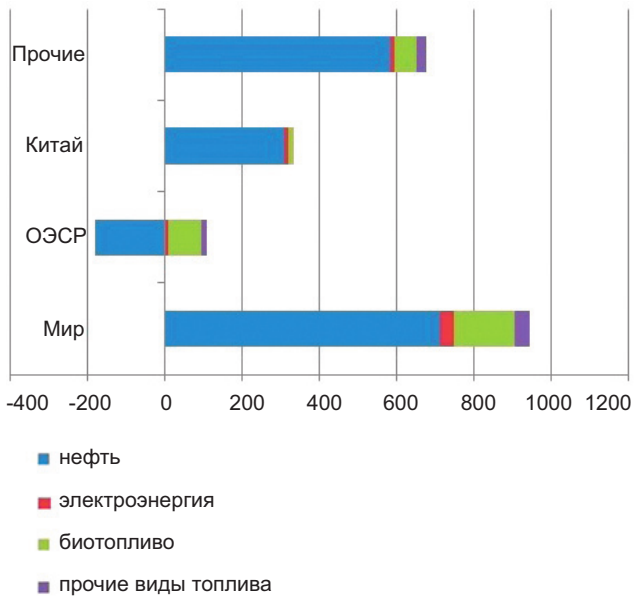


Рис. 8. Прирост энергопотребления на транспорте в 2008–2035 гг.

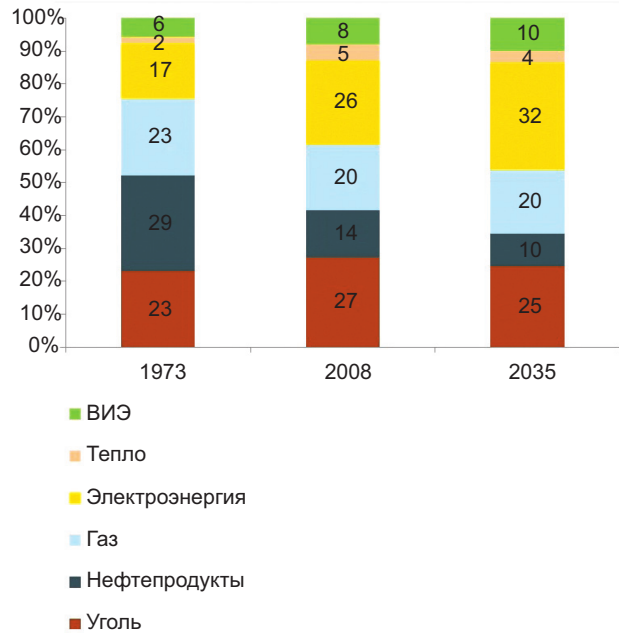


Рис. 9. Структура энергопотребления в промышленности

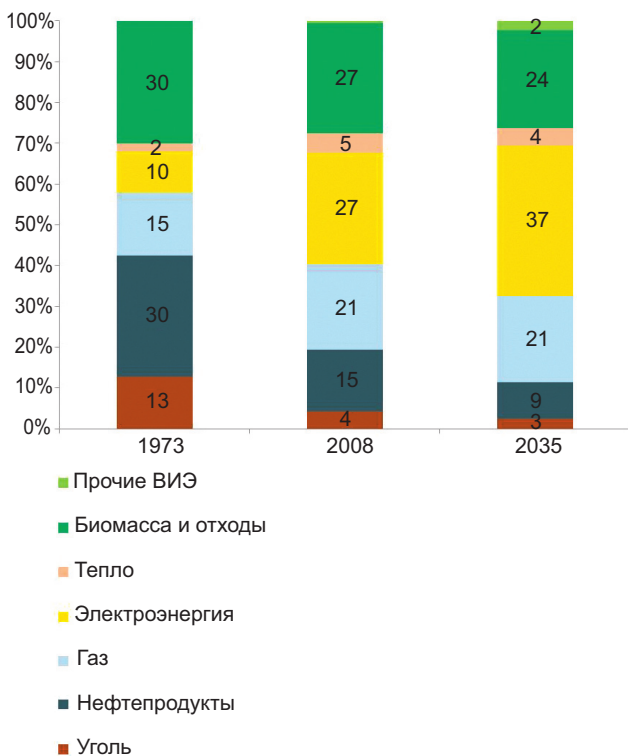


Рис. 10. Структура потребления энергии бытовым и коммерческим сектором

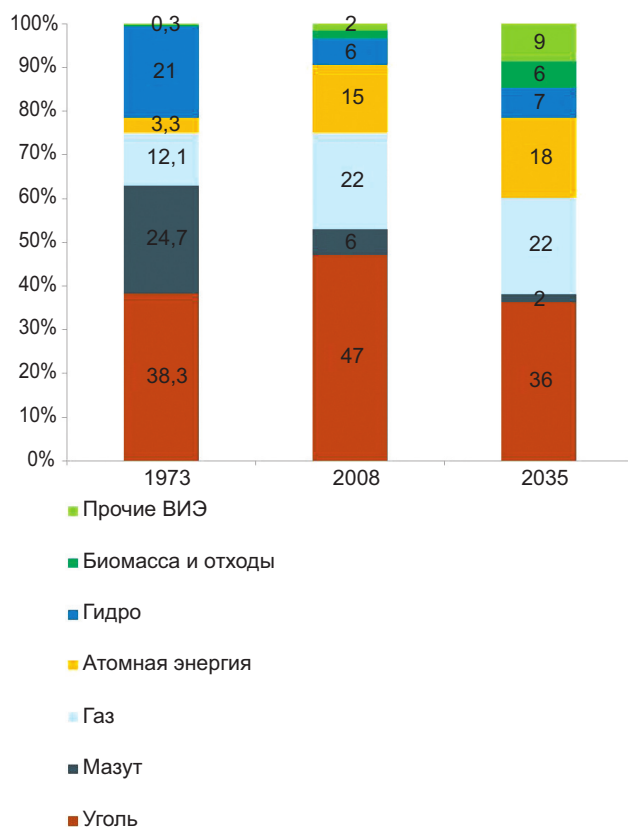


Рис. 11. Структура потребления энергоресурсов в электроэнергетике



Рис. 12. Мировое потребление первичной энергии по видам и секторам

димостью увеличения добычи традиционной нефти (рис. 5).

В добыче природного газа ситуация обстоит намного лучше, и необходимость крупномасштабного использования его нетрадиционных ресурсов отодвигается к 2030 г., хотя произошедший в США технологический прорыв в добыче сланцевого газа сделал эти ресурсы коммерчески привлекательными. Новые методы разведки и освоения месторождений углеводородов на суше и морском шельфе (включая подледную добычу) увеличат их экономически приемлемые запасы в 1,7 раза к 2030 г. По прогнозу МЭА, нетрадиционный газ будет обеспечивать почти 35 % прироста предложения к 2035 г., причем не только в Северной Америке, но и в других регионах мира. Доля местного нетрадиционного газа в суммарной мировой газодобыче должна возрасти с 12 % в 2008 г. до 24 % к 2035 г. (рис. 6, 7), существенно ослабляя **второй** фактор энергетической эксклюзивности.

Таким образом, нетрадиционные ресурсы и новые технологии добычи существенно расширят состав источников и диверсифицируют по источникам экономически приемлемых запасов нефти и газа, заметно смягчая их дефицитность по странам и миру в целом. Это станет хотя и не решающим, но уже важным вкладом в уменьшение роли энергетики как фактора геополитики.

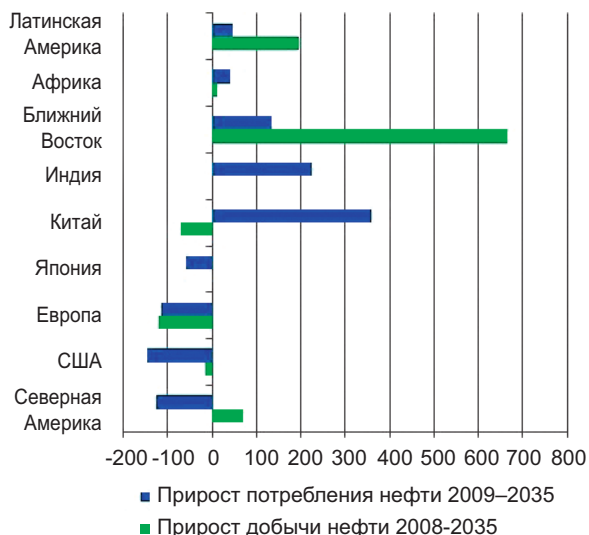


Рис. 13. Изменение потребления и производства нефти в 2008–2035 гг.

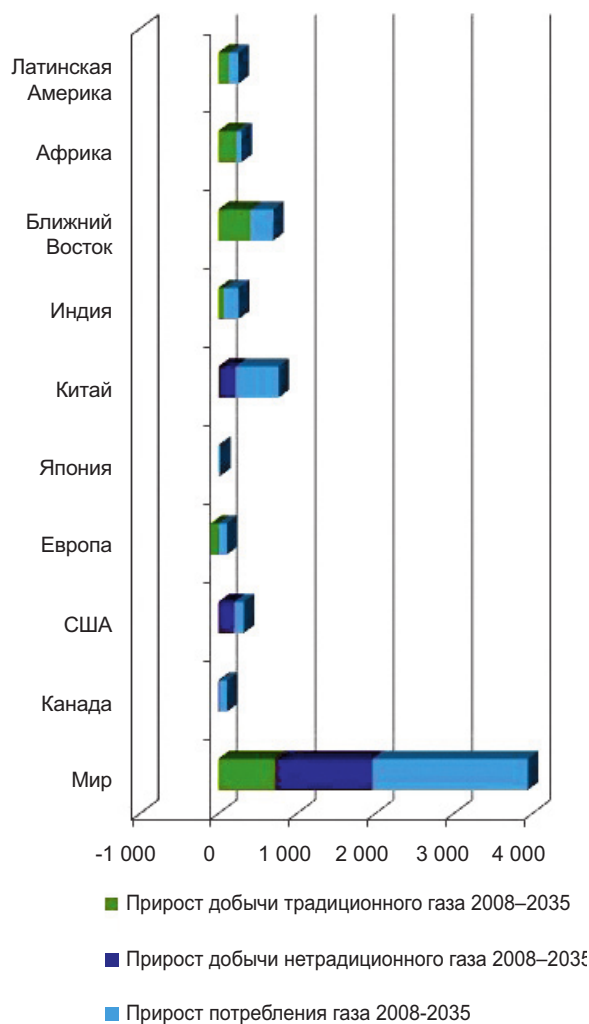


Рис. 14. Изменение потребления и производства газа в 2008–2035 гг., млрд./м³



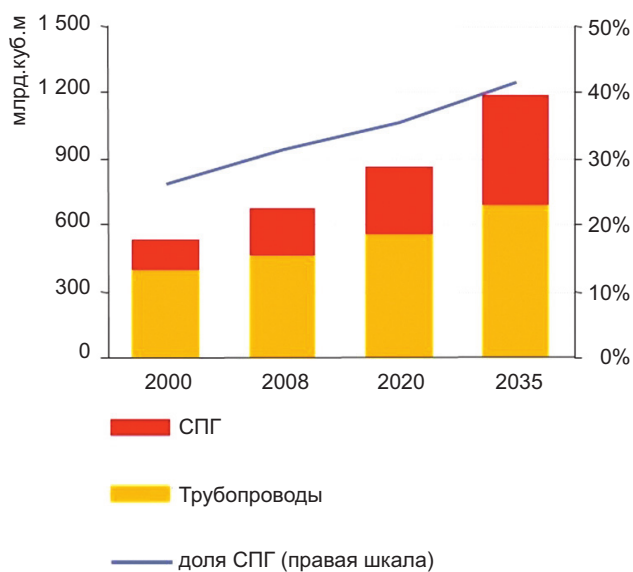


Рис. 15. Межрегиональная торговля сетевым газом и СПГ

Хотя радикального изменения соотношения между видами топлива в ближайшие 2–3 десятилетия сложно ожидать ввиду большой инерционности энергетического сектора, тем не менее, даже в глобальном масштабе доля эксклюзивного углеводородного сырья в общем производстве энергии при всех условиях будет постепенно уменьшаться при увеличении доли широко распространенных неископаемых источников энергии. Особенно характерно с этой точки зрения поведение развитых и приближающихся к ним стран, которые в первую очередь наращивают производство ВИЭ и атомной энергии, в меньшей степени – потребление газа, и уменьшают при этом потребление нефти (рис. 7).

Межтопливная конкуренция и взаимозаменяемость энергоресурсов по секторам потребления, усиливающиеся по мере развития технологий, ослабляют эксклюзивность **третьего** фактора – доминирования отдельных энергоресурсов в определенных жизненно важных энергопотребляющих процессах.

На транспорте прогресс технологий постепенно разрушает монополию нефтепродуктов, замещая их энергоносителями, которые используются и в других секторах потребления, тем самым связывая всю энергетику едиными условиями конкуренции [28]. Хотя нефть будет доминировать на транспорте до 2035 г., в приросте его потребления она будет

существенно ограничена альтернативными энергоресурсами (рис. 8), что сделает спрос на нефть более эластичным по цене и уменьшит ее эксклюзивность.

Промышленное энергопотребление уже довольно диверсифицировано, хотя и сохраняется зависимость отдельных технологических процессов от определенного энергоносителя. Невзирая на высокие цены, нефтепродукты все еще составляют довольно заметную долю в мировом промышленном энергопотреблении, но она последовательно снижается (рис. 9). Уголь остается основным источником энергии, обеспечивающим промышленный рост в развивающихся странах, и потому демонстрирует наиболее высокие темпы роста, но в перспективе его роль будет ограничена регулированием в отношении выбросов парниковых газов. В большинстве стран более строгое экологическое регулирование будет благоприятствовать росту потребления природного газа в данном секторе, который имеет преимущество во многих технологических процессах (в химической, пищевой, строительной и металлургической отраслях), и возможности его замены там ограничены.

Электроэнергия последовательно наращивает свою долю и замещает остальные энергоресурсы в силу простоты и удобства использования (рис. 9). Именно через электроэнергетику межтопливная конкуренция усиливается в промышленности.

В бытовом и коммерческом секторе за последние 35 лет доля нефтепродуктов сократилась вдвое, но они остаются важным энергоресурсом (рис. 10). Роль газа здесь растет, и применение газовых мини-ТЭЦ в регионах с развитой газовой инфраструктурой существенно ускорит этот процесс. Активно увеличивается использование ВИЭ – в первую очередь фотоэлементов и тепловых насосов взамен дров и отходов, традиционно обеспечивающих отопление и приготовление пищи в развивающихся странах. Межтопливная конкуренция усиливается здесь расширением применения электроэнергии, поскольку потребители предпочитают иметь один наиболее удобный источник энергии для всех нужд.

Электроэнергетика как крупнейший из секторов потребления, является основным полем конкуренции практически всех используемых энергоресурсов. За последние 35 лет структура потребления в электроэнергетическом секторе заметно изменилась (рис. 11): на смену

доминированию мазута пришел уголь (за счет быстрого расширения мощностей в развивающихся странах, где уголь – наиболее доступное местное топливо), газ вдвое расширил свою долю за счет высокой эффективности и удобства строительства и использования. Вчетверо увеличилась доля атомной энергетики.

В перспективе ожидается дальнейшее сокращение использования мазута и снижение доли угля в результате экологических ограничений. Доля генерации на ВИЭ (без учета гидроэнергетики) увеличится более чем в 5 раз: с 3 % в 2008 г. до 16 % в 2035 г. Они будут замещать ископаемое топливо, в первую очередь в наиболее импортозависимых странах Европы, в США, Китае и Индии, где смогут обеспечивать от четверти до трети производства электроэнергии. Диверсификация топливной корзины (рис. 11) будет способствовать смягчению политических напряжений, связанных с углеводородами [29].

В целом в перспективе существенно вырастет роль местной генерации, не зависящей от импорта углеводородов (ВИЭ, атомная и угольная энергетика), которые в сумме обеспечат 76 % мирового производства электроэнергии, а в отдельных регионах и выше.

Таким образом, анализ структуры энергопотребления по секторам свидетельствует, что новые технологии усиливают межтопливную конкуренцию и диверсификацию структуры энергопотребления во всех секторах по странам и миру в целом (рис. 12). Смягчение эксклюзивности отдельных энергоресурсов в большинстве секторов энергопотребления уменьшит роль энергетики как фактора геополитики и будет содействовать стабилизации цен углеводородов.

Однако благоприятных общемировых тенденций к ослаблению эксклюзивности энергетических факторов недостаточно для ослабления энергетических причин политических напряженностей без учета **четвертого** фактора – эксклюзивности энерготранспортной инфраструктуры, особенно газо- и нефтепроводов, а также каналов и морских проливов. Ослабление его роли идет по двум направлениям: роста самообеспеченности стран эксклюзивными энергоресурсами и диверсификации транспортных маршрутов.

По первому направлению прогнозируются благоприятные для ведущих стран изменения приростов потребления и собственного произ-

водства нефти и газа (в том числе из нетрадиционных ресурсов), что в большинстве случаев уменьшает их зависимость от внешних поставок (рис. 13, 14). Но более действенной мерой будет диверсификация видов транспорта, особенно перевозки сжиженного природного газа вместо газопроводов (рис. 15), а также сооружение избыточной сети конкурирующих нефте- и газопроводов, в том числе дублирующих судоходные каналы и морские проливы.

Обобщая сказанное, можно с большой вероятностью полагать, что благодаря новым ресурсным и технологическим возможностям уже в очередной инвестиционный цикл (10–15 лет) обычная экономическая конкуренция замедлит или остановит рост эксклюзивности всех пяти энергетических факторов, а ослабление их затем до приемлемого каждому государству уровня станет делом не столько политики, сколько экономической целесообразности и посильности.

Таким образом, новая ресурсно-технологическая база энергетики не только открывает возможности, но и делает экономическим императивом нивелирование ее роли как важного фактора геополитики. Масштабы и темпы реализации этой возможности будут определяться инвестиционными усилиями стран в области энергетики, и процесс может занять 3–4 десятилетия.

Казалось бы, тогда можно будет констатировать конец полторавековой аномалии в развитии антропогенной энергетики, когда она оказалась не в состоянии удовлетворять потребности людей ресурсами ближайшего размещения и стала важной причиной глобальных политических напряженностей. Вместе с тем, нельзя забывать, что человечество имеет большую историю упущения благоприятных возможностей, которые выпадают на его пути. Поэтому не исключено, что открываемое ныне техническим прогрессом «окно возможностей» уменьшения энергетической составляющей политических напряженностей так и не будет реализовано, а во второй половине XXI в. создание сверхмощных по своей природе термоядерных и солнечных электростанций в космосе породит новые геополитические реалии.

Тем не менее, необходимо ясно видеть открывающиеся возможности, чтобы направленно добиваться их осуществления.

## Литература

1. *Ratzel F.* Politische Geographie, 1887, Einleitung, Ueber die Gesetze des räumlicher Wachstum der Staaten, 1901
2. *Mackinder H.* Geographical Pivot of History//Geographical Journal, 1904
3. Democratic ideals and reality. – New York. – 1919.
4. *Mahan A.* The influence of Sea Power in history (1660 – 1783). – 1890.
5. *Mahan A.* The Sea Power in its relations to the war. – Boston. – 1905.
6. *Дугин А. Г.* Основы геополитики. – М.: АРКТОГЕЯ-центр. – 2000.
7. *Дугин А. Г.* Геополитика природных ресурсов. //Топливо-энергетический комплекс России. Федеральный справочник. Том № 11 – М. – 2011.
8. *Spykman N.* Geography of peace. – 1942.
9. *Haushofer K.* Kontinentalblocke: Mitteleuropa – Eurasia – Japon //Ausgewählte Texte zur Geopolitik. – Boppard am Rhein. – 1979.
10. *Schmitt C.* Der Nomos der Erde – Koeln. – 1950. – Die planetarische Spannung zwischen Ost und West. – 1959.
11. *Савицкий П.* Географические и геополитические основы евразийства// Элементы № 3. – 1933.
12. *Spykman N.* America's Strategy in World Politics. – 1942.
13. *Meinig D.W.* Heartland and Rimland in Eurasian History//West Politics Quarterly// IX. – 1956.
14. *Kirk W.* Geographical Pivot of History// Leicester Universal Press. – 1965.
15. *Cohen S.B.* Geography and Politics in a divided world – New York. – 1963.
16. *Gray Colin S.* The Geopolitics of the Nuclear Era – N.Y. – 1977.
17. *Benoist A.* de Les idess a l'endroit – Paris. – 1979.
18. *Bgezinsky Z.* The Grand Chessboard: American Primacy and Its Geostrategic Imperatives. – 1983.
19. The End of history and the Last Man – Free Press. – 1992.
20. *Huntington S.* Clash of Civilisations – Foreign Affairs. – 1993.
21. *Thome F.* Eurasisme et Neo-Eurasisme //Commentaire № 66. – 1994.
22. *Blache V.* de la Tableau de la Geographie de la France – Paris. – 1903.
23. *Campbell K., Price J.* The Global Politics of Energy – The Aspen Institute. –2008.
24. Shaffer Energy Politics – University of Pennsylvania Press. – 2009.
25. *Дугин А. Г.* Энергетическая геополитика // «Геополитика» № 3. – 2010.
26. World Energy Outlook 2008// International Energy Agency. – Paris. – 2008.
27. World Energy Outlook 2010// International Energy Agency. – Paris. – 2010.
28. Energy Technology Perspectives. Scenarios & Strategies to 2050 // International Energy Agency. – Paris. – 2008.
29. Number of Establishments with Capability to Switch Natural Gas to Alternative Energy Sources. Manufacturing Energy Consumption Survey '2006// Energy Information Administration, Office of Energy Markets and End Use, Energy Consumption Division, June 2010.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛИБЕРАЛИЗОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ<sup>1</sup>

Воропай Н.И., Ретанц К.<sup>2</sup>

Рассматриваются закономерности развития и особенности функционирования электроэнергетических систем с учетом влияния новых средств и методов измерения параметров режима, их обработки, передачи и представления, а также мониторинга режимов и управления ими. Формулируются основные направления развития принципов и систем управления режимами электроэнергетических систем. Приводятся результаты реализации новых методов управления режимами электроэнергетических систем.

**Ключевые слова:** электроэнергетические системы, либерализация, управление, технические проблемы.

Development trends and operation specifics of electric power systems are considered taking into account new technologies and tools for measurement of state variables, data processing, transmitting and visualization, as for as system state monitoring and control. Main development directions of operation control electric power system principles and systems are formulated. New methods for electric power system control are discussed.

**Keywords:** Electric power systems, Liberalization, Control, Technological problems.

Закономерности развития электроэнергетических систем (ЭЭС) и изменения условий их функционирования привели к существенным трансформациям в структуре систем и режимах их работы. Эти трансформации обусловлены следующими факторами [1]:


- увеличением масштабов ЭЭС, расширением обслуживаемых ими территорий, объединением для совместной работы различных ЭЭС с формированием межрегиональных, межгосударственных и межконтинентальных энергообъединений;

- децентрализацией электроснабжения в связи с расширением использования источников распределенной генерации, подключаемых к узлам распределительной электрической сети;

- реструктуризацией электроэнергетики, в результате которой ее организационная структура коренным образом отличается от технологической структуры ЭЭС как технически единого объекта и от структуры технологического управления этим объектом;

- либерализацией отношений в электроэнергетике, в результате которой возникло множество

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-08-91330) в рамках совместного конкурса с ННИО, Германия.

<sup>2</sup>  Воропай Николай Иванович, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, директор Института систем энергетики им.Л.А.Мелентьева СО РАН, e-mail: voropai@isem.sei.irk.ru.



Ретанц Кристиан, доктор-инженер, профессор, заведующий кафедрой электроэнергетических систем экономики энергетики Технического университета Дортмунда, Германия, e-mail: Christian.rehtanz@tudortmund.de.

субъектов отношений с несовпадающими, часто противоречивыми интересами в процессе развития, функционирования и управления ЭЭС.

Все эти факторы существенно усложняют режимы работы ЭЭС, повышают их динамичность и непредсказуемость, увеличивают опасность тяжелых аварий с нежелательным развитием и массовыми негативными последствиями для системы и потребителей и поэтому требуют более оперативной и адекватной реакции систем управления. Это вызывает необходимость совершенствования и развития принципов и систем управления режимами ЭЭС, в процессе которого следует использовать [1–3]:

- новые средства измерения параметров режима ЭЭС (Phazor Measurement Unit–PMU) и управления ими (Flexible Alternating Current Transmission System – FACTS, накопители энергии и др.), радикально повышающие наблюдаемость и управляемость ЭЭС;

- современные средства коммуникаций, новые информационные технологии и методы искусственного интеллекта, высокоэффективные компьютерные средства, принципиально изменяющие процессы сбора, обработки, передачи, представления (визуализации) и использования информации об ЭЭС;

- эффективные математические методы теории управления в многокритериальных противоречивых условиях.

Совместная работа энергообъединений регионов или стран в составе протяженного супер-энергообъединения, практическая необозримость информации о его текущем состоянии, различия в принципах управления режимами и в используемых программных средствах в разных энергообъединениях, конфиденциальность некоторой части информации заставляют в процессе совершенствования и развития систем управления режимами ЭЭС использовать распределенные алгоритмы обработки информации о состоянии системы и выработки управляющих воздействий.

Современные средства измерения параметров режима ЭЭС и управления ими, новые средства коммуникаций и обработки информации и др. позволяют на новой основе и с существенно большей эффективностью реализовать один из важнейших этапов управления режимами ЭЭС – оперативное и противоаварийное управление ими.

Изложенные подходы раскрываются далее в данной статье. Рассматриваются основные на-

правления развития принципов и систем управления режимами ЭЭС, а именно: разработка распределенных принципов и систем анализа режимов ЭЭС и управления ими, усиление координации управления режимами ЭЭС, использование методов и средств интеллектуальных технологий при анализе режимов ЭЭС и управлении ими. Излагаются результаты решения некоторых конкретных задач управления режимами ЭЭС, иллюстрирующие реализацию общих подходов к анализу режимов сложных энергообъединений и управлению ими.

### Основные направления развития принципов и систем управления режимами ЭЭС

*Принципы распределенного управления режимами ЭЭС.* Распределенное управление режимами ЭЭС связано с декомпозицией математических моделей системы, используемых для оценивания текущего состояния, прогнозирования параметров состояния ЭЭС и выработки управляющих воздействий. Возможны различные подходы к декомпозиции математических моделей. Один из таких подходов основан на так называемом функциональном моделировании [4]. Его базой являются следующие основные положения:

- построение и функционирование модели большой ЭЭС при решении задач расчета, планирования и управления режимами как иерархической двухуровневой структуры, включающей модели нижнего уровня – системы уравнений подсистем и модели верхнего уровня – систему уравнений связи для граничных переменных;

- представление подсистем в модели верхнего уровня функциональными характеристиками, отражающими зависимости между граничными и обобщенными переменными подсистем при соблюдении в подсистеме всех внутренних ограничений в виде равенств и неравенств;

- формирование системы уравнений связи на основе записанных в общем виде граничных условий при подстановке в них выражений для функциональных характеристик подсистем (эти условия могут, например, иметь вид выражений для законов Кирхгофа, относящихся к граничным переменным, и выражений, представляющих условия оптимальности для граничных переменных в задачах оптимизации) и решение системы уравнений связи, позволяю-

шее определить значения граничных переменных подсистем.

В наибольшей степени метод функционального моделирования проработан для задач оценивания состояния и оптимизации установившихся режимов ЭЭС [4]. Применительно к задаче оценивания текущего состояния в [5] рассмотрены и другие подходы к декомпозиции математической модели системы [6, 7], а также особенности задачи при использовании устройств измерения векторных величин РМУ. Примечательно, что вследствие высокой точности измерений РМУ, установленных в граничных узлах подсистем, решение задач оценивания состояния подсистем может выполняться независимо, а уравнения связи на верхнем уровне иерархии вырождаются и отпадает необходимость решения координационной задачи [5]. Это, в частности, дает возможность распараллелить общую задачу оценивания состояния большой АЭС и тем самым ускорить ее решение.

**Координация задач управления режимами ЭЭС.** Проблеме координации задач управления режимами ЭЭС во временном, пространственном и ситуативном аспектах традиционно уделяется пристальное внимание с точки зрения обеспечения эффективности управления таким сложным многомерным объектом [8, 9 и др.]. В современных ЭЭС с учетом усложнения режимов, снижения их предсказуемости, повышения вероятности аварийных ситуаций, а также новых средств и возможностей управления, необходимо существенное расширение и усиление координации управления режимами. Основными направлениями расширения и усиления координации являются:

1. Расширение координации управления режимами ЭЭС:

– во временном разрезе – от координированного проектирования систем управления до реализации управляющих воздействий диспетчерскими и автоматическими средствами;

– в ситуативном плане – координация оперативного диспетчерского, непрерывного автоматического и дискретного противоаварийного управления;

– в плане реализации распределенных принципов управления – координация устройств распределенной системы управления на основе мультиагентного подхода.

2. Развитие и расширение номенклатуры средств координированного управления режимами ЭЭС:

– развитие традиционных средств – систем управления возбуждением и мощностью синхронных машин, противоаварийной автоматики и др.;

– использование новых средств измерения и управления – РМУ, FACTS, накопители энергии и др.

3. Распространение и развитие принципов и систем координированного оперативного диспетчерского и противоаварийного управления на распределительные электрические сети, содержащие установки распределенной генерации.

4. Согласование коммерческих интересов субъектов рынков электроэнергии, мощности и системных услуг и необходимости обеспечения системной надежности и живучести ЭЭС.

5. Формирование новых критериев и разработка новых методов мониторинга и прогнозирования режимов и управления ими с целью обеспечения эффективности координированного управления для всех субъектов оптового рынка, системной надежности и живучести ЭЭС.

Взаимосвязь состояний ЭЭС и блоков задач мониторинга и прогнозирования режимов и управления ими показана на рис. 1.

**Новые средства и интеллектуальные технологии для мониторинга режимов ЭЭС и управления ими** включают (см. выше во Введении):

- новые средства и системы измерений параметров режимов ЭЭС (РМУ) и управления ими (FACTS, накопители энергии и др.);

- современные средства и системы коммуникации, новые информационные технологии и методы искусственного интеллекта, высокоэффективные компьютерные технологии;

- эффективные математические методы теории управления.

### **Реализация новых методов управления режимами ЭЭС**

В порядке иллюстрации изложенных направлений развития принципов и систем управления режимами ЭЭС рассмотрим некоторые новые разработки интеллектуальных методов мониторинга и управления режимами.

**Распределенная мультиагентная система оценивания состояния ЭЭС** [5, 10]. Оценивание состояния ЭЭС подразумевает вычисление переменных состояния системы по данным измерений. Результаты оценивания состояния являются базой для реализации задач мониторинга режимов ЭЭС и управления ими. Разработан-

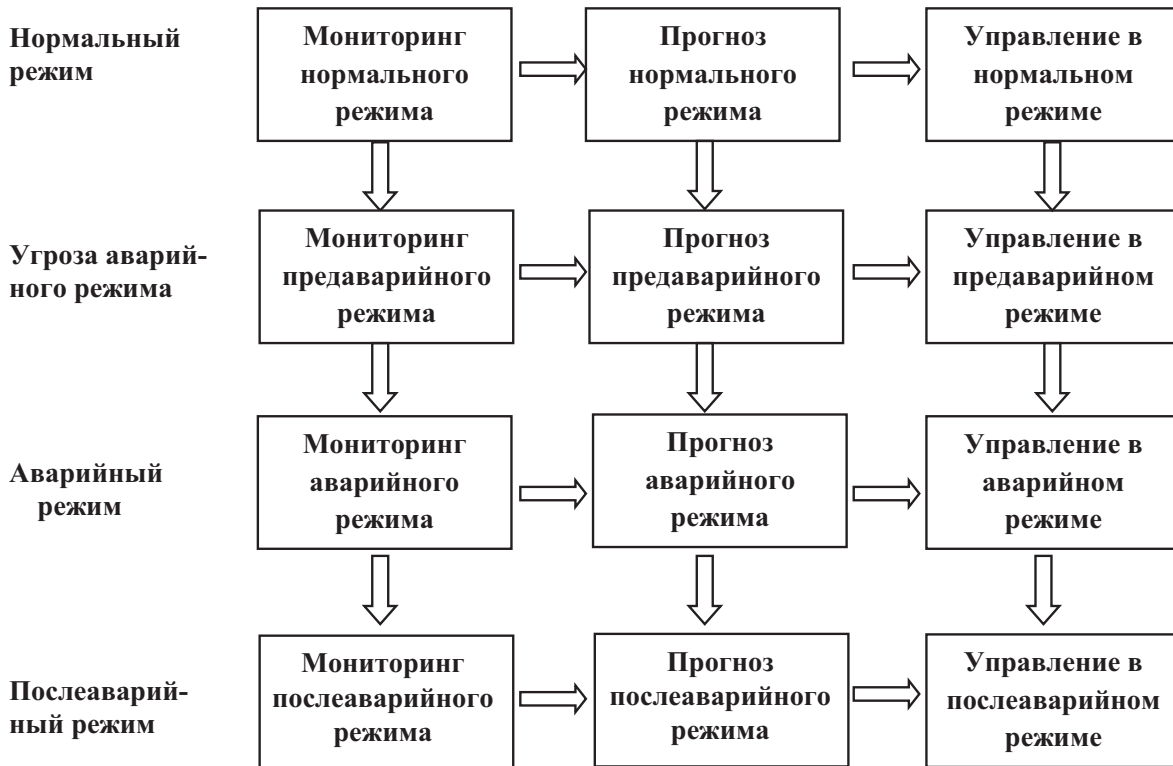


Рис. 1. Взаимосвязь состояний ЭЭС и блоков задач мониторинга и прогнозирования режимов и управления ими

ный метод основывается на использовании контрольных уравнений, которыми являются уравнения электрической сети, содержащие только измеренные переменные режима  $z$ :

$$w_k(z) = 0 \quad (1)$$

Процедура оценивания состояния больших энергообъединений связана с проблемами обработки огромных объемов неточной информации, больших затрат компьютерных ресурсов и времени, наличия грубых ошибок измерений и сбоев в измерениях (плохих данных), особенно в низковольтных электрических сетях.

Декомпозиция задачи оценивания состояния больших ЭЭС является эффективным способом решения проблемы размерности. Разработан двухшаговый подход к декомпозиции исследуемой ЭЭС на подсистемы. На первом шаге система делится на достаточно большие подсистемы с минимальным числом связей между ними. В граничных узлах подсистем размещаются РМУ. На втором шаге электрическая сеть каждой подсистемы дополнительно разделяется на подсистемы по уровням напряжений. Последнее позволяет обеспечить более корректное представление подсистем и улучшить сходимость процесса решения задачи.

Реализованный алгоритм декомпозиции общей задачи оценивания состояния ЭЭС использует технологию мультиагентного подхода [10]. Структура мультиагентной системы оценивания состояния показана на рис. 2. Каждый агент  $MAS_{ij}$  соответствующей подсистемы  $i$  на уровне напряжения  $j$  решает задачи выявления плохих данных (задача ПД) и оценивания состояния при использовании квадратичного критерия минимума невязок оцениваемых переменных (задача ОК):

$$J(z) = (\bar{z} - \hat{z})^T W (\bar{z} - \hat{z}), \quad (2)$$

где  $\bar{z}$  – измеренные,  $\hat{z}$  оцененные на данной итерации значения переменных,  $W$  – вектор весовых коэффициентов. В случае плохой сходимости процесса оценивания состояния подсистемы критерий (2) заменяется на какой-либо известный робастный критерий и задача оценивания состояния решается заново (задача ОР). В терминах мультиагентного подхода это означает, что агент  $MAS_{ij}$  состоит из трех агентов, т.е.

$$MAS_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} MAS_{ij\text{ ПД}}, \\ MAS_{ij\text{ ОК}}, MAS_{ij\text{ ОР}} \end{array} \right\} \quad (3)$$

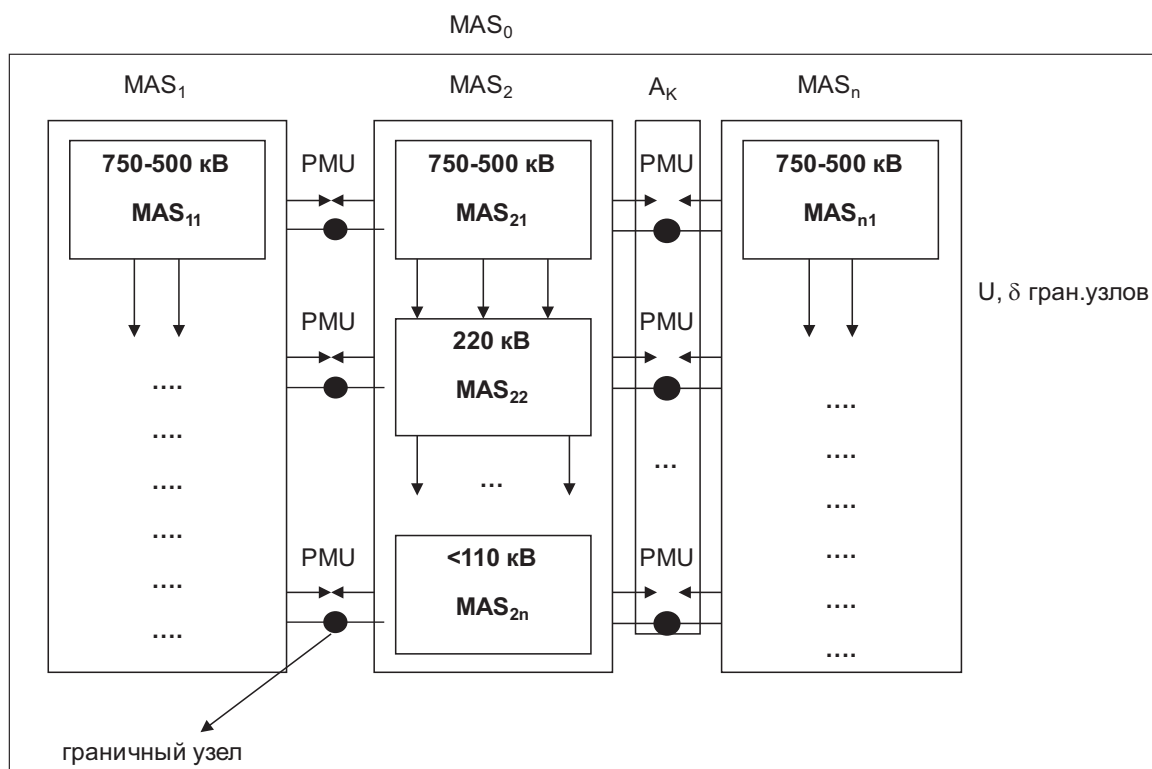


Рис. 2. Структура мультиагентной системы оценивания состояния энергообъединения

Сочетание декомпозиции задачи и мультиагентной реализации подхода позволяет организовать гибкое использование различных методов и структуры решения общей задачи оценивания состояния больших энергообъединений и обеспечить эффективное решение этой задачи.

**Устройство для динамического управления потокораспределением в ЭЭС [11].** Как отмечено во Введении, ряд характерных особенностей развития и функционирования современных ЭЭС приводит к усложнению режимов их работы, повышению динамичности и непредсказуемости режимов и вследствие этого требует более оперативной и адекватной реакции систем управления. Одна из задач, для решения которой требуется подобная реакция систем управления, связана с управлением потокораспределением в сложнзамкнутых электрических сетях.

Естественное потокораспределение в электрической сети определяется ее структурой и соотношением параметров линий электропередачи. Известно, например, что вследствие различия в соотношении активных и реактивных сопротивлений линий разных напряжений в одном сечении в большей степени загружаются линии более низкого напряжения по сравнению с линиями более высокого напряже-

ния. Для управления загрузкой такого сечения обычно применяется трансформатор с поперечным регулированием (или фазосдвигающий трансформатор), обмотка низкого напряжения которого имеет отпайки для изменения коэффициента трансформации, переключаемые механическим способом, что предопределяет их низкую надежность. Возможно использование для этой цели тиристорно управляемого продольного компенсатора (одно из устройств FACTS), однако его стоимость достаточно высока.

В [11] представлено разработанное авторами новое устройство для динамического управления потокораспределением на основе фазосдвигающего трансформатора, переключение отпайек которого осуществляется с помощью тиристорно управляемого электронного переключателя (см. рис. 3). Устройство испытано на номинальном межфазном напряжении 380 В. Испытания показали хорошие рабочие характеристики этого устройства. В дальнейшем предполагается его использование в реальных ЭЭС, а также в учебном процессе в вузе.

**Селективная автоматика предотвращения и ликвидации асинхронного режима (САПЛАР) [12].** Асинхронный режим в энергообъединении является одним из самых тяжелых аварийных



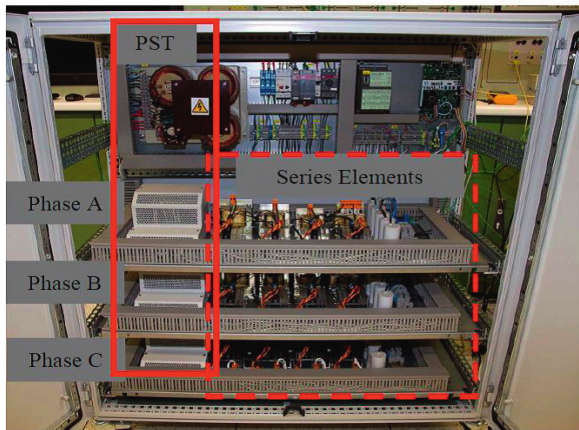


Рис. 3. Устройство для динамического управления потокораспределением

режимов. Он связан с нарушением устойчивости энергообъединения, что создает опасность повреждения оборудования, нарушения электроснабжения потребителей, нежелательного развития аварийного процесса с тяжелыми последствиями для энергообъединения в целом и его частей (blackout).

Для надежного, своевременного и селективного выявления и ликвидации асинхронного режима в ЭЭС используется специальная автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР). Наиболее эффективной является так называемая селективная АЛАР на основе измерения взаимного угла по линии. В прошлом трудности непосредственного измерения угла с помощью средств телепередачи фазы напряжения заставляли использовать косвенное измерение угла, наиболее распространенные способы которого основываются на определении амплитуды тока или комплексного сопротивления в месте подключения автоматики [13]. Недостатком этих способов является большой разброс значений угла срабатывания АЛАР вследствие различного возможного состава и структуры связей в сечении при разных схемах и режимах ЭЭС. Особо сложные условия для селективной работы АЛАР возникают при многочастотном асинхронном режиме по нескольким сечениям. Дальнейшее развитие селективной АЛАР привело к созданию многофункционального устройства, позволяющего не только ликвидировать уже возникший асинхронный режим, но и предотвращать его возникновение. Это устройство реализует две ступени управляющих воздействий [13]. Первая призвана предотвратить нарушение устойчивости, для чего производится отклю-

чение генерации в избыточной части системы и пуск быстрого резерва либо отключение второстепенной нагрузки в дефицитной части. Если эти управляющие воздействия недостаточны и предотвратит асинхронный режим не удастся, срабатывает вторая ступень автоматики и проводит разделение энергообъединения.

Принципиально новые возможности реализации селективной автоматики предотвращения и ликвидации асинхронного режима (САПЛАР) открывает использование синхронизированных измерений фаз напряжений с помощью устройств РМУ [12]. Принципы построения модифицированной САПЛАР следующие.

Потеря синхронизма в работе ЭЭС по какому-то сечению может быть вызвана двумя основными причинами:

- превышением предельно допустимой пропускной способности сечения и нарушением вследствие этого аperiodической статической устойчивости системы;
- нарушением динамической устойчивости в результате возмущения на одной из связей или вблизи рассматриваемого сечения.

В обычных случаях индикатором нарушения синхронизма и начала асинхронного режима является разность фаз напряжений по концам наиболее критичной связи рассматриваемого сечения. Другими словами, существует некоторое предельное значение разности фаз напряжения  $\delta_{lim}^{as}$ , превышение которого свидетельствует о начале асинхронного режима.

Для того, чтобы отстроиться от подобной критической ситуации, необходимо поддерживать загрузку сечения не выше некоторого допустимого уровня, соответствующего

$$\delta_{lim} < \delta_{lim}^{as} \quad (4)$$

Разница между  $\delta_{lim}$  и  $\delta_{lim}^{as}$  должна учитывать уровень нерегулярных колебаний перетоков по связям и необходимость обеспечения динамической устойчивости ЭЭС при штатных возмущениях.

С учетом сказанного, ЭЭС может находиться в четырех состояниях (рис. 4): безопасном, опасном, аварийном (асинхронный режим), послеаварийном. Нахождение ЭЭС в безопасном состоянии определяется условием

$$|\delta_{ij}| < \delta_{lim} \quad (5)$$

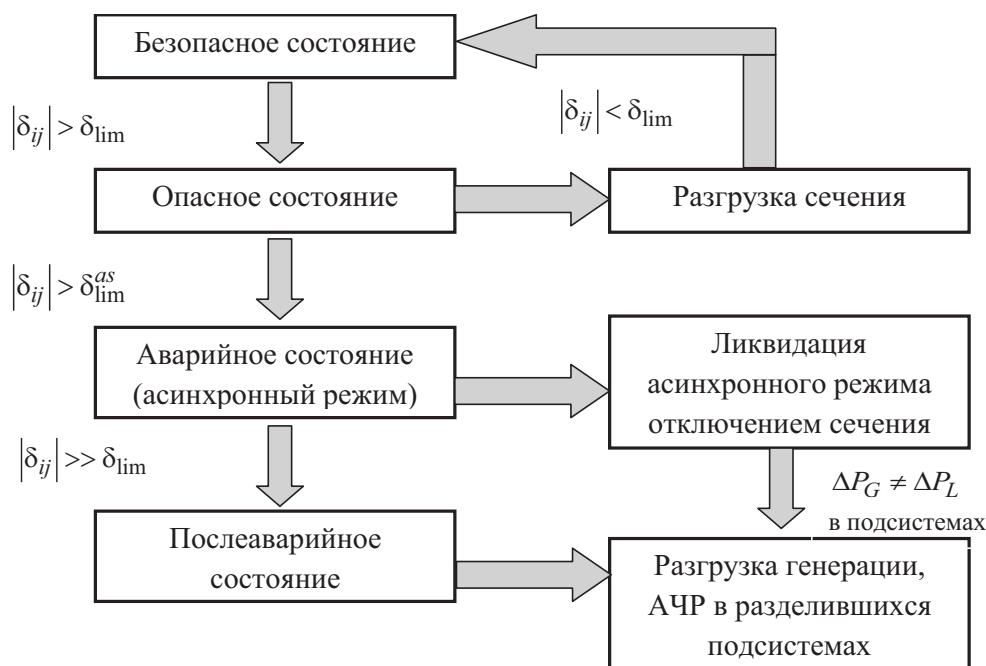


Рис. 4. Схема взаимосвязи состояний ЭЭС и управляющих воздействий в САПЛАР

Текущее значение  $\delta_{ij}(t)$  отслеживается по измерениям РМУ. В опасное состояние ЭЭС переходит при

$$|\delta_{ij}| > \delta_{lim} \quad (6)$$

Для того, чтобы ЭЭС вернулась в безопасное состояние, требуются упомянутые выше управляющие воздействия по разгрузке сечения. Если этих управляющих воздействий достаточно, ЭЭС возвращается в нормальное состояние (см. рис. 4). В случае недостаточности управляющих воздействий система переходит в аварийное состояние (асинхронный режим), прерывание которого выполняется отключением сечения (делением ЭЭС).

При неуспешном делении ЭЭС аварийная ситуация может развиваться, и послеаварийное состояние может оказаться тяжелым вплоть до полного погашения системы. В случае успешного деления происходит балансирование генерации и нагрузки в разделившихся подсистемах путем отключения генерации в избыточной подсистеме и действия автоматической частотной разгрузки (АЧР) в дефицитной подсистеме. Послеаварийное состояние в этом случае окажется менее тяжелым по сравнению с предыдущим.

В [12] приведены тестовые исследования, демонстрирующие работоспособность предложенного подхода.

Существенные изменения в структуре, организации и режимах работы ЭЭС требуют совершенствования и развития принципов и систем управления режимами ЭЭС. Использование новых средств измерения параметров режимов и управления ими, современных средств коммуникаций, новых информационных и компьютерных технологий, методов искусственного интеллекта и теории управления позволяет решить эту проблему на принципиально новой основе и с существенно большей по сравнению с существующим положением эффективностью.

Основными направлениями развития принципов и систем управления режимами ЭЭС является реализация методов распределенного управления режимами, усиление координации задач управления во временном, территориальном и ситуативном аспектах и активное использование новых средств и интеллектуальных технологий для мониторинга режимов ЭЭС и управления ими. Приведенные в статье конкретные разработки иллюстрируют эффективность используемых подходов и средств.

## Литература

1. *Воропай Н.И., Ретанц К., Суханов О.А.* Мониторинг и прогнозирование режимов совместно работающих энергообъединений и управление ими // *Электричество*. – 2011 – № 4 – С. 7–12.
2. *Voropai N.I., Rehtanz Ch.* Coordination of operation and emergency control of jointly operating power grids // 3rd International Conference “Actual Trends in Development of Power System Protection and Automation”, Saint Petersburg, Russia. May 30 – June 3. – 2011. – 5 p.
3. *Воропай Н.И.* Задачи повышения эффективности оперативного и противоаварийного управления электроэнергетическими системами // *Энергоэксперт*. – 2009. – № 4. – С. 36–41.
4. *Суханов О.А., Шаров Ю.В.* Иерархические модели в анализе и управлении режимами электроэнергетических систем. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007. – 286 с.
5. *Колосок И.Н., Коркина Е.С., Суханов О.А.* Алгоритмы распределенного оценивания состояния больших энергосистем // *Электричество*. – 2011. – № 4. – С. 27–37.
6. *Гамм А.З.* Алгоритмы декомпозиции для решения проблемы оценивания состояния ЭЭС // *Электронное моделирование*. – 1983. – № 3. – С. 31–38.
7. *Shahidehpour M., Wang Y.* Communication and control in electric power systems. Application of parallel and distributed processing. – New York: John Wiley & Sons Inc., 2003. – 334 p.
8. Автоматизация управления энергообъединениями / Совалов С.А., Семенов В.А., Руденко Ю.Н. и др.; Под ред. С.А. Совалова. – М.: Энергия, 1979. – 432 с.
9. Управление мощными энергообъединениями / Воропай Н.И., Ершевич В.В., Лугинский Я.Н. и др.; Под ред. С.А. Совалова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 256 с.
10. Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы / Гам А.З., Глазунова А.М., Гришин Ю.А., Колосок И.Н. и др. // *Электричество*. – 2009. – № 6. – С. 22–29.
11. *Haeger U., Goerner K., Rehtanz Ch.* Hardware model of a dynamic power flow controller // 2011 IEEE Power Tech Proceedings, Trondheim, Norway, June 19–23, 2011, 8 p.
12. Развитие системы противоаварийного управления для предотвращения и ликвидации асинхронных режимов энергосистемы с использованием регистраторов комплексных величин (РМУ) / Воропай Н.И., Ретанц К., Ефимов Д.Н., Хэгер У. и др. // *Электричество*. – 2011. – № 5. – С. 2–8.
13. *Гоник Я.Е., Иглицкий Е.С.* Автоматика ликвидации асинхронного режима. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 76 с.

## ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ И ЛИКВИДАЦИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НОВЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ<sup>1</sup>

*Воропай Н.И., Курбацкий В.Г., Томин Н.В.<sup>2</sup>*

Последние крупные аварии в Соединенных Штатах, Европе и России наглядно демонстрируют, что безопасное функционирование больших объединенных энергосистем не может быть достигнуто без полного понимания поведения системы в нештатных и аварийных ситуациях. Современная практика управления отдельными частями системы без знания «полной картины» приведет к еще большему количеству аварий и крупным отключениям. В данной работе предлагается новый подход к системе мониторинга и управления с целью выявления потенциальных проблем нестабильности напряжения прежде, чем они приведут к крупным авариям. Предлагаемый подход основан на самоорганизующихся нейронных сетях Кохонена. Сеть Кохонена обучается в автономном режиме и используется в режиме «online» для мониторинга и предсказания возможных аварий. Интеллектуальная система реализована в STATISTICA 8.0 и протестирована на 10-узловой и 42-узловой схемах IEEE электрической сети.

**Ключевые слова:** энергосистема, отключение, сеть Кохонена, стабильное напряжение, управление, мониторинг, прогнозирование.

Recent blackouts in the USA, Europe and Russian Federation have clearly demonstrated that secure operation of large interconnected power systems cannot be achieved without full understanding of the system behavior during abnormal and emergency conditions. Current practice of managing separate parts of the system without knowledge of the 'full picture' will lead to even greater blackouts. This paper proposes a novel approach to the system monitoring and control with the goal of identification potential voltage instability problems before they lead to major blackouts. The proposed approach is based self-organized Kohonen neural networks. The Kohonen network is trained off-line and then applied on-line to predict possible emergencies. The intelligent system was realized in STATISTICA 8.0 and tested on 10-bus and 42-bus IEEE power systems.

**Keywords:** power systems, blackouts, Kohonen network, voltage stability, control, monitoring, forecasting.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-08-00109, 12-01-00722).

<sup>2</sup>



Воропай Николай Иванович, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор кафедры Института систем энергетики имени Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, e-mail: voropai@isem.sei.irk.ru.



Курбацкий Виктор Григорьевич, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института систем энергетики имени Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, e-mail: kurbatskiy@isem.sei.irk.ru.



Томин Никита Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института систем энергетики имени Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, e-mail: tomin@isem.sei.irk.ru.

Каждый год в современных электроэнергетических системах (ЭЭС) происходят крупные аварии. Как известно, тяжелые аварийные ситуации в ЭЭС могут привести к перегрузке линий электропередач, нестабильности по напряжению в крупных регионах, каскадным отключениям и потере устойчивости. В достаточно короткий срок операторы ЭЭС должны реализовать соответствующие управляющие воздействия (УВ) и меры коррекции режима с целью предотвращения возможных отключений. Сбои в системах релейной защиты и устройств противоаварийной автоматики (ПАА), а также человеческие ошибки могут привести к крупномасштабным авариям [1–4]. При этом задача моделирования и анализа аварийных ситуаций ЭЭС усложняется вследствие большого количества взаимосвязанных процессов и схемно-режимных ситуаций в крупных ЭЭС, усложнения их топологии, а также широкого диапазона масштабов времени решаемых задач.

Как известно, для предотвращения каскадных аварий автоматизированные системы

ПАА необходимы. Но, к сожалению, во многих случаях, нынешнее поколение этих систем является неэффективным и ненадежным. В результате, мы имеем большое количество крупных аварий не только в России, но и по всему миру. Недавние примеры включают аварии в США и ЕС в 2003 г., в Москве в 2005 г., а также крупное масштабное отключение в Европе в 2006 г. [2,5].

Мониторинг крупной энергосистемы сейчас является довольно сложной задачей. При этом ситуация усугубляется, когда в экстренных случаях требуется выработка быстрых и эффективных решений. В этом случае полное представление о состоянии ЭЭС имеет первостепенное значение. Все большее число отключений в последние годы обусловлено именно неполнотой информации о текущем состоянии ЭЭС. Поэтому разработка нового поколения инструментов и систем для оценивания состояния, мониторинга и управления представляется чрезвычайно актуальной.

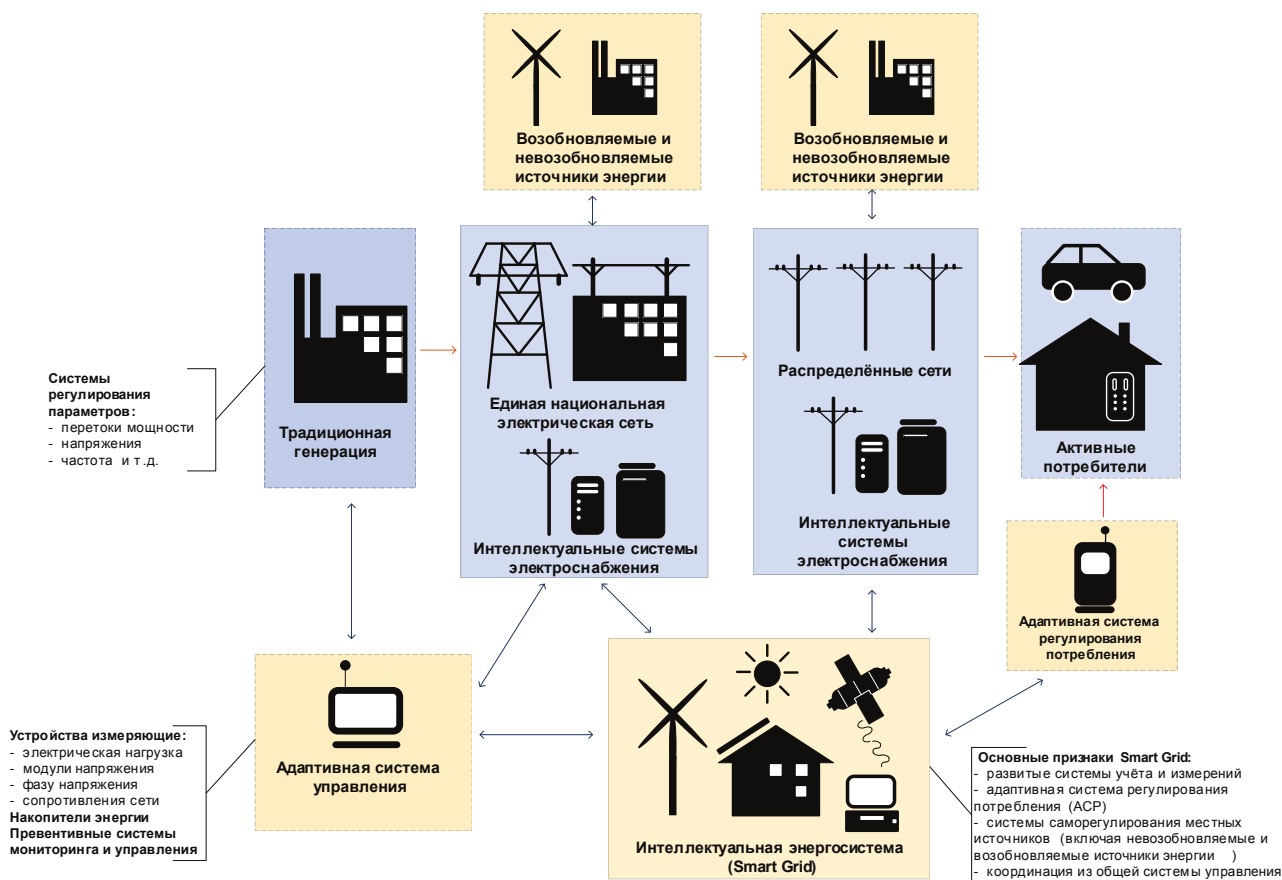


Рис. 1. Технологическая инфраструктура ИЭС ААС управления режимами ИЭС ААС – оперативное управление ими по данным мониторинга и прогнозирования режимных параметров

### Новая интеллектуальная концепция развития ЭЭС в России

В 2010 г. концепция ИЭС ААС [6] была разработана ОАО «НТЦ Электроэнергетики» и одобрена ОАО «ФСК ЕЭС». ИЭС ААС (рис. 1) представляет клиенто-ориентированную ЭЭС нового поколения, которая должна обеспечить доступность использования ресурса, надежное, качественное и эффективное обслуживание потребителей электроэнергии за счет гибкого взаимодействия всех ее субъектов (всех видов генерации, электрических сетей и потребителей) на основе современных технологических средств и единой интеллектуальной иерархической системы управления [7, 8].

Развитие методологии и методов управления режимами ЭЭС должно учитывать необходимость усиления координации и адаптивности управления на принципах ИЭС ААС. Новые средства измерения параметров режима энергосистем и управления ими, современные средства коммуникаций, новые информационные технологии и методы искусственного интеллекта позволят на новой основе и с существенно большей эффективностью построить одну из важнейших подсистем.

Временная последовательность отдельных этапов мониторинга и прогнозирования режимов ИЭС ААС и управления ими показана на рис. 2 [8].

### Современные системы мониторинга и выявления аварийных ситуаций

Значительные усилия исследователей прилагаются для эффективного решения задач в области исследования мониторинга и управления аварийными ситуациями [3, 9, 10];

- превентивные механизмы предназначены для смягчения последствий от влияния различных негативных факторов на ЭЭС;
- методы противоаварийного управления режимами разработаны для перехода ЭЭС в устойчивое состояние;
- методы восстановительного управления разработаны для того, чтобы остановить распространение нестабильности в ЭЭС, а также с целью предотвращения отключений.

В недавно завершившемся международном проекте ICOEUR была предложена новая многослойная архитектура системы мониторинга для крупных ЭЭС [11]. Данная система основана на определенных физических уровнях (слоях), которые в действительности представляют собой объединенные энергетические системы, состоящие из нескольких подсистем. Кибернетический слой содержит в основном коммуникационную систему. Измерения поступают главным образом от систем SCADA и WAMS и дополняют друг друга. В распределенном слое центры управления контролируют свои собственные подсистемы. Для мониторинга каждый центр управления реализу-

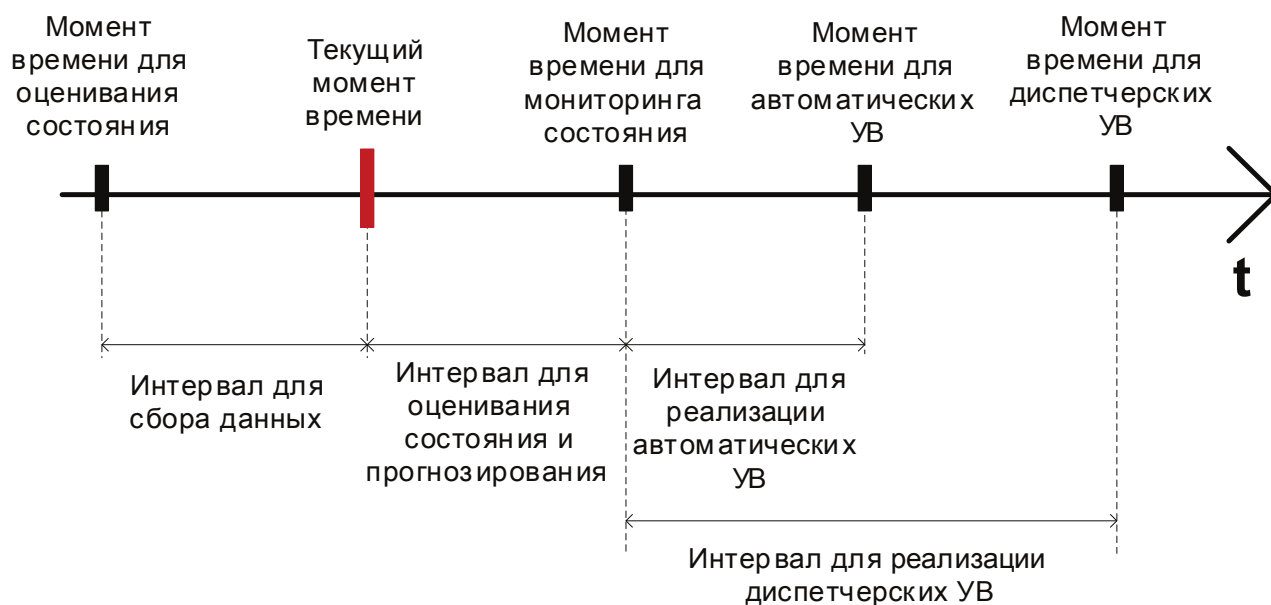


Рис. 2. Временная диаграмма мониторинга, прогнозирования и управления в ИЭС ААС

ет свой собственный алгоритм оценки состояния, расчета нагрузок и другие функции. Значения УВ оказывают влияние только на свои собственные подсистемы и выполняются непосредственно до тех пор, пока граничные значения остаются неизменными.

Существующие системы мониторинга во многом используют методы сбора данных для получения данных от различных датчиков с целью обнаружения и предупреждения о потенциально опасных участках в ЭЭС. Однако современные системы плохо оснащены алгоритмами и блоками принятия решений при большом количестве взаимосвязанных данных. Такие системы мониторинга не учитывают увеличения сложности в режимах работы крупных ЭЭС, что приводит к сбору огромного количества данных, а не информации о состоянии системы.

В последние годы нестабильность по напряжению является одной из основных причин отключений в электрических сетях [2, 5, 12]. Анализ крупных системных аварий показывает, что практически все они протекали по одному сценарию: после первого серьезного возмущения спустя некоторое время следовали множественные возмущения, которые приводили к погашению большей части ЭЭС [13]. Фаза развития аварии после первого возмущения представляла собой относительно продолжительный и спокойный период с нормальными уровнями частоты и напряжений в системе, за которым следовала лавина напряжения, длящаяся несколько секунд [14, 15]. Первое серьезное возмущение приводит к увеличению потерь реактивной мощности в системе и к увеличению выработки реактивной мощности синхронными машинами, находящимися в непосредственной близости от места повреждения. Таким образом, первое возмущение вызывает локальную проблему. Спустя некоторое время дефицит реактивной мощности в аварийной подсистеме может существенно возрасти, например, вследствие отключения перегруженного генератора, что в свою очередь, приведет к расширению зоны дефицита реактивной мощности и коллапсу по напряжению близлежащих подсистемах и системы в целом.

В данной работе предлагается новый подход к системе мониторинга и управления аварийными режимами с целью выявления потенциальных проблем нестабильности по напряжению, прежде чем они могут привести к значительным отключениям в электрических сетях.

### **Интеллектуальный подход к системе мониторинга и выявления аварийных ситуаций ЭЭС**

Концепция интеллектуального мониторинга включает следующие этапы:

- сбор данных;
- кластеризация состояний ЭЭС;
- интерпретация полученных кластеров состояния для того чтобы оператор смог выработать превентивные меры.

Первый этап заключается в сборе данных, предоставляемых системой SCADA. Эти данные подаются в системы предварительной обработки данных, которые выявляют наиболее важные и критические данные, оказывающие влияние на развитие режима.

Вторым этапом является кластеризация состояний ЭЭС. Цель этой процедуры заключается в выяснении, насколько опасно то или иное состояние системы. Авторы предлагают для реализации этой задачи использовать самообучающиеся и самоорганизующиеся нейронные сети Кохонена [16], которые используют набор состояний, основанный на различных смоделированных ситуациях в энергосистеме. Кластеры формируются по тестовым ситуациям, представляющим собой нормальные и аварийные режимы ЭЭС.

Третий этап состоит в интерпретации текущего состояния системы. В этом случае основной целью является ранжирование режимов работы ЭЭС на различные состояния с точки зрения их потенциальной способности перейти в область динамической неустойчивости. Все состояния делятся на нормальные, предупредительные и аварийные, которые могут быть представлены оператору ЭЭС для того, чтобы он имел возможность принять необходимое решение в требуемых временных рамках.

На рис. 3 представлена обобщенная блок-схема предложенного подхода для решения задачи интеллектуального мониторинга [17–19]. Данная схема состоит из двух основных режимов работы: «online» и «offline». Как видно из рис. 3, автономный процесс состоит из двух блоков: «Формирование выборки» и «Схема кластеризации». Для того чтобы избежать численных трудностей в расчетах и предотвратить доминирование одного параметра над другими, смоделированные данные подвергаются предварительной обработке. После этого преобразованный входной вектор поступает в блок кластеризации. Как было отмечено выше, в ка-

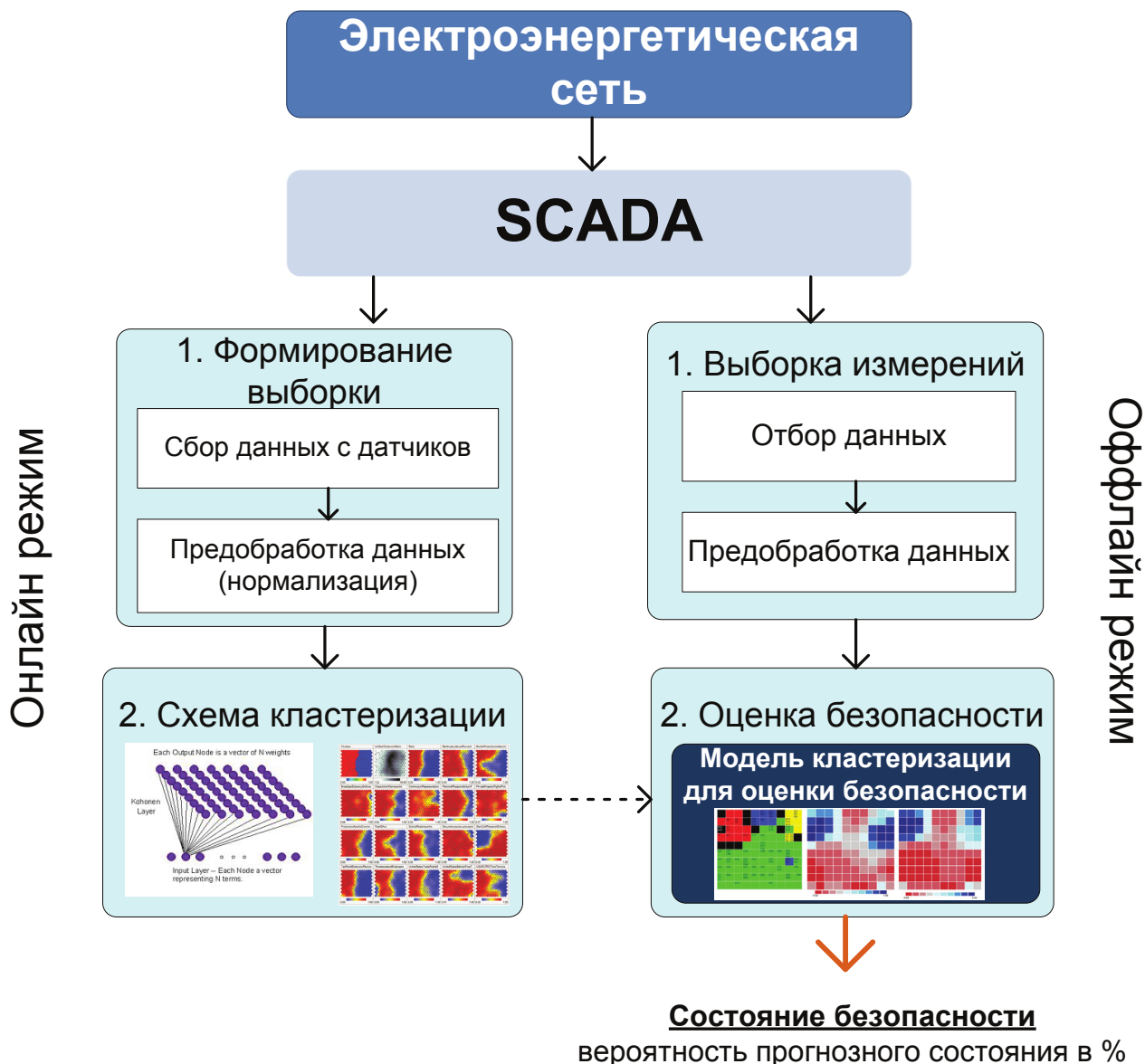


Рис. 3. Основная блок-схема предложенного подхода для оценивания и классификации состояния системы

честве схемы кластеризации используется сеть Кохонена.

Автономный процесс формирует кластерную модель оценки безопасности состояния ЭЭС для непосредственного использования в режиме «online». В этом режиме используются измерения в реальном времени, поступающие в обученную модель от системы SCADA. Блок выбора компонентов снижает огромную размерность входного вектора. Выбор наиболее важных компонент (понижение размерности) имеет большое значение в задачах классификации и кластеризации. В настоящей работе для решения этой задачи используется гибридный генетический алгоритм.

Таким образом, в режиме «online» разработанная модель позволяет оператору отслеживать текущее состояние безопасности режима работы ЭЭС, при этом всякий раз предупреждая о возможных утяжеленных режимах и аварийных ситуациях в электрических сетях. Важно также отметить, что оператор получит прогнозную оценку безопасности как некую вероятность состояния в процентах (например, вероятность чрезвычайной ситуации составляет 85 %).

Основная идея использования нейросетевого классификатора Кохонена заключается в создании модели, которая обучается классифицировать (разбивать на кластеры), отслеживать и предсказывать аварийные ситуации. Кластери-



зация состояний основана на критериях «аварийный» или «неаварийный» режим, которые в свою очередь подразделяются на «нормальный», «утяжеленный (предупредительный)», «аварийный (корректируемый)» и «аварийный (не корректируемый)». В этом случае:

- *нормальное состояние* означает, что все параметры ЭЭС поддерживаются в пределах указанной нормы эксплуатации;
- *утяжеленное (предупредительное) состояние* означает, что некоторые из параметров системы превышают указанные нормы (например, напряжение на шине может превышать  $\pm 5\%$ , но остается в пределах  $\pm 10\%$ );
- *аварийное (корректируемое) состояние* означает, что УВ все еще могут помочь системе избежать более серьезной нестабильности и тем самым избежать развития крупной аварии;
- *аварийное (некорректируемое) состояние* означает, что текущая ситуация не может быть исправлена и неминуема крупная авария.

### Экспериментальные расчеты

Предлагаемая интеллектуальная система реализована в STATISTICA 8.0. В качестве инструмента моделирования режимов работы тестовой электрической сети использовались программные продукты Matlab и PSAT. Необходимые расчеты установившегося режима и длительных переходных процессов выполнялись в среде PSAT.

В данной статье предлагаемая модель была протестирована на электрической схеме IEEE RTS-96 [8]. Первоначальная система имела 24 узла и в ней отсутствовали динамические элементы. После специальной модификации система включала 42 узла, как показано на рис. 4. Для проверки предлагаемого подхода по оценке стабильности используемая электрическая сеть подвергалась различным возмущениям, в том числе приводящие к коллапсу напряжения.

Во время процесса были использованы два типа автоматического управления:

- управление на базе традиционной автоматики;
- управления на базе мультиагентной автоматики.

### Расчетный пример с использованием традиционной автоматики.

- 1 секунда. Потеря трансформаторов на шинах 102–209 и генератора на шине 309, что приводит к незначительному падению первичного

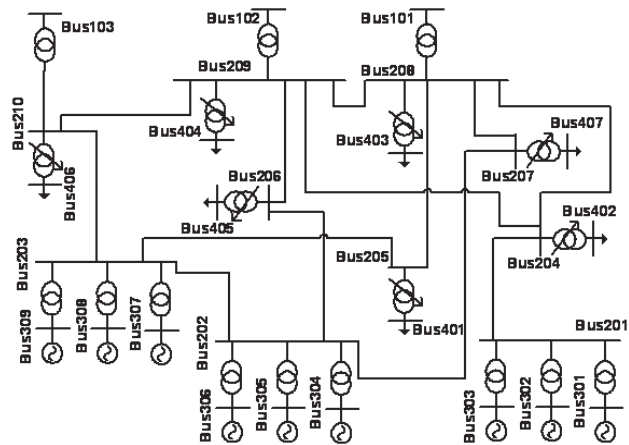


Рис. 4. Фрагмент модифицированной электрической сети IEEE RTS-96

напряжения на нагрузке подстанций. Позже РПН начинает действовать, приводя к росту вторичного напряжения. При этом первичное напряжение снижается, хотя в целом, при действии автоматики РПН избыток реактивной мощности уменьшаются в подсистеме.

- 200–201 секунды. Потеря генератора, подключенного к шине 306 из-за перегрузки, сразу же приводит к потере другого генератора, подключенного к шине 305. Выход из строя генераторов на шинах 305 и 306 немедленно приводит к коллапсу напряжения всей подсистемы.

На рис. 5 представлена полученная топологическая карта сети Кохонена. Кластеры, сформированные сетью Кохонена, отражают определенные режимы работы тестируемой электрической сети энергосистемы:

- нормальное состояние (normal) – зона  $3^3$  А;
- утяжеленное (предупредительное) состояние (alert 1–5) – зона В;
- аварийные состояния 1 и 2 (корректируемые) (emergency 1–2) – область С;
- аварийное состояние 3 (некорректируемое) (emergency 3) – область D.

Экспериментальные расчеты для этого случая наглядно демонстрируют, что предлагаемая интеллектуальная система оперативно реагирует на изменения режимов работы ЭЭС и что особенно

<sup>3</sup> Под зоной в данной работе понимается особая область на топологической карте Кохонена, включающая в себя один или несколько кластеров, отражающих близкое состояние системы.

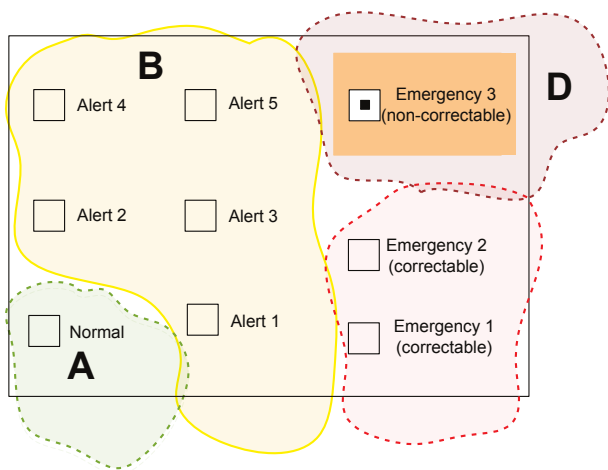


Рис. 5. Полученная топологическая карта Кохонена

важно, с определенным упреждением предсказывает развитие возможной аварийной ситуации.

Так, после первого и второго нарушения ( $t = 1$  с) система активировала кластер “Alert 1”. Это означает, что система находится в утяжеленном состоянии, в зоне В. Начиная с момента времени  $t = 21, 23$  с, активировался кластер “Alert 2”, который соответствует переходу электрической сети к более утяжеленному состоянию системы (рис. 6а). Кроме того, в этот момент времени модель SOM сообщила о возможном аварийном событии. Начиная с момента времени  $t = 28,48$  с, модель предупреждает о возможном развитии более серьезной аварийной ситуации.

После третьего и четвертого возмущения ( $t = 200$  с) активируется кластер “Emergency 3”,

что соответствует крупной аварии (коллапсу напряжения) в электрической сети (рис. 6б).

На рис. 7 показаны изменения уровней первичного и вторичного напряжений на шинах подстанций для расчетного случая работы традиционной автоматики, а также приведены основные сообщения от кластерной модели оценки безопасности ЭЭС.

**Расчетный пример с использованием мульти-агентной автоматики**

- 1 секунда. Потеря трансформаторов на шинах 102–209 и генератора на шине 309, что приводит к незначительному падению первичного напряжения на нагрузке подстанций. Мультиагентная автоматика определяет перегрузку нескольких генераторов и блоков РПН от нагрузки подстанций. При этом автоматика координирует источники реактивной мощности (генераторов и трансформаторов передач), чтобы исключить перегрузку и возникновения неустойчивости по напряжению.

- 200–201 секунды. Отключения генераторов на шинах 305 и 306 не приводят к неустойчивости по напряжению. В дальнейшем мультиагентная автоматика начнет отключать нагрузки.

В этом расчетном случае предложенная модель правильно отреагировала на изменения режима работы ЭЭС и работу мультиагентной автоматики, прежде всего корректно «почувствовав», что утяжеление ситуации при поддержке автоматики не приведет к развитию крупной и некорректируемой аварийной ситуации.

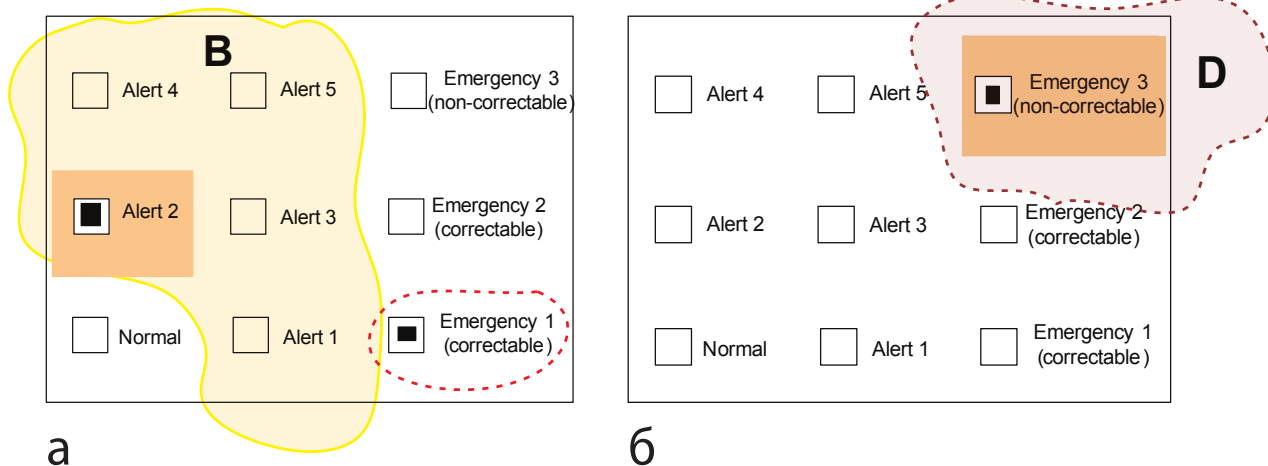


Рис. 6. Примеры карт Кохонена в различные моменты времени

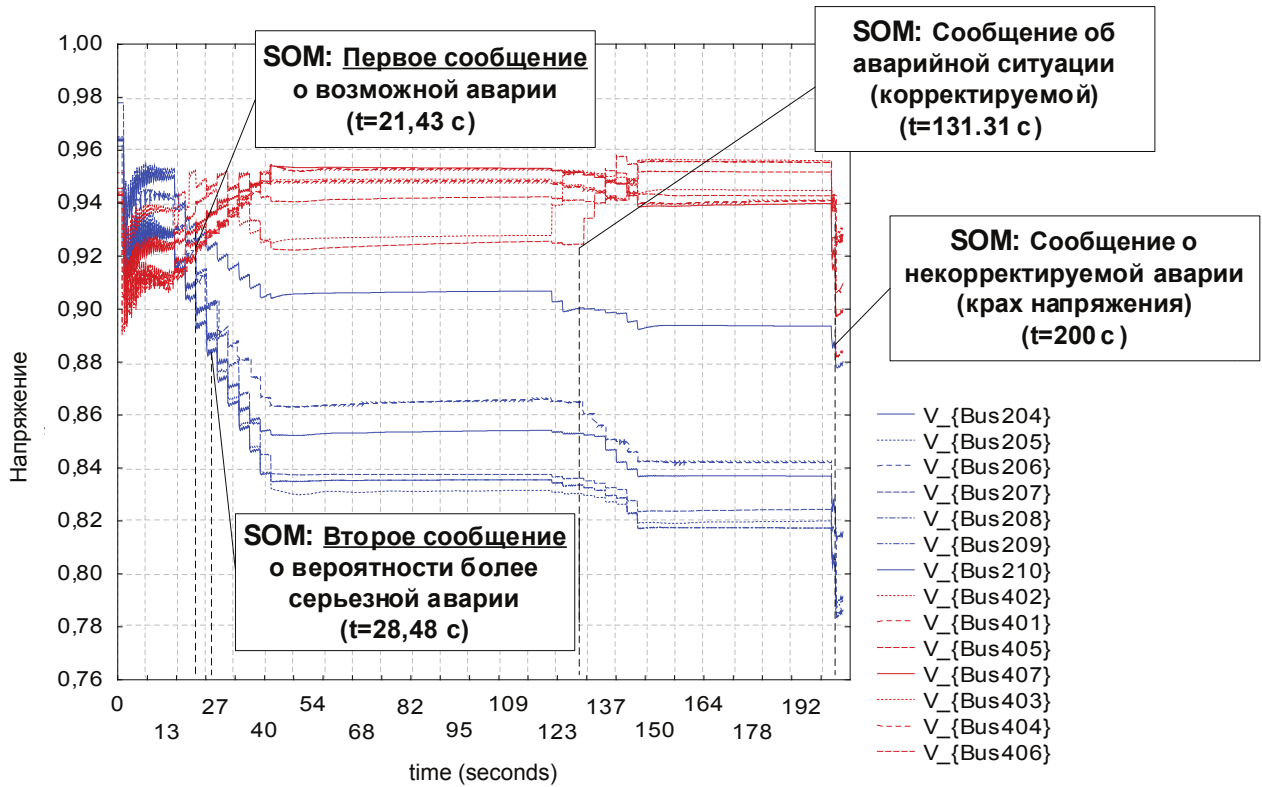


Рис. 7. Изменения уровней напряжения на шинах и сообщения кластерной модели для оценки безопасности системы

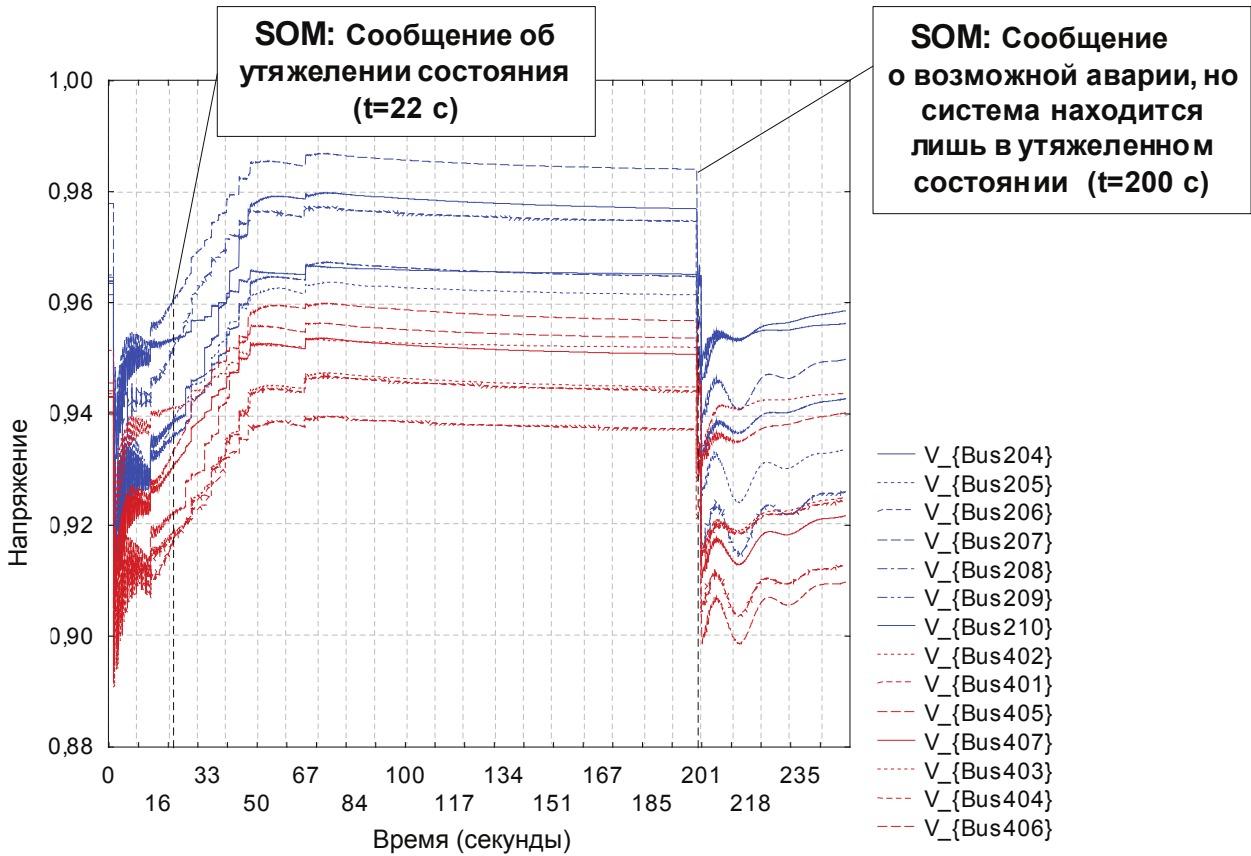


Рис. 8. Изменения уровней напряжения на шинах и сообщения кластерной модели для оценки безопасности системы

Как и в предыдущем случае, после первого и второго нарушения ( $t = 1$  с) система активировала кластер “Alert 1”, что соответствует утяжелению режима. Однако в момент времени  $t = 22$  с тестируемая система не переходит в более утяжеленное состояние, по аналогии с предыдущим расчетным случаем, и в этот период времени модель не сообщает о возможной чрезвычайной ситуации. Важно отметить, что после третьего и четвертого нарушений ( $t = 200$  с) тестируемая система не переходит в аварийное состояние, хотя и остается в тяжелом состоянии “Alert 2”.

На рис. 8. показано изменения уровней первичного и вторичного напряжений на шинах подстанций для расчетного случая работы мультиагентной автоматики, а также показаны

основные сообщения от кластерной модели оценки безопасности ЭЭС.

В работе предложен новый подход к системе мониторинга и контроля с целью выявления потенциальных проблем с нестабильностью по напряжению, прежде чем они приведут к крупным отключениям. Подход основан на самоорганизующейся нейронной сети Кохонена. Результаты расчетов показывают, что сеть Кохонена может определить потенциально опасные состояния системы и предупредить оператора энергосистемы. Кроме того, проведенные исследования свидетельствуют о том, что предложенная система успешно работает совместно мультиагентной автоматикой, позволяя более эффективно реализовать концепцию превентивного противоаварийного управления.

### Литература

1. *Makarov Yu.V., Reshetov V.I., Stroev V.A., Voropai N.I.* “Blackout prevention in the United States, Europe and Russia,” in 2005 Proc. of the IEEE, 93 (11). – PP. 1942–1955.
2. IEEE PES PSDP Task Force on Blackout experience, mitigation, and role of new technologies, blackout experiences and lessons, Best practices for system dynamic performance, and the role of new technologies, IEEE Special Publication 07TP190, July, 2007.
3. *Wang X., Shao W., Vittal V.* “Adaptive corrective control strategies for preventing power system blackouts,” in Proc. of 15th PSCC, Liege, August, 2005.
4. Report of Commission of JSC “UES of Russia” on the investigation of blackout that occurred on May 25, 2005, <http://www.rao.ru/ru/news/account/show.cgi?content.htm> (in Russian).
5. IEEE PES CAMS Task Force on Understanding, Prediction, Mitigation and Restoration of Cascading Failures “Initial Review Of Methods For Cascading Failure Analysis In Electric Power Transmission Systems,” In Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Pittsburgh, PA USA, July, 2008.
6. Концепция развития интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью. – М. – 2011.
7. *Дорофеев В.В., Макаров А.А.* Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. – 2009. – №4. – С. 28–34.
8. *Воропай Н.И.* Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2011. – №3. – С. 11–15.
9. *Negnevitsky M.* “Computational Intelligence Approach to Crisis Management in Power Systems”, International Journal of Automation and Control. – Vol. 2, No. 2/3. – 2008. – PP. 247–273.
10. *Le T. L., Negnevitsky M., Piekutowski M.* “Network Equivalents and Expert System Application for Voltage and VAR Control in Large-Scale Power Systems”, IEEE Trans. PowerSystems. – Vol. 12, No. 4. – November 1997. – PP. 1440–1445.
11. Project acronym ICOEUR. Intelligent Coordination of Operation and Emergency Control of EU and Russian Power Grids.
12. *Kurbatsky V., Tomin N.* “Smart System of Monitoring and Forecasting for Electric Power Systems,” In IEEE Proc. of the International Conference “IEEE POWERCON 2012”, Auckland, New Zealand. – October 30 – November 2, 2012.
13. *Cagnon J.-M., Lachs W., Gomes P.e.a.* Defense plan against extreme contingencies. – CIGRE Task Force C2.02.24, 2007.
14. *Lachs W.R.* Controlling grid integrity after power system emergencies. – IEEE Trans. Power Systems. – 2002. – Vol. 17. – No.2.
15. *Lachs W.R.* Voltage instability in interconnected power systems: A simulation approach. – IEEE Trans. Power Systems. – 1992. – Vol. 7, No.2.

16. Voropai N., Kurbatsky V., Panasetsky D., Tomin N. Prevention and elimination of power system emergency states by means of new prediction and control methods. Proc. of 8th World Energy System Conference “WESC’2010”, Romania, Targoviste. – 2010. – PP. 110–116.

17. Voropai N.I., Kurbatsky V.G., Tomin N.V., Panasetsky D.A. “Preventive and emergency control of intelligent power systems,” In Proc. of the International Conference “IEEE ISGT 2012”. – Berlin, Germany. – October 14–17, 2012.

18. Tomin N. “Intelligent Monitoring and Forecasting of the Expected Operating Conditions of Electric Power System,” In Proc. 3rd International Youth Conference on Energetics. – 2011. – Portugal, Leiria.

19. Voropai N., Kurbatsky V., Tomin N. and other. Coordinated Intelligent Operation and Emergency Control of Electric Power Systems. Chapter 1, Innovation in Power, Control, and Optimization: Emerging Energy Technologies. IGI Global, 2011. – PP. 1–56.

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ И РАЗВИТИЕ РАВНОВЕСНОГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЙ И ТРАЕКТОРИЙ<sup>1</sup>

Каганович Б.М., Кейко А.В., Шаманский В.А., Зароднюк М.С.<sup>2</sup>


Содержание статьи составляют экологический анализ сжигания топлив в стационарных и транспортных энергетических установках и развитие методов этого анализа на основе положений равновесной термодинамики. Раскрывается резкое увеличение возможностей термодинамического моделирования в связи со стремительным развитием в настоящее время вычислительной техники, вычислительной математики и информационных технологий. Обосновываются допустимость и плодотворность использования в энергетике равновесных моделей для определения как экстремальных состояний диссипативных систем, так и траекторий, по которым эти состояния достигаются.

**Ключевые слова:** равновесное состояние, равновесная траектория, диссипативная система, необратимый процесс, самоорганизация, горение, экология, математическое программирование, динамическое программирование.

The paper presents on environmental analysis of fuel combustion in stationary and mobile energy installations and the development of methods of such analysis on the base of equilibrium thermodynamics statements. A significant increase in the possibilities of thermodynamic modeling is shown which is due to quick present development in computers, calculus mathematics and information technologies. Equilibrium models of extreme states of dissipative systems and of trajectories along which this states are attained are substantiated to be acceptable and fruitful in energy science.

**Keywords:** equilibrium state, equilibrium trajectory, dissipative system, irreversible process, self-organization, combustion, ecology, mathematical programming, dynamic programming.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-08-00245).

<sup>2</sup>  Каганович Борис Моисеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, e-mail: thermo@isem.sei.irk.ru.



Кейко Александр Владимирович, доктор технических наук, заведующий отделом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, e-mail: keiko@isem.sei.irk.ru.



Шаманский Виталий Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, e-mail: vita@isem.sei.irk.ru.



Зароднюк Максим Сергеевич, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, e-mail: max@isem.sei.irk.ru.

### Модель экстремальных промежуточных состояний

Термодинамический анализ процессов переработки и сжигания топлив начал проводиться в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (бывшем Сибирском энергетическом институте) с 80-х гг. прошлого века в рамках исследований перспективной роли угля в отечественной энергетике. Для выполнения этих исследований были созданы первые модификации модели экстремальных промежуточных состояний (МЭПС) [1–4]. Непосредственное назначение МЭПС заключалось в определении предельных технико-экономических и экологических показателей (коэффициентов полезного действия, расходов ресурсов, выбросов вредных веществ) угольных технологий. В отличие от традиционных моделей равновесной термодинамики, связанных с поиском состояний конечного равновесия, предложенная для анализа угольной энергетики модель позволяла просматривать всю область термодинамической достижимости  $D_t(y)$  из заданного исходного состояния  $y$  моделируемой системы и находить в ней промежуточное (или конечное ( $x^{eq}$ )) равновесное состояние  $x^{ext}$ , соответствующее экстремальному значению интересующего исследователя свойства.

МЭПС в [1–4] была изложена на языке математического программирования (МП), которое с точек зрения физика и инженера можно определить как математическую теорию равновесных экстремальных состояний. Действительно, фундаментом для построения МП стала «Аналитическая механика» Лагранжа [5], в которой первое единое математическое описание ньютоновской механики основывалось на принципах равновесия и экстремальности. Варьирование вида целевой функции при решении задач МП уже с помощью первых МЭПС позволило, не определяя траекторию изучаемого процесса, отыскивать не один, а целое множество возможных результатов, в определенной мере связывая между собой равновесные теории покоя и движения.

Более точно учитывать влияние особенностей траекторий процессов на достижимые результаты стало возможным на втором этапе развития МЭПС (2001–2010 гг.) после включения в них записанных в термодинамической форме (без использования переменной времени) ограничений на необратимую макрокинетику [6–10]. Во время выполнения поддержан-

ного РФФИ проекта выявилась возможность полностью формализованных построения допустимых траекторий и выбора среди них оптимальных с помощью уже созданных вариантов МЭПС. Реализация этой возможности составляет содержание начавшегося третьего этапа в развитии МЭПС, конечный результат которого видится в превращении классической равновесной термодинамики в единую замкнутую теорию равновесных состояний и равновесных траекторий, распространяемую на консервативные и диссипативные системы, обратимые и необратимые процессы, явления деградации и самоорганизации.

В анализе равновесных экстремальных состояний и первых работах по совместному анализу состояний и траекторий наибольшее применение нашла модификация МЭПС, относящаяся к физико-химическим системам с фиксированными температурой  $T$ , давлением  $P$  и исходном составом реагентов  $y$ :

$$\text{найти } \text{extr} \left[ F(x) = \sum_{j \in J^{ext}} c_j x_j \right] = F(x^{ext}) \quad (1)$$

$$\text{при условиях } Ax = b, \quad (2)$$

$$D_t(y) = \left\{ x : \begin{array}{l} x \leq y, \\ \varphi_r(x_r, z_r) \leq \psi_r, r \in R^{lim} \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$G(x) = \sum_j G_j(x) x_j, \quad (5)$$

$$x_j \geq 0, \quad (6)$$

где  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$  – вектор состава (например, количество молей компонентов) системы;  $y \subset x$  – вектор исходного состава;  $c_j$  – коэффициент, ранжирующий интересующее исследователя свойство  $j$ -го компонента  $x$  (например, полезность или вредность);  $J^{ext}$  – множество индексов компонентов, экстремальную концентрацию смеси которых требуется определить;  $A = (m \times n)$  – матрица содержаний элементов в компонентах системы;  $b$  – вектор количества молей элементов;  $\varphi_r$  и  $\psi_r$  – лимитирующая кинетическая функция  $r$ -го компонента  $x$  или (и) какого-либо другого параметра  $z_r$  и ее предельное значение соответственно;  $R^{lim}$  – набор индексов ограничений на макрокинетическую кинетику;  $G$  и  $G_j$  – энергии Гиббса системы и ее  $j$ -го компонента. Знак « $\leq$ »

в неравенстве (3) наряду с математической имеет и специфическую термодинамическую трактовку:  $x \leq y$ , если из  $y$  можно перейти в  $x$  по непрерывной траектории, вдоль которой  $G(x)$  монотонно не возрастает. Математический смысл (3) наиболее наглядно объясняется при отображении решаемой с помощью модели (1) – (6) задачи в пространстве характеристической функции  $G$ , в котором  $x$  и  $y$  измеряются в единицах энергии. Целевая функция (1) в данном случае определяет экстремальную концентрацию заданного набора веществ. Равенство (2) представляет материальный баланс. Выражения (3) и (4) описывают область достижимости из точки  $y$ . С помощью неравенств (4) задаются кинетические ограничения. Выбор формул для вычисления отдельных слагаемых под знаком суммы в правой части равенства (5) зависит от свойств рассматриваемой системы.

Монотонность характеристических термодинамических функций  $G(x)$  обуславливает обладание областью достижимости  $D_t(y)$  свойствами инвариантного многообразия [17]. Если при использовании основанного на МЭПС алгоритма неравенство (3) соблюдается на каждой вычислительной итерации, то получаемая в ходе расчета траектория движения от точки  $y$  к точке  $x^{\text{ext}}$  оказывается термодинамически допустимой. Уже это обстоятельство подталкивает к попыткам создания с помощью модели экстремальных промежуточных состояний метода построения макроскопических траекторий. Конечно, разумность таких попыток следует серьезно обосновать, что в определенной мере делается ниже.

#### Обоснование возможностей равновесных описаний обратимых и необратимых траекторий

Как известно, попытки Клаузиуса, Гельмгольца, Больцмана, Дж.Томсона, Планка и других ученых вывести уравнение траектории макроскопических процессов, удовлетворяющее и экстремальным принципам механики, и второму закону термодинамики, закончились неудачно и привели к пониманию необходимости статистического обоснования термодинамических закономерностей [11]. Авторы, основываясь на возможностях современных информационных технологий и вычислительной математики, отказались от использования общего уравнения моделируемого процесса и перешли к последовательному многошагово-

му принятию решений на ничтожно малых, но конечных отрезках времени ( $\tau$ ) (или пространства ( $x$ )) [12]. Для таких отрезков оказалось возможным установление связей между законами консервативных и диссипативных систем [9, 10, 12, 13].

При определении связей в [13] согласно [5], предполагалось, что описание любого процесса должно основываться на описании мгновений равновесия (покоя), для которых справедливо уравнение принципа виртуальных перемещений. Это уравнение можно записать в виде:

$$d\ell^{\text{mov}} - d\ell^{\text{res}} = 0, \quad (7)$$

$$\text{где } \ell^{\text{mov}} = \sum_j c_j(x) dx_j$$

$$\text{и } \ell^{\text{res}} = \sum_j \lambda_i(\varphi) d\varphi_i -$$

дифференциалы работ движущих сил и сил сопротивления;  $c$ ,  $x$ ,  $\lambda$  и  $\varphi$  – движущая сила, координата, множитель Лагранжа (сила сопротивления связи) и деформация связи;  $j$  – индекс движущих сил и соответствующих координат;  $i$  – индекс сопротивлений и связей.

При естественном предположении о стационарности процесса на ничтожно малом отрезке движения уравнение (7) можно заменить уравнением в конечных разностях

$$\Delta\ell^{\text{mov}} - \Delta\ell^{\text{res}} = 0 \quad (8)$$

и приведенные формулы дифференциалов – формулами:

$$\ell^{\text{mov}} = \sum_j c_j(x) \Delta x_j \text{ и } \ell^{\text{res}} = \sum_j \lambda_i(\varphi) \Delta \varphi_i.$$

Равновесия, к которым относятся силы  $c_j$  и  $\lambda_i$ , согласно Галилею, Ньютону, Д'Аламберу и Лагранжу, допускают двойственную трактовку: и как мгновений движения, и как состояний покоя. В виде функций состояния для стационарных процессов оказываются представленными динамическими величинами: работа, теплота, скорость, расход вещества, кинетические коэффициенты и др. В «Аналитической механике» такой функцией гениально была принята основная переменная этого произведения – работа. Также [5] соответствует предположение, что точка равновесия одновременно является и точкой экстремума. Однозначность выбираемого критерия экстремальности обу-



словливается однозначностью разделения сил (работ) на движущие и сопротивления.

Оптимальное решение (выбор суммарной траектории исследуемого процесса) в отличие от [5] определяется не в результате поиска интеграла функции состояния, а путем последовательного суммирования результатов, получаемых на отдельных шагах. В случае неоднородности шагов (отличий общего механизма, условий взаимодействия изменяемой системы с окружением, масштабов описания и др.) одновременно строится несколько оптимальных траекторий (для различных диапазонов значений искомым переменных), и на последнем шаге среди них выбирается соответствующая глобальному экстремуму целевой функции.

Для раскрытия связей между законами консервативных и диссипативных систем и возможностей их единого описания рассмотрим систему, над которой совершается работа ( $\ell^{\text{mov}}$ ), и работа сопротивления которой ( $\ell^{\text{res}}$ ) целиком переходит в теплоту  $q$ , передаваемую в окружающую среду и увеличивающую энтропию ( $S$ ) последней и изолированной системы (рассматриваемая система плюс окружение) в целом. Если дополнительно предположить, что расход организованной формы энергии, преобразуемой в работу, представим в виде функции, не зависящей от температуры ( $T$ ), то не зависящими от  $T$  оказываются представимы также  $\ell^{\text{mov}}$ ,  $\ell^{\text{res}}$  и  $q$ . Тогда от формулы дифференциала энтропии

$$dS = dq / T$$

можно перейти к выражению

$$\Delta S = \Delta q / T. \quad (9)$$

Из (9) в свою очередь следует, что

$$\partial^2(\Delta S) / \partial T^2 = 2\Delta q T^{-3} \geq 0, \quad (10)$$

т.е. вдоль оси температур достигаются минимальные значения прироста энтропии  $\Delta S$ , переданной системой окружению теплоты, температуры системы  $T$  и перепада температур между системой и окружением.

Поскольку энтропия изолированной системы в состоянии конечного равновесия достигает глобального максимума, то второму закону термодинамики на основе выражения (10) можно дать дополнительную интерпретацию.

Максимальное накопление энтропии осуществляется наиболее экономным способом, лишняя термическая энергия на это накопление не расходуется. Следовательно, второй закон в некоторых отношениях, как и экстремальные (вариационные) принципы механики, является законом бережливости. Действительно, из-за отсутствия лишней диссипации энергии не происходит и дополнительных затрат работ  $\ell^{\text{mov}}$  и  $\ell^{\text{res}}$ , и образования не связанной с их производством теплоты. Движение к «смерти» своих отдельных элементов природа тоже осуществляет по оптимальной траектории, соответствующей минимуму непосредственно не относящегося к назначению изучаемой системы расхода энергетических ресурсов.

Углубляется и трактовка одной из основных теорем неравновесной термодинамики [14] — теоремы Онсагера-Пригожина. Производство энтропии минимизируется не только, когда внешние силы препятствуют движению системы к точке конечного равновесия (в «неравновесном стационарном состоянии» [14]), но и по температурной координате при достижении этой точки.

Справедливость и важность неравенства (10) подтверждаются и его соответствием релятивистской термодинамике Планка [15] — Эйнштейна [16]. Энтропия в этой термодинамике является инвариантом относительно изменения скорости ( $v$ ) системы координат. Однако производство энтропии с ростом скорости сокращается, что объясняется законами изменения энергии, теплоты и температуры, которые определяются выражениями:

$$\begin{aligned} E &= E^0 / (1 - v^2 / c^2)^{0.5}, \\ q &= q^0 (1 - v^2 / c^2)^{0.5} \\ T &= T^0 (1 - v^2 / c^2)^{0.5} \end{aligned} \quad (11)$$

где  $E$  — зависящая от массы и скорости энергия моделируемой системы;  $c$  — скорость света; индекс «0» относится к покоящейся системе (относительно которой изменяется скорость  $v$ ). Из формул (11) видно, что при увеличении полной энергии  $E$  с ростом  $v$  производство теплоты и температура сокращаются. Отсюда с учетом ускорения хода часов (ростом значений, замеряемых промежутков времени) становится ясным уменьшение производной  $\partial S / \partial \tau$ , т.е. производства энтропии. Направление измене-

ния переменных, естественно, сохраняется при переходе из релятивистского пространства — времени в область, где становится справедливым принцип относительности Галилея. Этим подчеркивается универсальность положения о минимальности диссипации термической энергии и необходимости его дальнейшего использования в анализе связей между закономерностями консервативных и диссипативных систем и допустимости единого равновесного описания тех и других.

Связи особенностей протекания процессов в изолированных системах с особенностями поведения их подсистем обсуждались в [9, 10, 12, 13, 17]. Наиболее детально они рассматривались применительно к гидравлическим цепям, для анализа которых были созданы специальные модификации МЭПС. Основными переменными этих модификаций являлись расходы жидкости на ветвях сети, отображаемой схемой в виде одномерного множества — графа. Такие схемы и соответствующие модификации МЭПС оказались удобными и для моделирования механизмов физико-химических процессов. В моделях механизмов совокупность элементов системы, участвующая в каком-либо процессе, отображалась потоком (вещества, энергии, заряда) на соответствующий этому процессу ветви графа. С помощью моделей цепей было установлено, что в активных цепях (с источниками движущих сил) соблюдается принцип максимального действия, а в пассивных (без таковых) — наименьшего.

В [13] была предпринята попытка распространить полученные для цепей выводы на макроскопические системы любой природы. В ходе изложенного в [13] анализа рассматривалась система, которая содержит фиксированные разности потенциалов и образуемую в результате работы сил сопротивления теплоту полностью передает в окружение при постоянном перепаде температур. МЭПС такой системы имеет вид:

$$\text{найти } \text{extr} (1/T) \sum_j c_j x_j \quad (12)$$

$$\text{при условиях } Ax = b, \quad (13)$$

$$\sum_j c_j x_j - \sum_j k_j x_j^{\beta_j+1} = 0, \quad (14)$$

$$x_j \geq 0. \quad (15)$$

С помощью равенства (13) описываются материальные балансы. При записи работ сопротивления (вторая сумма в левой части (14)) принято, что координаты, вдоль которых направлены движущие силы, и деформации имеют один и тот же физический смысл; силы сопротивления  $\lambda_j = k_j x_j^{\beta_j}$  с ростом деформации не уменьшаются, т.е.  $\beta_j \geq 0$ .

Вторые производные от функции Лагранжа ( $L$ ) системы (12)–(15)

$$\partial^2 L / \partial x_j^2 = \lambda_{(14)} k_j (\beta_j + 1) \beta_j x_j^{\beta_j-1} \leq 0 \quad (16)$$

поскольку множитель Лагранжа  $\lambda_{(14)}$ , равный производной от  $L$  по ограничению (14) отрицателен. Ведь при росте компонент вектора  $x$  без соответствующего увеличения суммарной работы сопротивлений и производства теплоты, т.е. при нарушении равенства (14), зависящая от  $q$  энтропия должна уменьшаться. Следовательно, в активной закрытой системе при соблюдении в охватывающей ее изолированной системе второго закона термодинамики выполняется принцип максимального (стационарного) действия.

Поведение открытых пассивных систем, описываемых моделью

$$\text{найти } \text{extr} \sum_j k_j x_j^{\beta_j+1} \text{ при условии } A_x = Q, \quad (17)$$

где  $Q$  — вектор внешних независимых притоков и стоков вещества (энергии, зарядов), подчиняется принципу наименьшего действия. Это следует из неравенства

$$\partial^2 L / \partial x_j^2 = k_j (\beta_j + 1) \beta_j x_j^{\beta_j-1} \geq 0. \quad (18)$$

Конечно, приведенный предельно краткий анализ связей между закономерностями поведения консервативных и диссипативных систем представляет только начальный этап исключительно трудоемких исследований, посвященных раскрытию возможностей равновесной термодинамики.

#### Методика построения траекторий физико-химических процессов на основе метода динамического программирования

При многошаговом построении траекторий авторами для расчетов равновесных состояний, соответствующих отдельным шагам вычислительного процесса, использовался метод

внутренних точек [2, 6, 8], а для определения переходов от одного шага к другому, обеспечивающих наращивание оптимальных показателей эффективности процесса, – метод динамического программирования [12, 17–21] (ДП). В основу ДП положен сформулированный Р. Беллманом принцип оптимальности: «Оптимальное поведение обладает тем свойством, что каковы бы ни были первоначальное состояние и решение в начальный момент, последующие решения должны составлять оптимальное поведение относительно состояния, получающегося в результате первого решения» [18]. Приведенная формулировка дополнительно разъясняется утверждением о независимости вида оптимальной траектории после достижения какого-либо промежуточного оптимального состояния от предыстории движения к этому состоянию.

Поиск экстремума функции многих переменных на основе принципа оптимальности при использовании ДП заменяется многократным (пошаговым) поиском экстремума функции одной или небольшого числа переменных, т.е. решение одной сложной задачи заменяется решением гораздо большего числа простых задач. При этом функциональные (рекуррентные) уравнения записываются в виде

$$\left. \begin{aligned} F_j(x) &= \text{extr}(F_{j-1}(x) + F_{j-1,j}(x)), \\ F_{j+1}(x) &= \text{extr}(F_j(x) + F_{j,j+1}(x)), \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где  $F_{j-1,j}(x)$  – приращения целевой функции (управляемые переменные) соответственно при переходе от  $j-1$ -го к  $j$ -му и от  $j$ -го к  $j+1$  шагам построения траектории.

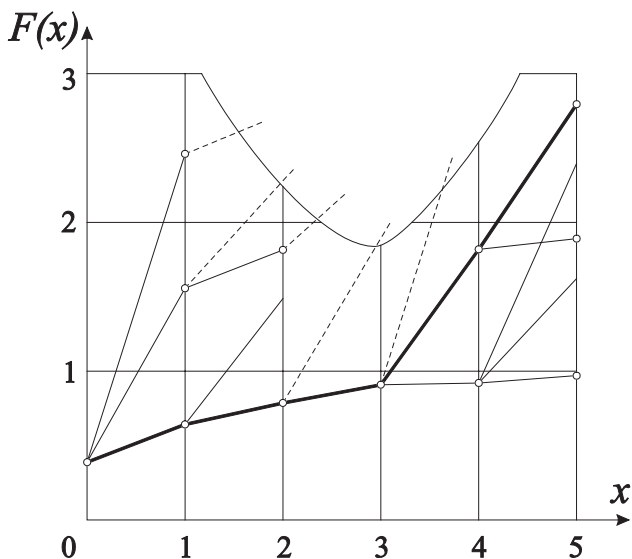
Используемые в ДП вычислительные процедуры при резком увеличении объема непосредственных компьютерных расчетов, что на современном уровне развития вычислительной техники не должно приводить к сколько-нибудь заметным трудностям, резко снижают затраты человеческого труда и неизмеримо повышают сами возможности решения многих сложнейших теоретических и прикладных задач. В рассматриваемом случае объем и сложность подготовки исходной информации сокращаются и благодаря простоте и универсальности предпосылок равновесной термодинамики, и вследствие перехода от определения характеристик движения к определению характеристик покоя. Последние вычисляются и измеряются несрав-

нимо проще, чем первые. Очевидным преимуществом многошаговых вычислений является возможность учета специфики отдельных шагов. Различными для рассчитываемых этапов могут приниматься физико-химические свойства и формализованные описания моделируемых процессов; аспекты изучения (превращения вещества и энергии, их перенос, фазовые переходы и т.д.); масштабы отображения (от нано- до макро-); условия взаимодействия с окружающей средой.

Реализация отмеченных преимуществ многошаговых вычислительных процедур и прежде всего метода ДП связана, конечно, и с решением ряда сложных проблем. Для ДП наиболее сложными и важными из них являются связанные с неоднородностью шагов принятия решений процедуры одновременного построения нескольких оптимальных траекторий и обусловленная взаимодействиями между компонентами моделируемой системы проблема неаддитивности целевой функции.

Проблему параллельного определения нескольких траекторий поясним с помощью рис. 1, на котором изображен процесс оптимизации на невыпуклом множестве ограничений  $D_i(y)$ . Невыпуклость наряду с другими возможными причинами обуславливается неоднородностью пространства переменных, включающего данное множество. Из рис. 1 видно, что траектории, оказавшиеся наилучшими на первом (0-1) и втором (1-2) шагах вычислений, ведут за пределы допустимой области решений и оказываются неосуществимыми. Глобальному экстремуму целевой функции соответствует траектория, наихудшая из оптимальных на отдельных заданных диапазонах значений переменных после первых двух этапов вычислительного процесса и единственно возможная на третьем этапе. Рис. 1 показывает, что точность оптимизационных расчетов может быть повышена увеличением чисел шагов принятия решений и отрезков, на которые делятся рассматриваемые диапазоны значений переменных. Это приводит к увеличению количества рассматриваемых траекторий и повышению шансов выбора среди них действительно наилучшей.

Еще сложнее проблемы одновременного построения нескольких траекторий, и самой сложной в применении ДП является проблема неаддитивности целевых функций. Она вызывается наличием взаимодействия между компонентами моделируемой системы, в виде



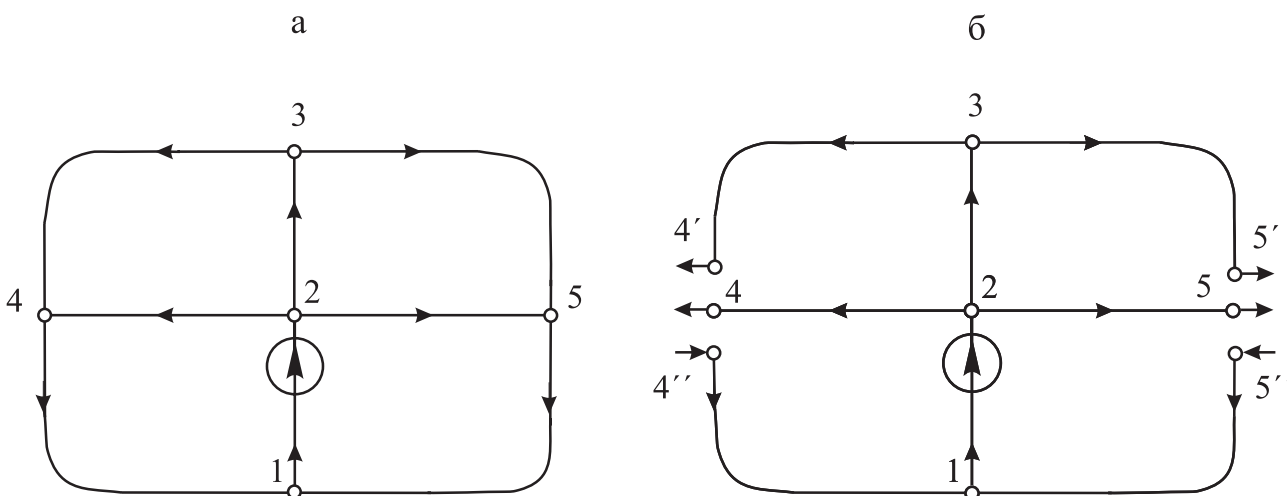
**Рис. 1.** Одновременное построение нескольких оптимальных траекторий. (—) — траектория достижения точки глобального максимума целевой функции. (—) — конкурирующие траектории. (---) — траектории, не удовлетворяющие ограничениям на допустимые значения переменных (параметров). 0 — исходное состояние и состояния локальных максимумов, достигаемых в заданных диапазонах значений переменных на последовательных шагах вычислений.

суммы функций которых представляется целевая функция используемой модели. По мнению Беллмана [18], эту проблему в принципе всегда можно решить путем увеличения размерности задачи (введением соответствующих взаимодействиям переменных). Ее практическое решение во многих случаях ограничива-

ется «проклятием размерности» [18]. Авторами пока только на примере технико-экономической оптимизации системы теплоснабжения (представляемой в виде гидравлической цепи) проблема неаддитивности была решена путем итеративных расчетов взаимодействий между потоками на отдельных ветвях цепи и ее параметров (диаметров труб) методом ДП.

Предельно кратко обсудим предлагаемый в [9, 10, 12, 17] метод решения рассматриваемой проблемы. Этот метод фактически составляет некоторое видоизменение предложенного С.В. Сумароковым метода оптимизации трубопроводных сетей [22]. По сравнению с [22], изменена методика расчета потокораспределения в цепи: вместо замкнутой системы уравнений Кирхгофа используется экстремальная термодинамическая модель гидравлической системы, т.е. МЭПС цепей. Эта замена произведена не столько с целью повышения вычислительной эффективности метода, сколько для облегчения его физической интерпретации и обоснования сходимости.

Содержание метода объясним на примере оптимизации простейшей цепи, избыточная схема которой приведена на рис. 2 а. Цель решаемой задачи определим как поиск наиболее экономичного варианта транспорта жидкости от насосной станции, расположенной на ветви 1-2, к узлам потребления 3, 4 и 5, т.е. нахождение минимума функции  $F(x, d)$ , где  $x = (x_1, \dots, x_8)^T$  и  $d = (d_1, \dots, d_8)^T$  — векторы объемного расхода и параметров (например, диаметров труб на ветвях сети), а  $x_i$  и  $d_i$  — их компоненты,  $x_i \geq 0$ .



**Рис. 2.** Замкнутая активная цепь (а) и ее преобразование в дерево (б). 1–4(4', 4''), 5(5', 5'') — номера узлов; стрелка в кружке — источник движущего давления; стрелки — заданные направления потоков на ветвях.

Метод предполагает разбиение процесса оптимизации на пять этапов.

Задание замкнутой (без внешних притоков и стоков) избыточной схемы. Избыточность схемы, приведенной на рис. 2 а, очевидна. Ведь всем отмеченным потребителям можно сохранить поставку жидкости при одиночном удалении из нее любой ветви, кроме 1-2.

Фиксирование для каждой из ветвей ее параметров (например, на первой итерации расчета взаимодействия максимально допустимых при предварительно намеченных расходах диаметров труб).

Определение при заданных схеме и параметрах потокораспределения. Выполнение этого этапа фиксирует вызывающее неаддитивность функции  $F(x, d)$  взаимодействие между потоками на ветвях схемы, поскольку потокораспределение – результат этого взаимодействия. Благодаря замкнутости схемы, взаимодействия, связанные с фиксированием давлений или внешних притоков и стоков в узлах, не возникают. Сохраняется тепловое взаимодействие цепи как единого целого с окружающей средой, которое на аддитивность целевой функции не влияет.

Преобразование при фиксированном взаимодействии (распределении потоков по ветвям) замкнутой схемы (рис. 2 а) в дерево (рис. 2 б) с заданием в узлах разрывов ( $4, 4', 4'', 5, 5', 5''$ ) условных внешних притоков и стоков, обеспечивающих сохранение найденных на предыдущем этапе материальных балансов в сети.

Выбор оптимальных, соответствующих минимуму аддитивной функции  $F(x, d)$ , диаметров трубопроводов на отдельных ветвях дерева методом ДП. Процесс пошагового поиска решений описывается уравнениями вида (19). В отличие от (19) принято только, что номера  $j + 1, j, j - 1$  убывают в направлении процесса оптимизации. Это связано с фиксированием параметров в узлах конечного потребления и поиском состояния в исходной точке (насосной станции). Понятно, что в узле стыковки потоков минимальные значения функций  $F(x, d)$  складываются. Так,

$$\begin{aligned} \min F_2(x, d) = & \min( F_3(x, d) + F_{32}(x, d) ) + \\ & + \min( F_4(x, d) + F_{42}(x, d) ) + \\ & + \min( F_5(x, d) + F_{52}(x, d) ). \end{aligned}$$

Суммирование производится для каждого из отрезков, на которые разбивается допусти-

мый диапазон изменения давлений, связанных с выбираемыми диаметрами  $d_i$  (см. рис. 1).

Процедуры 3–5 итеративно повторяются. Ветви, на которых расходы оказываются пренебрежимо малыми, после завершения расчетов из схемы удаляются. Вычислительный процесс заканчивается, когда снижение разности значений  $F(x, d)$  при переходе от одной итерации к другой становится меньше заданной ничтожно малой величины.

Сходимости метода оптимизации, основанного на итеративном использовании динамического программирования, можно дать строгое термодинамическое обоснование. Определяемое на третьем этапе стационарное потокораспределение соответствует равновесному оптимальному взаимодействию между потоками на ветвях и экстремальному взаимодействию цепи с окружающей средой. При этом в изолированной системе (цепь плюс окружение) достигается максимальное значение энтропии, а в цепи максимальная работа источника движущего давления совершается при минимально возможной температуре жидкости, т.е. при минимальном выделении и передаче в окружающую среду теплоты и минимальной диссипации энергии (производстве энтропии). В результате оптимизации параметров идеальной (с невзаимодействующими потоками) гидравлической системы на основе ДП осуществляются минимальная диссипация «экономической энергии» – денег – и минимальное производство «экономической энтропии».

Монотонность изменения производства энтропии в ходе итеративных расчетов взаимодействия между компонентами системы (определения потокораспределения) при заданной схеме и параметрах и параметров при фиксированном взаимодействии и обеспечивает сходимость описанного метода. Справедливость приведенного обоснования подтверждена многочисленными технико-экономическими расчетами трубопроводных систем. Отсутствие сходимости обнаружилось лишь в случаях, когда нарушалось условие замкнутости рассматриваемой схемы заданием в отдельных узлах регулируемых внешних притоков или стоков, что оставляло после расчетов потокораспределения отдельные взаимодействия (цепи с окружением в точках регулирования) незафиксированными.

При оптимизации физико-химических систем на основе ДП проблема неаддитивности оказывается весьма серьезной в случаях расче-

тов внутришаговых стационарных процессов и соответствующих им равновесных состояний, когда определяются механизмы моделируемых процессов, и возникающую задачу математического программирования не удается свести к выпуклому программированию. До настоящего времени опыт применения термодинамики и МЭПС в анализе механизмов химических реакций был распространен лишь на открытые системы с заданным «притоком» исходных реагентов и искомым «стоком» продуктов на схеме, имеющей вид графа – «химической цепи» [9, 12, 17]. Переход от открытых схем к замкнутым, осуществленный применительно к МЭПС гидравлических цепей и позволяющий итеративно фиксировать взаимодействия между компонентами системы для сложных механизмов, включающих процессы разной природы (превращений, обмена и переноса вещества, энергии и зарядов), может быть связан с исключительно большими трудностями. Так, если преобразование открытой гидравлической или электрической цепи в закрытую производится простым приемом соединения условными ветвями узлов внешних притоков и стоков с условным узлом, отображающим окружающую среду, и размещением на ветвях, связывающих притоки с окружением, источников односторонних движущих сил, то преобразование схемы механизма, содержащего стадии различной природы, требует включения в замкнутую схему условных ветвей с разнотипными движущими силами. Это представляет далеко не тривиальную проблему.

В описании переходов от одного шага построения траектории к другому потребность в разбиении системы на взаимодействующие части в общем случае не возникает. Следовательно, аддитивность целевой функции может не нарушаться. Пример постановки и решения аддитивной задачи, относящейся к экологическому анализу сжигания угля, приводится ниже. Несмотря на выявленные сложности применения ДП в исследованиях энергетических технологий, уже созданный задел в их проведении вселяет уверенность в успешном преодолении всех возникающих трудностей.

#### **Применение термодинамического моделирования в экологическом анализе сжигания топлив**

К настоящему времени уже накоплен весьма обширный и разнообразный опыт применения МЭПС в экологическом анализе сжигания

топлив [1, 6, 8-10, 12, 23, 24]. Исследовались: непосредственно процессы горения; переработка угля и древесных отходов, связанная с улучшением их качества и расширением области использования; поведение энергетических выбросов в атмосфере с учетом погодных условий и наличия неэнергетических загрязнителей. Моделировалось горение в крупных котлах тепловых электростанций, промышленных и коммунальных котельных, промышленных и бытовых печах, камерах сгорания транспортных двигателей. Рассматривался широкий ассортимент загрязнителей: оксиды азота, серы и углерода; азотная, синильная и другие кислоты; различные углеводороды, включая полиароматические и конкретно опаснейший канцероген – бенз(а)пирен.

Принципиальные возможности МЭПС стали выясняться с применением их первых модификаций во второй половине 80-х гг. прошлого века. Так, выявилась допустимость равновесного термодинамического моделирования в химии атмосферы. Мнения о принципиальной неприменимости такого моделирования придерживался широкий круг специалистов, исходя из представления о недостижимости в большинстве происходящих в атмосфере химических реакций конечного равновесия из-за их малой скорости в связи со сравнительно низкой температурой атмосферного воздуха. Возможность определения с помощью МЭПС промежуточных (частичных) равновесий сделала фактор недостижимости точки  $x^{eq}$  не влияющим на применимость модели.

Возможности экологических оценок энергетических технологий резко возросли на втором этапе развития МЭПС после включения в них ограничений на макрокинетику. Если в 1990-е и начале 2000-х гг. для разностороннего анализа процесса горения приходилось одновременно использовать МЭПС, кинетические модели и натурные эксперименты, то в 2009–2011 гг. во время выполнения поддержанного РФФИ проекта удалось обойтись исключительно моделью экстремальных промежуточных состояний. При работе над этим проектом у авторов возникла и начала реализовываться идея термодинамического моделирования траекторий физико-химических процессов [12]. Дальнейшее развитие возникшей идеи должно способствовать разработке методов автоматического управления технологическими процессами и разностороннего прогнозирования протекания природных процессов.

Плодотворность данной идеи попытаемся проиллюстрировать путем дальнейшего обсуждения уже рассматриваемого в [9, 10, 12] примера, посвященного анализу образования оксида азота при факельном сжигании канскоачинского угля. Излагая поставленную задачу, мы используем уже представленные в [9, 10] результаты определения равновесных экстремальных состояний  $x_{\text{NO}}^{\text{ext}}$  и в отличие от описания траектории в [12], где фиксировалась температура в топочном объеме, выбираем на каждом шагу поиска решения методом динамического программирования оптимальные температуру ( $T$ ) и коэффициент избытка воздуха ( $\alpha$ ).

При поиске возможной экстремальной концентрации оксида азота (NO) на основе модели (1)-(6) (без учета особенностей отдельных этапов процесса, т.е. рассмотрения его как единого целого) макрокинетические ограничения (4) записывались в виде системы неравенств:

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{NO}} &\leq 2[x_{\text{N}}(k_1 x_{\text{OH}} + k_2 y_{\text{O}_2})\tau_f + \\ &+ k_3 x_{\text{O}} y_{\text{N}_2} (\tau_b - \tau_f)], \\ x_{\text{N}} &\leq k_{\text{N}}^{\text{daf}} K_f N_{(\text{coal})} + (k_3 x_{\text{O}} y_{\text{N}_2} + k_4 x_{\text{CH}} y_{\text{N}_2})\tau_D, \\ x_{\text{OH}} &\leq (K_1 y_{\text{H}_2\text{O}})^{0.5}, \quad x_{\text{O}} \leq (K_2 y_{\text{O}_2})^{0.5}, \\ x_{\text{CH}} &\leq k_{\text{CH}}^{\text{daf}} K_f H_{(\text{coal})} \end{aligned} \right\} (20)$$

где  $\tau_b$ ,  $\tau_f$  и  $\tau_D$  – времена прохождения реакционной смеси через топочное пространство, сгорания летучих и диффузии компонентов пиролиза с поверхности частиц угля в турбулентную реакционную область;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  и  $k_4$  – константы скоростей реакций:  $\text{N} + \text{OH} \rightarrow \text{NO} + \text{H}$ ,  $\text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$ ,  $\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{N}$ ,  $\text{CH} + \text{N}_2 \rightarrow \text{HCN} + \text{N}$ ;  $K_f$  – коэффициент, определяющий долю летучих веществ, которые переходят из угольной частицы в газовую фазу за время  $\tau_D$ ;  $K_1$  и  $K_2$  – константы равновесия реакций  $\text{H} + \text{OH} \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$  и  $\text{O} + \text{O} \leftrightarrow \text{O}_2$ ;  $N_{(\text{coal})}$  и  $H_{(\text{coal})}$  – количества азота и водорода в угле;  $k_{\text{N}}^{\text{daf}}$  и  $k_{\text{CH}}^{\text{daf}}$  – коэффициенты, зависящие от состава летучих.

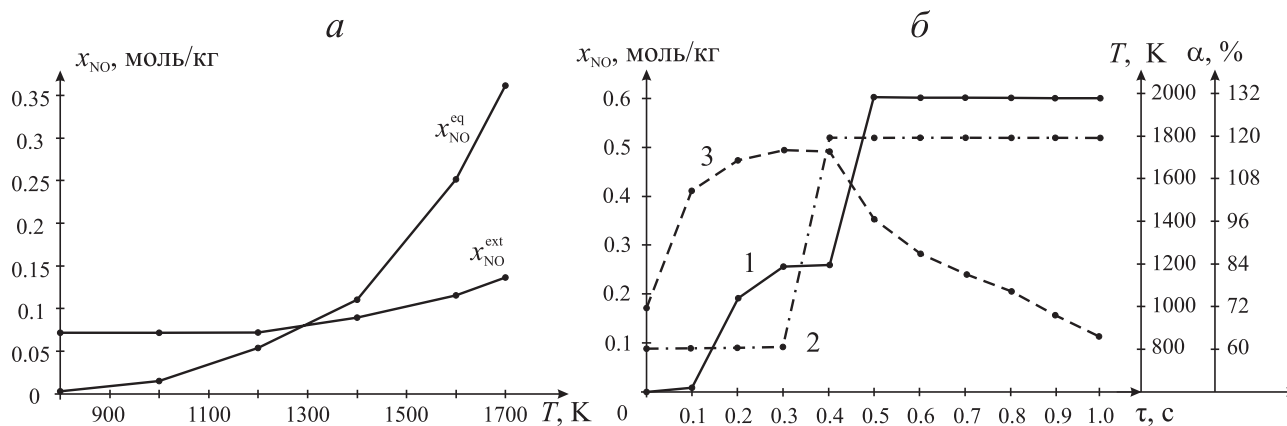
При составлении системы (20) учитывались механизмы образования «топливных», «термических» и быстрых NO; различные стадии горения (пиролиз, сгорание летучих, горение кокса); скорости химических реакций и процессов переноса (диффузии); особенности изменения

быстрых и медленных переменных. При анализе поведения медленных использовались интегралы кинетических уравнений, для быстрых (в данном примере  $x_{\text{OH}}$  и  $x_{\text{O}}$ ) задавались дополнительные термодинамические соотношения.

Уже анализ достижимых экстремальных состояний в значительной мере позволил раскрыть преимущества равновесного термодинамического моделирования относительно кинетического. В кинетическую модель должны быть включены описания и пиролиза, и горения летучих, и горения кокса, объединенные материальным и энергетическим балансами. В термодинамической модели состояний достаточно учесть только лимитирующие стадии. Например, для учета пиролиза требуется знать лишь скорость выхода летучих, для чего пригодны полуэмпирические или даже эмпирические соотношения. Для кинетического описания пиролиза нужно знание механизма процесса и диффузионных коэффициентов на поверхности угольной частицы и внутри поверхностного слоя. Поскольку молекулярный химический состав используемого угля точно не известен, даже составление списка химических реакций представляет сложную научную проблему. О величинах диффузионных коэффициентов на реакционной поверхности и в объеме поверхностного слоя можно только догадываться, поскольку их измерение или теоретическое описание исключительно сложно и ненадежно ввиду неоднородности и изменения поверхности угольной частицы в процессе горения. Это изменение также должно описываться в кинетической модели.

В МЭПС не требуется описание горения летучих. Их задаваемый состав, т.е. размерность вектора  $x$ , можно увеличивать до многих сотен компонентов, что только несколько увеличивает время вычислений. В кинетической модели отсутствие определенности в составе летучих делает невозможным описание их горения, основанное на элементарной кинетике, которое должно также включать испарение с поверхности частицы и диффузию. Параметры этих процессов, как правило, тоже не известны.

Кинетическое моделирование гетерогенного процесса – горения кокса – включает описания адсорбции молекул на поверхности, поверхностных реакций, десорбции продуктов реакций, диффузии сквозь поры и диффузии из газовой фазы к поверхности частицы. Большинство этих процессов для кокса в настоящее время



**Рис. 3.** Исследование образования экстремального количества оксида азота в пылеугольной топке. а – зависимости достижимых экстремальной ( $x_{NO}^{ext}$ ) и равновесной ( $x_{NO}^{eq}$ ) концентрации NO от температуры; б – оптимальная траектория образования  $x_{NO}^{ext}$  (1), найденные оптимальные изменения коэффициента избытка воздуха (2) и температуры (3)

мя мало изучено. Различная природа активных центров (различная энергия дислокаций) приводит к необходимости рассматривать в кинетических моделях одинаковые адсорбированные частицы как различные соединения из-за различных констант поверхностных скоростей. В МЭПС таким частицам приписываются различные фазовые состояния, что приводит только к увеличению числа реагентов. В отличие от констант скоростей поверхностных реакций, теоретический расчет которых представляет очень сложную проблему, а измерения имеют низкую воспроизводимость, определение термодинамических параметров возможно с достаточно высокой точностью из спектральных данных и статистических расчетов.

Из выявленной сложности построения кинетических моделей, описывающих основные стадии горения угля, следует и невозможность построения такой модели для рассматриваемого процесса в целом. Поэтому распространение получили эмпирические модели, основанные на выделении и экспериментальном изучении лимитирующих стадий. Такие модели не позволяют устанавливать общие закономерности. МЭПС, позволяющая исследовать всю область достижимости, делает возможным в анализе состояний рассматриваемой системы следить за изменением количеств любого компонента в зависимости от тех или иных кинетических ограничений, записываемых достаточно просто (см. систему (20)) даже для таких сложных процессов, как горение угля. Проведенный авторами подобный изложенному сравнитель-

ный анализ достоинств МЭПС выявил и их существенные преимущества относительно моделей неравновесных термодинамик.

Дальнейшее обогащение результатов равновесного термодинамического анализа образования оксидов азота при горении угля благодаря включению в него задачи построения траектории, по которой достигается искомая экстремальная концентрация ( $x_{NO}^{ext}$ ), иллюстрируется на рис. 3 а и 3 б.

На рис. 3 а отражен одноэтапный поиск зависимостей от температуры достижимых состояний: состояния с возможным наибольшим содержанием экологически опасного оксида азота  $x_{NO}^{ext}$  и состояния конечного равновесия  $x_{NO}^{eq}$ . Построение оптимальной траектории (рис. 3 б кривая 1) осуществлялось определением экстремальных равновесных состояний, достижимых на последовательных шагах вычислительного процесса при варьировании температуры  $T$  (кривая 3) и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  (кривая 2) на каждом условном шаге процесса методом динамического программирования. Т.е.  $T$  и  $\alpha$  были выбраны основными переменными, по которым ведется управление топочным процессом. Из рассмотрения были исключены траектории с температурой и избытком воздуха, приводящие к угасанию пламени, а также траектории с неполным окислением топлива.

При разработке вычислительного алгоритма на основе ДП предполагалось, что при расчете значений целевой функции для каждого из последовательно рассматриваемых состояний си-



стема ограничений (2)-(6) полностью описывает взаимодействия между компонентами внутри реагирующей системы и не вызывает нарушений аддитивности этой функции (см. предыдущий раздел). В то же время полученные при сделанных предположениях результаты исследования траекторий в значительной мере раскрывают теоретические и прикладные возможности этого анализа. Выясняются плодотворность и проблемы совместного равновесного моделирования состояний и процессов их достижения. Расширяется понимание физики горения и образования всего хода вредных побочных продуктов. Выявляются допустимые способы автоматического управления горением в отдельных пространственных зонах топочного объема (регулирование  $T$  и  $\alpha$ ), соответствующих различным временным отрезкам движения реагирующей смеси.

Изложенный экологический анализ сжигания топлив, обоснование и развитие методов его проведения выявляют необходимость дальнейшего развития равновесного термодинамического моделирования, которое должно привести к превращению классической равновесной термодинамики в единую замкнутую теорию

диссипативных систем и процессов. Важнейшим объектом приложений этой теории, бесспорно, станут энергетические технологии и прежде всего технологии сжигания органических топлив. Каждое конкретное приложение к определенному виду технологий (процессов) будет связано с решением сложных научных проблем, к которым относятся: создание соответствующей модификации МЭПС; уточнение вычислительного алгоритма на основе динамического программирования с учетом особенностей моделируемого объекта; проведение экологического, энергетического (связанного с оценкой расходов энергетически ресурсов) и технико-экономического анализов технологии; обоснование способов автоматического управления технологическим процессом. Экологический анализ следует распространить не только непосредственно на процесс горения, но и на технологии очистки уходящих газов и поведение вредных выбросов в атмосфере, почве и водоемах. Чтобы применение предлагаемого подхода стало широким и эффективным, необходимо участие в его реализации большого количества специалистов: физиков, химиков и инженеров.

### Литература

1. Каганович Б.М., Филиппов С.П., Анциферов Е.Г. Эффективность энергетических технологий: термодинамика, экономика, прогнозы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 256 с.
2. Анциферов Е.Г. Применение методов математического программирования в анализе термодинамических систем: Автореферат диссертации доктора физико-математических наук. – М., 1991. – 30 с.
3. Каганович Б.М. Исследование энергетических технологий на основе методов термодинамики и теории цепей: Диссертация в форме научного доклада ... доктора технических наук. – Иркутск, 1991. – 60 с.
4. Каганович Б.М., Филиппов С.П. Равновесная термодинамика и математическое программирование. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1995. – 236 с.
5. Лагранж Ж. Аналитическая механика. – М.–Л.: ГИТТЛ, 1950. – Т. 1. – 594 с.; Т. 2. – 440 с.
6. Горбань А.Н., Каганович Б.М., Филиппов С.П. Термодинамические равновесия и экстремумы: Анализ областей достижимости и частичных равновесий в физико-химических и технических системах. – Новосибирск: Наука, 2001. – 296 с.
7. Каганович Б.М. Об осуществимости равновесий в физико-химических системах. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2002. – Препринт № 6. – 42 с.
8. Gorban A.N., Kaganovich B.M., Filippov S.P., Keiko A.V., Shamansky V.A., Shirkalin I.A. Thermodynamic Equilibria and Extrema Analysis of Attainability Regions and Partial Equilibria. – Springer. 2006 – 305p.
9. Kaganovich B.M., Keiko A.V., Shamansky V.A. Equilibrium Thermodynamic Modeling of Dissipative Macroscopic Systems // Advances in Chemical Engineering. Thermodynamics and kinetics of complex systems. Vol. 39. Chapter 1 – Elsevier, 2010. – P. 1–74.

10. Каганович Б.М., Кейко А.В., Шаманский В.А., Ширкалин И.А., Зароднюк М.С. Технология термодинамического моделирования. Редукция моделей движения к моделям покоя. — Новосибирск: Наука, 2010. — 236 с.
11. Полак Л.С. Вариационные принципы механики: Их развитие и применения в физике. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. — 600 с.
12. Kaganovich B.M., Keiko A.V., Shamansky V.A., Zorodnyuk M.S. On the Interrelations Between Kinetics and Thermodynamics as the Theories of Trajectories and States // Chemical Kinetics. — Rijeka: Intech, 2012. — P. 31–60.
13. Каганович Б.М., Кейко А.В., Шаманский В.А., Зароднюк М.С. О единстве законов консервативных и диссипативных систем // Материалы XV Всероссийского семинара «Моделирование неравновесных систем-2012». — Красноярск: Институт вычислительного моделирования СО РАН, 2012. — С. 64–67.
14. Пригожин И.Р., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. — М.: Мир, 2002. — 461 с.
15. Plank M. Zur Dynamik bewegten Systeme // Ann. Phys. — 1908. — Bd. 331, N.6. — S. 1–34.
16. Эйнштейн А. О принципе относительности и его следствиях // Собр. науч. тр. — М.: Наука, 1965. — Т. 1. — С. 65–112.
17. Каганович Б.М. Равновесная термодинамика необратимых процессов. — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. — 121 с.
18. Беллман Р. Динамическое программирование. — М.: Изд-во иностр. лит., 1960. — 400 с.
19. Вентцель Е.С. Элементы динамического программирования. — М.: «Наука», 1964. — 175 с.
20. Каганович Б.М. Дискретная оптимизация тепловых сетей. — Новосибирск: Наука, 1978. — 88 с.
21. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. — М.: Наука, 1985. — 278 с.
22. Сумароков С.В. Метод решения многоэкстремальной сетевой задачи. — Экономика и мат. методы, 1976, т. 12, № 5. — С. 1016–1018.
23. Каганович Б.М., Филиппов С.П. Анализ технологических и экологических проблем энергетики методами равновесной термодинамики // Известия АН. Энергетика. — 2000. — № 6 — С. 13–21.
24. Каганович Б.М., Кейко А.В., Шаманский В.А. Развитие равновесного термодинамического моделирования необратимых процессов и его применение в энергетике // Известия АН. Энергетика. — 2011. — №2. — С. 132–141.

## СОЗДАНИЕ И ИНТЕГРАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И РЕСУРСОВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ<sup>1</sup>

Массель Л.В.<sup>2</sup>

Представлены результаты исследований, связанных с разработкой методов построения и интеграции интеллектуальных технологий и ресурсов для комплексных исследований энергетики. Выполнено развитие информационной и вычислительной инфраструктур, входящих в ИТ-инфраструктуру системных исследований в энергетике. Создана интеллектуальная инфраструктура, интегрирующая онтологическое пространство знаний, базы знаний и инструментальные средства для работы с ними.

**Ключевые слова:** интеллектуальная, вычислительная и информационная инфраструктуры, онтологическое пространство знаний, фрактальная стратифицированная модель, когнитивное и событийное моделирование

The results of investigation related to the methods development of the construction and integration of intelligent technologies and resources for comprehensive energy research are presented. The development of information and computational infrastructures within the IT infrastructure of systems research in energy are completed. An intelligent infrastructure that integrates ontological knowledge space, knowledge and tools to work with them are realized.


**Keywords:** intelligent, computational and information infrastructures, ontological knowledge space, fractal stratificated model, cognitive and event modeling.

В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН проводятся комплексные исследования в области энергетики, которые включают в том числе исследования экономики, экологии и прогнозирования изменений климата. Кроме того, исследования в энергетике интегрируют как исследования развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России и ее регионов, так и исследования функционирования основных систем энергетики, входящих в ТЭК: электроэнергетической, нефтегазоснабжающей, теплоснабжающей. Все исследования взаимосвязаны, результаты исследований систем энергетики могут быть входной информацией для исследований

ТЭК и наоборот. Очевидно, что требуется организация информационной поддержки этих исследований, предусматривающая интеграцию информационных и интеллектуальных ресурсов и базирующаяся на основе современных информационных технологий.

Коллективом, возглавляемым автором, была разработана ИТ-инфраструктура системных исследований в энергетике, включающая три уровня: информационную инфраструктуру, вычислительную инфраструктуру и телекоммуникационную инфраструктуру [1]. В рамках данного проекта выполнялось развитие двух первых уровней и был добавлен уровень интеллектуальной инфраструктуры (рис. 1). Уровень

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-07-00264).

<sup>2</sup>  Массель Людмила Васильевна, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, e-mail: massel@isem.sei.irk.ru.

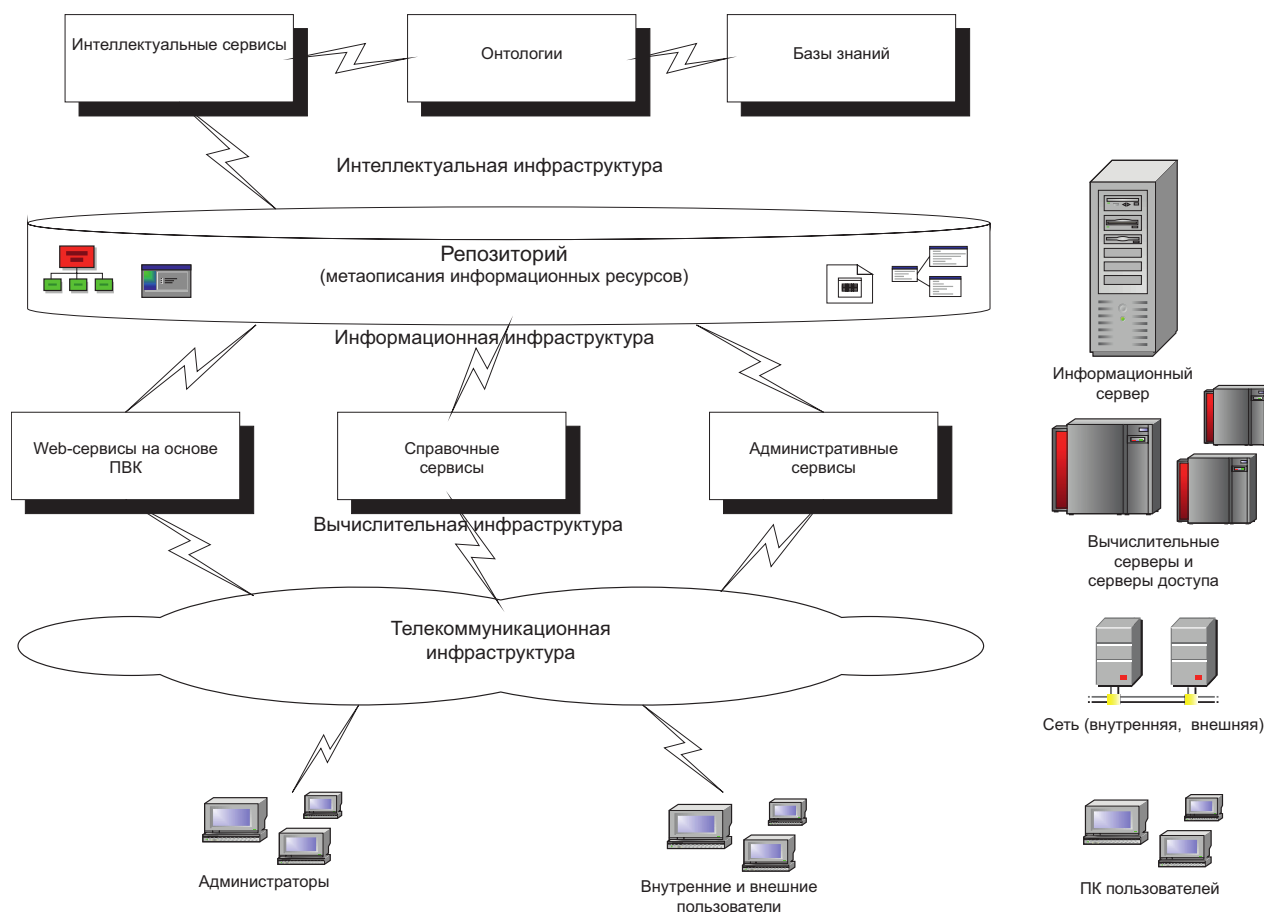


Рис. 1. ИТ-инфраструктура системных исследований в энергетике

телекоммуникационной инфраструктуре поддерживается соответствующим подразделением и авторами проекта не рассматривается.

*Информационные ресурсы*, интегрируемые в информационной инфраструктуре, объединяют данные о сотрудниках, проводимых ими научных исследованиях и их результатах. Кроме того, информационные ресурсы включают информацию обо всех разрозненных базах данных, используемых для хранения основной, промежуточной и результирующей информации, необходимой для исследований, о методах (алгоритмах), выполняющих какие-либо действия над информацией (программных комплексах, пакетах прикладных программ, различных сервисах).

Под *интеллектуальными ресурсами* понимаются знания, которыми обладает институт, представленные как в традиционном виде (электронные тексты статей, отчетов и монографий), так и в виде онтологий предметных областей энергетики. Эти ресурсы интегрированы в рамках интеллектуальной инфраструктуры.

Построение интеллектуальной инфраструктуры основано на разработанной участниками проекта методологии построения онтологического пространства знаний на примере исследований энергетики. Предложена фрактальная структура онтологического пространства знаний в области энергетики [2]. Рассмотрено использование авторской фрактальной стратифицированной модели (ФС-модели), предусматривающей расслоение (стратификацию) предметной области достаточно большого объема (например, энергетики). Каждый слой объединяет однотипные объекты (например, по системам энергетики), предусматривается отображение любого слоя в каждый с условием сохранения инварианта: существенных и неизменяемых свойств объектов. Каждый слой, в свою очередь, может быть расслоен. Процесс повторяется до той степени глубины, которая необходима для описания конкретной отрасли энергетики. С применением предложенного подхода построены онтологии теплоэнергетики, угольной промышленности, энергетичес-

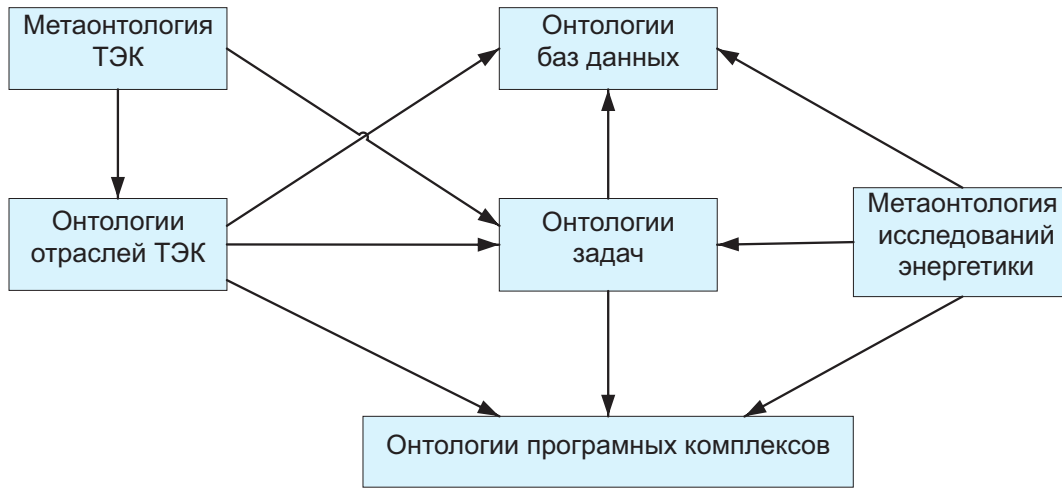


Рис. 2. Система онтологий исследований ТЭК России и ее регионов

кой безопасности и др.). Пример системы онтологий исследований ТЭК приведен на рис. 2.

Одним из основных компонентов ИТ-инфраструктуры является Репозиторий, обеспечивающий интеграцию как информационных, так и интеллектуальных ресурсов. Репозиторий содержит информацию обо всех других компонентах, их местоположении и о способах доступа к ним. В нем описываются хранилища данных и знаний отдельных систем энергетики, указывается их расположение (адреса серверов) и интерфейсы взаимодействия (описания Web-сервисов). При создании интегрированной базы данных исследований используется принцип построения виртуальной базы

данных: данные не интегрируются физически, в то же время все описания оперативных баз данных программных комплексов, используемых в исследованиях, научных трудов сотрудников института и др. хранятся в Репозитории, и при необходимости к ним обеспечивается доступ (требуется согласие владельца).

Для поддержки проведения исследований в разных предметных областях разработаны требования и методические принципы построения инструментальных программных средств описания знаний и управления знаниями, в соответствии с которыми выполнены проектирование и реализация хранилища данных и знаний для исследований энергетики (рис. 3).

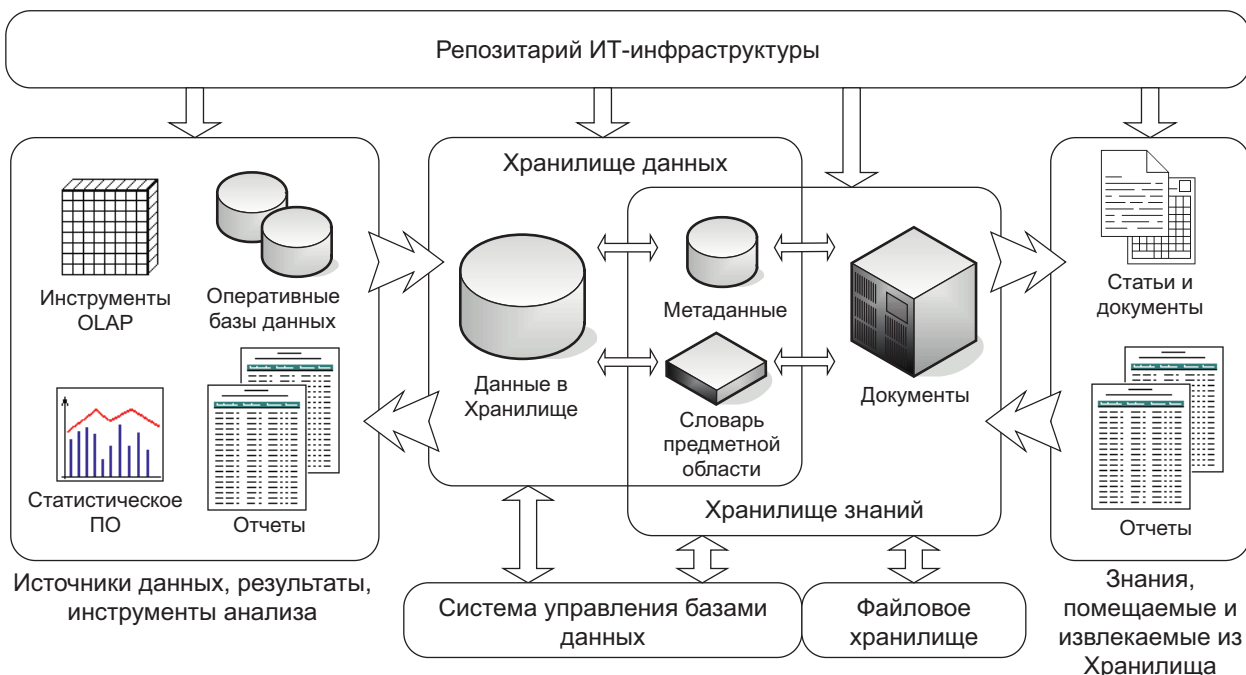


Рис. 3. Архитектура хранилища данных и знаний для исследований энергетики.

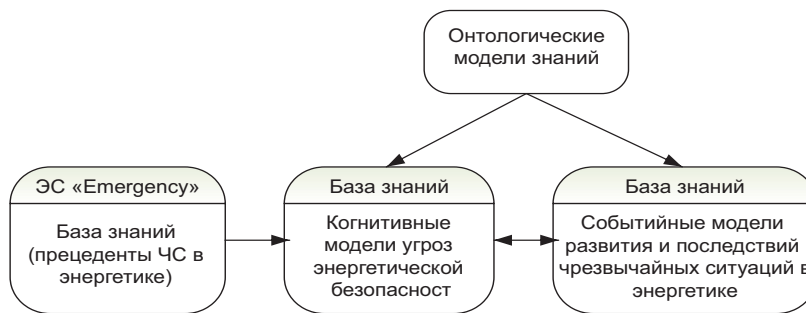


Рис. 4. Пространство знаний, поддерживаемое интеллектуальной ИТ-средой

Разработаны программные средства для администрирования и работы с Хранилищем данных и знаний, выполнена их апробация на примере исследований развития угольной промышленности. Разработан механизм интеграции Хранилища данных и знаний в информационную инфраструктуру исследований (с использованием онтологий и Репозитория) и реализованы программные средства, обеспечивающие интеграцию [3].

Важным фрагментом интеллектуальной инфраструктуры являются средства представления знаний и управления знаниями для поддержки принятия решений в исследованиях

и обеспечении энергетической безопасности России и ее регионов. Эти средства интегрированы в рамках интеллектуальной ИТ-среды, включающей пространство знаний (рис. 4) и инструментальные средства работы с ним (рис. 5), которые с помощью Репозитория интегрированы в интеллектуальную инфраструктуру исследований в энергетике.

Интеллектуальная ИТ-среда поддерживает двухуровневую технологию исследований проблем энергетической безопасности [4, 5], в которой на первом, верхнем уровне выполняется качественный анализ угроз энергетической безопасности (ЭБ) с использованием когнитивного

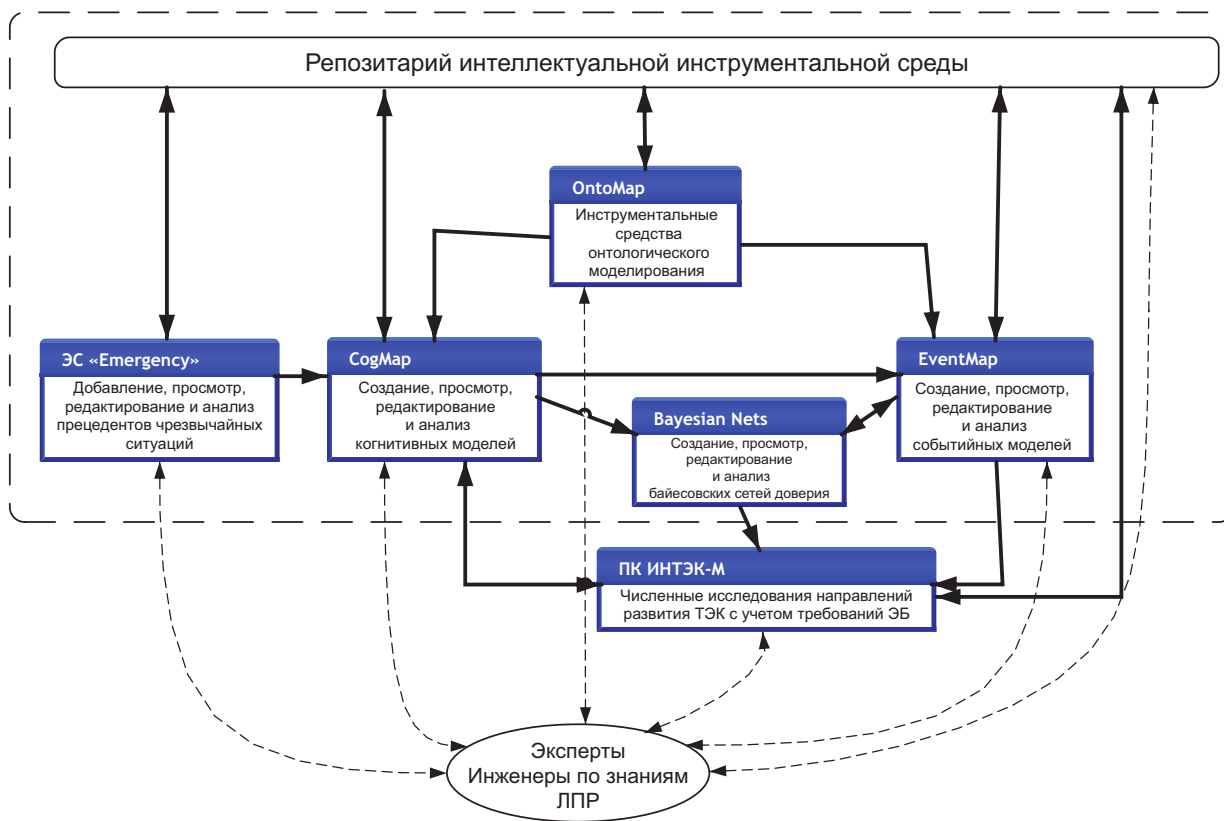


Рис. 5. Схема взаимодействия компонентов интеллектуальной ИТ-среды

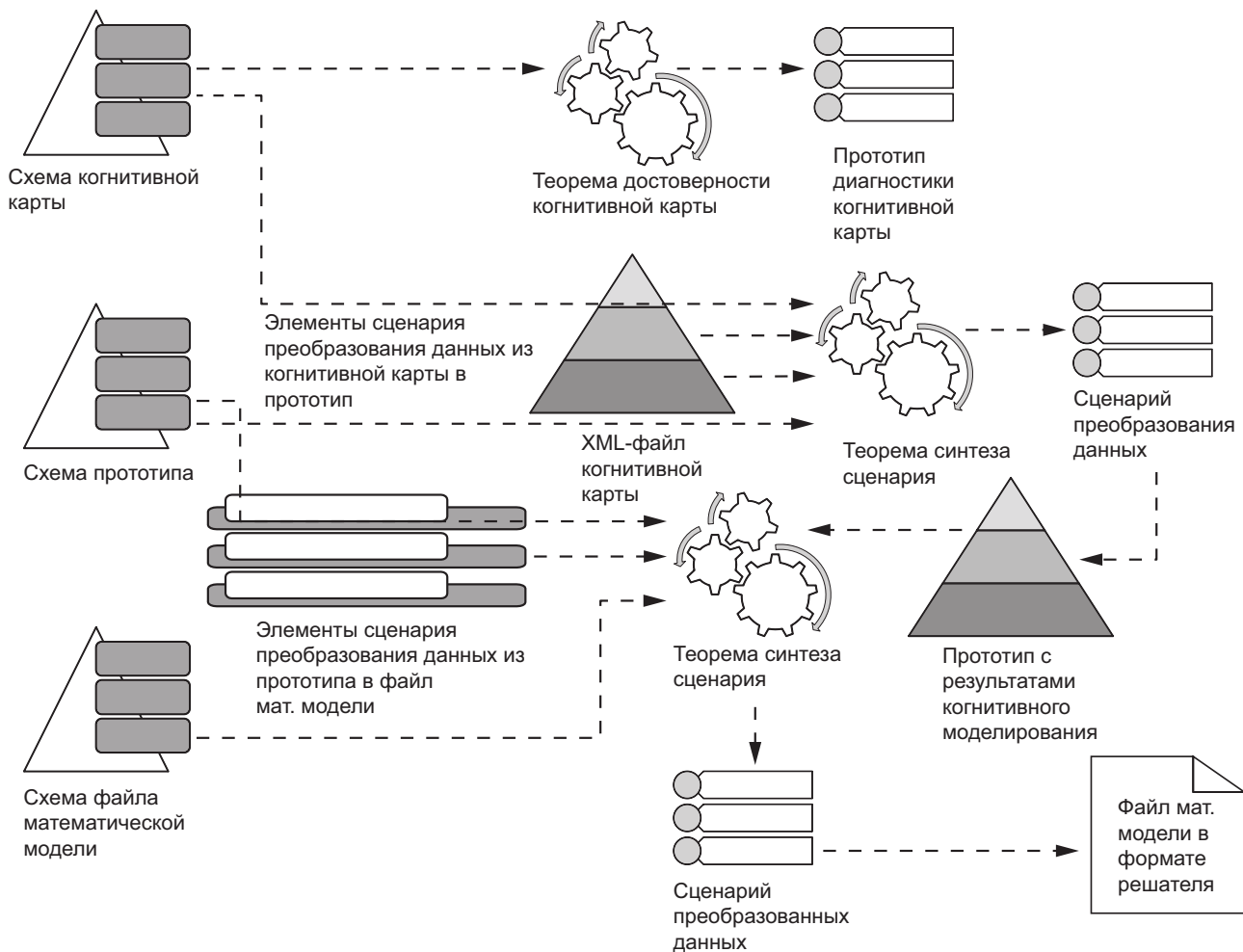


Рис. 6. Схема преобразования данных при переходе от когнитивных карт к математическим моделям

моделирования [6], а также анализ развития и последствий возможных чрезвычайных ситуаций в энергетике с использованием событийного моделирования на основе Joiner-сетей [7].

В интеллектуальную ИТ-среду включена также экспертная система Emergencу, фреймовая база знаний которой содержит более 600 прецедентов описаний ЧС в энергетике. Анализ прецедентов позволяет выбрать типовые (наиболее часто встречающиеся) угрозы ЭБ. В последнее время в ИТ-среду интегрирован аппарат Байесовских сетей доверия (Bayesian Nets) для детализации угроз ЭБ и оценки рисков их наступления [8].

На основе авторской графической инструментальной среды GrModeling реализованы библиотеки когнитивного и событийного моделирования CogMap и EventMap [9]. Для обеспечения концептуальной общности в этой среде реализована библиотека OntoMap для построения онтологий, хотя онтологии могут разрабатываться также с помощью свободно

распространяемых инструментальных средств (например, SmartTools или Protégé).

Реализованный в этом же коллективе много-агентный программный комплекс ИНТЭК-М используется на втором, нижнем уровне предложенной двухуровневой технологии [10]. С его помощью рассчитываются выбранные с использованием средств качественного анализа (когнитивного и событийного моделирования, Байесовских сетей доверия) детальные варианты развития ТЭК страны и ее регионов с учетом требований энергетической безопасности.

Для автоматизации перехода от первого уровня ко второму, для решения задачи преобразования данных при интеграции разработанных интеллектуальных информационных технологий и традиционных средств в области исследований энергетики (ПК ИНТЭК), разработан методический подход к интеллектуальному контролю и преобразованию данных для вычислительного эксперимента в исследованиях энергетики [11]. Предложенный подход базируется

на применении методов дедуктивного синтеза программ для решения задач преобразования и контроля данных в ходе вычислительного эксперимента (рис. 6).

Для интерпретации полученных результатов используется 3D-визуализация. В рамках проекта разработаны методика построения 3D-приложений и специальный геокомпонент, позволяющий исследователям представлять свои данные в требуемом виде и передавать их в один из ГИС-сервисов (например, геосервис Google Earth) [12].

Для усовершенствования вычислительной инфраструктуры, интегрирующей разработанные в институте программные комплексы для исследований в энергетике, разработан методический подход к реинжинирингу унаследованного программного обеспечения и разработана экспертная система, помогающая выбрать оптимальную стратегию реинжиниринга [13].

В статье кратко описаны основные результаты проекта, выполненного при поддержке гранта РФФИ №10-07-00264. Выполнено развитие информационной и вычислительной инфраструктур и создана интеллектуальная инфраструктура исследований, интегрирующая онтологическое пространство знаний в области исследований энергетике и базы знаний, в которых хранятся когнитивные и событийные модели, описания прецедентов ЧС в энергетике и др. С помощью Репозитария в интеллектуальную инфраструктуру интегрированы инструментальные средства описания знаний

и управления знаниями: Хранилище данных и знаний, библиотеки онтологического, когнитивного и событийного моделирования OntoMap, CogMap и EventMap.

Новизна полученных результатов определяется совместным использованием методов онтологического, когнитивного и событийного моделирования, которые ранее в исследованиях энергетике не применялись, и расширением области применения этих методов на комплексные исследования в области экономики, экологии и прогнозирования климата. Кроме того, в рамках проекта получен ряд новых результатов, связанных с прогнозированием природообусловленных факторов энергетике с учетом тенденций изменения климата [14]. Разработан ряд оригинальных методических подходов и методик, в том числе методический подход к моделированию данных и знаний как объектов стратифицированного информационного пространства (фрактальный подход), предложенный автором (руководителем проекта), а также методики когнитивного и событийного моделирования и интеллектуальной поддержки принятия решений в исследованиях и обеспечении энергетической безопасности. Предложенные подходы и методики, а также разработанные инструментальные средства составили предмет новизны семи диссертационных работ, защищенных молодыми исполнителями проекта под руководством Л.В. Массель во время выполнения проекта.

## Литература

1. Массель Л.В., Шер И.А. ИТ-инфраструктура системных исследований в энергетике / В кн.: Системные исследования в энергетике: ретроспектива научных исследований СЭИ-ИСЭМ. – Новосибирск: Наука, 2010. – С. 107–126.
2. Копайгородский А.Н., Массель Л.В. Фрактальный подход к проектированию архитектуры информационных систем // Вестник ИрГТУ. – 2010. – № 6. – С. 8–12
3. Копайгородский А.Н., Массель Л.В. Методы, технологии и реализация хранилища данных и знаний для исследований энергетике // Вестник Южно-Уральского государственного университета: Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2011. – Вып. 7, №4. – С. 47–55.
4. Массель А.Г. Методологический подход к организации интеллектуальной поддержки исследований проблемы энергетической безопасности // Информационные технологии. – 2010. – №9. – С. 32–36.
5. Massel L.V., Massel A.G., Arshinsky V.L. Intelligent IT-environment for decision support in research and energy security guaranty of Russia and its regions // Proceedings of the Workshop on Computer



Science and Information Technologies.— Germany, Garmish-Partenkirchen: KIT. — 2011. — Vol. 1. — P. 7–13.

6. *Массель А.Г.* Когнитивное моделирование угроз энергетической безопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).— М.: Изд-во «Горная книга». — 2010. — Отд. вып. — №17. — С. 194–199.

7. *Аршинский В.Л.* Событийное моделирование чрезвычайных ситуаций в энергетике //Труды Международной конференции: Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе. Приложение к журналу «Открытое образование». — Украина, Гурзуф, 2010. — С. 299–301.

8. *Массель Л.В., Пяткова Е.В.* Применение байесовских сетей доверия для интеллектуальной поддержки исследований проблем энергетической безопасности // Вестник ИрГТУ. — 2012. — №2. — С. 8–13.

9. *Копайгородский А.Н.* Проектирование и реализация системы графического моделирования / Информационные и математические технологии в науке и управлении // Труды XV Байкальской Всероссийской конференции, т. III. — Иркутск: ИСЭМ СО РАН. — 2010. — С. 22–28.

10. *Фартышев Д.А.* Разработка многоагентного ПК ИНТЭК-М для исследований проблемы энергетической безопасности // Программные продукты и системы. — 2010. — № 3. — С. 126–129.

11. *Массель Л.В., Курганская О.В.* Автоматизация вычислительного эксперимента на основе логических моделей // Вестник ИрГТУ. — 2011. — № 2. — С. 8–14.

12. *Массель Л.В., Иванов Р.А.* 3D-геомоделирование в исследованиях энергетике: примеры применения и перспективы // Вестник ИрГТУ. — 2011. — № 4. — С. 6–11.

13. *Массель Л.В., Подкаменный Д.В.* Системный анализ и реинжиниринг унаследованного программного обеспечения // Наука и образование (электронное научно-техническое издание МГТУ им. Баумана, эл. № ФС 77–30569, гос. рег. № 0421000025). 2011. №4. — <http://technomag.edu.ru>.

14. *Абасов Н.В., Бережных Т.В., Ветрова В.В.* Долгосрочное прогнозирование гидроэнергетического потенциала каскада ГЭС в условиях изменения климата // Известия РАН «Энергетика». — 2012. — №1. — С. 49–57.

## ТВЕРДЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ НА ОСНОВЕ ГАЛЛАТА ЛАНТАНА И КИНЕТИКА ЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С ЭТИМИ ЭЛЕКТРОЛИТАМИ<sup>1</sup>

Бронин Д.И., Кузин Б.Л., Ярославцев И.Ю., Береснев С.М.<sup>2</sup>


Определен фазовый состав и установлены пределы растворимости стронция и магния в твердых электролитах  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ga}_{1-y}\text{Mg}_y\text{O}_{3-\alpha}$  (LSGM). Изучены механизмы реакций восстановления кислорода и окисления водорода / восстановления воды на модельном электроде из пористой платины в контакте с LSGM электролитом. Предложены маршруты и лимитирующие стадии указанных электродных процессов. Исследованы электрохимические свойства LSC катодов и Ni-GDC анодов для среднетемпературных твердооксидных топливных элементов с несущим LSGM электролитом. Показано: единичные топливные элементы с разработанными электродами проявляют высокие токовые и мощностные характеристики.

**Ключевые слова:** твердооксидные топливные элементы, допированный галлат лантана, электроды, электродные реакции.

The phase composition and solubility limit of strontium and magnesium in solid electrolytes  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ga}_{1-y}\text{Mg}_y\text{O}_{3-\alpha}$  (LSGM) have been determined. Mechanisms of reactions of oxygen reduction and hydrogen oxidation / reduction of water have been studied on a model electrode made of porous platinum in contact with LSGM electrolyte. Routes and limiting stages of the above electrode processes have been suggested. Electrochemical properties of LSC cathodes and Ni-GDC anodes for LSGM electrolyte-supported solid intermediate temperature oxide fuel cells have been studied. It has been demonstrated that single fuel cells with the developed electrodes reveal high current and power characteristics.

**Keywords:** solid oxide fuel cells, doped lanthanum gallate, electrodes, electrode reactions.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 04-03-96084).

<sup>2</sup>  Бронин Димитрий Игоревич, доктор химических наук, заведующий лабораторией кинетики Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН, e-mail: bronin@ihte.uran.ru.



Кузин Борис Леонидович, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории кинетики Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН, e-mail: kuzin@ihte.uran.ru.



Ярославцев Игорь Юрьевич, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории кинетики Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН, e-mail: yaroslav@ihte.uran.ru.



Береснев Сергей Михайлович, научный сотрудник лаборатории кинетики Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН, e-mail: beresnev\_sm@mail.ru.

Топливные элементы — это электрохимические устройства, которые непосредственно преобразуют химическую энергию топлива и кислорода в электричество. Одна из разновидностей топливных элементов — твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), отличается, помимо высокого КПД, тем, что в качестве топлива в них могут использоваться не только водород, но и различные углеводороды, а сами они изготавливаются из керамических материалов. Наиболее распространены твердооксидные топливные элементы с электролитом на основе твердых растворов  $ZrO_2-Y_2O_3$  (YSZ). Однако достаточно высокая электропроводность этих электролитов реализуется лишь при температурах (800–1000 °С), что предъявляет чрезвычайно высокие требования к стойкости функциональных и конструкционных материалов в таких условиях. В настоящей работе изучены возможности использования в ТОТЭ твердых электролитов на основе галлата лантана  $(La,Sr)(Ga,Mg)O_{3-\alpha}$  (LSGM), предложенных в 1994 г. Ишихарой с соавт. [1] и Фенгом и Гуденафом [2].

Электропроводность LSGM существенно выше, чем у наиболее часто применяемого YSZ электролита, и находится на уровне электропроводности твердых электролитов на основе  $SeO_2$ . Однако если «цериевые» электролиты имеют узкую электролитическую область и доля электронной проводимости в них высока даже в слабо восстановительных условиях, то число переноса ионов LSGM электролитов близко к единице в очень широком диапазоне активности кислорода. Электролитическая область LSGM электролита охватывает весь наиболее важный для практики диапазон парциального давления кислорода: от  $10^{-20}$  до 0,21 атм [3]. В воздушной среде при температурах ниже 1000° С число переноса электронных дырок в LSGM электролитах не превышает 0,01 [4, 5]. Тем не менее, оно существенно выше, чем в случае электролитов на основе  $ZrO_2$ , что, как будет показано, сказывается на механизме протекания кислородной электродной реакции. Коэффициент линейного термического расширения (КЛТР) этих электролитов несколько выше, чем у электролитов на основе  $ZrO_2$ . По данным Стивенсона с соавторами [6], его среднее значение в температурном диапазоне от 25 до 1200 °С составляет  $11,2-12,2 \times 10^{-6} K^{-1}$  в зависимости от состава.

Высокая электропроводность реализуется в LSGM электролитах, когда стронций и магний замещают около 10-20% лантана и галлия, соответственно. Анализ множества публикаций говорит о том, что однофазную LSGM керамику синтезировать очень сложно, и в LSGM электролите практически всегда присутствуют следы примесных фаз [7]. В некоторых работах, например, [8], показано, что условия синтеза LSGM заметно влияют на фазовый состав керамики. Однозначно вопрос о природе образования примесных фаз в LSGM не выяснен. Одна из существующих точек зрения заключается в том, что при высоких температурах твердофазного синтеза LSGM происходит испарение некоторых его компонентов [9], в результате чего нарушается катионная стехиометрия твердого раствора и появляются примесные фазы.

Представления о кристаллической структуре твердых растворов LSGM очень неоднозначны даже при комнатной температуре. Например, авторы, одновременно опубликовавшие первые сообщения об открытии ими нового твердого электролита, имели разные точки зрения на структуру одного и того же вещества. Фенг и Гуденаф идентифицировали структуру  $La_{0,9}Sr_{0,1}Ga_{0,8}Mg_{0,2}O_{2,85}$  (LSGM10-20) как кубическую [2], а Ишихара с соавторами — как орторомбическую [1]. Результаты более поздних работ также противоречивы [3, 10–14]. В большинстве публикаций считается, что при комнатной температуре твердые растворы LSGM имеют орторомбическую или кубическую симметрию, когда они содержат малые или большие количества допантов, соответственно.

Исследование скорости межфазного обмена и диффузии кислорода проводилось методом ВИМС на образцах LSGM10–20 путем определения профиля концентрации метки изотопа  $^{18}O$  в электролите при 770–1250 К в интервале давлений кислорода от 1013 до 101325 Па [15]. Было установлено, что скорость кислородного обмена велика: при 1000 К и давлении кислорода 101325 Па — порядка  $10^{16}$  атомов/см<sup>2</sup>с. Близкий к этому результат был получен и в наших исследованиях для LSGM12–18 [16].

Недостатком LSGM можно считать его высокую реакционную способность к оксидным перовскитным смешанным проводникам [17] и к оксиду никеля [18] — материалам, используемым для изготовления электродов практических устройств. Обычно химическое взаимодействие между материалами электродов и

электролитом предотвращается организацией промежуточного интерфейсного слоя, например, из электролита на основе  $\text{CeO}_2$  [19].

Известно, что кобальтит лантана-стронция (LSC) – один из наиболее активных электродных материалов для кислородного электрода. Его применение с твердыми электролитами на основе  $\text{ZrO}_2$  затруднительно, поскольку при температурах выше 1273 К они взаимодействуют с образованием малопроводящих цирконатов лантана и стронция. При этом электрохимическая активность электродов снижается на два и более порядка [20]. Иная ситуация наблюдается при использовании LSC в качестве электродного материала с LSGM электролитами, когда некоторое их взаимодействие приводит к обогащению приповерхностной области электролита ионами кобальта [21, 22]. Схожесть структур LSGM и LSC и их элементного состава приводят к тому, что происходит лишь некоторая взаимная диффузия катионов между двумя фазами, которая не ухудшает, а улучшает обменные характеристики электролита и электрохимические свойства границы раздела электрод–электролит. На это косвенно указывают высокие характеристики единичных топливных ячеек с электролитом на основе  $\text{LaGaO}_3$  и LSC-катодом, приведенные в [23], и результаты наших исследований характеристик LSC-катодов на LSGM электролите [22].

Большой интерес представляет изучение закономерностей протекания электродных процессов, природы маршрутов и стадий электрохимических реакций на галлатном электролите. Скорость электродных процессов – одна из характеристик, определяющая эффективность работы электрохимических устройств. Поскольку твердые электролиты на основе галлата лантана обладают очень высокой скоростью обмена с кислородом газовой фазы [16], то можно ожидать протекания электродных реакций по двум параллельным маршрутам: с участием атомов кислорода, адсорбированных как на самом электродном материале, так и на поверхности электролита в относительном удалении от частиц электрода. Схожая перовскитная структура электролита на основе галлата лантана и многих катодных материалов, например, кобальтитов лантана-стронция, дает возможность формировать электродную систему не как границу раздела электрод–электролит, а создавать пространственную взаимопроникающую область, представляющую собой твер-

дый раствор материалов электрода и электролита. Можно ожидать высокой электрохимической активности электродов, сформированных таким образом.

### Фазовый состав электролитов (La,Sr)(Ga,Mg)O<sub>3</sub>

Синтез образцов электролита проводился при 1700–1800 К керамическим способом [36]. Рентгенофазовый анализ (РФА) показал, что при комнатной температуре полученные материалы однофазны и имеют кубическую структуру. Пример рентгенограммы образца LSGM12–18 показан на рис. 1 (здесь и далее для указания состава электролита используются общепринятые аббревиатуры, например, LSGM12–18 соответствует составу  $\text{La}_{0,88}\text{Sr}_{0,12}\text{Ga}_{0,82}\text{Mg}_{0,18}\text{O}_{2,85}$ , т. е. числа после LSGM означают атомную долю замещения лантана стронцием, а галлия – магнием). В отличие от результатов РФА, электронная микроскопия показала, что образцы всех составов содержали небольшие включения примесных фаз. Для составов, где замещение катионов La и/или Ga катионами Sr и/или Mg соответственно, составляло менее 20 ат. % количества этих фаз были минимальны и представляли собой отдельные редкие включения. Состав примесных фаз определялся методом рентгеноспектрального микроанализа и приведен в табл. 1. Рентгеноспектральный микроа-

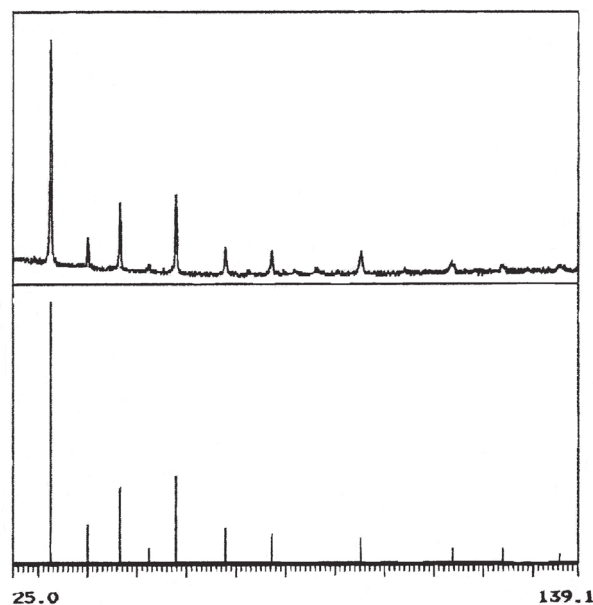


Рис. 1. Рентгенограмма образца твердого электролита  $\text{La}_{0,88}\text{Sr}_{0,12}\text{Ga}_{0,82}\text{Mg}_{0,18}\text{O}_{2,85}$

Таблица 1. Примесные фазы в LSGM керамике различного состава и условия синтеза

Образцы	Температура обжига (длительность)	Температура окончательного синтеза (длительность)	Примесные фазы
LSGM5-5	1473 К (1 ч)	1723 К (1,5 ч)	Следы $\text{LaSrGa}_3\text{O}_7$ и $\text{La}_4\text{Ga}_2\text{O}_9$
LSGM10-10	1473 К (1 ч)	1723 К (1,5 ч)	Следы $\text{LaSrGa}_3\text{O}_7$ и $\text{La}_4\text{Ga}_2\text{O}_9$
LSGM15-15	1473 К (1 ч)	1723 К (1,5 ч)	Следы $\text{LaSrGa}_3\text{O}_7$
LSGM20-20	1473 К (1 ч)	1723 К (1,5 ч)	$\text{LaSrGa}_3\text{O}_7$ и $\text{La}_4\text{Ga}_2\text{O}_9$
LSGM10-20	1693 К (10 ч)	-	$\text{La}_4\text{Ga}_2\text{O}_9$
LSGM20-15	1373 К (1 ч)	1793 К (10 ч)	$\text{LaSrGa}_3\text{O}_7$
LSGM20-15	1573 К (1 ч)	1793 К (10 ч)	$\text{LaSrGa}_3\text{O}_7$
LSGM20-15	1793 К (1 ч)	1793 К (6 ч)	$\text{LaSrGa}_3\text{O}_7$

нализ применялся и для определения элементного состава основной фазы образцов.

Концентрация стронция и магния в основной фазе LSGM соответствует введенному количеству допантов лишь до значений  $x$  и  $y$  около 0,16. При введении большего количества стронция и магния их содержание в основной фазе LSGM выходит на насыщение и не меняется. Позже авторы [25] подтвердили установленный нами предел растворимости магния в LSGM. Наличие в керамике следов примесных фаз, вероятно, обусловлено тем, что при охлаждении образцов после синтеза некоторое количество твердого раствора «разваливается» в соответствии с диаграммой состояния [10]. Возможно, сказывается также некоторая не-

гомогенность смеси исходных реактивов, несмотря на тщательное их перемешивание до и после предварительного обжига и/или малые отличия в энергии образования основной и примесных фаз.

#### Механизм кислородной реакции на платиновом электроде в контакте с электролитом $(\text{La,Sr})(\text{Ga,Mg})\text{O}_3$

На рисунке 2 показана микрофотография, сделанная с внешней поверхности исследованных платиновых электродов, припеченных к таблеткам LSGM электролита.

Морфологию электродов можно охарактеризовать как высокопористую структуру, типичную для газовых электродов такого типа.

На рисунке 3а и 3б продемонстрированы характерные спектры импеданса, зарегистрированные на двух идентичных электрохимических ячейках, которые находились в одной и той же измерительной ячейке при 543 °С и парциальном давлении кислорода,  $P_{\text{O}_2}$ , равном 1 и  $4 \cdot 10^{-5}$  атм, соответственно. При одинаковом газовом окружении различие в величинах их поляризационной проводимости не превышало 5 %. Далее все результаты будут представлены лишь для одной из исследованных электрохимических ячеек.

На рисунке 4 в логарифмических координатах показаны данные по зависимости поляризационной проводимости ( $\sigma_{\eta}$ ) от парциального давления кислорода ( $P_{\text{O}_2}$ ) при различных температурах, а на рис. 5 те же результаты приведены в виде температурных зависимо-

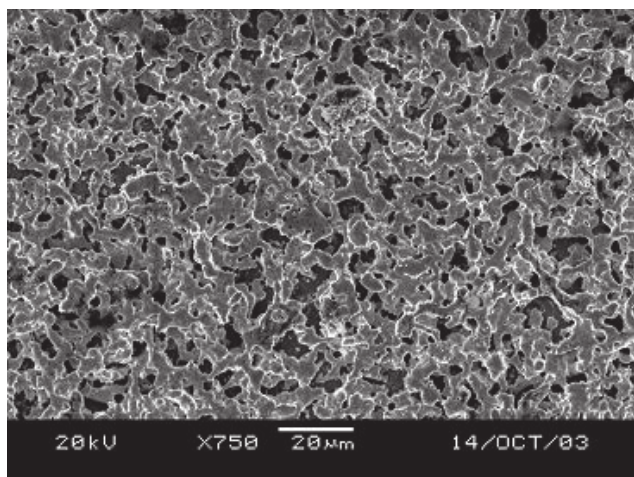


Рис. 2. Микроизображение поверхности Pt электрода, сформированного на LSGM электролите

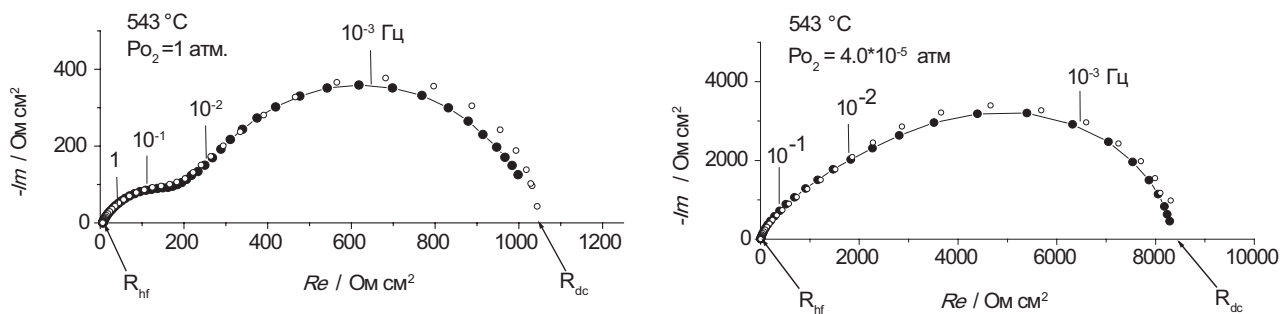


Рис. 3. Спектры импеданса двух идентичных ячеек Pt, O<sub>2</sub> | LSGM | Pt, O<sub>2</sub> при 543 °С и парциальном давлении кислорода 1 атм и 4·10<sup>-5</sup> атм. Залитые символы – ячейка 1, пустые символы – ячейка 2

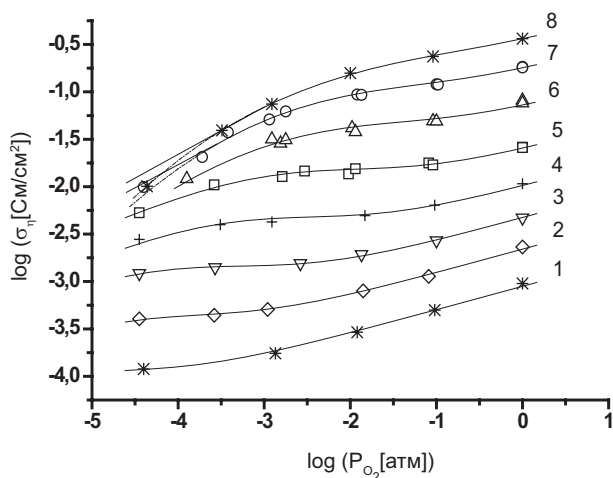


Рис. 4. Зависимость поляризационной проводимости электродной системы Pt, O<sub>2</sub> | LSGM от парциального давления кислорода в газовой фазе при температурах (°С): 1 – 543; 2 – 593; 3 – 644; 4 – 693; 5 – 743; 6 – 794; 7 – 835; 8 – 874. Сплошные линии и пунктир – результаты фитинга экспериментальных данных уравнением 12 и 14 соответственно

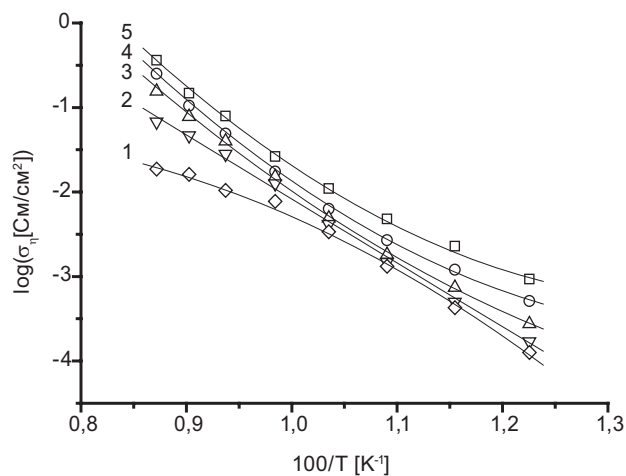


Рис. 5. Зависимость поляризационной проводимости электродной системы Pt, O<sub>2</sub> | LSGM от температуры при различных парциальных давлениях кислорода в газовой фазе (атм.): 1 – 1·10<sup>-4</sup>; 2 – 1·10<sup>-3</sup>; 3 – 0,01; 4 – 0,1; 5 – 1

стей. И та, и другая существенно нелинейны, исходя из чего можно предполагать, что кислородная реакция на данном электроде протекает сложным образом.

Для количественного описания полученных экспериментальных данных нами предлагается модель двух параллельных маршрутов протекания кислородной реакции. Один из них, в соответствии с представлениями, развитыми для аналогичных электродных систем с электролитами на основе ZrO<sub>2</sub> и CeO<sub>2</sub> [26–29], локализуется вблизи трехфазной границы электрод–электролит–газ и лимитируется скоростью поверхностной диффузии адсорбированного атомарного кислорода по поверхности плати-

ны. Другой маршрут может реализоваться через двухфазную границу раздела электролит–газ. Как было показано в [16], изотопный обмен кислорода газовой фазы с кислородом LSGM электролита протекает примерно в 100 раз быстрее, чем с электролитом на основе ZrO<sub>2</sub>. Поскольку, кроме того, в атмосфере свободного кислорода дырочная проводимость и число переноса дырок в LSGM выше, чем в ZrO<sub>2</sub> электролитах [4, 30], то диффузия дырок от границы электролит–газ к границе электрод–электролит и последующая их рекомбинация с электронами платины вполне могут обеспечить параллельный поток кислорода через границу электролит–газ.

Нами предполагаются следующие маршруты кислородной реакции.

Маршрут I

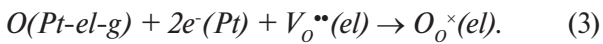
Стадия 1: диссоциативная адсорбция кислорода на поверхности платины



Стадия 2: диффузия атомарного адсорбированного кислорода по поверхности платины к трехфазной области электрод–электролит–газ



Стадия 3: восстановление атомарного кислорода до иона, который встраивается в кристаллическую решетку электролита

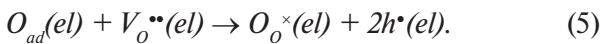


Маршрут II.

Стадия 1: диссоциативная адсорбция кислорода газовой фазы на поверхности электролита



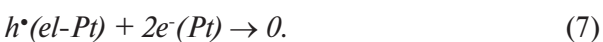
Стадия 2: вхождение кислорода в кристаллическую решетку электролита с образованием в нем электронных дырок



Стадия 3: диффузия дырок в объеме электролита к платине



Стадия 4: рекомбинация дырок, продиффундировавших к границе раздела электролит–платина, с электронами платины



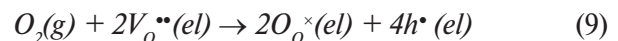
В уравнениях, записанных выше, и в последующих уравнениях в скобках указаны фазы ( $g$  – газ,  $Pt$  – платина,  $el$  – электролит) или границы раздела, где локализована соответствующая частица. Индекс  $ad$  обозначает адсорбированное состояние,  $V_o^{\bullet\bullet}$  и  $O_o^{\times}$  – кислородная вакансия и ион кислорода в кислородном узле решетки электролита соответственно. Приведенные выше уравнения записаны для катодного процесса.

В [28, 31] было установлено, что кислород адсорбируется на платине в двух формах: сильносвязанной и слабосвязанной. Максимум поляризационной проводимости реализуется при парциальном давлении кислорода, соответствующим степени заполнения поверхности платины,  $\theta$ , адсорбированным слабосвязанным атомарным кислородом, равной 0,5 [26–29]. В соответствии с разобранными в этих работах представлениями, установление равновесного покрытия платины слабосвязанными адсорбированными атомами кислорода протекает очень быстро (стадия 1 маршрута I), а переход заряда (стадия 3 маршрута I) не является скоростьюопределяющим. В качестве лимитирующей стадии данного маршрута кислородной реакции выступает процесс доставки адсорбированного на платине кислорода к трехфазной границе путем поверхностной диффузии (стадия 2 маршрута I). Поляризационная проводимость в таком случае описывается выражением вида

$$\sigma_{\eta 1} = K_1(Po_2)^{1/2} / [(Po_2^{max})^{1/2} + (Po_2)^{1/2}]^2, \quad (8)$$

где  $K_1$  – коэффициент,  $Po_2^{max}$  – парциальное давление кислорода, при котором реализуется максимальное значение поляризационной проводимости, а степень заполнения поверхности платины адсорбированным кислородом равна 0,5.

Будем предполагать, что скорость второго маршрута протекания кислородной реакции лимитируется 3-ей стадией. Из уравнения реакции образования электронных дырок в электролите



следует, что

$$[h^{\bullet}] \sim (Po_2)^{1/4} \quad (10)$$

и если подвижность дырок не зависит от их концентрации, поляризационная проводимость, определяемая диффузией дырок в электролите, описывается выражением

$$\sigma_{\eta 2} = K_2(Po_2)^{1/4}. \quad (11)$$

Полная поляризационная проводимость представляет собой сумму поляризационных проводимостей обоих маршрутов электродной реакции (8) и (11):

$$\sigma_{\eta} = \sigma_{\eta_1} + \sigma_{\eta_2} = K_1(Po_2)^{1/2}/[(Po_2^{max})^{1/2} + (Po_2)^{1/2}]^2 + K_2(Po_2)^{1/4}. \quad (12)$$

Фитинг параметров уравнения (12) к экспериментальным данным (рис. 4) проводился методом нелинейной регрессии. Выражение (12) хорошо описывает экспериментальные данные почти во всем изученном диапазоне температур и давлений, что показано на рис. 4 сплошными линиями. Лишь при самых высоких температурах: 1108 и 1147 К, — и самых низких парциальных давлениях кислорода: ниже 32 Па, — экспериментальные значения поляризационной проводимости были несколько ниже расчетных.

Это несоответствие устранялось при учете диффузионных затруднений в газовой фазе за счет конечной скорости молекулярной диффузии кислорода в порах электрода — транспортной стадии, последовательной к маршрутам I и II. Поляризационная проводимость, отвечающая этому процессу, описывается выражением

$$\sigma_{\eta_3} = K_3 Po_2, \quad (13)$$

где  $K_3$  — коэффициент пропорциональности. Тогда полная поляризационная проводимость

$$\begin{aligned} \sigma_{\eta} &= [(\sigma_{\eta_1} + \sigma_{\eta_2})^{-1} + \sigma_{\eta_3}^{-1}]^{-1} = \\ &= \{[K_1(Po_2)^{1/2}/[(Po_2^{max})^{1/2} + (Po_2)^{1/2}]^2 + \\ &+ K_2(Po_2)^{1/4}]^{-1} + K_3^{-1} Po_2^{-1}\}^{-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

Нелинейный регрессионный анализ по уравнению (14) показал, что для самой высокой температуры, при которой проводились эксперименты, — 1147 К — значение коэффициента  $K_3$  составило 0,003 См/см<sup>2</sup>Па. Поскольку процесс диффузии в газовой фазе не является активационным, последующий анализ для всех остальных зависимостей, полученных при более низких температурах, был проведен по уравнению (14) с фиксированием полученного значения коэффициента  $K_3$ . На рисунке 4 результаты фитинга по уравнению (14) показаны пунктирной линией.

Температурная зависимость рассчитанных значений  $Po_2^{max}$  в аррениусовских координатах представлена на рис. 6. Путем линейной аппроксимации было найдено, что эффективная энергия активации  $E_a(Po_2^{max})$  составляет  $218 \pm 5$  кДж/моль. По физическому смыслу

$-E_a(Po_2^{max})$  соответствует энтальпии адсорбции кислорода на поверхности платины при степени покрытия ее кислородом  $\theta=0,5$ . Экстраполяция зависимости на рис. 6 к нулевому значению на оси абсцисс дает значение изменения энтропии при адсорбции кислорода на поверхности платины, равное  $163 \pm 6$  Дж/моль К. Это следует из того, что при термодинамическом равновесии

$$\Delta G_{ad}^0 = -RT \ln K_{ad} = \Delta H_{ad}^0 - T\Delta S_{ad}^0, \quad (15)$$

где  $\Delta G_{ad}^0$ ,  $\Delta H_{ad}^0$  и  $\Delta S_{ad}^0$  — изменение стандартной энергии Гиббса, изменение стандартной энтальпии и изменение стандартной энтропии при адсорбции кислорода на платине, соответственно,  $R$  — универсальная газовая постоянная, а  $K_{ad}$  — константа адсорбционного равновесия. Диссоциативная адсорбция кислорода описывается уравнением



где  $[ \bullet ]_{ad}(Pt)$  — вакантное место для адсорбции кислорода на поверхности платины. Предполагая ленгмюровский характер адсорбции, т.е.  $[O_{ad}] = \theta$  и  $[ \bullet ]_{ad} = 1-\theta$ ,

$$K_{ad} = \theta^2/Po_2(1-\theta)^2. \quad (17)$$

В случае, когда  $\theta = 0,5$ ,

$$K_{ad} = 1/Po_2^{max} \quad (18)$$

и окончательно, в соответствии с (15),

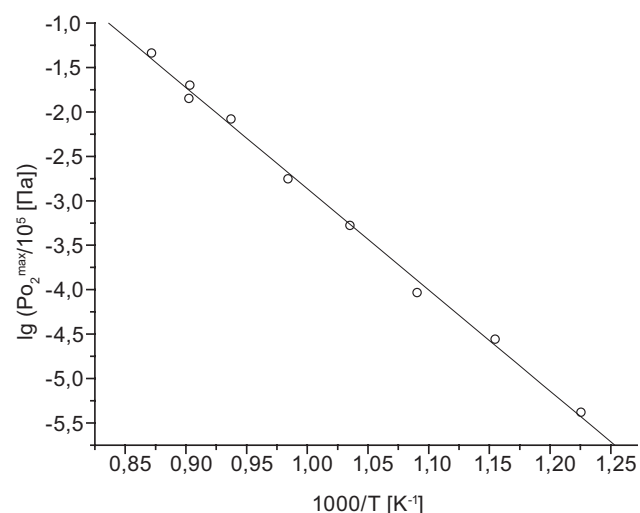


Рис. 6. Температурная зависимость значений  $Po_2^{max}$  в выражении (12)



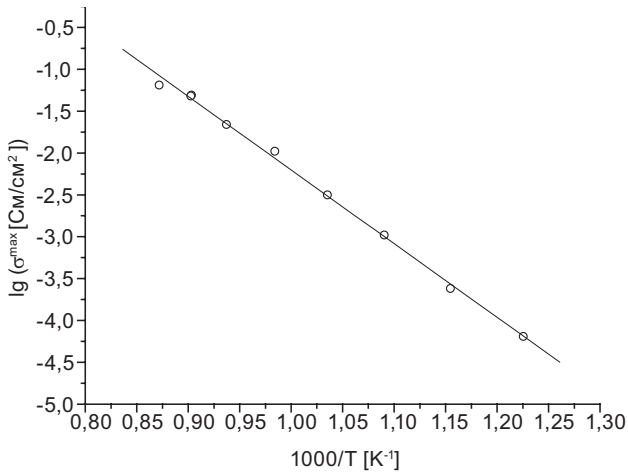


Рис. 7. Температурная зависимость значений  $\sigma_{\eta}^{max}$  выражения (12)

$$\ln(Po_2^{max}) = \Delta H_{ad}^{max}/RT - \Delta S_{ad}^{max}/R. \quad (19)$$

На рисунке 7 представлена температурная зависимость расчетных значений  $\sigma_{\eta}^{max}$ , из которой была определена эффективная энергия активации

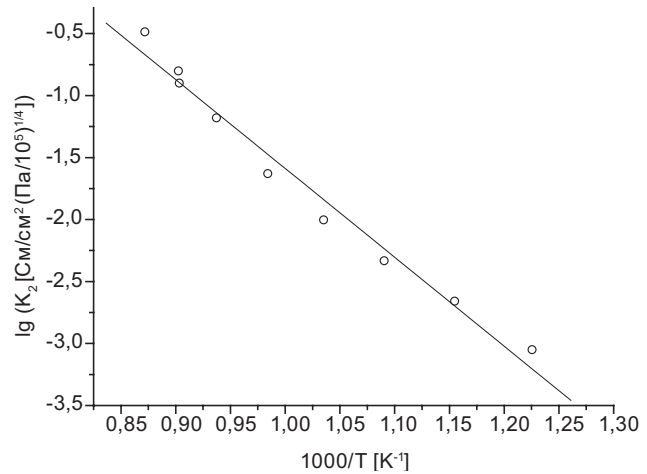


Рис. 8. Температурная зависимость значений коэффициента  $K_2$  в выражении (12)

ции  $E_a(\sigma_{\eta}^{max})$ , равная  $168 \pm 4$  кДж/моль. Физический смысл эффективной энергии активации поляризационной проводимости в максимуме  $E_a(\sigma_{\eta}^{max})$  — энергия активации процесса поверхностной диффузии кислорода, адсорбированного на платине при степени покрытия  $\theta = 0,5$ .

Таблица 2. Изменения энтальпии адсорбции кислорода,  $\Delta H_{ad}^{max}$ , энтропии адсорбции кислорода,  $\Delta S_{ad}^{max}$ , и эффективной энергии активации поверхностной диффузии кислорода,  $E_a(\sigma_{\eta}^{max})$

Литературный источник	$-\Delta H_{ad}^{max}$ [кДж/моль]	$-\Delta S_{ad}^{max}$ [Дж/моль К]	$E_a(\sigma_{\eta}^{max})$ [кДж/моль]
Окамото и др. [32]	180	138±11	194±16
Мицусаки и др. [27]	222±17	188±44	172±13
Сакураи и др. [33]	200	-	-
Кузин, Комаров [40]	220	199±6	145±5
Швандт, Веппнер [29]	195±24	178±27	204±5
Наши данные	218±5	163±6	168±4

Таблица 3. Энергия активации дырочной проводимости LSGM электролитов

Литературный источник	Состав	$E_a(\sigma_{\eta})$ (кДж/моль)
Ямаджи и др. [30]	$La_{0,90}Sr_{0,10}Ga_{0,80}Mg_{0,20}O_{3-\alpha}$	116
Ким, Йоо [4]	$La_{0,90}Sr_{0,10}Ga_{0,80}Mg_{0,20}O_{3-\alpha}$	108±12
Шмидт и др. [35]	$La_{0,90}Sr_{0,10}Ga_{0,80}Mg_{0,20}O_{3-\alpha}$	102
Йанг, Чои [5]	$La_{0,80}Sr_{0,20}Ga_{0,80}Mg_{0,20}O_{3-\alpha}$	93
	$La_{0,90}Sr_{0,10}Ga_{0,90}Mg_{0,10}O_{3-\alpha}$	83
	$La_{0,90}Sr_{0,10}Ga_{0,80}Mg_{0,20}O_{3-\alpha}$	88
Вейткамп, Вимхефер [36]	$La_{0,80}Sr_{0,20}Ga_{0,85}Mg_{0,15}O_{3-\alpha}$	64
	$La_{0,80}Sr_{0,20}Ga_{0,80}Mg_{0,20}O_{3-\alpha}$	87
	$(La_{0,80}Sr_{0,20/0,95}Ga_{0,80}Mg_{0,20}O_{3-\alpha})$	74
	$(La_{0,90}Nd_{0,10/0,80}Ga_{0,80}Mg_{0,20}O_{3-\alpha})$	106
Хартон и др. [34]	$(La_{0,90}Sr_{0,10/0,98}Ga_{0,80}Mg_{0,20}O_{3-\alpha})$	144±8
Расчетное значение, полученное нами	$La_{0,88}Sr_{0,12}Ga_{0,82}Mg_{0,18}O_{3-\alpha}$	137±3

В табл. 2 для сравнения приведены значения  $\Delta H_{ad}^{max}$ ,  $\Delta S_{ad}^{max}$  и  $E_a(\sigma_{\eta l}^{max})$ , определенные в работах [27–29, 32, 33], и наши результаты. Их близость свидетельствует о правильных предположениях, сделанных о природе электродных процессов в изученной нами системе. Температурная зависимость коэффициента  $K_2$  в уравнении (12) приведена на рис. 8. Он характеризует транспортные свойства электронных дырок в LSGM электролите. Следует ожидать, что его эффективная энергия активации должна соответствовать энергии активации дырочной проводимости этого электролита, поскольку дырочная электропроводность электролита осуществляется по диффузионному механизму. Литературные данные об энергии активации дырочной проводимости в LSGM электролитах и эффективная энергия активации коэффициента  $K_2$ , определенная нами, приведены в табл. 3. Результаты работ [4, 30, 34] достаточно близки к расчетной величине, полученной нами.

Таким образом, хорошее описание полученных экспериментальных данных выражением (12), а также значений соответствующих величин, приведенных в таблицах 2 и 3, с независимыми литературными данными показывают, что кинетика электродной реакции в системе Pt, O<sub>2</sub> | LSGM адекватно описывается предложенной моделью двух параллельных маршрутов кислородной реакции.

#### Электрохимическое поведение платинового электрода в контакте с (La,Sr)(Ga,Mg)O<sub>3</sub> электролитом в атмосфере H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O

Исследуемая электродная система Pt, H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O | LSGM представляла собой пористую платину, нанесенную на электролит состава La<sub>0,88</sub>Sr<sub>0,12</sub>Ga<sub>0,82</sub>Mg<sub>0,18</sub>O<sub>2,85</sub>. В зависимости от содержания водорода и воды в газе импедансные спектры симметричной электрохимической ячейки



представляют собой одну искаженную или две перекрывающихся дуги (рис. 9). Поскольку вид спектров не дает однозначных оснований для выбора эквивалентной схемы, по которой можно проводить их анализ, был проведен анализ температурных и концентрационных зависимостей постоянного токового поляризационного сопротивления,  $R_{\eta}$ , Pt, H<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O | LSGM электродов.

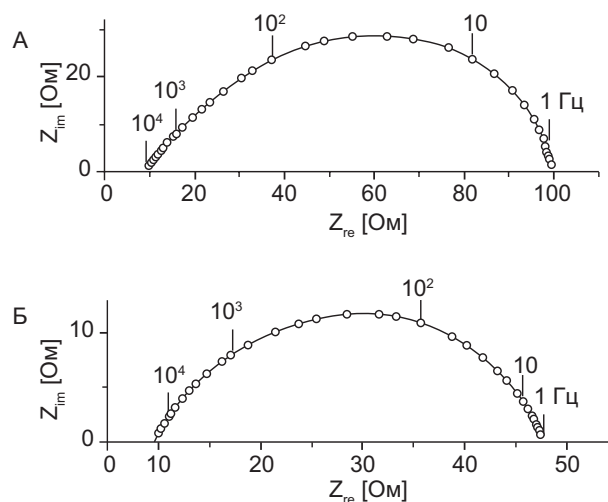


Рис. 9. Спектры импеданса электрохимической ячейки Pt(H<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O+Ar) | LSGM | (H<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O+Ar) Pt при 719°C. А – P<sub>H<sub>2</sub></sub> = 0,0097 атм, P<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = 0,0429 атм.; Б – P<sub>H<sub>2</sub></sub> = 0,0875 атм, P<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = 0,155 атм.

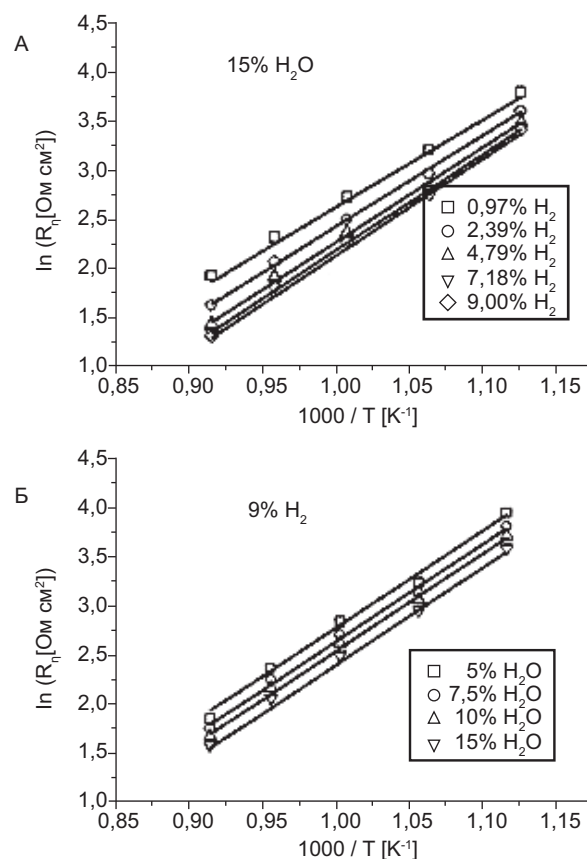
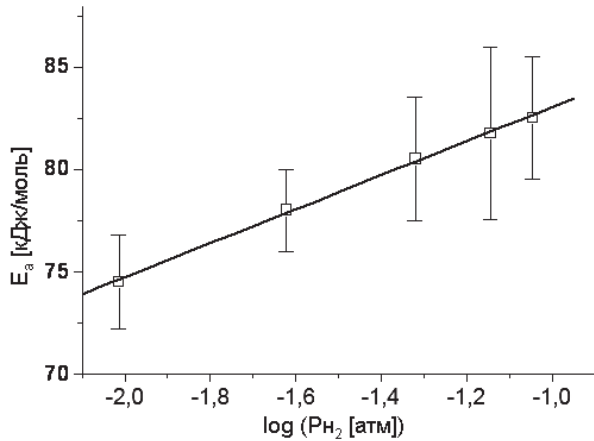
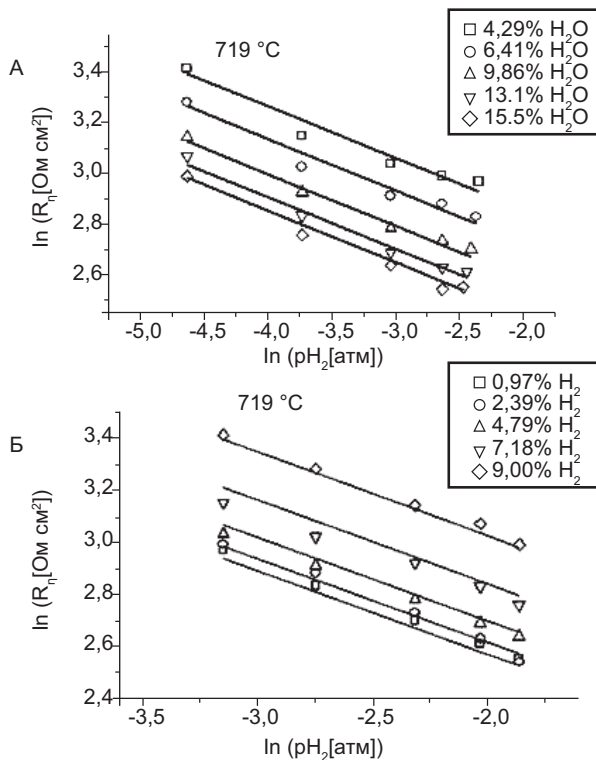


Рис. 10. Температурные зависимости поляризационного сопротивления Pt(H<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O+Ar) | LSGM электрода при содержании в газе 15% H<sub>2</sub>O (А) и 9% H<sub>2</sub> (В). Прямые, описывающие зависимости – результат линеаризации экспериментальных данных.



**Рис. 11.** Зависимость энергии активации поляризационного сопротивления Pt(H<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O+Ar) | LSGM электрода в зависимости от концентрации водорода в газе

Примеры температурных зависимостей удельного поляризационного сопротивления, R<sub>η</sub>, электрохимической ячейки (20) в условиях постоянства концентрации воды и различ-



**Рис. 12.** Зависимости поляризационного сопротивления Pt(H<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O+Ar) | LSGM электрода при 719 °С от содержания в газовой фазе водорода (А) и воды (В). Линии, описывающие зависимости – результат расчетов по выражению (24)

ного содержания водорода в газовой фазе, а также при постоянном содержании водорода и различном содержании воды, приведены на рис. 10. Приведенные зависимости говорят о том, что энергия активации поляризационного сопротивления, E<sub>акт</sub> не зависит от концентрации воды в газе, но несколько меняется в зависимости от концентрации водорода. Зависимость E<sub>акт</sub> от концентрации водорода приведена на рис. 11 и описывается выражением вида

$$E_{акт} = E_a + a \ln(P_{H_2}), \tag{21}$$

где E<sub>a</sub> и a равны 91,3±0,3 и 3,6±0,1 кДж/моль соответственно.

Примеры концентрационных зависимостей удельного поляризационного сопротивления, R<sub>η</sub>, от содержания водорода при постоянстве содержания воды и от содержания воды при постоянстве давления водорода приведены на рис. 12 для температуры 870 °С.

Если представить поляризационную проводимость, σ<sub>η</sub>=1/R<sub>η</sub>, выражением вида

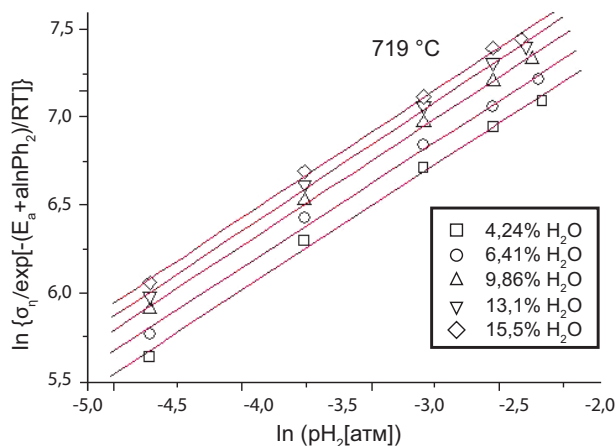
$$\sigma_{\eta} = K P_{H_2}^n P_{H_2O}^m \exp\left(-\frac{E_{акт}}{RT}\right), \tag{22}$$

где R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура, K, n и m – постоянные, то для определения порядка скорости реакции по водороду, n, можно использовать выражение

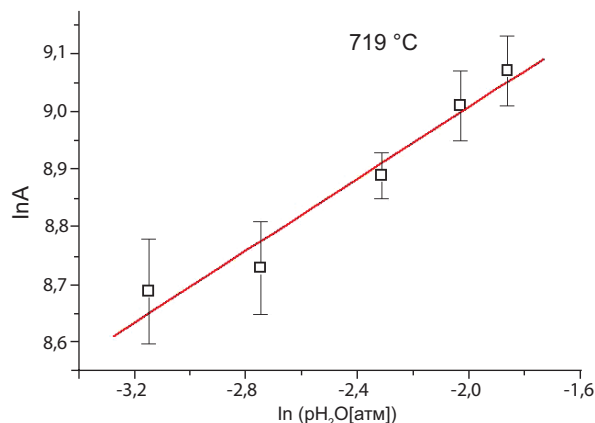
$$\ln[\sigma_{\eta}/\exp(-E_{акт}/RT)] = A + n \ln P_{H_2}, \tag{23}$$

где A=lnK+m lnP<sub>H<sub>2</sub>O</sub> при P<sub>H<sub>2</sub></sub>=1 атм. Пример таких зависимостей показан на рис. 13, где в координатах ln[σ<sub>η</sub>/exp(-E<sub>акт</sub>/RT)]– lnP<sub>H<sub>2</sub></sub> представлены те же экспериментальные данные, что и на рис. 12. Путем линеаризации зависимостей были определены значения A. В свою очередь, из зависимости A от lnP<sub>H<sub>2</sub>O</sub> можно определить значения lnK и порядка скорости реакции по воде, m – рис. 14. Найденные таким образом при различных температурах значения lnK, n и m приведены в табл. 4.

Во всем изученном температурном интервале, за исключением самой высокой температуры – 1143 К– константа K, и показатели степени P<sub>H<sub>2</sub></sub> и P<sub>H<sub>2</sub>O</sub> – n и m, в пределах ошибок их определения не зависят от температуры. Это указывает на то, что механизм электродной реакции окисления водорода / восстановления воды в области



**Рис. 13.** Экспериментальные данные рис. 12, представленные в координатах, соответствующих выражению (23). Линии – результат линеаризации данных



**Рис. 14.** Зависимость параметра А выражения (23) от концентрации воды в газовой фазе

температур между 888 и 1092 К не изменяется, а поведение поляризационной проводимости исследуемой электродной системы в широком диапазоне условий адекватно описывается эмпирическим выражением

$$\sigma_{\eta} = K P_{H_2}^n P_{H_2O}^m \exp \left[ -\frac{(E_a + a \ln P_{H_2})}{RT} \right]. \quad (24)$$

Соответствие между расчетом и экспериментом можно видеть из рис. 13, где линии – расчетные зависимости.

На основании полученных результатов можно с большой вероятностью полагать, что вблизи равновесного электродного потенциала скорость электродного процесса контролируется одной, а не несколькими стадиями. В противном случае трудно понять постоянство параметров  $K$ ,  $m$  and  $n$  в широком диапазоне температур и парциальных давлений водорода и воды.

**Таблица 4.** Значения  $\ln K$ ,  $n$  и  $m$  выражения (22) при различных температурах

T (К)	$\ln K$ (См см <sup>-2</sup> )	n	m
888	9,90±0,05	0,66±0,05	0,41±0,02
941	9,8±0,1	0,67±0,03	0,37±0,05
992	9,63±0,09	0,64±0,04	0,32±0,04
1043	9,7±0,1	0,64±0,03	0,33±0,04
1092	9,9±0,1	0,66±0,03	0,37±0,06
1143	10,6±0,1	0,71±0,04	0,55±0,01

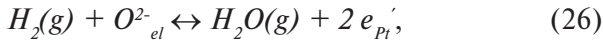
Выявлена интересная особенность: энергетика электродного процесса зависит от концентрации одного из компонентов газовой смеси – водорода, которая, скорее всего, указывает на то, что поверхность платины энергетически неоднородна в отношении хемосорбции водорода [37]. Природой энергетической неоднородности поверхности электрода могут быть «биографические» особенности, например, наличие на нем различно ориентированных кристаллических граней. Кроме того, неоднородность поверхности может быть спровоцирована самим адсорбционным процессом, например, электростатическим взаимодействием адсорбированных частиц. Если в образовании хемосорбционных связей участвуют делокализованные электроны, то каждый адсорбционный акт будет приводить к изменению электронной структуры адсорбента, концентрация электронов на поверхности будет изменяться, а уровень Ферми смещаться. Энергия активации адсорбции на энергетически неоднородной поверхности зависит от степени покрытия,  $\theta$ , и описывается линейным выражением вида [38]:

$$E = E_a + \alpha \theta, \quad (25)$$

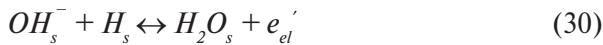
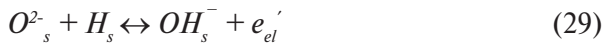
где  $\alpha$  – постоянная. Выражение (25) находится в соответствии с экспериментально обнаруженной зависимостью (21), если принять, что  $\theta \sim \ln(P_{H_2})$ .

На сегодняшний день относительно механизма изучаемого электродного процесса можно высказать лишь гипотетические соображения.

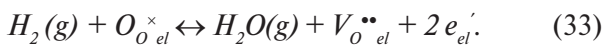
Так, наблюдаемая зависимость поляризационного сопротивления от состава газа может быть объяснена, если принять, что электродная реакция происходит на поверхности электролита вблизи трехфазной границы электрод–электролит–газ. Механизм электродной реакции



где в скобках указаны соответствующие фазы: «g» – газ, «el» – электролит, «Pt» – платина, может быть описан последовательностью следующих реакций:



где индекс «s» относится к адсорбционному состоянию частицы. Реакцию равновесия между газовой фазой и электролитом можно записать в виде:



Предполагая, что скорость электродного процесса,  $v$ , контролируется только реакцией (30), запишем

$$\sigma_{\eta} \sim v \sim [H_2O_s][e_{el}'] \sim [OH_s^-][H_s], \quad (34)$$

а из уравнения (33) следует, что

$$[e_{el}'] \sim (P_{H_2}/P_{H_2O})^{0,5}. \quad (35)$$

Кроме того, можно дополнительно предположить условие адсорбционного равновесия:  $[H_2O_s] \sim P_{H_2O}$ . Объединяя его с уравнениями (34 и 35), получаем зависимость поляризационной проводимости от состава газовой фазы:

$$\sigma_{\eta} \sim v \sim (P_{H_2})^{0,5} (P_{H_2O})^{0,5}. \quad (36)$$

Как показано выше, значения показателей степени  $n$  и  $m$ , определенные эксперименталь-

но, отличаются от 0,5 незначительно, а их сумма близка к единице (табл. 4). Таким образом, выражение (36) удовлетворительно соответствует результатам экспериментов. Более детальное описание механизма процессов на сегодняшний день невозможно, поскольку свойства поверхности платины, а тем более поверхности LSGM, в отношении адсорбции водорода и воды при высоких температурах не изучены. Следует принимать во внимание и то, что уравнение (33) описывает установление равновесия в объеме электролита, а не на его поверхности. Кроме того, соотношение между  $[H_2O_s]$  и  $P_{H_2O}$  может иметь более сложный вид.

### Электроды для топливного элемента с (La,Sr)(Ga,Mg)O<sub>3</sub> электролитом.

Как уже отмечалось ранее, одним из самых электрохимически активных материалов для кислородного электрода твердооксидных топливных элементов является La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CoO<sub>3-δ</sub> [39]. В случае традиционно используемого YSZ электролита применение LSC затруднительно вследствие большого различия в коэффициентах их термического расширения, а также из-за того, что при температурах выше 1000 °C LSC взаимодействует с YSZ, образуя низкопроводящие цирконаты лантана и стронция. Применение LSC в топливных элементах с электролитами LSGM представляется более перспективным, т.к. схожесть кристаллической структуры и элементного состава LSGM и LSC уменьшает вероятность образования малопроводящих фаз при их взаимодействии, а значение коэффициента термического расширения LSGM несколько выше, чем у YSZ.

В качестве материала катода использовался кобальтит состава La<sub>0,7</sub>Sr<sub>0,3</sub>CoO<sub>3-δ</sub>, а электролитом служил изученный ранее La<sub>0,88</sub>Sr<sub>0,12</sub>Ga<sub>0,82</sub>Mg<sub>0,18</sub>O<sub>2,85</sub>. Порошковый LSC электрод припекался к электролиту при 1250 °C в течение 1 часа. Для повышения электрохимической активности в поры электрода путем импрегнирования вводился нитрат празеодима, который разлагался до PrO<sub>2-x</sub> при 600 °C.

Свойства LSC катода были изучены методами электрохимического импеданса и поляризационных зависимостей. Импедансный спектр симметричной электрохимической ячейки с LSC электродами приведен на рис. 15. Уже при 600 °C в воздушной атмосфере поляризационное сопротивление электродов достаточно мало

и составляет  $0,7 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ . Изучение поляризационных зависимостей полученных электродов в температурном диапазоне  $600\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$  подтвердило их высокую электрохимическую активность. Эти результаты показаны на рис. 16. Совпадение прямого и обратного хода поляризационных зависимостей указывает на обратимое поведение электродов. Ранее характеристики электродов из кобальтита лантана–стронция состава  $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{CoO}_{3-\delta}$  изучалась Хуангом с соавт. [40] и Марином с соавт. [41]. За счет использования электрокатализатора из оксида празеодима наши электроды проявляют значительно более высокую электрохимическую активность. При поляризации в  $25 \text{ мВ}$  плотность тока составляла  $35$  и  $610 \text{ мА}/\text{см}^2$  для  $600$  и  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , соответственно, в случае наших электродов и лишь  $20$  и  $150 \text{ мА}/\text{см}^2$  для тех же температур по данным [55] и  $220 \text{ мА}/\text{см}^2$  при  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  по данным [56].

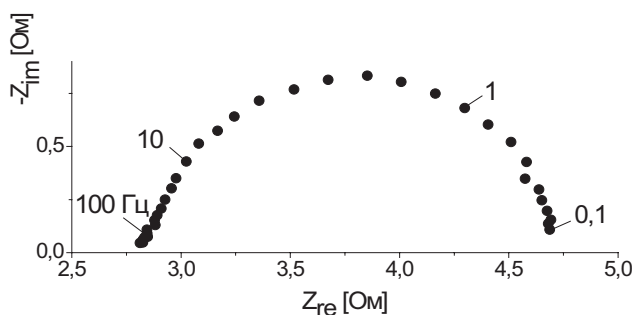


Рис. 15. Импедансный спектр электрохимической ячейки LSC, воздух | LSGM | воздух, LSC при  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ . Площадь каждого из электродов  $0,73 \text{ см}^2$

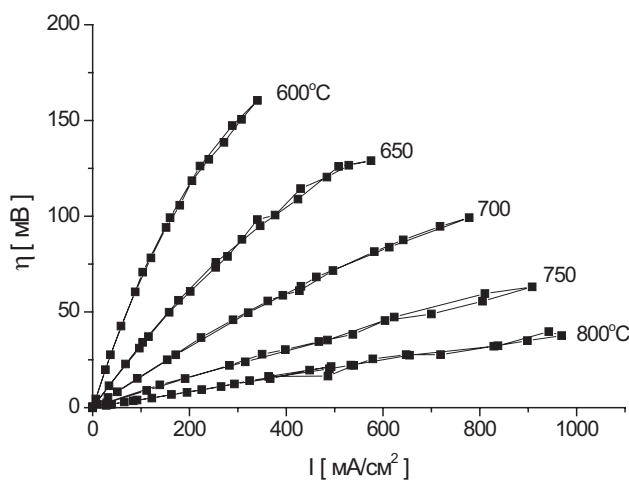


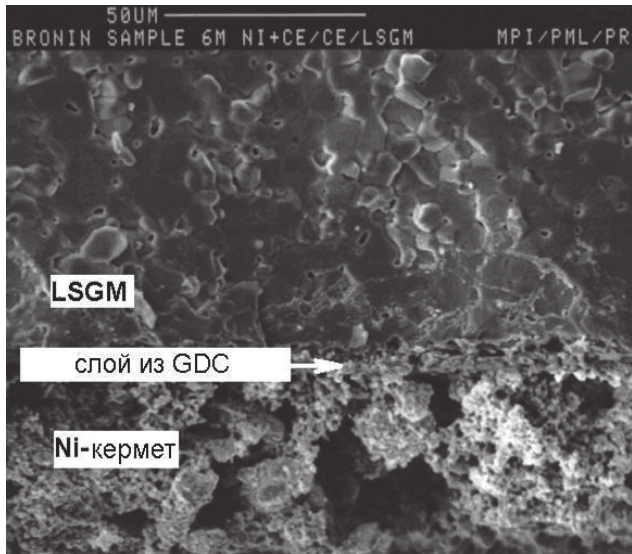
Рис. 16. Поляризационные зависимости LSC, воздух | LSGM электродов при различных температурах

Создать эффективный анод для топливного элемента с LSGM электролитом оказалось намного сложнее, чем катод. Осложняющим обстоятельством является то, что при высоких температурах LSGM химически взаимодействует с оксидом никеля, являющимся основным компонентом электродной массы для изготовления анодов. При этом образуется никелат лантана [42], который в восстановительной среде разлагается с образованием оксида лантана [43]. Оксид лантана имеет очень высокое электрическое сопротивление и препятствует протеканию тока через анод. Одним из способов предотвратить такое взаимодействие является организация тонкого интерфейсного слоя из кислородного проводника между анодом и LSGM электролитом, инертного в химическом отношении к никелю. Обычно этот промежуточный между электролитом и анодом слой изготавливается из твердого электролита на основе  $\text{CeO}_2$  [44, 45].

В наших экспериментах для предотвращения химического взаимодействия на поверхность LSGM электролита методом пиролиза раствора карбоксилатов наносился тонкий слой твердого электролита  $\text{Ce}_{0,82}\text{Gd}_{0,18}\text{O}_{1,91}$  (GDC) церия и гадолиния [46]. Как и при разработке катода, в качестве несущего электролита использовался  $\text{La}_{0,88}\text{Sr}_{0,12}\text{Ga}_{0,82}\text{Mg}_{0,18}\text{O}_{2,85}$ . Интерфейсный слой припекали к LSGM электролиту на воздухе при температуре  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Толщина этого слоя варьировалась от  $4,5$  до  $23,5 \text{ мкм}$ .

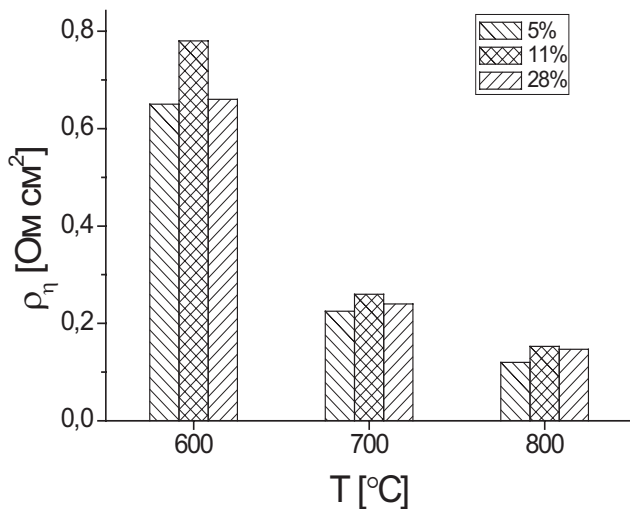
Исходные электродные массы для изготовления никель-керметных анодов готовились из смеси NiO–GDC. Они формировались в виде таблеток и спекались в воздушной атмосфере при  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Их измельчали в агатовой ступке до мелкодисперсного состояния и готовили суспензии с этиловым спиртом и канифолью. Электроды изготавливались методом окрашивания. В случае симметричных ячеек с двумя одинаковыми никель-керметными электродами площадь каждого из них составляла  $0,5 \text{ см}^2$ . Для изучения поляризационных характеристик электродов организовывался электрод сравнения из платины.

Электроды припекали на воздухе при температурах от  $1200$  до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Количество GDC-составляющей в восстановленных электродах составляло  $5$ ,  $11$  и  $28 \text{ мас. } \%$ . Для увеличения электрохимической активности электродов после спекания они про-



**Рис. 17.** Поперечный срез электрохимической ячейки. LSGM электролит (вверху) и Ni-керметный электрод (внизу) разделены пленкой из GDC электролита

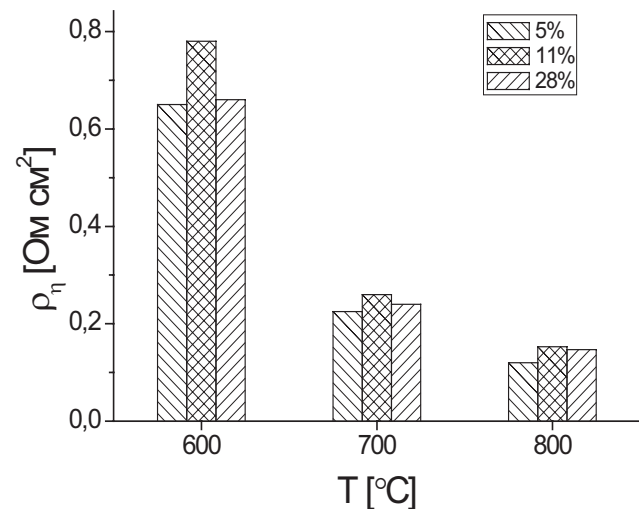
питывались раствором азотнокислого церия и подвергались термообработке, в результате которой азотнокислый церий разлагался с образованием высокодисперсного оксида церия. Последний является эффективным катализатором электродной реакции в восстановительных средах [47, 48].



**Рис. 18.** Влияние количества GDC фазы в Ni-керметном электроде (мас. %) на его поляризационное сопротивление в атмосфере  $H_2(3\% H_2O)$ . По оси абсцисс отложена температура измерения. Толщина GDC слоя  $7 \div 10$  мкм, температура спекания электрода  $1250$  °C

На рис. 17 показано изображение поперечного слома одного из образцов единичных топливных элементов с Ni-керметным анодом и  $L_{a0.7}S_{r0.3}C_{o}O_3$  катодом. Площадь электродов составляла  $0,2-0,3$  см<sup>2</sup>. Видно, что высокопористый никель-керметный электрод состава 95 мас. % Ni – 5 мас. % GDC и LSGM электролит разделены пленкой GDC электролита толщиной около 5 мкм. Эта пленка имеет некоторую пористость, но, как будет ясно из последующего изложения, ее плотности достаточно для предотвращения непосредственного контакта никелевого кермета с LSGM.

Измерения поляризационного сопротивления электродов с различным содержанием GDC фазы показали, что изменение количества GDC в диапазоне от 5 до 28 мас. % мало влияет на электрохимическую активность электродов (рис. 18). Однако увеличение содержания GDC приводит к возрастанию слоевого (продольного) сопротивления анодов от  $0,02$  до  $0,2$  Ом. Поэтому в конструкциях топливных элементов, где необходимым является низкое значение слоевого сопротивления анода, целесообразно использовать Ni-керметные аноды с 5 мас. % GDC. С другой стороны, большее содержание электролитной фазы создает условия, препятствующие спеканию частиц никеля между собой, и,

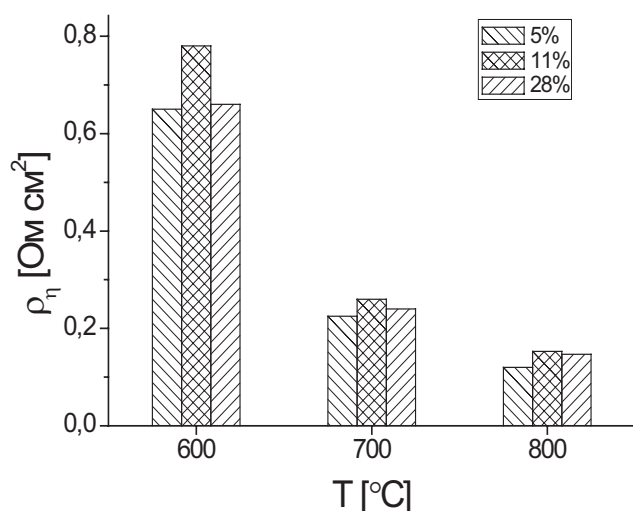


**Рис. 19.** Влияние толщины промежуточного слоя из GDC электролита между LSGM электролитом и электродами из Ni - GDC на поляризационное сопротивление анода в атмосфере  $H_2(3\% H_2O)$ .

следовательно, должно увеличивать микро-структурную стабильность электрода.

Толщина промежуточного слоя из GDC электролита, варьируемая в диапазоне 4,5–23,5 мкм, также мало влияла на поляризационное сопротивление анода, что видно из рис. 19. Это говорит о том, что уже тонкий слой GDC электролита достаточно надежно предотвращает взаимодействие LSGM электролита с оксидом никеля при спекании электрода.

Поскольку механические качества электродов были удовлетворительными лишь при температуре их формирования не ниже 1200 °С, то именно такая температура служила нижней границей при изучении зависимости поляризационного сопротивления электродов от температуры их спекания. С ростом температуры спекания электрода его поляризационное сопротивление возрастает (рис. 20). При температуре формирования анода 1500 °С как поляризационное сопротивление анодов, так и омическое сопротивление электролита возрастали до катастрофических значений (табл. 5), характерных для ячеек с никель-керметными электродами без интерфейсного слоя. Это однозначно указывает на то, что при этом происходило химическое взаимодействие оксида никеля с LSGM электролитом с образованием оксида лантана при восстановлении анода.



**Рис. 20.** Влияние температуры спекания Ni-GDC электродов на их поляризационное сопротивление в атмосфере H<sub>2</sub>(3% H<sub>2</sub>O).

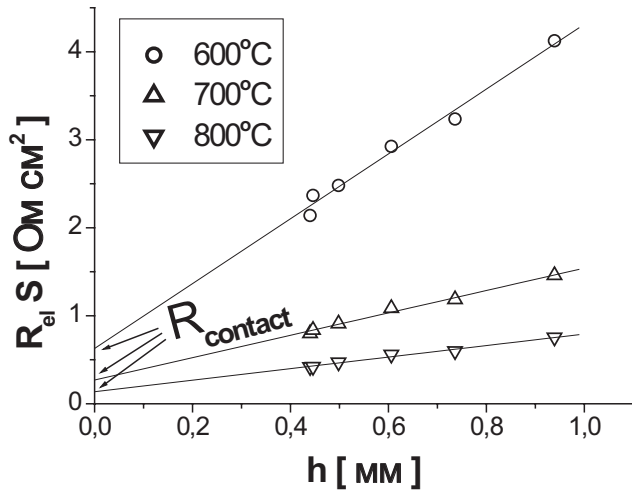
Как известно, в гетерослойных структурах, типичным примером которых является исследуемая электродная система, неполный контакт фаз приводит к тому, что омическое сопротивление объекта оказывается выше, чем следует, исходя из величин электропроводности отдельных фаз [49]. Представляло интерес выяснить, на какой границе раздела: Ni-кермет | GDC или GDC | LSGM, реализуется так называемое контактное (переходное) сопротивление, характеризующее несовершенство контакта между фазами. С этой целью были проведены эксперименты по определению сопротивления электролита электрохимических ячеек, в которых толщина LSGM электролита изменялась от 0,45 до 0,94 мм, а толщина интерфейсного слоя была примерно одинаковой и составляла 7÷13 мкм (рис. 21). Значения удельного контактного сопротивления изменялось от 0,14 Ом/см<sup>2</sup> при 800 °С до 0,63 Ом·см<sup>2</sup> при 600 °С.

**Таблица 5.** Поляризационное сопротивление никель-керметного анода (ρ<sub>p</sub>) и удельное сопротивление LSGM электролита (ρ<sub>el</sub>) при различных температурах спекания электрода. Температура спекания промежуточного слоя из GDC электролита 1300 °С. Измерения проведены при 700 °С в атмосфере H<sub>2</sub> (3 % H<sub>2</sub>O).

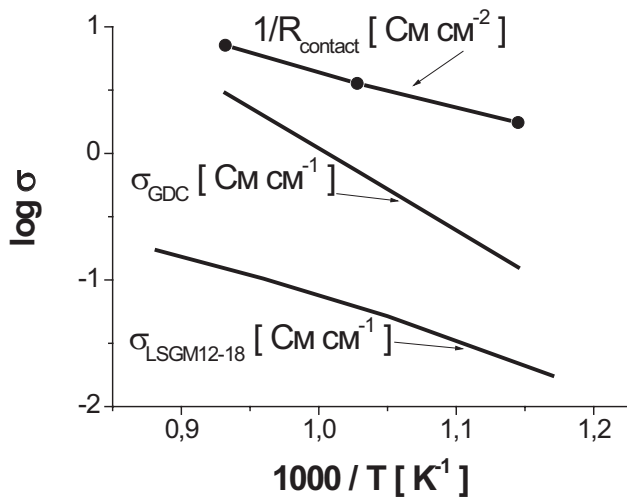
Измеряемая характеристика	Температура припекания электрода		
	1200 °С	1350 °С	1500 °С
ρ <sub>p</sub> [Ом см <sup>2</sup> ]	0,18	0,22	9,51
ρ <sub>el</sub> [Ом см]	16,5	19,2	1370

Сравнение вида температурных зависимостей электропроводности LSGM и GDC электролита в восстановительной среде, а также обратной величины контактного сопротивления приведено на рис. 22. Энергии активации проводимости LSGM электролита и обратной величины контактного сопротивления оказались близки, около 60 кДж/моль, а энергия активации проводимости восстановленного GDC электролита существенно выше, около 120 кДж/моль, что следует и из [50]. Этот результат указывает на то, что омические потери за счет прерывистого характера контактов сосредоточены на границе раздела GDC/LSGM.



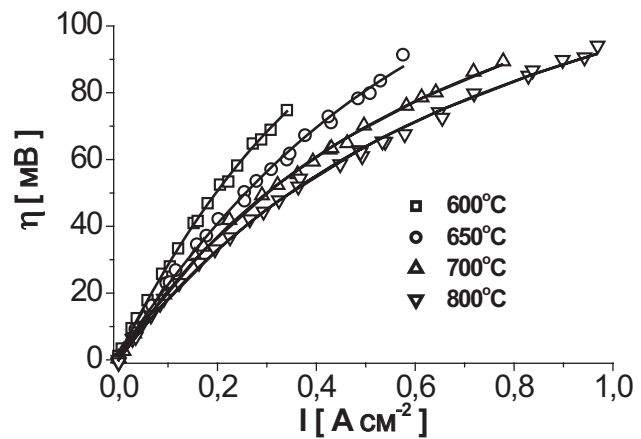


**Рис. 21.** Определение значений контактного сопротивления в ячейках Ni-GDC | GDC | LSGM | GDC | Ni-GDC в атмосфере H<sub>2</sub>(3 % H<sub>2</sub>O) по изменению их омического сопротивления в зависимости от толщины LSGM электролита (по оси ординат отложено произведение измеренного сопротивления электролита на площадь электрода)



**Рис. 22.** Температурные зависимости электропроводности LSGM электролита, GDC электролита в атмосфере H<sub>2</sub>(3 % H<sub>2</sub>O) и обратного контактного сопротивления, определенного из рис. 21

На рисунке 23 показаны анодные поляризационные зависимости электрода из 95 мас. % Ni и 5 мас. % GDC, полученные во влажном водороде (около 3% H<sub>2</sub>O) в температурном диапазоне 600–800 °C. При температуре 800 °C плотность тока в 1 А/см<sup>2</sup> реализуется при анодном перенапряжении менее 100 мВ. При 600 и 700 °C поляризационные потери тоже невелики и при 0,3 А/см<sup>2</sup> составляют 68 и 50 мВ соответственно.



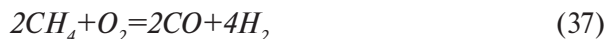
**Рис. 23.** Поляризационные зависимости анода из 95 мас. % Ni + 5 мас. % GDC в среде H<sub>2</sub>(~3 % H<sub>2</sub>O)

Такую высокую активность электродов удается реализовать в основном за счет электрокатализатора из CeO<sub>2</sub>, распределенного в матрице Ni-кермета. Немодифицированные электроды значительно менее активны. Например, по данным Хуанга с соавторами [40], при 800 °C и плотности тока в 1 А/см<sup>2</sup> поляризация Ni-керметного анода составляет 150 мВ, а при 600 и 700 °C и плотности тока 0,3 А/см<sup>2</sup> – 500 и 100 мВ соответственно.

Токвые и мощностные характеристики топливного элемента с галлатным электролитом, анодом из 95 %Ni–5 %GDC и катодом их La<sub>0,7</sub>Sr<sub>0,3</sub>CoO<sub>3-δ</sub> показаны на рис. 24. Напряжение разомкнутой цепи во всем интервале температур соответствует термодинамической разнице потенциалов, рассчитанной по уравнению Нернста. При температурах 600 и 800 °C максимальная мощность составляет 0,10 и 0,31 Вт/см<sup>2</sup> соответственно. Испытания топливного элемента при 650 °C в течение 20 суток показали, что при плотности тока 0,26–28 А/см<sup>2</sup> его удельная мощность упала примерно на 9 %: от 0,157 до 0,143 Вт/см<sup>2</sup>. Падение характеристик произошло как за счет роста омических потерь в электролите, так и некоторого возрастания поляризации электродов. Так, при плотности тока 0,275 А/см<sup>2</sup> омические потери возросли с 449 до 475 мВ, поляризация анода – от 52 до 66 мВ, а поляризация катода – от 80 до 96 мВ.

Эксперименты показали, что разработанный анод успешно функционирует и при использовании в качестве топлива смеси метана с кислородом в соотношении 2:1 (рис. 25). Такое

соотношение обеспечивает внутреннее парциальное окисление метана по уравнению



последующим электроокислением продуктов реакции



и



При температуре 700 °С плотность тока в 1 А/см<sup>2</sup> вызывала поляризацию анода в 75 мВ, а при 650 °С – около 200 мВ. При более низких температурах его поляризация становилась заметно выше.

Систематические исследования в области электрохимии новых твердых электролитов на основе LaGaO<sub>3</sub> позволили определить их свойства и механизмы электродных реакций на модельных электродах из пористой платины, никеля и электродах из смешанных кислород-электронных проводников. Высокая скорость гетерообмена кислородом между LSGM электролитом и газовой фазой приводит к распространению зоны реакции на поверхность электролита, свободную от электрода. Предложены механизмы кислородной реакции и реакции электроокисления водорода в электродных системах с LSGM электролитом. Разработаны электроды для топливного элемента с несущим галлатным электролитом. Испытания единичного топливного элемента с катодом из кобальтита лантана–стронция и Ni–керметным анодом показали перспективность LSGM электролитов с точки зрения снижения рабочей температуры топливных элементов по сравнению с традиционным YSZ электролитом.

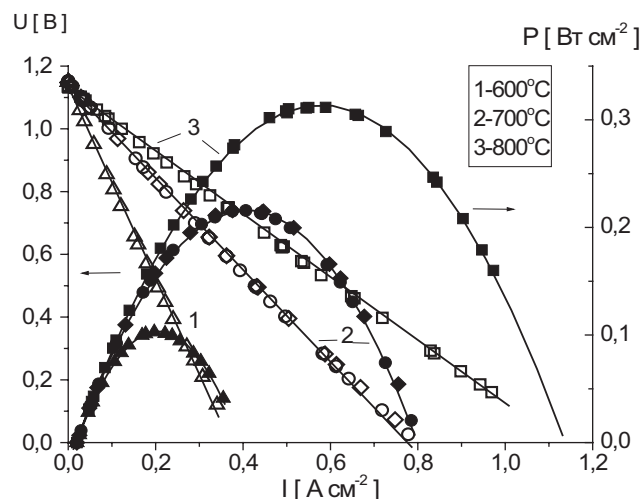


Рис. 24. Вольтамперные и мощностные характеристики единичной топливной ячейки с Ni–керметным анодом и катодом из La<sub>0,7</sub>Sr<sub>0,3</sub>CoO<sub>3-δ</sub> при различных температурах. Топливо H<sub>2</sub> (~3% H<sub>2</sub>O), окислитель – воздух. Толщина электролита 0,64 мм

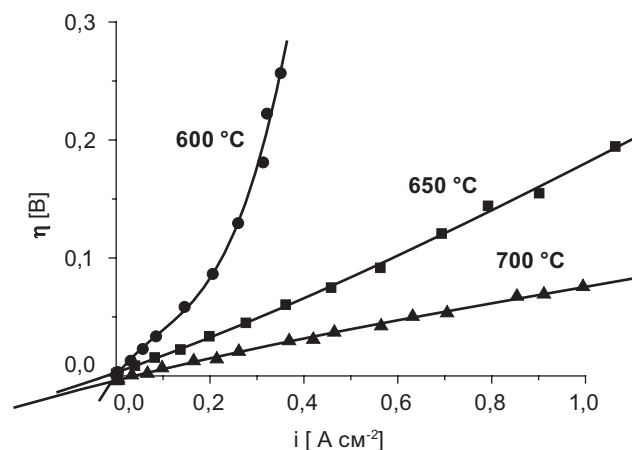


Рис. 25. Поляризационные зависимости анода из 95 мас. % Ni + 5 мас. % GDC в среде CH<sub>4</sub>+O<sub>2</sub> (2:1)

### Список литературы

1. Ishihara T., Matsuda H., Takita Y. Doped LaGaO<sub>3</sub> perovskite type oxide as a new oxide ionic conductor // J. Am. Chem. Soc. – 1994. – V. 116. – P. 3801–3803.
2. Feng M., Goodenough J.B. A superior oxide-ion electrolyte // Eur. J. Solid State Inorg. Chem. – 1994. – V. 31. – P. 663–672.
3. Huang P., Petric A. Superior oxygen ion conductivity of lanthanum gallate doped with strontium and magnesium // J. Electrochem. Soc. – 1996. – V. 143, No. 5. – P. 1644–1648.
4. Kim J.-H., Yoo H.-I. Partial electronic conductivity and electrolytic domain of La<sub>0,9</sub>Sr<sub>0,1</sub>Ga<sub>0,8</sub>Mg<sub>0,2</sub>O<sub>3-d</sub> // Solid State Ionics. – 2001. – V. 140, No. 1–2. – P. 105–113.
5. Jang J.Y., Choi G.M. Partial electronic conductivity of Sr and Mg doped LaGaO<sub>3</sub> // Solid State Ionics. – 2002. – V. 154–155. – P. 481–486.
6. Stevenson J.W., Armstrong T.R., McCready D.E., Pederson L.R., Weber W.J. Processing and electrical

properties of alkaline earth-doped lanthanum gallate // J. Electrochem. Soc. – 1997. – V. 144, No. 10. – P. 3613–3620.

7. *Stevenson J.W., Armstrong T.R., Pederson L.R., Li J., Lewinsohn C.A., Baskaran S.* Effect of A-site cation nonstoichiometry on the properties of doped lanthanum gallate // Solid State Ionics. – 1998. – V. 113–115. – P. 571–583.

8. *Djurado E., Labeau M.* Second phases in doped lanthanum gallate perovskites // J. Europ. Ceram. Soc. – 1998. – V. 18, No. 10. – P. 1397–1404.

9. *Kuncewicz-Kupczyk W., Kobertz D., Miller M., Singheiser L., Hilpert K.* Vaporization of Sr- and Mg-doped lanthanum gallate and implications for solid oxide fuel cells // J. Electrochem. Soc. – 2001. – V. 148, No. 6. – P. E276–E281.

10. *Rozumek M.* Kristallchemische Eigenschaften ausgewählter Funktions-Kermiken im quasi-quaternären System  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ - $\text{La}_2\text{O}_3$ - $\text{MgO}$ - $\text{SrO}$ . Ph.D. Thesis. Univ. Stuttgart. – 2003. – 113 p.

11. *Slater P.R., Irvine J.T.S., Ishihara T., Takita Y.* High-temperature powder neutron diffraction study of the oxide ion conductor  $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{2.85}$  // J. Solid State Chem. – 1998. – V. 139, No. 1. – P. 135–143.

12. *Lerch M., Boysen H., Hansen T.* High-temperature neutron scattering investigation of pure and doped lanthanum gallate // J. Phys. Chem. Solids. – 2001. – V. 62, No. 3. – P. 445–455.

13. *Skowron A., Huang P., Petric A.* Structural study of  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.85}\text{Mg}_{0.15}\text{O}_{2.825}$  // J. Solid State Chem. – 1999. – V. 143, No. 2. – P. 202–209.

14. *Mathews T., Sellar J.R.* Observation of diffuse electron scattering in Sr- and Mg-doped  $\text{LaGaO}_3$  // Solid State Ionics. – 2000. – V. 135, No. 1-4. – P. 411–417.

15. *Ishihara T., Kilner J., Honda M., Takita Y.* Oxygen surface exchange and diffusion in the new perovskite oxide ion conductor  $\text{LaGaO}_3$  // J. Am. Chem. Soc. – 1997. – V. 119. – P. 2747–2748.

16. *Вдовин Г.К., Курумчин Э.Х., Исаева Е.И., Бронин Д.И.* Изотопный обмен и диффузия кислорода в системе  $\text{La}_{0.88}\text{Sr}_{0.12}\text{Ga}_{0.82}\text{Mg}_{0.18}\text{O}_{3-a}$ -молекулярный кислород // Электрохимия. – 2001. – Т. 37, № 3. – С. 347–351.

17. *Sakai N., Horita T., Yamaji K., Brito M.E., Yokokawa H., Kawakami A., Matsuoki S., Watanabe N., Ueno A.* Interface stability among solid oxide fuel cell materials with perovskite structures // J. Electrochem. Soc. – 2006. – V. 153, No. 3. – P. A621–A625.

18. *Bannikov D.O., Cherepanov V.A.* Thermodynamic properties of complex oxides in the La–Ni–O system // J. Solid State Chem. – 2006. – V. 179, No. 8. – P. 2721–2727.

19. *Bi Z., Dong Y., Cheng M., Yi B.* Behavior of lanthanum-doped ceria and Sr-, Mg-doped  $\text{LaGaO}_3$  electrolytes in an anode-supported solid oxide fuel cell with a  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_3$  cathode // J. Power Sources. – 2006. – V. 161, No. 1. – P. 34–39.

20. *Yamamoto O., Takeda Y., Kanno R., Noda M.* Perovskite-type oxides as oxygen electrodes for high temperature oxide fuel cells // Solid State Ionics. – 1987. – V. 22, No. 2–3. – P. 241–246.

21. *Huang K., Feng M., Goodenough J.B., Schmerling M.* Characterization of Sr-doped  $\text{LaMnO}_3$  and  $\text{LaCoO}_3$  as cathode materials for a doped  $\text{LaGaO}_3$  ceramic fuel cell // J. Electrochem. Soc. – 1996. – V. 143, No. 11. – P. 3630–3636.

22. *Бронин Д.И., Кузин Б.Л., Соколова Ю.В., Полякова Н.В.* Взаимодействие кобальтсодержащих материалов с твердым электролитом на основе галлата лантана // Журн. прикл. химии. – 2000. – Т. 73, № 9. – С. 1482–1485.

23. *Bakker W.T., Huang K., Goodenough J., Khandkar A., Elangovan S., Miliken C.* Doped lanthanum gallate, a superior electrolyte for low temperature solid oxide fuel cells // in “Fuel Cells-Clean Energy for Today’s World”. Abstr. 1998 Fuel Cell Seminar. – Palm Spring, California. – 1998. – P. 250–253.

24. *Gorelov V.P., Bronin D. I., Sokolova Ju. V., Näfe H., Aldinger F.* The effect of doping and processing conditions on properties of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ga}_{1-y}\text{Mg}_y\text{O}_{3-a}$ . J. Europ. Ceram. Soc. – 2001. – V. 21, No. 13. – P. 2311–2317.

25. *Oncel C., Ozkaya B., Gulgun M.A.* X-ray single phase LSGM at 1350°C // J. Europ. Ceram. Soc. – 2007. – V. 27, No. 2–3. – P. 599–604.

26. *Mizusaki J., Amano K., Yamauchi S., Fueki K.* Electrode reaction at Pt,  $\text{O}_2$  (g)/stabilized zirconia interfaces. Part I: Theoretical consideration of reaction model // Solid State Ionics. – 1987. – V. 22. – P. 313–322.

27. *Mizusaki J., Amano K., Yamauchi S., Fueki K.* Electrode reaction at Pt,  $\text{O}_2$  (g)/stabilized zirconia interfaces. Part II: Electrochemical measurements and analysis // Solid State Ionics. – 1987. – V. 22. – P. 323–330.

28. *Kuzin B.L., Komarov M.A.* Adsorption of  $O_2$  at Pt and kinetics of the oxygen reaction at a porous Pt in contact with a solid oxide electrolyte // *Solid State Ionics*. – 1990. – V. 39. – P. 163–172.
29. *Schwandt C., Weppner W.* Kinetics of oxygen, platinum/stabilized zirconia and oxygen, gold/stabilized zirconia electrodes under equilibrium conditions // *J. Electrochem. Soc.* – 1997. – V. 144, No. 11. – P. 3728–3738.
30. *Yamaji K., Horita T., Ishihawa M., Sakai N., Yokokawa H., Dokiya M.* Some characteristics for fabrication of  $LaGaO_3$ -based electrolyte // *Proc. 5-th Int. Symp. on SOFC*. – PV 97–40. – Aachen, Germany. – 1997. – P. 1041–1050.
31. *Kaloyannis J. Yi, A., Vayenas C.G.* High temperature cyclic voltammetry of Pt catalyst-electrodes in solid electrolyte cells // *Electrochim. Acta*. – 1993. – V. 38, No. 17. – P. 2533–2539.
32. *Okamoto H., Kawamura G., Kudo T.* Study of oxygen adsorption on platinum through observation of exchange current in a solid electrolyte concentration cell // *Electrochim. Acta*. – 1983. – V. 28, No. 3. – P. 379–382.
33. *Sakurai K., Nagamoto H., Inoue H.* Microstructure of Pt electrodes over solid-electrolyte and its effect on interfacial impedance // *Solid State Ionics*. – 1989. – V. 35, No. 3–4. – P. 405–410.
34. *Kharton V.V., Yaremchenko A.A., Viskup A.P., Figueiredo F.M., Shaulo A.L., Kovalevsky A.V., Naumovich E.N., Marques F.M.B.* P-type electronic conduction in  $CeO_2$ - and  $LaGaO_3$ -based solid electrolytes // *Ionics*. – 2002. – V. 8, No. 3–4. – P. 215–222.
35. *Schmidt S., Berckemeyer F., Weppner W.* Investigations of electronic minority charge carrier conductivity in  $La_{0.9}Sr_{0.1}Ga_{0.8}Mg_{0.2}O_{2.85}$  // *Ionics*. – 2000. – V. 6. – P. 139–144.
36. *Weitkamp J., Wiemhöfer H.-D.* Electronic conduction and stability of solid electrolytes based on lanthanum gallates // *Solid State Ionics*. – 2002. – V. 154–55. – P. 597–604.
37. *Боресков Г.К.* Гетерогенный катализ. – М.: Наука, 1998. – С. 100.
38. *Елович С.Ю., Жаброва Г.М.* Механизм каталитического гидрирования этилена на никеле. I. Кинетика процесса // *Журн. физ. химии*. – 1934. – V. 13, №12. – С. 1761–1774.
39. *Isaacs H.S., Olmer L.J.* Comparison of materials as oxygen catalytic electrodes on zirconia electrolyte // *J. Electrochem. Soc.* – 1982. – V. 129, No. 2. – P. 436–443.
40. *Huang K., Feng M., Goodenough J.B., Milliken C.* Electrode performance test on single ceramic fuel cells using as electrolyte Sr- and Mg-doped  $LaGaO_3$  // *J. Electrochem. Soc.* – 1997. – V. 144, No. 10. – P. 3620–3624.
41. *Maric R., Ohara S., Fukui T., Yoshida H., Nishimura M., Inagaki T., Miura K.* Solid oxide fuel cells with doped lanthanum gallate electrolyte and  $LaSrCoO_3$  cathode, and Ni-samarium-doped ceria cermet anode // *J. Electrochem. Soc.* – 1999. – V. 146, No. 6. – P. 2006–2010.
42. *Zhang X., Ohara S., Maric R., Mukai, K. Fukui T., Yoshida H., Nishimura M., Inagaki T., Miura K.* Ni-SDC cermet anode for medium-temperature solid oxide fuel cell with lanthanum gallate electrolyte // *J. Power Sources*. – 1999. – V. 83. – P. 170–177.
43. *Petrov A.N., Cherepanov V.A., Zuyev A. Yu., Zhukovsky V.M.* Thermodynamic stability of ternary oxides in Ln-M-O systems (Ln=La, Pr, Nd; M=Co, Ni, Cu) // *J. Solid State Chem.* – 1988. – V. 75, No. 1. – P. 1–14.
44. *Huang K., Goodenough J.* A solid oxide fuel cell based on Sr- and Mg-doped  $LaGaO_3$  electrolyte: the role of a rare-earth oxide buffer // *J. Alloys and Comp.* – 2000. – V. 303–304. – P. 454–464.
45. *Matsuzaki Y., Yasuda I.* Electrochemical properties of reduced-temperature SOFCs with mixed ionic-electronic conductors in electrodes and/or interlayers // *Solid State Ionics*. – 2002. – V. 152–153. – P. 463–468.
46. *Gorina L.F., Sevastyanov V.V., Morozov V.V., Nikitin S.V., Lipilin A.S., Rodionov I.V., Sevastyanov A.V., Yaltuk J.G.* Method for manufacturing a single high-temperature fuel cell and its components. Patent US 6875532 (5 Apr. 2005).
47. *Кузин Б.Л., Демин А.К.* Электровосстановление воды на электроде из  $Pt-CeO_{2-x}$  в контакте с твердым оксидным электролитом // *Сб. науч. трудов «Электродные процессы в твердоэлектролитных системах»*. – Свердловск: УрО АН СССР. – 1988. – С. 58–66.
48. *Сомов С.И., Перфильев М.В.* Поляризационные характеристики электродной системы  $CO+CO_2/M+CeO_{2-x}/0,91ZrO_2+0,09Y_2O_3$  // *Сб. науч. трудов «Электродные реакции в твердых электролитах»*. – Свердловск: УрО АН СССР. – 1990. – С. 80–90.
49. *Чеботин В.Н., Перфильев М.В.* Электрохимия твердых электролитов. – М.: Химия. – 1978. – С. 195.
50. *Xiong Y., Yamaji K., Horita T., Sakai N., Yokokawa H.* Hole and electron conductivities of 20 mol %- $REO_{1.5}$  doped  $CeO_2$  (RE=Yb, Y, Gd, Sm, Nd, La) // *J. Electrochem. Soc.* – 2004. – V. 151, No. 3. – P. A407–A412.

## ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ<sup>1</sup>

Киншт Н.В., Петрунько Н.Н.<sup>2</sup>

Настоящая статья посвящена проблемам, составляющим предмет теоретических и прикладных исследований в области ранней диагностики высоковольтного электроэнергетического оборудования на основе анализа его собственных электромагнитных излучений.

**Ключевые слова:** диагностика, трансформатор, электромагнитные излучения.

The paper concerns the problems which are carried out the object of theoretical and applied investigations in the field of early diagnosis of the HV equipment based on analysis of own electromagnetic radiation.

**Keywords:** diagnostics, testing, transformer, electromagnetic radiation.

### Частичные разряды в изоляции высоковольтного оборудования и собственные электромагнитные излучения

Разработка новых методов диагностики является сегодня одним из наиболее наукоемких направлений исследований по оценке технического состояния и остаточного ресурса высоковольтного трансформаторного оборудования (ВВО) на ранних стадиях деградации его технического состояния (ТС). Одна из причин недостаточной эффективности методов ранней диагностики ВВО заключается в отставании

фундаментальной составляющей осмысливания электрофизических процессов, происходящих в реальных объектах.

ТС ВВО в значительной степени определяется состоянием его изоляции. Частичные электрические разряды (ЧР) возникают как при нормальной работе оборудования, так и при деградации изоляции и других конструктивных элементов и как первичный электрофизический процесс характеризует его качество. ЧР сопровождаются собственными электромагнитными излучениями (ЭМИ) в широком диапазоне частот, которые можно

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 06-08-00508, 06-08-96017, 08-08-08054, 11-08-98510).

<sup>2</sup>



Киншт Николай Владимирович, профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института автоматики и процессов управления (ИАПУ) ДВО РАН, e-mail: kin@dvo.ru.



Петрунько Наталья Николаевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института автоматики и процессов управления (ИАПУ) ДВО РАН, e-mail: pnn@dvo.ru.

явно обнаруживать при эксплуатации ВВО в рабочих режимах, регистрируя спектральные характеристики ЭМИ с помощью радиоэлектронных средств.

В настоящее время в электроэнергетике имеет применение ГОСТ 20074-83 [1]. Принципы метода, положенного в основу ГОСТа, основаны на концепции так называемого «кажущегося заряда»; они сформулированы более 70 лет назад (Сканави 1935 г., Коске 1939 г.). Математическая модель строится на основе анализа разряда в единственном постороннем включении в изоляции. Вместе с тем практика эксплуатации ответственного электроэнергетического оборудования показала, что средства контроля ТС ВВО, в основе которых лежала концепция кажущегося заряда, не смогли предотвращать неоднократные крупные аварии. Наши исследования показали, что эта концепция достаточно бедна, она не учитывает ряда существенных факторов: геометрического расположения включения в объеме изоляции, вариации напряжения зажигания ЧР, неопределенности в напряжении погасания ЧР, длительность горения ЧР,  $\text{tg}\delta$  изоляции. Эти факторы являются параметрами единого электрофизического процесса; в совокупности разброс этих факторов составляет неопределенность в несколько порядков. Кроме того, эта концепция принципиально не учитывает коллективных эффектов множества ЧР.

Исследования по гранту РФФИ 06-08-00508-а дали ответ на некоторые из поставленных вопросов. Так, впервые была установлена взаимосвязь параметров процесса ЧР: увеличение поляризационной составляющей  $\text{tg}\delta$  приводит к уменьшению напряжения погасания и увеличению периода повторения ЧР [2]. Результаты моделирования излучающих свойств ВВО, подтвержденные исследованиями на реальных объектах, позволили сформулировать методику мониторинга спектров ЭМИ; защищенную несколькими патентами РФ [например, 3,4].

### ЭМИ как диагностический признак

Идея регистрации ЭМИ, излучаемых действующим оборудованием, сама по себе элементарна, на этой основе строились датчики ЧР, расположенные непосредственно на оборудовании. Вопрос состоит лишь в том, какое измерительное оборудование применяется для регистрации ЭМИ и каким образом интерпретируются результаты. В настоящее время среди специалистов не существует единого мнения относительно свойств собственных ЭМИ ВВО. Так, по некоторым данным, исследование собственных ЭМИ ВВО не имеет смысла производить в диапазоне выше 25–40 МГц. По данным некоторых исследователей, ЭМИ ВВО целесообразно регистрировать в диапазоне 1–3 ГГц, а рекомендации известной фирмы Doble, предлагающей к использованию на практике анализатор ЧР, заключаются в мониторинге ЧР в диапазоне 250 МГц–1 ГГц [5]. По экспериментальным данным авторов Гранта РФФИ 11-08-98510-р\_восток\_a, информационная составляющая ЭМИ ВВО неравномерно распределена от нескольких МГц до единиц ГГц. Поскольку время протекания тока ЧР оценивается порядка  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  с и, следовательно, верхняя часть диапазона частот собственных ЭМИ ВВО простирается вплоть до сантиметровых волн (порядка  $10^{10}$  Гц). Вопрос состоит лишь в поиске частотных диапазонов ЭМИ и эффективной селекции сигналов, обладающих наибольшей информативностью и помехозащищенностью с точки зрения диагностики технического состояния изоляции ВВО [6, 7]. Изучение этого вопроса имеет большую важность в связи с назначением технических параметров измерительного комплекса, контролирующего работу ВВО и использования соответствующих алгоритмов обработки информации и принятия решений. С точки зрения теории случайных процессов апостериорные интегральные реализации ЭМИ, а также их спектры ВВО представляют собой нестационарные случайные процессы, промодулированные частотой

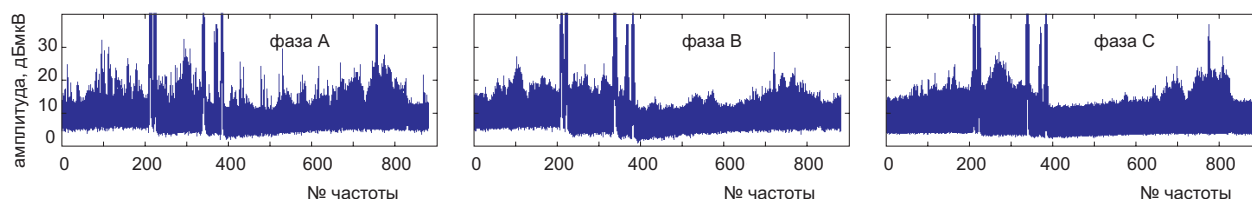


Рис. 1. Амплитудные спектры ЭМИ

рабочего напряжения. Однако очевидно, что в них имеется явно выраженная информационная составляющая; эти спектры индивидуальны для отдельных элементов ВВО (ЭО) и аналогичны для однотипных ЭО. На рис. 1 даны фрагменты спектров однотипных однофазных силовых трансформаторов АОДЦТН-167000/500/220 в диапазоне [40–170 МГц] (Зейская ГЭС).

В упрощенном подходе спектры оцениваются своим максимальным, минимальным и средним значением амплитуд сигналов (как на отдельных частотах, так и в определенном диапазоне), а также среднеквадратичным отклонением и энергией спектра. Однако значительно более эффективным представляется более подробный частотно-временной анализ.

### Частотно-временные характеристики собственных ЭМИ ВВО

Единичные частичные разряды в изоляции ВВО имеют широкий энергетический спектр и возбуждают электромагнитные излучения в широком диапазоне частот внутри бака трансформатора. Трансформатор на высоких частотах представляется сложной эквивалентной электрической цепью, элементы его конструкции: обмотки, ярма, изоляции – в совокупности обладают резонансными свойствами высокой добротности, его частотная характеристика имеет много резонансов (собственных частот). Энергия ЧР возбуждает в трансформаторе достаточно длительные собственные высокочастотные электромагнитные колебания и излучает их в частотных диапазонах, соответствующих собственным частотам. Выявление частотных диапазонов и амплитуд именно этих колебаний и представляет собой главную задачу исследования.

Спектр, наблюдаемый визуально на экране анализатора спектра, представляет собой весьма динамический процесс. Стабильные явно выраженные спектральные линии соответствуют телевизионным каналам.

Спектр ЭМИ ЭО записывается в виде файла – потока мгновенных кадров. Так, при частоте кадров 50 Гц и записи со скоростью 44000 Гц в каждом кадре представляется информация по интенсивности ЭМИ в  $m = 44000/50 = 880$  точках спектра в соответствующем диапазоне частот. Таким образом, результат каждого сеанса съемки, например, в течение интервала наблюдения  $T = 1$  мин составляет  $n = 3000$  кадров

или массив из 2640000 значений «мгновенных» амплитуд спектров. Теперь есть возможность осуществлять селекцию сигналов как функций времени при фиксированных частотах. И так, для каждой из частот анализируем сигналы как функции времени  $S(f_k, t) = S_k(i)$  ( $k = 1 \dots m$  – порядковый номер частоты,  $i = 1 \dots n$  – дискретное время или номера кадров) на интервале наблюдения  $T$ . Интегрально эта информация может быть представлена в графическом виде – в виде трехмерного изображения (рис. 2). Здесь  $S(f, t) = S(k, i)$ , спектр как функция времени представлен в координатах: амплитуда сигнала (дБмкВ) – номера частот – номера кадров.

Научный подход требует корректного формального либо удовлетворительного качественного описания (модели) излучаемых сигналов, заведомо имеющих своей первопричиной ЧР внутри трансформатора. Можно построить формальную модель взаимосвязи тока ЧР и ЭМИ как функции времени [6], однако это не приводит к конструктивному результату. Можно прийти к реальным результатам на основе анализа качественных признаков ЭМИ ЧР. Этими признаками являются: квазипериодичность функции  $S_k(i)$  (где период связан с частотой рабочего напряжения и/или частотой кадров анализатора спектра), кратковременность активного излучения ЭМИ, узкополосность (обусловленная высокой добротностью элемента ВВО) и высокая скважность (например, не менее 5) или, что то же самое, малое среднее значение по сравнению с амплитудой сигнала.

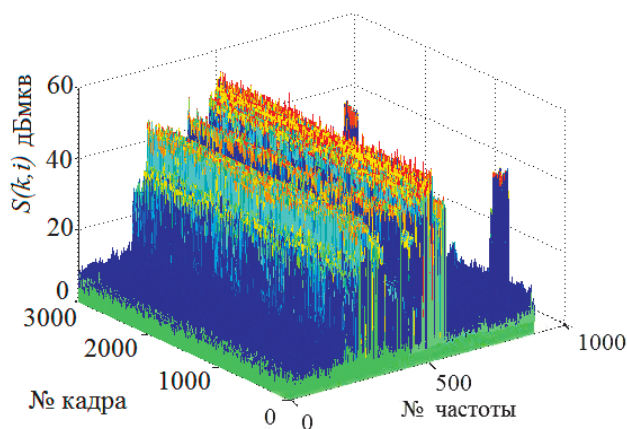


Рис. 2. Трехмерное представление спектра ЭМИ. Подстанция «Научная», трансформатор АДЦТН 125000/220/110, фаза В

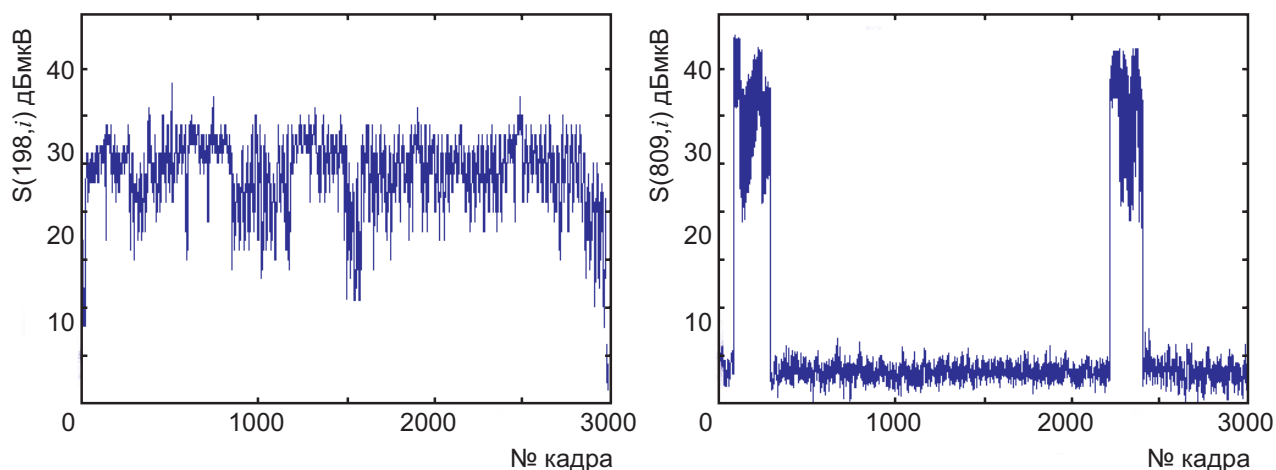


Рис. 3. Типичные сигналы — телевизионный (слева) и системы связи (справа)

### Интерпретация экспериментальных спектров

Дальнейшее изложение иллюстрируется типовыми данными из архива результатов обследований силового трансформаторного оборудования на подстанциях 500/220 кВ Сибири и Дальнего Востока, которые производились сотрудниками лаборатории электрофизики и электроэнергетики ИАПУ ДВО РАН. (Приводимые данные соответствуют диапазону частот 40–170 МГц. В дальнейшем конкретные значения частот не представляют специального интереса, они будут идентифицироваться лишь по порядковым номерам, присвоенным при обработке результатов). Например, типичные сигналы типа телевизионных ( $k = 198$ ) либо сигналов автоматизированной системы связи ( $k = 809$ ), приведенные на рис. 3, заведомо не удовлетворяют

перечисленным признакам и исключаются из дальнейшего анализа вместе с частотами, составляющими полосу пропускания телевизионного сигнала.

Кроме того, исключаются из анализа шумы неустановленного происхождения, не позволяющие при обработке реально анализировать состояние ВВО.

Излучения на частотах, которые соответствуют ЧР внутри трансформатора, имеют специфическую зависимость от времени. Регистрируются импульсы, длительность которых позволяет обнаружить их как на одном, так и на нескольких кадрах подряд (рис. 4,  $k = 430$ , рис. 5,  $k = 220$ ).

При этом один ЧР или одна и та же серия ЧР может одновременно вызвать колебания на нескольких собственных частотах, вместе с тем ЧР, возникающие в различных областях

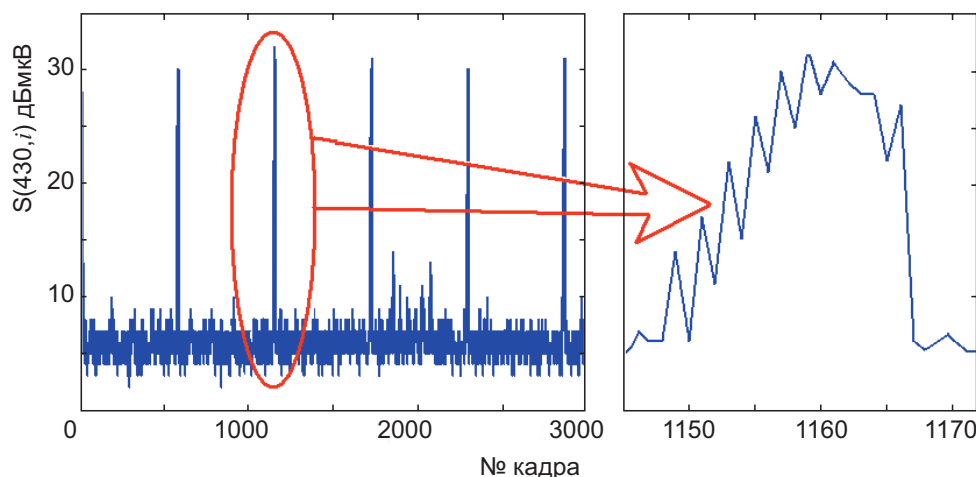


Рис. 4. Сигнал серии ЧР,  $k = 430$



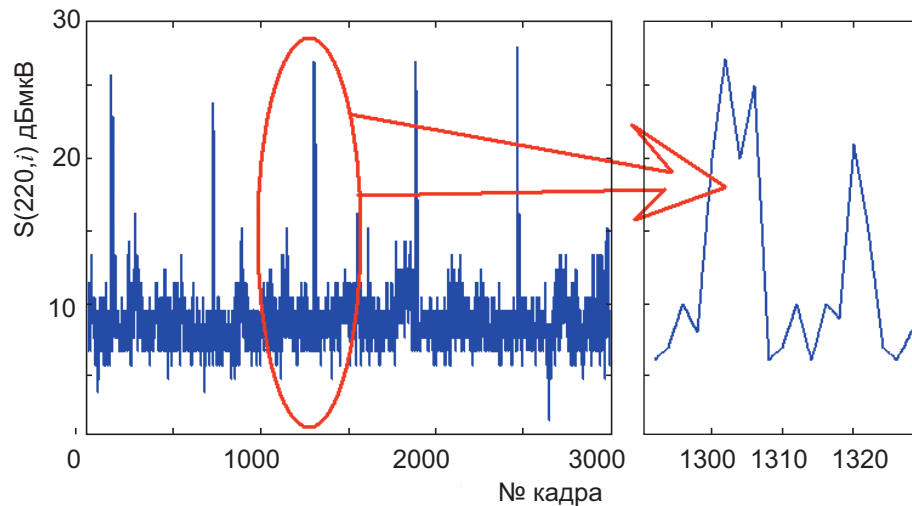


Рис. 5. Сигнал серии ЧР,  $k = 220$

объема трансформатора, могут вызывать колебания на различных собственных частотах. Наиболее продолжительные импульсы, как правило, соответствуют квазипериодической серии ЧР.

Совместно анализируя эти процессы, можно сделать следующие правдоподобные предположения.

Серии импульсов ЭМИ повторяются с периодом примерно 570–580 кадров (с частотой 0,087 Гц), что можно объяснить разностью

частот кадров анализатора спектра и рабочего напряжения.

Для частоты  $k = 430$  каждый импульс серии представляет собой процесс длительностью примерно в 29 кадров ( $i = 1148–1167$ ), который подпитывается, по крайней мере, 9 частичными разрядами. Предположительно, все эти ЧР возникают в одном и том же включении.

Каждый импульс серии импульсов на частоте  $k = 220$  представляет собой процесс длительностью примерно в 15 кадров и создается он паке-

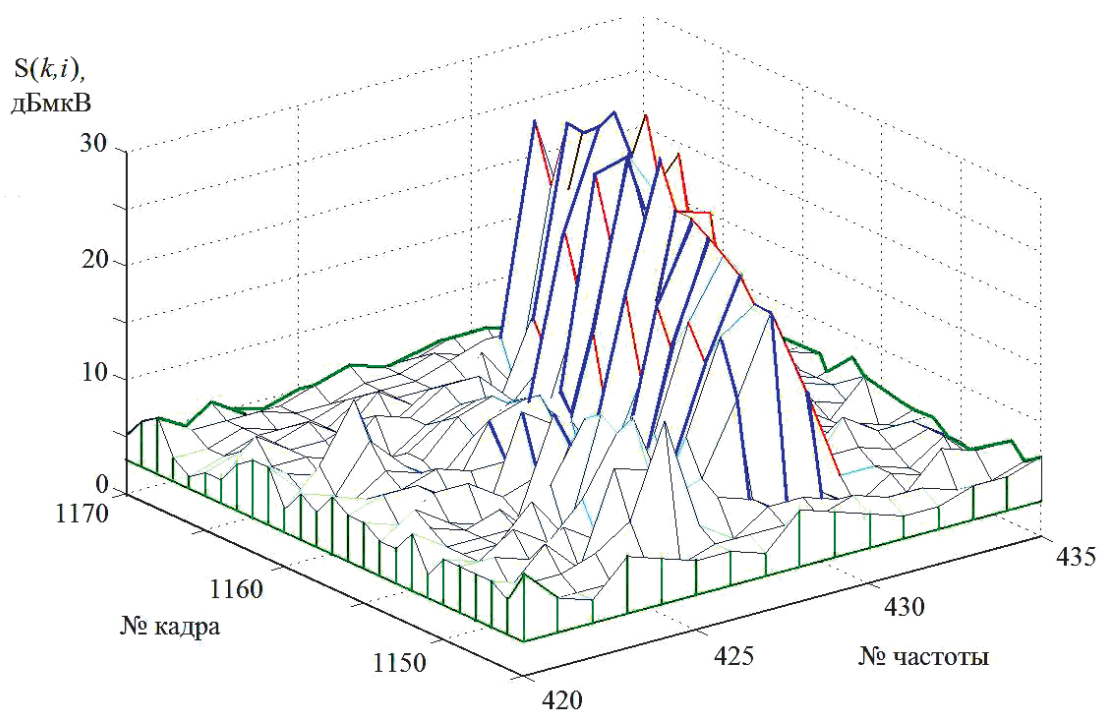


Рис. 6. Трехмерное представление сигнала,  $k = 430$

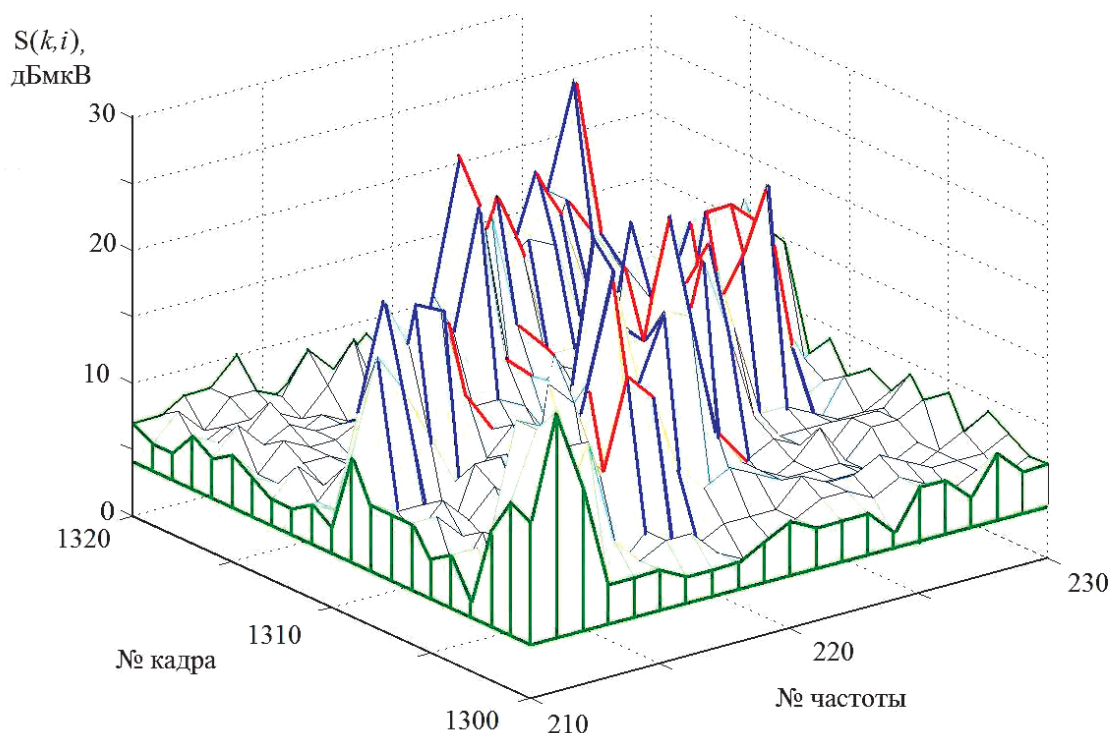


Рис. 7. Трехмерное представление сигнала,  $k = 220$

том из  $(2+1)$  ЧР не одновременно с импульсами серии  $k = 430$ . Есть основания считать, что процессы ЧР, вызвавшие колебания на частотах  $k = 220$  и  $k = 430$ , не зависят друг от друга и происходят в различных фрагментах объема ЭО.

Можно предположить также, что процессы  $(2 \text{ ЧР} + 1 \text{ ЧР})$  также являются независимыми, но происходят в одном и том же фрагменте объема ЭО.

Каждый из рассмотренных импульсов локализован как по времени, так и по частоте (рис. 6, 7); степень локализации обуславливается добротностью системы на этой собственной частоте.

## Выводы

Целью изучения ЭМИ вблизи элементов высоковольтного оборудования является выявление критериев, характеризующих внутреннее техническое состояние элемента оборудования. Наиболее информативным представляется анализ частотно-временных свойств спектров собственных ЭМИ ВВО.

Частоты, соответствующие отдельным линиям спектра ЭМИ, связанным с частичными разрядами, представляют собой собственные частоты трансформатора.

## Литература

1. ГОСТ 20074-83 «Метод измерения характеристик частичных разрядов».
2. Кац М.А., Кинит Н.В. К анализу переходного процесса в несовершенном диэлектрике с нелинейной неоднородностью // Электричество. – 2006. – №11. – С. 65–68.
3. Патент на изобретение № 2311652 от 10.04.2006 г. «Способ контроля технического состояния электроэнергетического оборудования» / Кинит Н.В. и др.
4. Кинит Н.В., Петрунько Н.Н., Силин Н.В. Патент РФ на изобретение № 2368914 от 11.03.2008 г. «Способ контроля технического состояния элементов высоковольтного оборудования».
5. [http://www.livingston-products.com/products/pdf/152982\\_1\\_en.pdf](http://www.livingston-products.com/products/pdf/152982_1_en.pdf).
6. Кинит Н.В., Кац М.А. Диагностика точечных источников электромагнитных шумов // Электричество. – 1999, №4. – С. 40–42.
7. Кинит Н.В. Интерпретация свойств спектров электромагнитных излучений высоковольтного оборудования // Известия РАН. – Энергетика. – 2012, №5. – С. 30–37.

## МЕХАНИЗМ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ В ДИНАМИКЕ ФОНТАНИРОВАНИЯ РАСКАЛЕННЫХ БОМБ НА БАЗАЛЬТОВЫХ ВУЛКАНАХ<sup>1</sup>

Озеров А.Ю.<sup>2</sup>

Проведены специальные вулканолого-геофизические исследования, позволившие выявить периодичность в динамике фонтанирования раскаленных бомб на базальтовых вулканах. Создан крупногабаритный газогидродинамический аппаратный комплекс моделирования базальтовых извержений. Проведенные на его основе эксперименты позволили предложить новую модель движения магматического расплава в подводящем канале базальтового вулкана. Самоорганизация одноразмерных газовых пузырьков, движущихся в расплаве по вертикальному каналу, при определенных расходах газа приводит к формированию открытых пузырьковых кластеров (кластерный режим), реализующихся в кратере в виде периодического фонтанирования раскаленных бомб.

**Ключевые слова:** вулкан, извержение, фонтанирование лавы, периодичности, лабораторное моделирование, двухфазные потоки, кластеры, механизм.

Special volcanologic-geophysical studies have been conducted to reveal a periodicity in the dynamics of fountaining of incandescent bombs at basaltic volcanoes. A large-size gas-hydrodynamic apparatus complex has been constructed to model basaltic eruptions. The experiments conducted with it allowed us to propose a new model of movement of magmatic melt in the conduit of a basaltic volcano. Self-organization of one-size gas bubbles, moving in the melt up the vertical channel, at certain discharge of gas leads to formation of open bubbly clusters (cluster regime), realized in the crater in the form of periodic fountaining of incandescent bombs.

**Keywords:** volcano, eruption, lava fountaining, periodicity, laboratory modeling, two-phase flows, clusters, mechanism.

Фонтанирование раскаленных бомб на базальтовых вулканах — грандиозное, часто встречающееся и опасное проявление вулканических сил нашей Планеты. Вулканические бомбы образуются из жидкой базальтовой магмы за счет лопающихся газовых пузырей, формирующихся в расплаве при подъеме к поверхности. Массовое выделение магматических пузырей из расплава в кратере вулкана приводит к фонтанированию раскаленных бомб. Светящиеся фонтаны в зависимости от характера вулкана и интенсивности

извержения поднимаются на высоту от 100 до 1000 м. При фонтанировании слабой интенсивности на поверхность Земли поступает 10–100 тонн/с вулканических бомб, при средней интенсивности 100–1000 тонн/с, а при сильной — свыше 1000 тонн/с. Этот тип вулканической активности представляет серьезную угрозу для населения и самолетов вследствие массового выпадения вулканических бомб и обильного выделения вулканического пепла, разносимого на сотни-тысячи километров от места извержения.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 97-05-64541, 00-05-64466, 03-05-64881, 06-05-64590, 09-05-00841).

<sup>2</sup>



Озеров Алексей Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, e-mail: ozerov@ozerov.ru.



**Рис. 1.** Фонтан раскаленных вулканических бомб, вершинный кратер Ключевского вулкана (1984 г.). Диаметр кратера 750 м. Высота выброса бомб 200 м. Фотография Озерова А.Ю.

В 1984 г. при исследовании вершинного извержения Ключевского вулкана (рис. 1) нами была выявлена новая особенность в деятельности раскаленных фонтанов — устойчивая периодичность в динамике их развития. Наблюдалось необычное явление — последовательное чередование двух фаз извержения: интенсивного фонтанирования раскаленных бомб и слабого проявления вулканической деятельности. Во время фазы фонтанирования плотная струя раскаленных бомб выбрасывалась из кратера на высоту 100–500 м и вместе с бомбами извергалось большое количество вулканического пепла. Фонтанирование продолжалось 40–60 мин. Затем в динамике извержения происходило резкое ослабление фонтанирования, и за 10–15 мин вулкан переходил в фазу слабых и редких выбросов (высота выбросов — десятки метров). Интервал ослабления обычно длился 4–5 ч, затем в течение 10–15 мин извержение вновь вступало в фазу фонтанирования. Последовательное чередование этих двух фаз формировало устойчивый периодический эксплозивный режим со средним периодом 5–6 ч.

При обсуждении этого явления рассматривались материалы и по другим базальтовым вулканам, но оказалось, что описания периодического фонтанирования в литературе нет. Наши первоначальные попытки объяснить причину периодического фонтанирования на основе известных законов не увенчались успехом, так как ни в физике, ни в физиче-

ской вулканологии не описаны подобные процессы.

В связи с вышеизложенным были поставлены следующие задачи исследований: 1 — разработать методику исследования процессов периодического фонтанирования раскаленных бомб в динамике базальтовых извержений; 2 — детально охарактеризовать это явление; 3 — определить место режима периодического фонтанирования в ряду других режимов извержения; 4 — рассмотреть, существует ли этот режим при извержениях других вулканов мира; 5 — выявить механизм периодического фонтанирования.

### ВУЛКАНОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач было проведено комплексное изучение на Ключевском вулкане (выбранном в качестве основного для исследования), которые показали, что изменения в динамике извержения наилучшим образом отражает вулканическое дрожание, которое непрерывно регистрируется на сейсмических станциях вблизи вулкана.

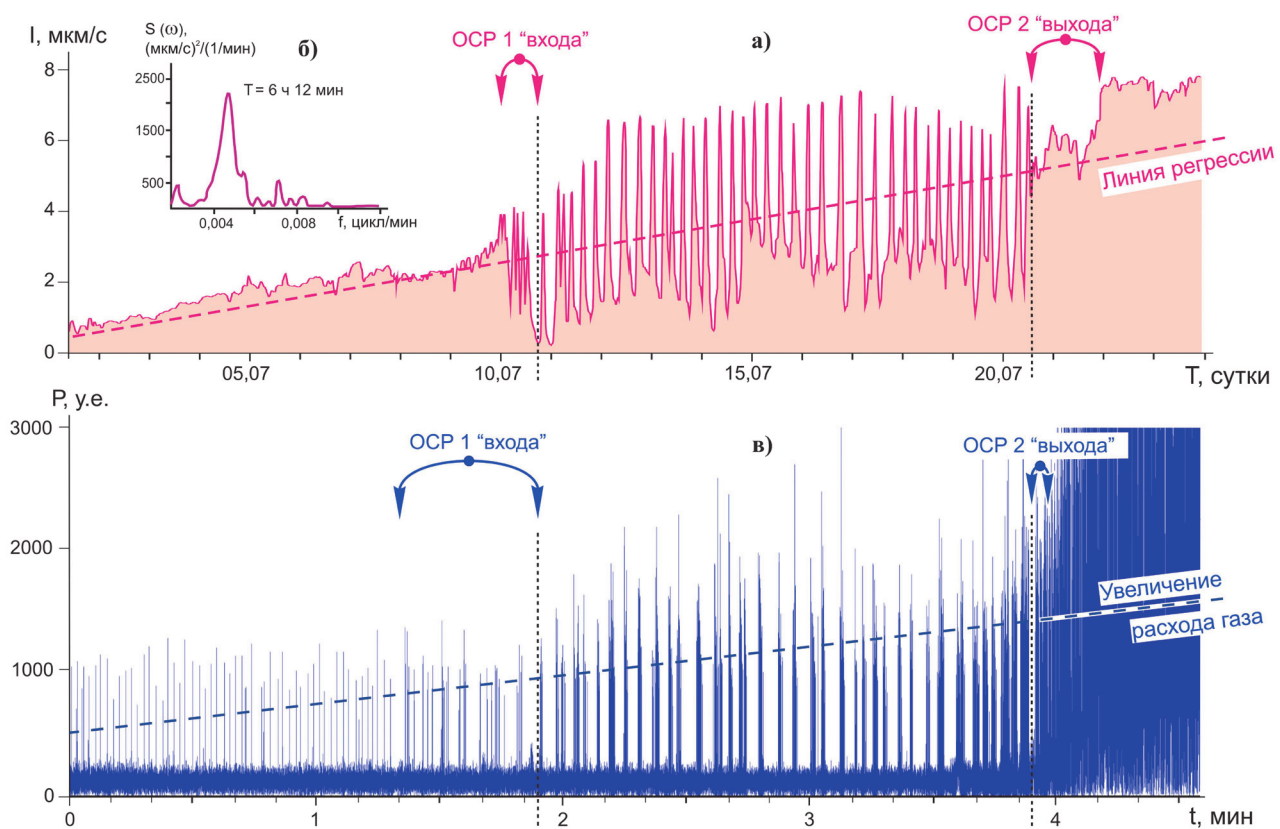
Специально для исследований периодических флуктуаций вулканического дрожания был разработан метод эквидистантного отсчета, который совместно с методами математической статистики и позволил детально изучить это явление [1, 2]. На примере извержения Ключевского вулкана 1984 г. была исследована огибающая вулканического дрожания, его спектральная характеристика и построены автокорреляционные функции для разных частей интервала проявления периодического процесса. Метод позволяет получать воспроизводимые результаты, не зависящие от внешних факторов: погоды, времени суток, условий наблюдения и др. В дальнейшем мы использовали эту методику или отдельные ее элементы на всех изученных нами извержениях Ключевского вулкана. В результате было установлено, что возникающий в динамике извержений режим периодического фонтанирования может реализовываться в широком диапазоне: минимальная длина периода —  $T_{\min} \sim 1 \text{ ч } 30 \text{ мин}$ , максимальная —  $T_{\max} \sim 8 \text{ ч}$  [3]. Такой режим во время извержений может существовать от 1 до 10 суток, т.е. в питающей системе вулкана в какое-то время включается, а затем работает

мощнейший генератор природного периодического процесса.

Для определения места режима периодического фонтанирования в ряду других режимов Ключевского вулкана было проведено изучение длинных (недели – месяцы) рядов данных вулканического дрожания, зарегистрированного во время вершинных извержений 1984, 1993 и 2008 гг. Для всех трех извержений были получены близкие результаты.

Опишем их на примере извержения 1993 г., во время которого проводилось детальное изучение динамики извержения и исследовалось

вулканическое дрожание [4]. Экспедиционные исследования показали, что в июле 1993 г. происходило увеличение расхода магматического материала, поступающего на поверхность. Эту тенденцию можно видеть на графике изменения интенсивности вулканического дрожания (рис. 2а), когда уровень вулканического дрожания за 21 дней (02–23 июля) увеличился с 0,8 до 7,6 мкм/с (микрон в секунду). На фоне общего повышения интенсивности вулканического дрожания последовательно проявились три режима извержения: равномерный низкоинтенсивный (02–10 июля), периодиче-



**Рис. 2.** Сопоставление характера взрывной активности Ключевского вулкана (1993 г.) с поверхностными проявлениями экспериментальных газогидродинамических режимов, полученных в экспериментах на КАМБИ

(а) – график интенсивности вулканического дрожания Ключевского вулкана для интервала времени 2 июня–24 июля 1993 г. [4]; по оси ординат – амплитуда интенсивности вулканического дрожания –  $I$ , мкм/с, по оси абсцисс – время –  $T$ , сутки; линия регрессии показана красной пунктирной линией. Регистрация вулканического дрожания выполнялась на сейсмической станции «Подкова»;

(б) – спектральная плотность мощности интенсивности вулканического дрожания для интервала времени 18 час 11 июля – 14 час 21 июля, показанного на графике рисунка (а) вертикальными пунктирными линиями; по оси ординат – спектральная плотность мощности интенсивности вулканического дрожания –  $S(\omega)$ ,  $(\text{мкм/с})^2/(1/\text{мин})$ , по оси абсцисс – частота –  $f$ , цикл/мин;

(в) – график изменения давления звуковой волны, производимой лопающимися газовыми пузырьками над поверхностью модельной жидкости (по результатам экспериментальных исследований на КАМБИ); по оси ординат – давление звуковой волны в условных единицах –  $P$ , у.е., по оси абсцисс – время –  $t$ , мин. Ось ординат по вертикали искусственно ограничено автором выше значения 3000 у.е.

ский (11–21 июля, 40 периодов за 10 суток при средней длине одного периода – 6 ч 12 мин, (рис. 26) и равномерный высокоинтенсивный (23–24 июля).

При этом установлены две области смены режимов (ОСР-1 «входа» и ОСР-2 «выхода»), когда эруптивная система приобретает новые качества. Смена режимов в обоих случаях происходила на фоне общего повышения уровня вулканического дрожания. В первом случае – ОСР-1 «входа» – эруптивная система входит в периодический режим, а во втором – ОСР-2 «выхода» – выходит из него, поэтому мы предлагаем рассматривать выделенные области смены режимов как принципиально разные. Описанные области ограничивают амплитудный интервал проявления периодического режима: нижняя граница ~ 3 мкм/с и верхняя ~ 5,2 мкм/с.

Рассмотрим совокупно кривую интенсивности вулканического дрожания и линию регрессии, показывающую тенденцию увеличения уровня вулканического дрожания (рис. 2а). Переход системы из равномерного режима в периодический и вновь в равномерный, при постоянном тренде повышения уровня дрожания, позволяет полагать, что в магматической системе с 11 по 21 июля проявился процесс нелинейного возбуждения колебаний, выражающийся в глубоких периодических флуктуациях. Их спектральная характеристика представлена на рис. 2б.

Такое же последовательное проявление трех вышеописанных режимом и двух областей смены режима (ОСР-1 «входа» и ОСР-2 «выхода») установлено при исследовании извержений Ключевского вулкана 1984 и 2008 гг.

Приведенные материалы свидетельствуют, что процесс периодического фонтанирования на Ключевском вулкане представляет собой не эпизодическое событие, а является составляющей более крупной эруптивной закономерности и реализуется между двумя режимами: равномерным низкоинтенсивным и равномерным высокоинтенсивным.

Кроме исследований на Ключевском вулкане, мы провели поиски свидетельств периодического фонтанирования раскаленных бомб на других базальтовых вулканах. Как уже отмечалось, описаний периодического фонтанирования в литературе нет. В связи с этим был выполнен анализ опубликованных записей сейсмограмм, позволивший установить, что пе-

риодическое фонтанирование характерно для ряда вулканов мира: Каркар и Маннам (Папуа Новая Гвинея), Килауэа (Гавайи), Нирагонго (Конго, Африка), НВ Рота-1 (Марианская впадина), Толбачинский (Камчатка) и Этна (Италия) [5–9].

Из всего вышеизложенного следует, что периодическое фонтанирование раскаленных бомб – широко распространенное явление при извержениях базальтовых вулканов. Но механизм его один из самых слабоизученных в вулканологии. Попытки привлечь известные газожидкостные режимы в вертикальных каналах: пузырьковый, снарядный, кольцевой и дисперсный – не дали однозначного объяснения причин этого явления. Поэтому для изучения этого феномена нами с 2003 г. проводились лабораторные эксперименты.

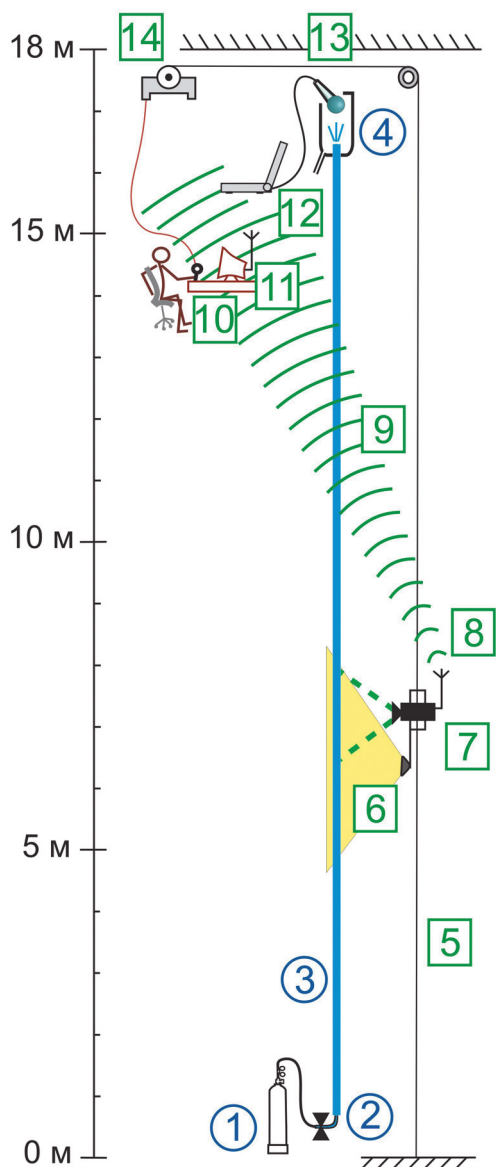
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачей экспериментов являлось выявление причин возникновения периодичностей в динамике фонтанирования раскаленных бомб на базальтовых вулканах. Для этого проводилось лабораторное моделирование поведения двухфазных газожидкостных смесей в вертикальных колоннах. Объектом исследования являлись газовые пузырьки и их групповое движение при всплывании (барботировании) сквозь модельные жидкости разной плотности, с последующим сопоставлением полученных данных с реальными вулканическими событиями. Специально для этих исследований был сконструирован комплекс аппаратуры моделирования базальтовых извержений – КАМБИ «барботажная колонна» [10, 11].

### Комплекс аппаратуры моделирования базальтовых извержений

При создании лабораторной установки мы стремились максимально учесть соотношения параметров реальных питающих магматических систем. За основу принят Ключевской вулкан – типичный представитель базальтовых вулканов. КАМБИ состоит из двух систем: моделирующей и регистрирующей (рис. 3).

Моделирующая система представляет собой прозрачную, вертикально расположенную пластиковую колонну высотой 16 600 мм, внутренний диаметр 18 мм. Нижний торец колон-



**Рис. 3.** Схема комплекса аппаратуры моделирования базальтовых извержений – КАМБИ «барботажная колонна»

1–4 – моделирующая система (синие кружки), 5–14 – регистрирующая система (зеленые квадраты): 1 – газовый баллон высокого давления с воздухом; 2 – кран высокоточной регулировки подачи газа; 3 – прозрачная колонна; 4 – аквариум для приема жидкости; 5 – трос, направляющий движение платформы динамического видеослежения; 6 – источник света; 7 – видеокамера (зеленым штрих-пунктиром показан угол захвата при съемке); 8 – передатчик и телеметрическая антенна; 9 – радиосигнал; 10 – пульт управления, отвечающий за перемещение видеокамеры; 11 – приемник видеосигнала и монитор; 12 – компьютер; 13 – микрофон; 14 – электродвигатель. В верхней части рисунка – оператор, управляющий движением видеокамеры.

ны герметизирован пробкой, сквозь которую в колонну введена полая игла, через которую в модельную жидкость подается газ. Верхняя часть колонны открыта и входит в аквариум, созданный для приема поступающей модельной жидкости. Пластиковая колонна имитирует питающий канал вулкана, а аквариум – кратер вулкана.

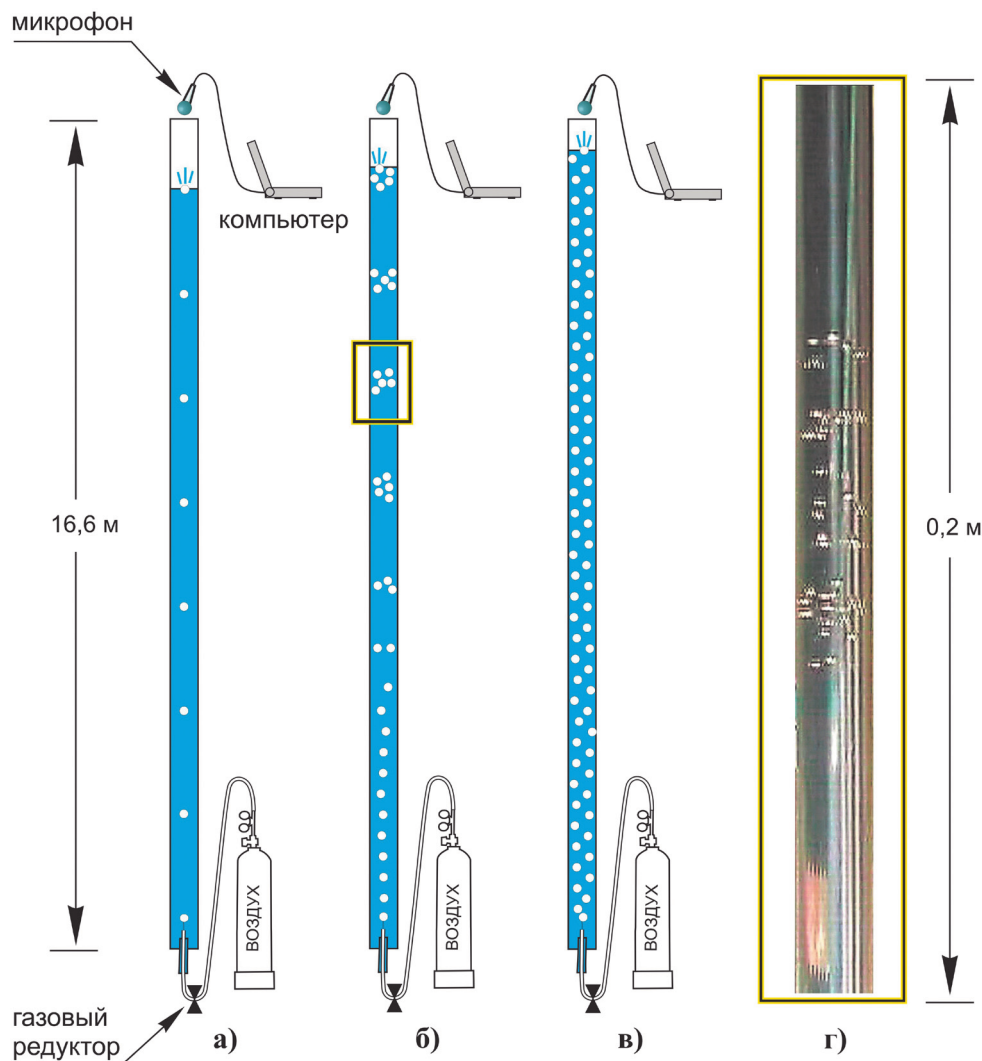
В качестве модельной жидкости применялся 35 % раствор глицерина в воде; это соотношение было подобрано в результате предварительных экспериментов. В качестве барботирующего газа использовался обычный воздух, поступающий под давлением из газового баллона. Основной массив экспериментов был проведен с пузырьками одного размера при отношении диаметра пузырька к внутреннему диаметру колонны примерно 1:20, что исключало возможность запираания внутреннего сечения колонны крупным пузырьком. Были проведены опыты также с более крупными и более мелкими пузырьками.

Регистрирующая система (рис. 3) включает блок динамического видеослежения, позволяющий следить за любым пузырьком в колонне и в соответствии со скоростью регистрируемого пузырька или группы пузырьков изменять скорость движения мобильной тележки с видеокамерой, блок видеорегистрации, блок акустической регистрации (экспериментальный аналог сейсмической станции на вулкане), электронный высотомер и спидометр, синхронизирующее устройство и отключающую систему.

Аналогов КАМБИ в мире нет.

### Экспериментальные исследования и их обсуждение

Во время экспериментов в нижнюю часть вертикальной колонны, заполненной модельной жидкостью, вводились газовые пузырьки, которые всплывали (барботировали) сквозь модельную жидкость (рис. 4). Количество газовых пузырьков, поступающих в колонну, регулировалось при помощи высокоточного газового редуктора. Газовые структуры, формирующиеся в процессе подъема пузырьков, постоянно фиксировались при помощи перемещающейся видеокамеры, движущейся вдоль прозрачной колонны. Звуковые волны, производимые лопающимися на поверхности модельной жидкости газовыми пузырьками, регистрировались по измерению давления при



**Рис. 4.** Схематичное изображение газогидродинамических режимов при увеличении расхода газа  
 (а) – пузырьковый низкодебитный режим;  
 (б) – пузырьковый среднедебитный в нижней части колонны, переходящий в кластерный в средней части колонны (прямоугольником ограничен участок колонны с пузырьковым кластером, рис. г);  
 (в) – пузырьковый высокодебитный;  
 (г) – фотография открытого пузырькового кластера, состоящего из 40 пузырьков

помощи микрофона, расположенного над верхней частью экспериментальной колонны.

На рисунках 4а, б, в показано схематичное изображение трех последовательных этапов одного и того же эксперимента, во время которого плавно увеличивалось количество газовых пузырьков, поступающих в колонну. На рис. 2в приведен график изменения давления звуковой волны, производимой лопающимися газовыми пузырьками на поверхности модельной жидкости. Каждый вертикальный импульс на графике соответствует всплеску одного лопающегося пузырька.

В экспериментах рассматривалось влияние расхода газа на характер газожидкостных структур. При низких расходах газа (пузырьки подавались через 10 см) наблюдался равномерный, пузырьковый низкодебитный режим по всей лабораторной колонне (рис. 4а). Он выражен на графике изменения давления звуковой волны в интервале 0 мин 00 с – 1 мин 20 с в виде равномерно распределенных акустических импульсов от лопающихся на поверхности газовых пузырьков (рис. 2в). При средних расходах газа (пузырьки подавались через 1 см) в нижней части колонны на-



блюдался равномерный, среднедебитный пузырьковый режим, который в средней части колонны переходил в периодический режим открытых пузырьковых кластеров (рис. 4б); достигнув поверхности, кластеры фиксировались в виде периодически повторяющихся плотных групп акустических импульсов (см. рис. 2в, интервал 1 мин 54 с – 3 мин 53 с). При высоких расходах газа (пузырьки подавались через 0,3 см) по всей высоте барботажной колонны наблюдался равномерный высокодебитный пузырьковый режим (рис. 4в), который проявлялся на поверхности в виде равномерной последовательности сближенных акустических импульсов (рис. 2в, интервал 3 мин 58 с – 4 мин 44 с).

Все вышеизложенное свидетельствует о том, что при монотонном увеличении расхода газа в эксперименте дважды происходила коренная перестройка структуры газожидкостного потока в двух областях смены режима (ОСР): при переходе от пузырькового низкодебитного режима к кластерному периодическому режиму – ОСР-1 «входа» – и от кластерного периодического режима к пузырьковому высокодебитному – ОСР-2 «выхода».

Это дает основание считать, что в барботирующей системе между двумя областями: ОСР-1 и ОСР-2, в интервале 1 мин 54 с – 3 мин 53 с (ограниченном на рис. 2в вертикальными пунктирными линиями) проявился нелинейный физический процесс, выраженный в периодическом формировании открытых пузырьковых кластеров.

В процессе экспериментальных исследований выявлена новая, ранее неизвестная, морфологически устойчивая газогидродинамическая структура – открытый пузырьковый кластер (рис. 4г). Он представляет собой объем жидкости с высокой концентрацией пузырьков, сверху и снизу ограниченный жидкостью, не содержащей газовых пузырьков. Совокупность открытых пузырьковых кластеров, следующих друг за другом на фиксированном расстоянии, образует периодический режим открытых кластеров (рис. 4б – верхняя часть колонны).

Изучено поведение газовых пузырьков в экспериментальной колонне, установлено десять видов движения пузырьков в модельной жидкости (см. [11]). Приведем те из них, которые ответственны за формирование кластерного режима:

– движение догоняющее (за лидером). Между одноразмерными пузырьками существует расстояние взаимодействия ( $L_{\text{взаим}}$ ), которое определяет возможность пузырьков догонять друг друга. Если расстояние между пузырьками больше  $L_{\text{взаим}}$ , то пузырьки пройдут весь путь «в одиночку», так как после прохождения пузырька среда успевает восстановиться, и поднимающийся снизу пузырек не может догнать верхний. Если это расстояние меньше  $L_{\text{взаим}}$ , тогда в силу вступает «догоняющее» движение, нижний пузырек становится в спутный след и обязательно догонит верхний.

– движение горизонтальных пузырьковых структур. Два одноразмерных пузырька, догнав друг друга, продолжают свой путь вместе, сформировав двухпузырьковый кластер. При этом они стремятся занять горизонтальное положение в колонне и образуют горизонтальный слой поперек своего основного, вертикального движения в жидкости.

– кластерообразующее движение. Вышеописанное горизонтальное положение пузырьков сокращает сечение обратного тока жидкости, скорость газовой структуры уменьшается и создается динамическая газовая пробка, движущаяся медленнее, чем одиночный пузырек. Нижние пузырьки догоняют вышеидущий кластер, «улавливаются» им и становятся его частью. Начинается лавинообразный процесс объединения пузырьков – кластерообразование.

– последовательное движение кластеров (кластерный режим). Продолжающийся подниматься снизу поток пузырьков попадает в те же условия, в которых происходило вышеописанное кластерообразование, и на тех же уровнях высоты происходят сходные процессы объединения пузырьков. Таким образом, формирующиеся газовые структуры последовательно проходят одну и ту же морфологическую эволюцию. Эти циклы периодически повторяются, и в барботажной колонне одновременно наблюдаются десятки кластеров, состоящих из равновеликих пузырьков.

– сквозное движение разноразмерных пузырьков через кластер. С учетом того, что в реальных питающих системах вулканов находятся пузырьки разных размеров, мы провели специальные исследования с тремя размерами пузырьков. Одиночные крупные пузырьки и кластеры, состоящие из крупных пузырьков, проходят сквозь кластеры, состоящие из среднеразмерных пузырьков. Одиночные мелкие

пузырьки и кластеры, состоящие из мелких пузырьков, не препятствуют прохождению среднеразмерных пузырьков или кластеров и не захватываются последними. Пузырьки разных размеров фактически «не чувствуют» друг друга, не объединяются в открытые пузырьковые кластеры, поэтому в кластере остаются пузырьки только одного размера.

Возникновение кластерного режима приводит к существенному перераспределению пузырьков в барботажной колонне, которое на поверхности жидкости приводит к интенсивному разбрызгиванию жидкости за счет лопающихся пузырьков кластера. В промежутках между поступлением кластеров поверхность жидкости остается в спокойном состоянии. Таким образом, реализуется устойчивое периодическое фонтанирование модельной жидкости.

Теперь проведем сравнение результатов изучения вулканического дрожания при извержении Ключевского вулкана 1993 г. (рис. 2а) с данными акустических исследований на КАМБИ (по измерению звуковых волн, производимых лопающимися газовыми пузырьками на поверхности модельной жидкости) (рис. 2в). Сопоставление природного и экспериментального графиков демонстрирует большое их сходство в последовательной реализации трех режимов в паре природный процесс – эксперимент соответственно: 1 – равномерный низкоинтенсивный – равномерный низкодебитный, 2 – периодический в обоих процессах, 3 – равномерный высокоинтенсивный – равномерный высокодебитный. При этом установлены две области смены режимов – как при извержениях вулкана, так и в экспериментальных исследованиях: ОСР-1 «входа» в периодический режим и ОСР-2 «выхода» из него. Кроме того, на обоих графиках хорошо выражены процессы нелинейного (в нашем случае периодического) возбуждения вулканической и экспериментальной систем.

Полученные данные подтвердили правомерность приложения результатов экспериментальных исследований на КАМБИ применительно к механизму процессов, происходящих в подводном канале Ключевского вулкана. Результаты экспериментального моделирования позволяют полагать, что во время извержений на вулкане реализуется аналогичный процесс, когда из жидкой магмы в кратере за счет лопающихся газовых пузырьков происходит фонтанирование лавы, и вылетают пластичные базальтовые бомбы.

Реализация на поверхности различных режимов течения двухфазного магматического расплава ответственна за многообразие эксплозивных явлений в кратере вулкана. В зависимости от типа газогидродинамического режима в питающей системе базальтовых вулканов в кратере могут проявляться различные типы эксплозивной деятельности: 1 – при равномерном низкодебитном режиме магматического потока – равномерная пепловая эмиссия с небольшим количеством вулканических бомб, 2 – при периодическом режиме открытых пузырьковых кластеров, закономерно возникающем при среднедебитном расходе магматического вещества, – энергичное периодическое фонтанирование раскаленных бомб, 3 – при равномерном высокодебитном режиме магматического потока – продолжительное монотонное интенсивное фонтанирование раскаленных бомб.

Периодическое фонтанирование раскаленных бомб было впервые выделено при исследовании извержений Ключевского вулкана (1984 г.), в последующем оно многократно фиксировалось в динамике его эруптивной деятельности. На вулкане была детально изучена структура периодического фонтанирования, и благодаря экспериментальному физическому моделированию определен механизм его генерации. Анализ опубликованных записей сейсмограмм на других вулканах мира позволил установить, что периодическое фонтанирование характерно для многих базальтовых вулканов. На основании вышеизложенного правомерно выделить этот тип извержения в качестве самостоятельного. Мы предлагаем назвать его Ключевской и использовать этого термин, наряду с уже известными типами – Вулканский, Гавайский, Пелейский, Плинианский и Стромболианский.

Ключевской тип вулканической деятельности можно охарактеризовать следующим образом: это процесс периодического или квазипериодического фонтанирования раскаленных бомб на базальтовых вулканах. Он характеризуется чередованием эпизодов интенсивного фонтанирования и эпизодов ослабления или прекращения деятельности огненных фонтанов. Раскаленные вулканические бомбы в виде веера или вертикальной струи выбрасываются на высоту, которая в зависимости от интенсивности извержения обычно находится в интервале 100–500 м, иногда достигает 1 км.

Периодическое фонтанирование возникает на фоне общего повышения интенсивности извержения между двумя режимами — равномерным низкоинтенсивным и равномерным высокоинтенсивным. Огненные фонтаны могут сопровождаться одновременным излиянием лавовых потоков. Периодическое фонтанирование проявляется в ходе вершинных, побочных и латеральных извержений. Оно наблюдается при наземных и подводных извержениях. Механизм извержений Ключев-

ского типа определяется газогидродинамическими процессами движения магматического расплава в подводящем канале базальтового вулкана. Самоорганизация одномерных газовых пузырьков, движущихся в магме по вертикальному каналу, при определенных расходах газа приводит к формированию открытых пузырьковых кластеров (кластерный режим), последовательно поднимающихся вверх и реализующихся в кратере в виде периодического фонтанирования раскаленных бомб.

### Литература

1. *Ozerov A.Yu., Konov A.S.* Regularities the dynamics of the Klyuchevskoy volcano eruption // *Proceeding Kagoshima International Conference of Volcanoes. Japan.* — 1988. — P. 63–65.
2. *Коннов А.С., Озеров А.Ю.* Закономерности в динамике извержений Ключевского вулкана и сопровождающем их вулканическом дрожании // *Вулканология и сейсмология.* — 1988. — № 3. — С. 21–38.
3. *Озеров А.Ю.* Периодичности в динамике извержений вулканов Камчатки // в сборнике «Современный вулканизм и связанные с ним процессы», Материалы юбилейной сессии Камчатского научного центра ДВО РАН, посвященной 40-летию Института вулканологии (8–11 октября 2002 г.). Петропавловск-Камчатский. — 2003. — С. — 26–28.
4. *Ozerov A.Yu., Firstov P.P., Gavrilov V.A.* Periodicities in the dynamics of eruptions of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Geophysical Monograph Series.* — 2007. — V. 172. — P. 283–291.
5. *Barker S.R., Sherrod D.R., Lisowski M., Heliker C., Nakata J.S.* Correlation Between Lava-Pond Drainback, Seismicity, and Ground Deformation at Pu‘u ‘Ö‘ö // *The Pu‘u ‘Ö‘ö-Küpaianaha Eruption of Kilauea Volcano, Hawai‘i: The First 20 Years. U.S. Geological Survey Professional Paper 1676.* Reston, Virginia. — 2003. — P. 53–62.
6. *Chadwick W.W., Cashman K.V., Embley R.W., Matsumoto H., Dziak R.P., de Ronde C.E.J., Lau T. K., Deardorff N.D., Merle S.G.* Direct video and hydrophone observations of submarine explosive eruptions at NW Rota-1 volcano, Mariana arc // *J. Geophys. Res.* — 2008. — V. 113. — B08S10. — P. 1–23.
7. *McNutt S.R.* Volcanic Tremor // *Encyclopedia of Earth System Science. Academic Press.* San Diego, California. — 1992. — P. 417–425.
8. *McNutt S.R.* Volcano Seismology and Monitoring for Eruptions, Chapter 25 // *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology.* — 2002. — Vol. 81A. — IASPEI. — P. 383–406.
9. *Privitera E., Sgroi T., Gresta S.* Statistical analysis of intermittent volcanic tremor associated with the September 1989 summit explosive eruptions at Mount Etna, Sicily // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* — 2003. — V. 120. — P. 235–247.
10. *Ozerov A.Yu.* Experimental Modeling of the Explosion Mechanism of Basaltic Magmas // *Petrology.* — 2009. — Vol. 17, No. 7. — P. 653–668.
11. *Озеров А.Ю.* Механизм периодического фонтанирования базальтовых вулканов (по экспериментальным исследованиям и природным наблюдениям) // Сборник «Экстремальные природные явления и катастрофы», посвященный 80-тилетию академика РАН Н.П. Лаврова. — Том. 2. — М.: 2011. — С. 279–298.

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРОФИЗИКИ ЗВЕЗДНЫХ АТМОСФЕР<sup>1</sup>Нефедьев Ю. А. Шиманский В. В.<sup>2</sup>

В статье представлен обзор современных результатов наблюдательных и теоретических методов анализа строения звезд и звездных систем, использованию в них новейших данных атомной спектроскопии, физики плазмы и ядерных процессов.

**Ключевые слова:** звездные атмосферы, астрофизика, спектральный анализ, строение звезд.

This paper reviews recent results of observational and theoretical methods of analyzing the structure of stars and star systems and using for this the atomic spectroscopy data, plasma physics and nuclear processes.

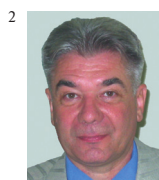
**Keywords:** atmosphere, astrophysics, spectral analysis, structure of stars.

Грантами РФФИ за последние годы были поддержаны несколько проектов в области исследования звездных атмосфер. Эти гранты включали как проведение международных конференций в данной области, так и выполнение инициативных проектов. Если проанализировать итоги работ по этим грантам, то можно сделать вывод, что основным толчком к развитию метода моделей звездных атмосфер послужили как существенно выросший в середине прошлого века объем высокоточных спектроскопических наблюдений, так и появление мощных вычислительных ресурсов, позволявших перейти к анализу многочисленных физических процессов в атмосферах звезд. Важно, что советские ученые практически с первых дней включились в развитие новых методов и действовали в тесном контакте с ведущими мировыми центрами. Это позволило к началу 80-х гг. создать астрофизическую школу,

специализировавшуюся на анализе состояния плазмы в атмосферах звезд. Дальнейшее развитие этой школы связано как с началом исследований более сложных явлений и объектов (рентгеновских источников, двойных систем и т.д.), так и появлением мощной наблюдательной базы.

Перспективные исследования запланированы на космическом телескопе «Спектр-УФ» (рис. 1). Актуальность таких наблюдений вызвана узостью доступного земным телескопам спектрального диапазона и большим вкладом ультрафиолетового диапазона в излучении горячих звезд, компактных объектов и многочисленных внегалактических источников. Несмотря на проведение к настоящему времени около 20 космических миссий с ультрафиолетовыми наблюдениями, объем полученных данных остается недостаточным. В этих условиях разработанная обсерватория

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 10-02-01145, 10-02-06141).



Нефедьев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, директор Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта Казанского федерального университета, e-mail: star1955@mail.ru.



Шиманский Вячеслав Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент Казанского федерального университета, e-mail: slava.shimansky@ksu.ru.



Рис. 1. Космический телескоп «Спектр-УФ»

«Спектр-УФ» оснащается 3 спектрометрами и 3 камерами для проведения всех типов спектроскопических, фотометрических и астрометрических наблюдений и должна сыграть решающую роль. В расписании обсерватории запланировано выполнение наблюдений как по базовой программе разработчиков проекта, так и по наиболее перспективным заявкам внешних специалистов. Реализация базовой программы предусматривает решение ряда задач: исследование эволюции Вселенной, физики аккреции и звездного ветра, ранней эволюции звезд и протопланетных дисков и химической эволюции.

Невозможно не отметить и современное развитие методов моделирования кривых блеска и спектров тесных двойных систем (ТДС) (рис. 2). Данная тематика берет начало в 70-е гг. прошлого века с открытия ряда систем с мощными источниками рентгеновского излучения. Их начальный анализ показал, что звезды в таких системах подвергаются внешним гравитационным и лучистым воздействиям и их корректное исследование требует физически адекватного моделирования этих воздействий. В результате к настоящему времени созданы методики расчета излучения ТДС с учетом эффектов отражения, несферичности и аккреции. Они не только позволили корректно описывать наблюдаемые кривые блеска и спектры и определять характеристики систем, но и от-

крыли возможность получения значений ранее недоступных параметров (углы наклона орбит, отношения масс компонент, светимости компактных источников). Таким образом, на данный момент времени найдены параметры для 50 нейтронных звезд и 24 черных дыр, а также 14 микрокварзаров. Их предварительный анализ показывает, что ряд проблем в понимании физики этих объектов (например, провал масс в районе  $3M_{\odot}$ ) остаются актуальными даже при наличии достаточной статистики.

Если провести анализ не-ЛТР исследований, выполненных казанской астрофизической группой с начала 70-х гг., то можно отметить, что в развитии этих исследований выделяются 2 этапа: до середины 80-х гг., когда расчеты проводились только для атмосфер горячих звезд, и позднее, когда произошел переход к объектам поздних спектральных классов. Работы первого этапа характеризовались построением небольших моделей атомов HeI и ионов CNO (до 20 уровней) с целью объяснения особенностей линий данных элементов. Несмотря на ограниченность моделей, в работах получены фундаментальные результаты и выводы, не пересмотренные до наших дней. Переход к холодным звездам был обусловлен потребностью в исследовании их химического состава с целью анализа химической эволюции Галактики. Он потребовал построения гораздо больших моделей атомов (от 40 до 150 уровней), совершенных программных комплексов и мощных вычислительных средств. Огромным шагом в развитии не-ЛТР методики в данном направлении явилось появление и совершенствование программного комплекса

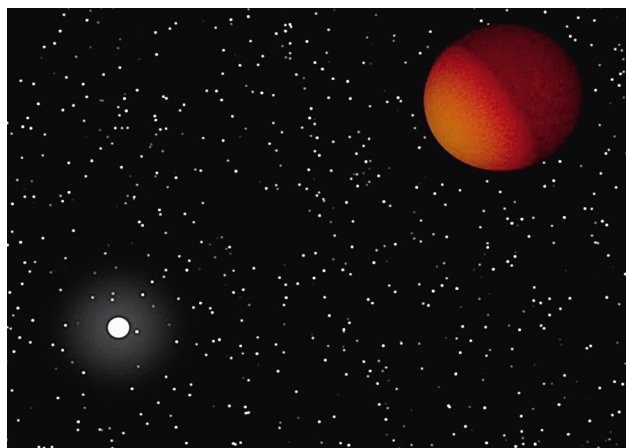


Рис. 2. Модель тесной двойной системы с эффектом отражения

NONLTE3. На основе его применения, а так же использования других программ за 25 лет разработано около 15 полноценных моделей атомов и методик моделирования и проведен анализ спектроскопических данных для нескольких сотен звезд. Таким образом, в не-ЛТР исследованиях российскими исследователями проанализировано примерно 60 % элементов, рассмотренных в мире, а в ряде случаев проводили работы и не имеющих мировых аналогов.

Что касается формирования спектров двойных звезд со слабыми эффектами отражения, следует отметить, что невысокая амплитуда колебаний блеска в таких системах может быть обусловлена как низкой температурой облучающих источников, так и широким разделением звезд в системе. В результате характер эмиссионных спектров этих систем варьируется в широких пределах: от термализованных слабых линий H $\beta$  и металлов, характерных для старых предкатаклизмических переменных, до чисто небулярных линий HeI и HeII, типичных для наиболее молодых объектов. При этом часть систем с холодными главными компонентами проявляет фотометрическую переменность, природа которой может быть связана как с сильными магнитными полями на поверхности вторичных компонент, так и с эффектами локальной, тепловой неустойчивости в их облучаемых атмосферах.

В настоящее время рассматривается возможность построения моделей атмосфер нейтронных звезд и перспектив их применения для широкого круга объектов: от барстеров до магнетаров. При этом необходимо учитывать общие принципы расчета атмосфер с учетом ряда физических эффектов, характерных только для релятивистских объектов: вырождения вещества с набором уравнений его состояния, комптонизации излучения, эффектов ОТО и др. Такая методика уже применена для расчета 350 атмосфер горячих нейтронных звезд и анализа вспышки барстера 4U 1724-307 (рентгеновской ТДС с взрывным горением водорода) с целью определения массы и радиуса объекта. Полученные в настоящее время параметры в целом соответствуют предполагаемым для нейтронных звезд в барстерах, а теоретическое распределение потоков во вспышке согласуется с наблюдаемым. При исследовании рентгеновского излучения изолированных нейтронных звезд важен учет водородных линий поглощения в спектрах. Только модель тонкой водо-

родной атмосферы на железистой поверхности нейтронной звезды позволяет адекватно описать наблюдаемые спектры, также некорректно предположение о существовании сильных тороидальных полей на поверхности нейтронных звезд.

Тем не менее, несмотря на успехи в изучении астрофизики звезд, существует ряд трудностей, связанных с описанием водородных линий в спектрах звезд разных типов. Данные линии часто применяются для определения фундаментальных параметров звезд, полей скоростей на их поверхности, напряженности магнитных полей и т.д. В настоящее время для 4 линий Бальмеровской серии используется теория уширения Вайдл-Куппер-Смитта, позволяющая корректно описывать наблюдательные данные. Ее сравнение с теорией Грима показывает сильные (до 2–3 раз) различия в интенсивностях линий в спектрах O–B звезд и существенно меньшие (до 30 %) – в спектрах A–G звезд. Однако к данному моменту теоретически разработаны и представлены в табличной форме модели уширения всех водородных линий серий Бальмера и Пашена, почти не применяемые на практике. Анализ формирования последних в спектрах звезд классов O–A показал, что они слабо блендированы и имеют высокую чувствительность к температуре и силе тяжести, т.е. могут эффективно использоваться для определения параметров атмосфер. Поэтому задача включения таблиц уширения линий в программные комплексы по расчету спектров звезд является особо актуальной.

А вот в области исследования запятненных звезд получены интересные результаты. В настоящее время предложена методика решения проблемы температурного картирования поверхности запятненных звезд по фотометрическим данным, что позволит получать карты распределения температур по умеренно длинным (5–7 ночей) рядам фотометрических наблюдений и рассчитывать на их основе синтетические спектры объектов для анализа вариаций наблюдаемых профилей линий. Методика основана на разбиении поверхности звезды на равновеликие площадки с определением светимости каждой из них путем решения обратной задачи при заданных функциях сглаживания и регуляризации. Тестирование метода на модельных примерах показало качественно адекватное восстановление температурной структуры поверхности с 1–3 пятнами,

но существенное (до 30 %) уменьшение амплитуды вариаций температуры. Выполнен анализ  $B$ ,  $V$ ,  $R$  кривых блеска предкатаклизмической переменной DE CVn с построением температурных карт, близких во всех полосах, и найдено, что вариации блеска системы обусловлены низкоконтрастными пятнами ( $\Delta T_{\text{eff}} < 150\text{K}$ ), занимающими до 30 % поверхности вторичной компоненты.

Если обобщить результаты работ по моделированию кривых блеска и лучевых скоростей двойных систем и звезд с протяженными атмосферами, то можно сказать следующее. Успехи в разработке подобных методик моделирования, достигнутые за последние 20 лет, позволили перейти к полностью корректному описанию наблюдаемых данных с получением фундаментальных параметров (температуры, радиусы, массы) звезд и компактных объектов разных типов. В частности, учет эффектов несферичности звезд и многокомпонентных аккреционных дисков с горячими струями в системах типа SS433 позволил определять отношение масс звезд и воспроизводить сложные двухфазные формы затмений. Учет эффектов отражения жесткого излучения в рентгеновских двойных системах обеспечил построение кривых лучевых скоростей компонент с формой, отличной от синусоиды, что дает возможность оценивать степень заполнения звездами своих полостей Роша, т.е. их радиусы, отношения светимостей источников и т.д. Разработанная методика дополнительно расширена за счет учета оболочек вокруг звезд и протяженных атмосфер, в результате чего показано сильная

зависимость профилей спектральных линий от темпов потери массы и скоростей ее истечения с поверхностей звезд.

Интересные работы проведены в области изучения маломассивных, аккрецирующих систем — катаклизмических переменных звезд (рис. 3). Данные объекты являются самым крупным классом ТДС и включают в себя как вспыхивающие (Новые, повторные Новые, новоподобные и т.д.), так стационарные системы. В настоящее время реализованы новые методики анализа спектров таких звезд, основанные на доплеровском картировании и анализе лучевых скоростей по крыльям водородных линий. В аккреционном диске SU UMa обнаружены две яркие волны плотности, одна из которых совершает полный оборот за время около 0,16 орбитального периода. Для всех подобных систем определены амплитуды лучевых скоростей белых карликов и получены оценки параметров. В целом массы белых карликов во всех объектах заключены в пределах 0,4–0,6 массы Солнца, что подтверждает их принадлежность к маломассивным системам.

Анализ сложных движений газа в атмосферах звезд в настоящее время производится путем измерения лучевых скоростей по разным точкам профилей спектральных линий. Традиционные методы измерения лучевых скоростей (кросс-корреляции и зеркального отражения линий) используют полные наблюдаемые профили, формирующиеся в различных областях за разными значениями  $V_r$ . Определение скоростей по различным точкам внутри профиля позволяет провести сканирование поля скоростей как по поверхности звезды, так и вглубь ее атмосферы. Анализ наблюдаемых спектров показывает, что такой подход наиболее эффективен для звезд типа  $\alpha$  Cyg с сильной переменностью линий. В частности, измерения скоростей по синим и красным сторонам биссектра линии  $H\beta$  показывают правильные вариации с периодами 14 и 22 дня соответственно, хотя центр тяжести линии практически не имеет доплеровских смещений. Лучевые скорости HD 93521 уменьшаются с ростом глубины линий HeI в точке их измерения. Это может быть объяснено существованием вокруг данной O-звезды более холодного диска с преимущественным формированием линий HeI.

Один из немногих крупных российских телескопов РТТ-150 также вносит определенный наблюдательный вклад в направлении модели-

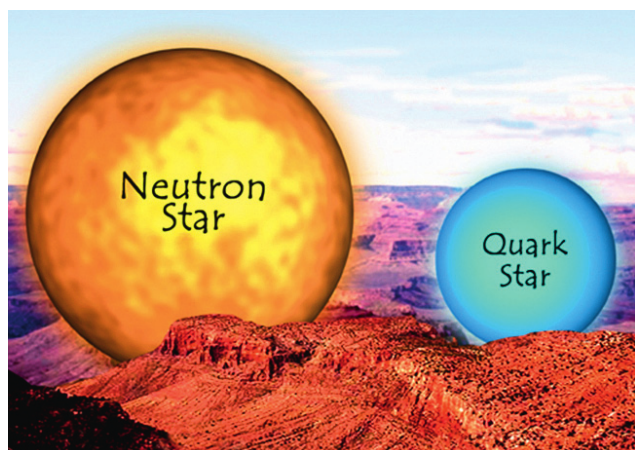


Рис. 3. Сравнительные размеры нейтронной и кварковой звезд

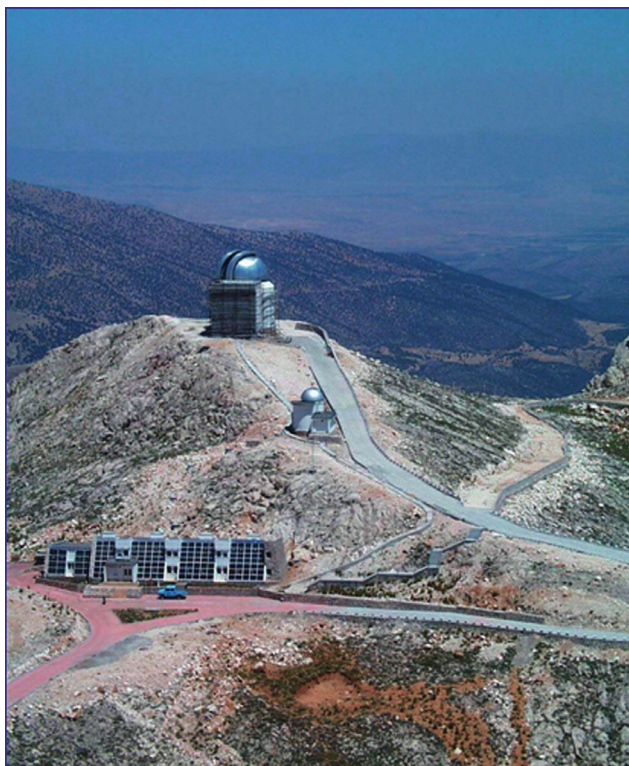


Рис. 4. Телескоп РТТ-150

рования звездных атмосфер. Введение в штатную эксплуатацию данного инструмента, оснащенного современным комплексом наблюдательной аппаратуры, позволило кардинально модернизировать тематику астрофизических исследований в Казани. С использованием куде-эшелле спектрометра РТТ-150 получены спектры для более сотни одиночных звезд и двойных систем диска Галактики. На основе их анализа решаются вопросы об использовании химического состава компонент ТДС для

оценки ядерного синтеза на поздних стадиях эволюции звезд; о связи металличности, химического состава атмосфер и возраста звезд, об аномалиях химических элементов в звездах А–F классов, о наличии экзопланет и их характеристиках в окрестностях ярких звезд и т.д. С использованием кривых блеска и спектров умеренного разрешения РТТ-150 классифицировано более 20 тесных двойных систем, для более 10 из которых определены наборы фундаментальных параметров. Доказано, что применение фотометрических данных телескопа позволяет выявить действие эффектов отражения в ТДС и проводить их корректную классификацию. Анализ рентгеновского и оптического излучения ряда объектов, наблюдаемых на РТТ-150, позволил открыть 6 новых сейфертовских галактик I и II типов, а также одну из первых галактик с черной дырой промежуточной массы. Особенно важно, что большая часть представленных результатов получена на основе анализа наблюдательных данных количественными методами моделей атмосфер, что является неотъемлемой частью современных исследований.

В статье использован материал из выступлений Н.А.Сахибуллина, Б.Н. Шустова, А.М. Черепашука, Л.И. Машонкиной, Т.А. Рябчикова В.В, Шиманского, М.К. Абубекерова, В.Ф. Сулейманова, Н.Г. Бочкарева, А.И. Колбина, Э.А. Антохиной, Т.В. Мишениной, Д.Г. Якина, А.Х. Рзаева, И.Ф. Бикмаева, сделанных на конференции «Новейшие методы исследования космических объектов» международной рабочей группы «Звездные атмосферы», поддержанной грантом РФФИ 10-02-06141\_г.



VIAM SUPERVADET VADENS  
(ДОРОГУ ОСИЛИТ ИДУЩИЙ)

*Стажировка российского молодого ученого К.Р. Каримуллина<sup>1</sup>  
в Институте спектроскопии РАН по программе РФФИ «Мобильность молодых ученых»*

**Немного истории**

Впервые о научно-исследовательской группе под руководством Ю.Г. Вайнера из Института спектроскопии РАН (ИСАН) в г. Троицке я услышал на международном симпозиуме по фотонному эху и когерентной спектроскопии — своей первой «серьезной» научной конференции. В моем блокноте, сохранившемся с той конференции, после краткого содержания докладов, прочитанных незнакомыми мне тогда Юрием Григорьевичем Вайнером и Андреем Витальевичем Намовым, записано: «Очень интересная тема, ознакомиться подробнее». Эту заметку я нашел уже гораздо позже, когда просматривал фотографии с разных конференций, наткнулся на знакомые лица и решил заглянуть в блокнот с записями. Я упомянул здесь об этом, так как мне кажется, что случайные на первый взгляд события, при внимательном рассмотрении оказываются вполне закономерными.



К.Р. Каримуллин

В Институт спектроскопии я попал через несколько лет — весной 2007 г, приехав в Троицк из Звенигорода, где проходила молодежная школа по волновым явлениям в неоднородных средах. Тогда я был аспирантом первого года обучения, определялся с направлением будущих исследований и подбирал работы для написания научного обзора по теме диссертации. Незадолго до этого я был принят на работу инженером-исследователем в лабораторию нелинейной оптики Казанского физико-техни-

ческого института им. Е.К. Завойского Казанского научного центра РАН. Бессменным руководителем лаборатории является мой научный руководитель, доктор физико-математических наук, академик РАЕН профессор В.В. Самарцев. Именно он и предложил мне поехать в Институт спектроскопии и попробовать договориться об организации совместных исследований в отделе молекулярной спектроскопии.

Нужно отметить, что основной темой нашей лаборатории является изучение когерентных оптических переходных явлений типа фотонного эха. Фотонное (световое) эхо — аналог магнитного спинового эха в оптике, было теоретически предсказано в 1963 г. сотрудниками Физико-технического института Казанского филиала АН СССР У.Х. Копвиллемом и В.Р. Нагибаровым. Экспериментально фотонное эхо годом позже было детектировано в кристалле рубина американскими учеными А. Абеллой, Н. Кёнитом и С. Хартманом. С момента открытия это явление привлекало к себе внимание не только в качестве нового метода исследования вещества, а как уникальный способ записи, хранения, обработки и считывания оптической информации. К настоящему времени в мире получено множество патентов на различные схемы оптической фазовой памяти и эхо-процессоры на основе фотонного эха, ведется активный поиск новых носителей информации и оптимальных режимов функционирования подобных устройств.

Лаборатория электронных спектров молекул (ИСАН), в которой я проходил стажировки, относится к числу ведущих исследовательских групп в мире в области оптической эхо-спектроскопии, занимаясь изучением внутренней

<sup>1</sup> Каримуллин Камиль Равкатович, кандидат физико-математических наук, докторант Института спектроскопии Российской академии наук, e-mail: kamil@isan.troitsk.ru.

динамики неупорядоченных твердотельных сред (полимеров, стекол, наноструктурированных материалов) на микроскопическом уровне с высоким временным и пространственным разрешением. Лаборатория оснащена современным уникальным оборудованием для проведения исследований методами оптической селективной спектроскопии – фотонного эха и спектроскопии одиночных хромофорных молекул-зондов. Одним из методов, развитых в лаборатории, является техника некогерентного фотонного эха.

«Фотонное эхо относится к широкому классу когерентных оптических переходных явлений. Однако оказывается, что генерация сигналов фотонного эха возможна и при его возбуждении некогерентным (шумовым) излучением. Кроме того, такой режим возбуждения характеризуется рядом преимуществ: высоким временным разрешением и низкой интенсивностью возбуждающего излучения. Для реализации этого метода в нашей лаборатории создан шумовой источник излучения – суперлюминесцентный лазер, построенный по безрезонаторной схеме». Я, наверное, очень мало что понял из всего, что услышал тогда, во время своего первого посещения лаборатории. Впереди была долгая работа по освоению сложной методики и не менее сложной экспериментальной техники; мне еще только предстояло вникнуть в принцип работы установки, состоящей из системы зеркал, дифракционных решеток, квантронов и труб водяного охлаждения.

Через несколько месяцев я был направлен в свою первую служебную командировку в ИСАН,

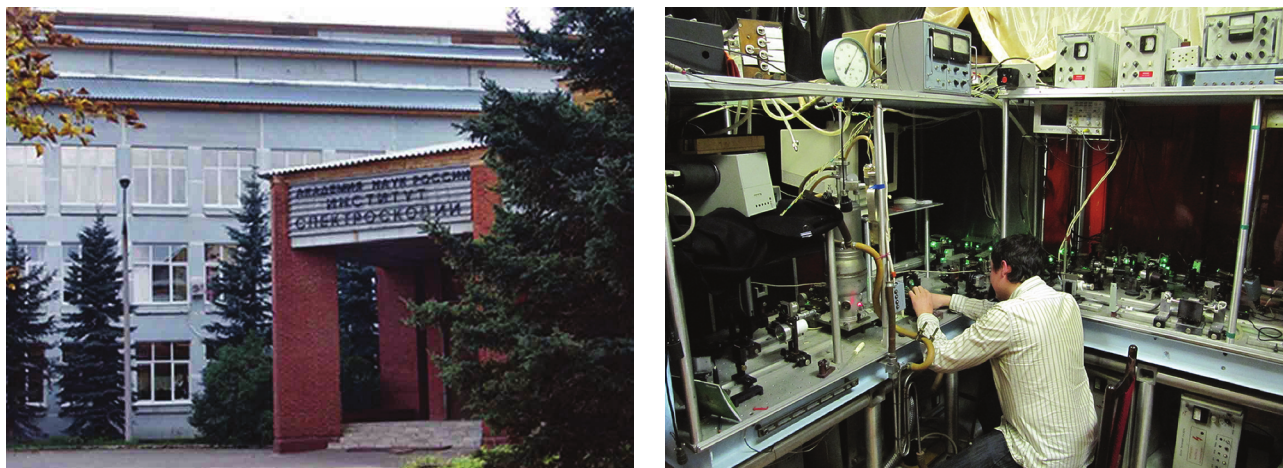
где подключился к работе по спектроскопии некогерентного фотонного эха в примесных полимерах, начал изучать специальную литературу и потихоньку осваиваться с экспериментальной установкой. Вскоре появилась информация Российского фонда фундаментальных исследований о возобновлении Программы «Мобильность молодых ученых». Мы решили оформить грант, и первая же попытка, как впрочем, и все остальные, оказалась успешной – наш проект стажировки был поддержан Фондом. Благодаря тому первому гранту я получил возможность жить и работать в Троицке, а выгодное расположение города позволило часто посещать Москву.

### Троицк и Институт спектроскопии

Троицк – город областного подчинения в Московской области; с 2007 г. имеет статус наукограда (с июля 2012 г. входит в состав Москвы). В городе действуют десять известных научно-исследовательских центров, которые являются градообразующими: Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН) – старейший институт города; Троицкий Институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ); Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина (ИФВД); Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН, филиал в г. Троицке); Институт спектроскопии РАН; Институт ядерных исследований (ИЯИ РАН); Отдел перспективных лазерных технологий Института проблем лазерных и информационных технологий (ОПЛТ ИПЛИТ РАН);



Рис. 1. Виды Троицка: цветные фонтаны на площади (слева), сиреневый бульвар – вид со стороны улицы Центральной (справа)



**Рис. 2.** Институт спектроскопии РАН. Общий вид лабораторного корпуса (слева). Автор за настройкой спектрометра некогерентного фотонного эха в отделе молекулярной спектроскопии ИСАН в лаборатории электронных спектров молекул (справа)

Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов (ФГУ ТИСНУМ). Троицк имеет всю необходимую инфраструктуру для жизни и отдыха, включающую в себя современное жильё, магазины, предприятия бытового обслуживания, здравоохранения, детские сады, общеобразовательные школы, лицей, две гимназии, спортивную школу и спортивный комплекс, школу искусств (рис. 1). В последние годы в Троицке ведётся интенсивное жилищное строительство. Город выгодно отличает благоприятная экологическая обстановка: окружение лесами и отсутствие крупных промышленных предприятий, а также близость к Москве (примерно 20 км от МКАД).

Институт спектроскопии Российской академии наук является правопреемником Института спектроскопии АН СССР, организованного в 1968 г. на базе лаборатории Комиссии по спектроскопии (рис. 2). Организатором, первым директором и идеологом направления научных исследований Института стал доктор физико-математических наук, профессор Сергей Леонидович Мандельштам, впоследствии член-корреспондент АН СССР. По замыслу С.Л. Мандельштама, численность Института не должна была превышать 300–400 человек. Небольшие по численности лаборатории позволяли руководителям заниматься прежде всего научной, а не административной работой и мобильно менять тематику исследований. В настоящее время в штате Института насчитывается 239

человек, из них 113 – научные сотрудники, в числе которых 30 докторов и 45 кандидатов наук. Директором Института с 1989 г. является профессор, член-корреспондент РАН Евгений Андреевич Виноградов.

В Институте работает Диссертационный совет по присуждению ученых степеней кандидата и доктора физико-математических наук по специальностям «Оптика» и «Теоретическая физика». Имеется лицензия на ведение образовательной деятельности в сфере послевузовского образования (аспирантура) по специальностям: «Оптика», «Теоретическая физика», «Физика конденсированного состояния» и «Лазерная физика». При Институте работает базовая кафедра нанооптики и спектроскопии Московского физико-технического института. При поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг. при ИСАН работает Научно-образовательный центр «Оптическая спектроскопия перспективных материалов».

ИСАН располагает уникальным комплексом оборудования, обеспечивающим проведение проблемно-ориентированных оптических исследований одновременно в широком спектральном диапазоне, со сверхвысоким спектральным разрешением, временным и пространственным разрешением, что позволяет проводить дополняющие друг друга исследования материалов и процессов на единой научной платформе с получением достоверной детальной инфор-

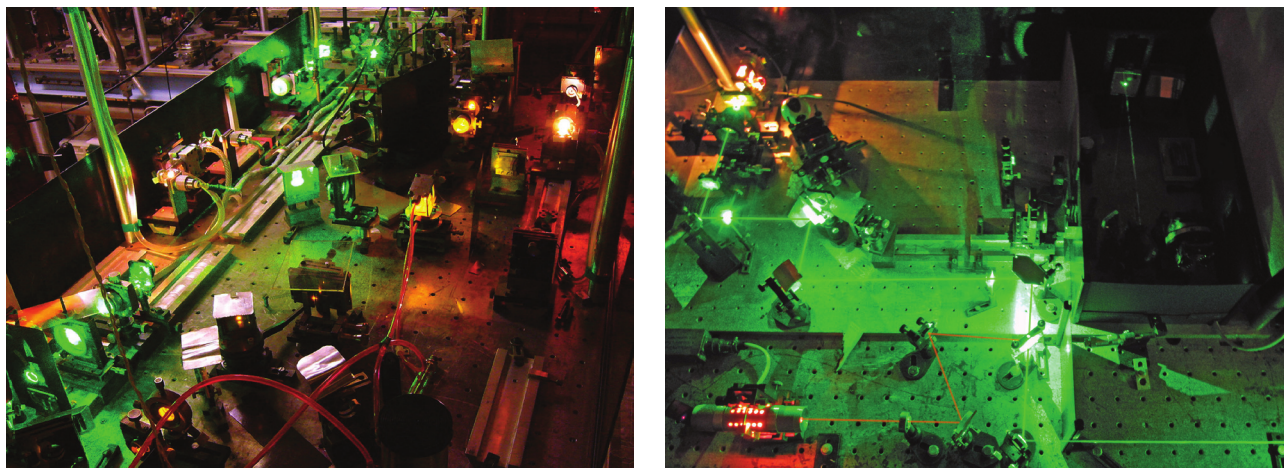
мации о структуре, оптических и магнитных свойствах, спектроскопических, релаксационных и других характеристиках различных материалов и структур с сохранением их свойств и функциональной активности. В Институте представлены все основные направления спектроскопии: оптика ближнего поля (эванесцентная спектроскопия); фемтосекундная спектроскопия; квантовая электродинамика микрополости; новые источники излучения с уровнем шума ниже квантового предела; спектроскопия одиночных атомов и молекул; атомная оптика (лазерное управление движением атомов) и многое другое. Вместе с новыми фундаментальными направлениями исследований в ИСАН рождаются и новые технологии: лазерное разделение изотопов; ультрачувствительные методы контроля состава сверхчистых материалов и загрязнения окружающей среды; создание сверхплотной плазмы; глубокое охлаждение атомов лазерным излучением; новые источники излучения; новые системы связи и множество разнообразных датчиков, а также многое другое. По данным зарубежных источников, Институт спектроскопии РАН наравне с крупнейшими институтами и вузами России входит в тридцатку научных организаций России с наивысшим индексом цитирования работ их ученых.

Необходимо отметить, что Институт спектроскопии является своего рода «центром кристаллизации» профессионалов в области оптики, спектроскопии, спектрального анализа и оптико-спектрального приборостроения независимо от их места работы. ИСАН стал организатором Всероссийской школы по спектральному анализу, которая объединила спектроскопистов-аналитиков НИИ, вузов и заводских лабораторий. Институт – бессменный организатор съездов по спектроскопии с участием иностранных ученых и специалистов, конференций и научных школ по различным разделам оптической спектроскопии, а также первых трех Троицких конференций «Медицинская физика и инновации в медицине». Ученые Института широко привлекаются другими организациями к оппонированию диссертаций, проведению экспертиз, относящихся к области оптики и спектроскопии, к участию в комиссиях по научно-техническим вопросам, научных и диссертационных советах.

### Научная работа в рамках грантов

Проект № 07-02-90818, сроки выполнения: 1 декабря 2007 г. – 31 мая 2008 г. В рамках данного проекта мной была изучена техника некогерентного фотонного эха (НФЭ) для исследования процессов оптической дефазировки и спектральной диффузии в примесных неупорядоченных твердотельных средах, освоена уникальная установка для измерения сигналов НФЭ в твердотельных средах при низких температурах (рис. 3). Далее я ознакомился с методиками модельных расчетов времен оптической дефазировки в примесных молекулярных системах в рамках модели туннелирующих двухуровневых систем и модели мягких потенциалов, в том числе, с разработанными в Институте спектроскопии РАН оригинальными алгоритмами и программным обеспечением и получил представление о методе спектроскопии одиночных молекул (СОМ) и о его возможностях для исследования низкотемпературной динамики аморфных сред. Среди практических результатов можно выделить следующие:

- проведена существенная модернизация экспериментальной установки для регистрации кривых спада некогерентного фотонного эха при низких температурах, обеспечившая простоту и удобство юстировки отдельных ее частей. После модернизации и юстировки были получены следующие характеристики лазерной системы: длительность импульсов – 12–15 нс при частоте повторения импульсов – 1,5 Гц, выходная энергия в импульсе – не менее  $10^{-4}$  Дж/см<sup>2</sup>, диапазон перестройки длины волны 570–610 нм (рис. 3);
- создан работающий макет установки (конфокальный люминесцентный микроскоп-спектрометр) для измерения давления в камере высокого давления, предназначенной для проведения экспериментальных исследований динамики неупорядоченных твердотельных сред методом некогерентного фотонного эха в широком диапазоне температур (от криогенных до комнатной) в условиях высокого давления (рис. 3);
- проведены поисковые эксперименты по исследованию при комнатной температуре процессов сверхбыстрой фазовой релаксации в аморфном полиметилметакрилате, легированном молекулами красителя родамин-101 методом четырехволнового смешения.



**Рис. 3.** Общий вид работающего некогерентного шумового лазера (слева) и люминесцентного микроскопа-спектрометра (справа)

В ходе выполнения данного проекта была подготовлена база для проведения последующих систематических исследований спектральной динамики примесных центров в полимерных матрицах в широком диапазоне температур. По результатам стажировки была опубликована статья в журнале «Ученые записки Казанского университета. Серия физико-математические науки» и подготовлено 5 докладов на различных конференциях.

Проект № 09-02-90705, сроки выполнения: 1 апреля 2009 г. – 31 сентября 2009 г. В рамках стажировки была изучена методология проведения оптических экспериментов при криогенных температурах (от 1,6 К и выше) с использованием температурно-регулируемых криостатов; освоена техника проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а именно, была разработана, спроектирована и создана оптическая камера высокого давления; проведена работа с литературными источниками и подготовлена обзорная часть диссертации «Динамика оптических спектров примесных центров в кристаллических и аморфных матрицах: исследования методами когерентного и некогерентного фотонного эха» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «01.04.05» – оптика. К основным результатам стажировки можно отнести следующие:

- разработана и создана оптическая камера высокого давления с сапфировыми накопателями для проведения оптических иссле-

дований при повышенном гидростатическом давлении. Камера отвечает всем требованиям эксперимента по измерению сигналов фотонного эха и четырехволнового смешения в широком температурном диапазоне (от 1,6 К до комнатной) с возможностью приложения к образцу внешнего гидростатического давления вплоть до 3 ГПа. Давление к камере контролируется путем регистрации спектра флуоресценции микрокристалла рубина, помещенного внутрь образца в камере. Регистрация спектра осуществляется с использованием конфокального люминесцентного микроскопа-спектрометра высокого разрешения, созданного в рамках проекта РФФИ № 07-02-90818;

- методом некогерентного фотонного эха и четырехволнового смешения проведены измерения времен оптической дефазировки для ряда примесных неупорядоченных твердотельных сред (полиизобутилен (ПИБ) и полиметилметакрилат, легированные молекулами тетра-трет-бутилтеррилена (ТБТ); поливинилацетат с примесью органического красителя стирил-9М; полиметилметакрилат, допированный молекулами родамин-101) при нормальном и повышенном гидростатическом давлении;
- измерена температурная зависимость обратного времени оптической дефазировки для системы ТБТ/ПИБ в температурном диапазоне от 77,3 К до 300 К, установлены механизмы дефазировки и определена точка перехода от одного механизма к другому;

- проведены пробные эксперименты по исследованию динамики спектров примесных центров в аморфном полимере в условиях высокого давления (образец – ТБТ/ПИБ под давлением около 1,5 ГПа).

По итогам стажировки было опубликовано 5 статей, основные результаты доложены на 2 всероссийских и 3 международных конференциях. Для участия в международном симпозиуме по молекулярной спектроскопии высокого разрешения, проходившем в пос. Листвянка на берегу оз. Байкал, был оформлен и получен грант РФФИ № 09-02-16010. Основные научные результаты стажировки вошли в третью главу моей кандидатской диссертации, а один из руководителей стажировки (А.В. Наумов) стал научным консультантом работы. Диссертация была успешно защищена на заседании специализированного совета по оптике в Казанском государственном университете 17 декабря 2009 г. По итогам защиты я был рекомендован для поступления в докторантуру ИСАН, а разработанные методики и созданная техника были положены в основу новых экспериментов.

Проект № 10-02-90714, сроки выполнения: 1 апреля 2010 г. – 31 сентября 2010 г. Была освоена техника люминесцентной микроскопии; разработана и создана система сведения лазерных лучей внутри оптической камеры высокого давления с сапфировыми наковальнями (созданной в рамках гранта РФФИ № 09-02-90705) на основе схемы люминесцентного микроскопа, что значительно облегчило процедуру фокусирования излучения в одной точке образца. Основные результаты стажировки:

- разработана методика регистрации сигналов фотонного эха и четырехволнового смешения, позволяющая в автоматическом режиме учитывать паразитные засветки рассеянным лазерным излучением, создана программа, управляющая работой многоканальной системы регистрации на основе высокочувствительной ПЗС-камеры, с возможностью уменьшения регистрируемой интенсивности внешней (паразитной) засветки более чем на порядок;
- разработана и создана конфокальная схема возбуждения и сбора люминесценции образца в оптической камере высокого давления с сапфировыми наковальнями, служащая для точного сведения лазерных лучей на образце

в экспериментах по фотонному эху и четырехволновому смешению (схема служит для предварительной настройки схемы – фокусировки лучей на образце, не требует использования шумового лазера на красителе с накачкой твердотельным YAG-лазером с ограниченным ресурсом и внесения дополнительных изменений в оптическую схему установки);

- экспериментально исследована оптическая дефазировка в полиизобутилене, допированном молекулами тетра-трет-бутилтеррилена в условиях повышенного давления, измерены кривые спада сигналов фотонного эха и четырехволнового смешения при различных температурах и значениях давления, проанализировано влияние давления и мощности возбуждающего излучения на однородное уширение спектров хромофоров;
  - на основе люминесцентного микроскопа-спектрометра (созданного в рамках гранта РФФИ № 07-02-90818) запущен экспериментальный стенд для визуализации одиночных квантовых объектов и регистрации их спектров флуоресценции; стенд апробирован на примере исследования спектров микро- и нанокристаллов рубина, а также квантовых точек (нанокристаллов YAG:Ce<sup>3+</sup>), внедренных в полиизобутилен.
- По итогам стажировки опубликовано 9 печатных работ и сделано более десяти докладов на 6 конференциях, в том числе 2 доклада на международной конференции по когерентной и нелинейной оптике, а также лазерам, лазерным технологиям и их приложениям (ICONO/LAT 2010, Казань, 26-30 августа 2010 г.). Основным итогом работы за этот год я считаю разработку методологии и выбор тематики будущей научной работы над докторской диссертацией и оформление документов для поступления в докторантуру ИСАН.

#### Научные семинары, конференции, съезды

За время стажировок я неоднократно был слушателем научных семинаров Института спектроскопии и отдела молекулярной спектроскопии, а также итоговых конференций ИСАН. Присутствовал на весьма интересных научно-образовательных лекциях («Современное состояние эмиссионного спектрального анализа металлов: проблемы и приборы»

(А.М. Лившиц, ИСАН), «Необычные вращения в кластерах He-CO и «наноскопическая» сверхтекучесть» (Б.С. Думеш, ИСАН), Spectroscopy and atomic physics of highly charged ions of heavy elements observed with an Electron Beam Ion Trap at NIST (Дж. Ридер, Национальный институт стандартов и технологии, США), «Оптические свойства метаматериалов» (С.Г. Тиходеев, ИОФ РАН) — это темы и авторы лишь некоторых из них), молодежных научных семинарах, конкурсах молодых ученых, защитах бакалаврских, магистерских, кандидатских и докторских диссертаций. Дважды оппонировал бакалаврские работы студентов.

Одним из наиболее запомнившихся мне событий было посещение первого Российского молодежного инновационного конвента, проходившего 9-10 декабря 2008 г. в Москве в Центре международной торговли на Красной Пресне. В конвенте приняли участие почти 1000 молодых специалистов, занятых в разных отраслях инновационной деятельности: от ученых и изобретателей до менеджеров и руководителей венчурных компаний. В рамках конвента проходила выставка проектов и стартапов, проводились лекции, мастер-классы и круглые столы, в которых приняли участие российские и зарубежные лидеры инновационного бизнеса: Давид Ян — основатель компании ABYU, сэр Ричард Бренсон — основатель VIRGIN, Гай Кавасаки — венчурный инвестор, основатель Apple Computer и другие известные деятели инновационной сферы: футурологи, редакторы научных журналов, руководители предприятий и образовательных проектов.

Группа молодых ученых, в сотрудничестве с которыми я работаю в ИСАН, оказалась тогда в числе финалистов конкурса инновационных проектов на соискание национальной премии имени Зворыкина. В финальном заседании конвента принимали участие: министр образования и науки РФ Андрей Фурсенко, министр спорта, туризма и молодежной политики РФ Виталий Мутко, академик РАН, Президент РНЦ «Курчатовский институт» Евгений Велихов, председатель Наблюдательного совета инвестиционной компании «Базовый Элемент» Олег Дерипаска и генеральный директор Российской корпорации нанотехнологий Анатолий Чубайс.



**Рис. 4.** На первом Российском молодежном инновационном конвенте с одним из финалистов национального конкурса инновационных проектов — научным сотрудником ИСАН А.А. Горшелевым

Кульминацией конвента стала церемония вручения Президентом России Зворыкинской премии — национальной премии в области инноваций для молодежи. Мои коллеги получили тогда диплом финалистов конкурса (рис. 4). Необходимо отметить, что награда все-таки нашла своих героев; в октябре 2010 г. проект молодых ученых из Института спектроскопии А.В. Наумова, А.А. Горшелева, И.Ю. Еремчева и Я.И. Соболева под названием «Fluorescent spectromicroscopy of single impurity molecules as a tool for the nanodiagnosics of solids» получил Первую премию на Третьем международном конкурсе научных работ молодых ученых в области нанотехнологий «Rusnanotech-2010» в номинации «нанодиагностика».

В марте 2010 г. я представлял Казанский физико-технический институт на XXVI Съезде по спектроскопии, организованном Институтом спектроскопии и Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН, Научными советами РАН по спектроскопии атомов и молекул и по оптике и лазерной физике. Съезд был посвящен 100-летию со дня рождения выдающегося физика-спектроскописта Сергея Леонидовича Манделъштама (1910–2010 гг.). По итогам конкурса научных работ молодых ученых, проведенного в рамках Съезда, мой доклад «Оптическая спектроскопия примесных центров в кристаллических и аморфных матрицах методами когерентного



**Рис. 5.** После награждения победителей конкурса научных работ молодых ученых в рамках XXIV Съезда по спектроскопии с членами оргкомитета: членом-корреспондентом РАН, директором ИСАН профессором Е.А. Виноградовым, руководителем отделения оптики ФИАН профессором А.В. Масаловым, заместителем директора ИСАН по науке А.В. Наумовым. Холл Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 5 марта 2010 г.

и некогерентного фотонного эха» был отмечен дипломом I степени и премией им. Мандельштама (рис. 5).

В целом по итогам стажировок было подготовлено и представлено около 20 докладов на нескольких всероссийских и международных конференциях, среди которых: International conference on coherent and nonlinear optics & International conference on lasers, applications, and technologies (ICONO/LAT 2010, Kazan, Russia, August 2010), XVI International symposium on high resolution molecular spectroscopy (HighRus-2009, Irkutsk, Russia, July 2009), VIII Международный симпозиум по фотонному эху и когерентной спектроскопии

(PECS-2009, Казань, октябрь 2009 г.); XII-XIV Международные молодежные научные школы «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (Казань, 2008 – 2010 гг.); XI и XII Всероссийские школы-семинары «Физика и применение микроволн», XII Всероссийская школа-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» (Звенигород, 2008–2010 гг.); III-V Международные научные школы «Наука и инновации» (Йошкар-Ола, 2008–2010 гг.); XVI Всероссийская научная конференция «Структура и динамика молекулярных систем» (Яльчик, 2009 г.).

Все фотографии, используемые в статье, представлены автором.



## «САМОЕ СИНЕЕ В МИРЕ, ЧЕРНОЕ МОРЕ МОЕ...»

*Стажировка российского молодого ученого С.В. Пахомовой<sup>1</sup>  
в Южном отделении Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН*

**Море гораздо разнообразнее суши.  
Интереснее, чем что-либо.  
Изнутри, как и снаружи.**

*И. Бродский*

Впервые в Южное отделение Института океанологии РАН (ЮО ИО РАН), расположенное на побережье Черного моря в Голубой бухте, пригороде г. Геленджик, я попала 10 лет назад с экспедицией. Первые впечатления — как мне повезло, что можно работать в таких условиях: море, воздух, горы. И действительно, работать оказалось даже легче, чем в Москве. Самому выходить в море, отбирать и анализировать пробы, наслаждаясь при этом окружающей тебя красотой, намного интересней, чем обрабатывать в лаборатории привезенные тебе образцы.

Бывший в то время зав. Лаборатории химии ЮО ИО РАН Евгений Владимирович Якушев очень доброжелательно относился к приезжающим в экспедиции коллегам, а главное — он всегда активно вовлекал в работу молодых специалистов и давал им шанс проявить себя. Благодаря ему мне посчастливилось принять участие в международном рейсе американского судна «Кнорр» в ЮЗ части Черного моря, где я впервые работала вместе с будущим руководителем моей стажировки, нынешним зав. Лаборатории химии ЮО ИО РАН Валерием Кузьмичом Часовниковым. И хотя в начале рейса мы были мало знакомы, за четыре недели совместной работы и попаданий в несколько комичных ситуаций (американское судно — считай, Америка) успели установиться дружеские отношения. Исследования, проведенные в этом рейсе, вылились в отдельную главу моей кандидатской диссертации, которой изначально даже не планировалось. В последующие годы эта тема продолжала развиваться и в этом году, благодаря гранту по программе «Мобильность молодых ученых», мне удалось снова поработать с Валерием Кузьмичом.



С.В. Пахомова

С точки зрения гидрохимической структуры Черное море представляет собой уникальный водоем, характерной чертой которого является сероводородное заражение нижнего слоя воды. Субоксильная зона (редокс-зона), разделяющая кислородные и бескислородные воды Черного моря, представляет собой великолепный природный объект для изучения промежуточных окислительно-восстановительных процессов, в которые вовлечены соединения Mn, Fe, N и S. Впервые существование этой зоны было отмечено в 1988 г. [3]. Факт существования слоя воды, не содержащей ни кислорода, ни сероводорода, привел к появлению двух лагерей среди океанологов — кто верил в существование этого слоя, и кто не верил. Ожесточенные споры велись до недавнего времени, пока не появилось новое оборудование (безмембранные и

<sup>1</sup> Пахомова Светлана Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, e-mail: s-pakhomova@yandex.ru.

оптические датчики кислорода), подтвердившие наличие этого слоя. Мы предложили свое объяснение, почему раньше находили слой сосуществования кислорода и сероводорода, и оно оказалось очень простым.

Последние исследования кислородного/бескислородного интерфейса выявили сезонную изменчивость биогенных элементов и металлов [1, 6]. Мы также наблюдаем межгодовую и декадную изменчивость свойств субокисильной зоны и объема кислородного слоя [2]. В последние годы обнаружено, что соединения марганца могут играть одну из главных ролей в формировании редокс-зоны и являются индикаторами изменений окислительно-восстановительных условий [1, 7, 8]. В частности, было найдено, что окисление Mn(II) является бактериологическим процессом, в ходе которого как промежуточный продукт образуется растворенный Mn(III) [5], который присутствует в значительных количествах в редокс-зоне и связан в прочные органические и неорганические (соединения фосфора) комплексы [1, 4]. И как часто бывает, открытие чего-то нового приводит к еще большим вопросам. Целью моей стажировки было исследование роли форм

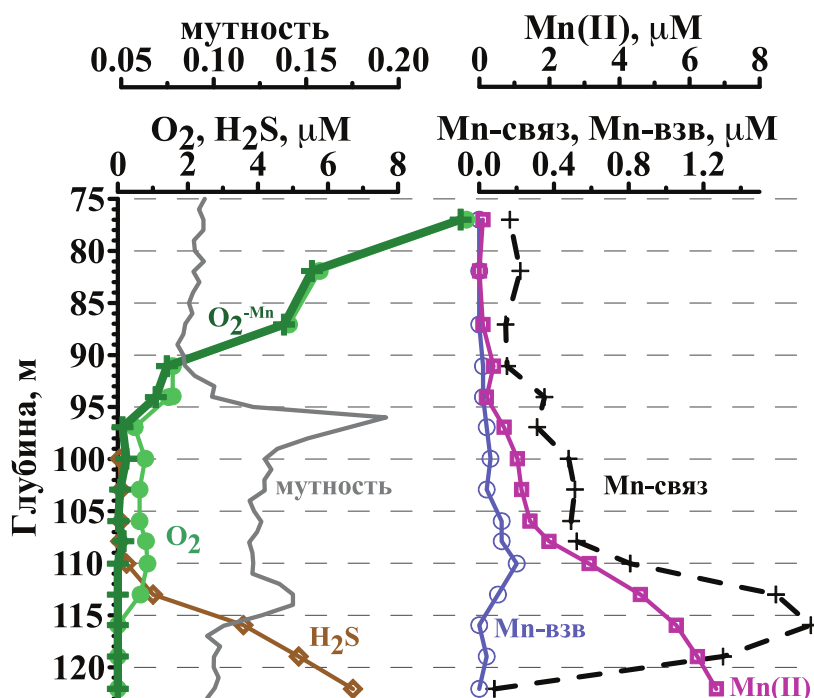
марганца и железа в формировании структуры редокс-зоны.

В ходе стажировки я принимала участие в двух рейсах НИС «Ашамба» в шельфовых водах Черного моря в районе г. Геленджик. В ходе этих рейсов выполнялись комплексные гидрохимические исследования строения редокс-зоны, включающие как определение стандартных параметров (кислород, сероводород, неорганические формы азота, фосфаты, кремний), а также малоисследованных параметров, таких как растворенный органический углерод, полифосфаты, растворенные железо и марганец, связанные в комплексы и взвешенные железо и марганец.

Полученные данные распределения форм марганца и железа показали наличие в редокс-зоне данных металлов, связанных в комплексы с концентрациями 0,2–1,5 мкМ. Оба металла, очевидно, находятся в трехвалентном состоянии и вероятно образуют одинаковые комплексы.

Наличие трехвалентного марганца в редокс-зоне Черного моря имеет очень большое значение.

Во-первых, появился еще один окислитель, позволяющий объяснить феномен отсутствия слоя сосуществования кислорода и сероводорода и непосредственного окисления серово-



**Рис 1.** Распределение в толще Черного моря растворенного кислорода с учетом поправки на присутствие в воде окисленных соединений марганца ( $O_2$ -Mn), растворенного кислорода без учета данной поправки ( $O_2$ ), сероводорода ( $H_2S$ ), восстановленного растворенного марганца (Mn(II)), окисленного взвешенного марганца (Mn-взв), окисленного растворенного марганца (Mn-связ)

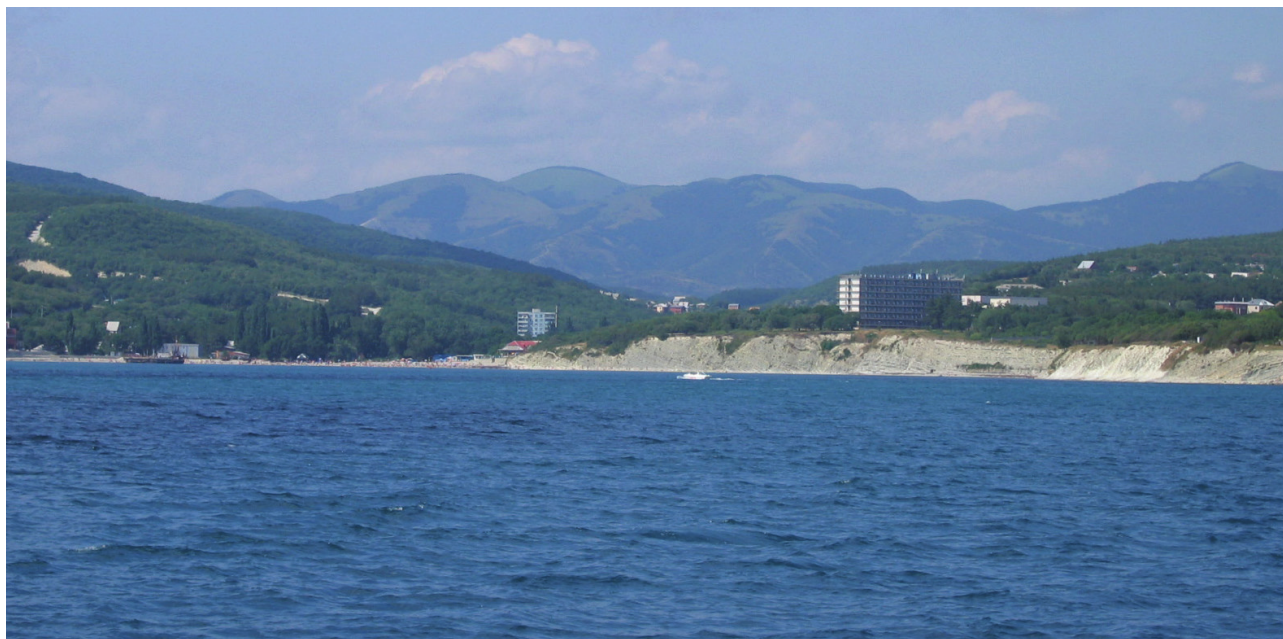


Рис 2. Вид с моря на Голубую бухту, Южное отделение Института океанологии имени П.П. Ширшова РАН

дорода кислородом. Окисленные соединения марганца, присутствующие в слоях воды выше сероводородной границы завышают результат определения кислорода методом Винклера (в ходе определения добавляются соединения марганца, которые окисляются растворенным кислородом и оттитровываются). После вычитания концентраций окисленного марганца, присутствующего в морской воде, из величин, полученных после титрования кислорода, четко проявляется 10-метровый слой, в котором отсутствует как растворенный кислород, так и сероводород (рис. 1). Наличие такого слоя соответствует современным теоретическим представлениям и результатам экспериментальных исследований.

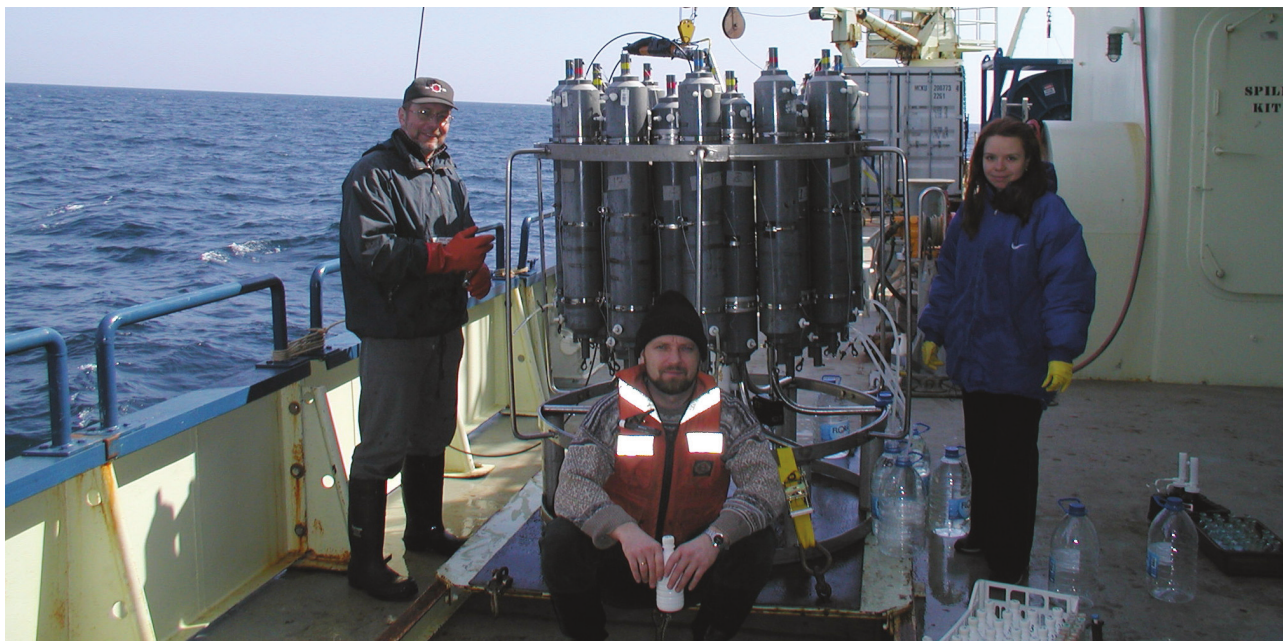
Во-вторых, свойства трехвалентного марганца сходны со свойствами трехвалентного железа. Например, они могут образовывать одинаковые комплексы с органическим веществом морской воды, что приводит к конкурирующим процессам между ними и имеет значение для распределения и биодоступности растворенного железа.

В третьих, присутствие значительных количеств трехвалентного марганца в редокс-зоне может влиять на распределение других элементов, способных образовывать с ним соединения, например, с фосфором. По нашему мнению, возможное образование  $Mn(III)$  комплексов с пирофосфатами может объяснить наблюдаемую структуру распределения фос-

фатов, так называемый «фосфатный диполь» с минимумом фосфатов непосредственно над сероводородной границей и максимумом ниже границы. Верхний минимум фосфатов расположен на той же глубине, где исчезает  $Mn(II)$  за счет окисления кислородом, а нижний максимум фосфатов расположен чуть ниже сероводородного интерфейса, где должно происходить восстановление  $Mn(III)$  сероводородом. По данным наших наблюдений, выполненных в ходе стажировки, на глубинах образования верхнего минимума фосфатов действительно обнаруживается четкий максимум полифосфатов, положение которого соответствует максимуму марганца, связанному в комплексы.

Полученные данные не показали явной связи между распределениями железа и марганца, связанных в комплексы и растворенного органического углерода. Изменения органического углерода в редокс-зоне варьируются в десятки мкМ, тогда как металлов — на три порядка ниже. Данные исследования необходимо продолжить, возможно, с большим разрешением при отборе проб в редокс-зоне.

Полученных в ходе стажировки данные позволили сделать вывод о возможной роли форм марганца в сдерживании поднятия границы сероводорода при уменьшении поступления кислорода в редокс-зону в результате аномально теплой зимы. Потепление климата для Черного моря выявляется в повышении температуры



**Рис 3.** Как все начиналось (Е.В. Якушев, В.К. Часовников, С.В. Пахомова). Отбор проб морской воды, ЮЗ часть Черного моря, НИС «Кнорр», 2003 г.

поверхностного слоя и уменьшению интенсивности образования холодного промежуточного слоя (ХПС), обеспечивающего поступление кислорода в субкислородную зону. Особо сильное влияние оказывают аномально теплые зимы, в ходе которых не происходит образование ХПС, что наблюдалось, например, в 2000–2001 гг. Падение концентрации кислорода в данном слое составило 30–40 %. Это привело к поднятию границы сероводорода на 0,1–0,2 единицы условной плотности, и на 20–30 м по глубине. Таким образом, объем кислородной зоны Черного моря мог уменьшиться на единицы или первые десятки процентов. К 2004 г. содержание кислорода в ХПС увеличилось, но граница сероводорода осталась на новом уровне. Текущий 2010 г. снова характеризовался высокой зимней температурой, образование ХПС было затруднено. По предварительным данным, полученным в ходе стажировки, концентрация кислорода в ХПС упала, но изменения положения границы сероводорода не произошло. Очевидно, что такие изменения в величинах потока кислорода в субкислородную зону должны приводить к изменениям, как биогеохимических процессов, протекающих в редокс-зоне, так и ее структуры. Если уменьшается поступление кислорода, главного окислителя, а граница сероводорода не поднялась, тогда в окислении поднимающихся восстановленных

форм будут задействованы другие окислители. Следующим по важности окислителем в редокс-зоне является марганец.

Полученные данные использованы при написании инициативного гранта РФФИ «Влияние климатических изменений на положение и строение зоны контакта кислородных и бескислородных вод в Черном море». В ходе написания этого проекта мы



**Рис 4.** Анализ проб в судовой лаборатории с В.К. Часовниковым

начали тесно общаться с гидрофизиками и узнали много интересного. И это я считаю одним из самых главных итогов моей стажировки — знакомство и общение с новыми людьми, в ходе которого появляются новые идеи, возможность участия в экспедициях и исследованиях, рамки которых только расширяются. Я очень благодарна Фонду российских фундаментальных исследований за помощь, оказываемую молодым ученым, и дополнительные возможности для участия в научных исследованиях.

### Литература

1. Пахомова С.В., Розанов А.Г., Якушев Е.В. Растворенные и взвешенные формы железа и марганца в редокс-зоне Черного моря // *Океанология*.—2009.—Т. 49, №. 6.—С. 835–850.
2. Подымов О.И. Использование проблемно-ориентированной базы данных для статистического анализа гидрохимических характеристик редокс-зоны Черного моря // *Океанология*.—2008.—Т. — 48, № 5.—С. 19–27.
3. Murray J.W., Jannasch H.W., Honjo S. et al. Unexpected changes in the oxic/anoxic interface in the Black Sea // *Nature*.—1989.—V. 338.—P. 411–413.
4. Trouwborst R.E., Clement B.G., Tebo B.M. et al. Soluble Mn(III) in Suboxic Zones // *Science*. 2006.—V. 313.—1955–1957.
5. Webb S.M., Dick G.J., Bargar J.R., Tebo B.M. Evidence for the presence of Mn(III) intermediates in the bacterial oxidation of Mn(II) // *PNAS*.—2005.—V.—102, № 15.—P. 5558–5563.
6. Yakushev E.V., Chasovnikov V.K., Debolskaya E.I. et al. The northeastern Black Sea redox zone: hydrochemical structure and its temporal variability // *Deep Sea Res. II*.—2006.—V. 53.—P. 1764–1786.
7. Yakushev E.V., Pollehne F., Jost G. et al. Analysis of the water column oxic/anoxic interface in the Black and Baltic seas with a Redox-Layer Model // *Mar. Chem.*—2007.—V. 107.—P. 388–410.
8. Yakushev E.V., Pakhomova S.V., Sorensen K., Skei J. Importance of the different manganese species in the formation of water column redox zones: observations and modeling // *Marine Chemistry*.—2009.—V. 117.—P. 59–70.

## ВЕТВИСТОУСЫЕ РАКООБРАЗНЫЕ (CRUSTACEA, CLADOCERA) КАК ОБЪЕКТ ИЗУЧЕНИЯ

*Стажировка молодого российского ученого Валентины Николаевны Подшивалиной<sup>1</sup>  
в Институте проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН*

Ветвистоусые ракообразные (Cladocera) (рис. 1) в большинстве водоемов являются одними из основных организмов, населяющих толщу воды и осуществляющих ее фильтрацию. Благодаря этим в прямом смысле слова микроскопическим существам в озерах, реках, морях и даже в подземных водах пещер происходит самоочищение. Поэтому изучение организмов, играющих столь важную роль в водных экосистемах, было, есть и будет оставаться актуальным, особенно в связи с усиливающейся тенденцией загрязнения водных объектов. Приятно осознавать, что самые крупные в мире ученые, занимающиеся исследованием особенностей систематики, морфологии и жизненного цикла ветвистоусых рачков, работают именно в нашей стране, в Институте проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук (ИПЭЭ РАН).

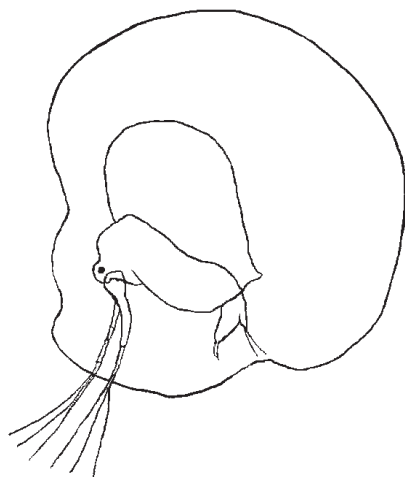
С сотрудниками лаборатории водных сообществ и инвазий ИПЭЭ РАН, а точнее с группой экологии пресноводных сообществ, мое знакомство (на тот момент заочное) состоялось еще когда я только начала заниматься изучением планктонных беспозвоночных. Поскольку освоение любой новой тематики предполагает определение степени изученности выбранного направления, штудирование литературных источников становится первоочередной задачей. При этом, конечно, дело непременно касается трудов «классиков», в число которых входят и ученые из названной лаборатории. Однако поначалу часто не задумываешься о принадлежности специалистов к тем или иным лабораториям, группам и т.п., а просто пользуешься данными результатов их работ, выполненных на высоком профессиональном уровне. Осознание реальных масштабов значимости вклада в мировую науку проводимых относительно небольшим коллективом группы экологии пресноводных сообществ исследований произо-



В.Н. Подшивалина

шло при личном знакомстве на Всероссийской школе-конференции «Cladocera: систематика и биология», проводившейся на базе Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН (п. Борок, 2007). Информирование о последних достижениях и обучение методикам начинающих и не только гидробиологов учеными из ИПЭЭ РАН продолжилось год спустя в рамках работы семинара «Систематика Cladocera». Это значимое событие (длвшееся целых две недели) собрало ученых от Калининграда до Якутска. Именно тогда возникло желание полностью окунуться в эту интересную научную атмосферу, созданную еще в 70-е гг., в которой кипит жизнь лаборатории экологии водных сообществ и инвазий ИПЭЭ РАН.

<sup>1</sup> Подшивалина Валентина Николаевна, кандидат биологических наук, доцент Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева, e-mail: vpodsh@newmail.ru.



**Рис. 1.** *Holopedium gibberum* Zaddach — ветвистоусый рачок, имеющий преимущественно бореальное распространение, встречающийся также на территории Среднего Поволжья

Очень удачным способом воплотить желаемое в реальность стало оформление гранта РФФИ на научную стажировку по программе «Мобильность молодых ученых» под руководством доктора биологических наук, ведущего научного сотрудника Котова Алексея Алексеевича (рис. 2). Обстоятельства сложились настолько удачно, что грант был поддержан фондом, и это уже само по себе казалось большим чудом. Итак, для освоения современных методов исследования систематики, биологии ветвистоусых ракообразных и количественной оценки биологического разнообразия пресноводного зоопланктона я была направлена в ИПЭЭ РАН.

На деле все оказалось гораздо шире, глубже и разностороннее, чем планировалось и формулировалось в заявке на стажировку. И все это благодаря замечательному коллективу группы экологии пресноводных сообществ и моему руководителю А.А. Котову.

Для любого специалиста, занимающегося исследованием флоры или фауны, неизбежно встает вопрос относительно верификации списков видов, которые выявлены им для какого-либо региона. Иначе все рассуждения об особенностях, изменчивости, экологической характеристике биоты становятся спекулятивными. В связи с этим, помощь специалистов-систематиков, которые могут подтвердить или опровергнуть правильность определения видов, крайне необходима и очень ценна. За предыдущие годы моей научной деятельности был

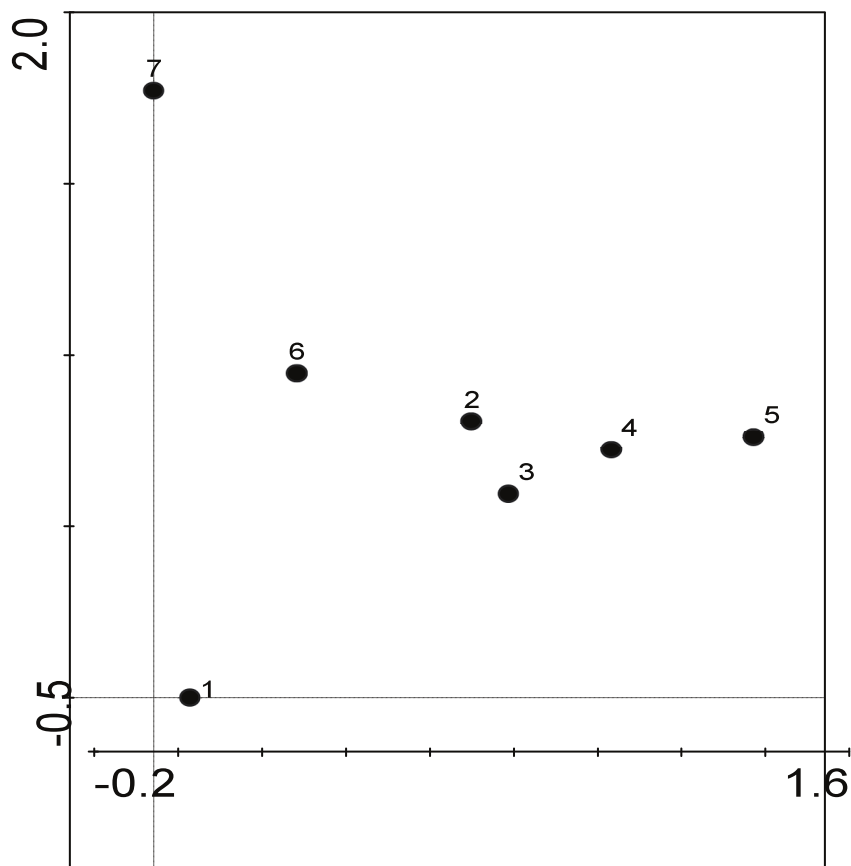
накоплен большой массив данных по фауне зоопланктона различных водоемов Среднего Поволжья. В ходе стажировки проведена окончательная проверка списков видов для отдельных водоемов, которые приведены в соответствие с современным состоянием систематики ветвистоусых и веслоногих ракообразных. Итого, в реках, озерах и прудах исследованного за десятилетие региона установлено обитание 198 видов беспозвоночных, в том числе 94 видов коловраток, 38 — веслоногих и 66 — ветвистоусых ракообразных.

Параллельно с проверкой состава зоопланктонной фауны в ИПЭЭ РАН мной были освоены современные методы исследования систематики пресноводных планктонных ракообразных, а именно: морфологический анализ и методы препарирования микроскопических рачков. Получено представление о новейших тенденциях в морфологической систематике ветвистоусых ракообразных. Благодаря стараниям сотрудников лаборатории собрана богатейшая в мировом масштабе коллекция литературы по систематике, морфологии и биологии пресноводных ракообразных. И все это было предоставлено в мое полное распоряжение!

Во время стажировки в лаборатории на примере накопленного мной материала были освоены и применены современные методы анализа экологических предпочтений видов пресноводного зоопланктона. В частности, был проведен канонический анализ зависимости численности и встречаемости отдельных видов от морфометрических (средняя, относительная и



**Рис. 2.** Котов А.А. Сбор материала на оз. Глубокое



**Рис. 3.** Ординационная диаграмма сходства фаун зоопланктона озер, находящихся на разных стадиях развития (от относительно молодого (1) до угасающих (6, 7)). Озера выстроены в порядке увеличения их онтогенетического возраста, который определялся по морфометрическим показателям, зарастаемости, уровню и характеру осадконакопления. Расположение объектов вдоль оси абсцисс, вероятно, отражает влияние меняющейся в ходе развития водоемов степени их трофности. Расположение на одном уровне по данной оси относительно молодого (1) и угасающих (6, 7) озер может свидетельствовать о сходстве их трофического статуса, который деградирующими водоемами приобретает вторично. Отличия в составе фаун, которые наблюдаются при рассмотрении положения объектов относительно оси ординат, вероятно, обусловлены более низкой минерализацией вод угасающих озер, связанной с особенностями круговорота веществ в них

максимальная глубины, площадь, объем, длина береговой линии, изрезанность береговой линии) и гидрохимических (минерализация, *pH*, концентрация катионов кальция, магния, железа, анионов хлора, нитрат-, сульфат-, гидрокарбонат-ионов, ХПК (химическое потребление кислорода), сухой остаток) параметров водоемов. Оказалось, что наибольшее влияние на формирование фауны зоопланктона исследованных водоемов оказывают минерализация и ряд морфометрических показателей, отражающих степень глубоководности водоема. В Среднем Поволжье именно они меняются в значительной степени в ходе эволюционного развития озер, приводящего к их старению и деградации. Было подтверждено статистичес-

ки, что в ходе приближения водоемов к стадии развития, следующей за состоянием онтогенетической «зрелости», населяющие их сообщества зоопланктонных организмов приобретают черты сходства с развивающимися в относительно молодых озерах (рис. 3). Вероятно, это обусловлено вторичной олиготрофностью, возникающей в водоемах при их деградации и трансформации в качественно новое состояние — болотное сообщество.

Выделены также группы видов, которые, предположительно, предпочитают совместное обитание в водоемах, одинаково реагируя на действие одних и тех же факторов. Особый интерес представляет комплекс видов, населяющий преимущественно озера на стадии уга-





**Рис. 4.** Лаборатория стационара «Озеро Глубокое» (Рузский район Московской области, памятник науки и культуры, охраняется государством, 1905 г.)

сания (*Holopedium gibberum* Zaddach (рис. 1), *Heterocope appendiculata* Sars, *Eudiaptomus graciloides* Lilljeborg) и более характерный для фауны севернее расположенных озер. Вероятно, озера на стадии деградации по абиотическим характеристикам приобретают черты сходства с типично таежными, что способствует формированию в них бореальной фауны.

Следующим этапом стало суммирование многолетних данных по встречаемости, численности и биомассе доминирующих и редких видов во всех изученных водоемах и их обработка при помощи количественных методов оценки биологического разнообразия и закономерностей распределения отдельных видов зоопланктона. В результате этого анализа не выявлено зональных закономерностей в распределении общего биологического разнообразия, а также в распределении отдельных видов в пределах Среднего Поволжья. Можно предположить, что подобные взаимосвязи могут быть установлены только для бассейна Волги в целом. Однако успешно проанализированы экологические (в зависимости от типа, размера, различных гидрологических и гидрохимических параметров, а также трофности водоемов) и временные (сезонная и многолетняя динамика, этап онтогенетического развития водоема) закономерности численности, встречаемости и биомассы отдельных видов. Данные закономерности достаточно четко ложатся в общую схему эволюции озер Среднего Поволжья.

Важно, что полученные данные по экологическим предпочтениям отдельных видов хорошо согласуются с ранее полученной информацией по их биологии.

Данный анализ для водоемов Среднего Поволжья был проведен впервые.

Одной из привлекательных особенностей работы специалиста-биолога является приятная необходимость иметь дело с природными объектами с целью сбора материалов. Для гидробиологов, в частности, это связано с проведением исследований на водоемах. Поскольку базой для лаборатории экологии водных сообществ и инвазий является гидробиологическая станция «Озеро Глубокое», то для знакомства с новыми методиками отбора проб пресноводных микробеспозвоночных и их подготовки для изотопного анализа (определения доли стабильных изотопов  $^{15}\text{N}$  и  $^{13}\text{C}$ ) был выбран именно этот стационар. Озеро расположено в Рузском районе Московской области. На нем базируется Гидробиологическая станция «Озеро Глубокое» (рис. 4), которая признана старейшей в мире (основана в 1891 г.).

Оценка «веса» стабильных изотопов  $^{15}\text{N}$  и  $^{13}\text{C}$  весьма актуальна для различных сообществ, поскольку позволяет разобраться в сложных трофических взаимоотношениях различных организмов и определить скорость и направление потоков вещества в экосистемах. Данный подход стал популярен относительно недавно, используется преимущественно на территории других государств, однако в ИПЭЭ РАН имеется необходимое для его применения оборудование. Следует отметить интересный момент: если для изучения процессов функционирования наземных ценозов методика отработана относительно четко, то для водных экосистем — нет. Тем интереснее было присутствовать при обсуждении отдельных моментов, касающихся ее адаптации к особенностям именно водной среды, а также применительно к тем водным организмам, которые населяют озеро Глубокое, выбранное как модельный объект. Собранный на озере биологический материал (в виде рассортированных по отдельным пробиркам видов из числа ветвистоусых рачков с различным типом питания) был подвергнут обработке на газовом хроматографе. Это позволило получить первичные данные о различиях в соотношении стабильных изотопов

углерода и азота ( $^{15}\text{N}$  и  $^{13}\text{C}$ ) в тканях планктонных животных и верифицировать методику.

Данные биогеохимические исследования проводились совместно с лабораторией почвенной зоологии и экспериментальной энтомологии. Было весьма полезно наблюдать сложившуюся в ИПЭЭ РАН систему взаимодействия группы экологии пресноводных сообществ с коллегами из других лабораторий. Да, наверное, именно так и должна развиваться наука: во взаимодействии и взаимопроникновении отдельных направлений, в рассмотрении одних и тех же явлений с разных позиций, силами специалистов из смежных направлений науки.

В этом отношении еще одна традиция института представляется весьма важной. Речь идет о систематически проводящихся семинарах. В частности, мне удалось принять участие в заседаниях семинара «Вопросы эволюции». Несмотря на то, что непосредственно с направлением моей научной работы их тематика («Происхождение насекомых», «Evo-devo and the Expansion of the Evolutionary Synthesis») не была связана, считаю расширение кругозора за счет смежных вопросов весьма важным, поскольку оно способствует более глубокому пониманию сути процессов, происходящих в живой природе. Поэтому полагаю не менее ценным знание, приобретенное на семинарах, посвященных экологии паразитов («Are there general rules governin ecology of ectoparasitic arthropod?», ИПЭЭ), морским паразитическим ракообразным («The Five Wonders of Parasitic Copepoda», МГУ), Международной конференции по молекулярной биологии (МГУ). Особо запомнилась лекция лауреата Нобелевской премии Дж. Уотсона. Такое разностороннее погружение в научную среду стало возможным исключительно

благодаря научной эрудиции, широте взглядов, высокой организованности руководителя стажировки – А.А. Котова.

В целом считаю, что моя стажировка в Институте проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН в группе экологии пресноводных сообществ лаборатории экологии водных сообществ и инвазий прошла очень продуктивно, причем как в научном, так и в методическом отношении (многие материалы уже используются в учебном процессе в ходе преподавания ряда экологических дисциплин, а также в научно-исследовательской работе со студентами). Она позволила не только суметь сделать многое на качественно новом уровне, но и дала толчок для дальнейших поисков, инициировала развитие проводимых мной исследований в новых направлениях. По-прежнему получая регулярные рассылки семинара «Вопросы эволюции», с теплотой и некоторым сожалением о невозможности принять участие вспоминаю замечательное время моего пребывания в институте. Хотелось бы выразить огромную благодарность руководителю стажировки, доктору биологических наук Котову Алексею Алексеевичу, взявшему на себя огромный труд не только по организации научной части процесса на высочайшем уровне, но и по улаживанию различных технических, бытовых и других сторон моего пребывания в Москве. Также выражаю признательность группе экологии пресноводных сообществ за невероятно интересное насыщенное научное общение. Без поддержки РФФИ гранта № 10-04-90716 все перечисленное выше было бы трудно осуществимо, в связи с чем считаю приятным долгом поблагодарить его за предоставление мне такой замечательной возможности.

Подписано в печать 28.12.2012. Формат 60 x 90 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Печ. л. 17,5. Тираж 1100 экз.

Оригинал-макет подготовлен ЗАО «ИТЦ МОЛНЕТ»  
123104, г. Москва, Малый Палашевский пер., д. 6  
Тел./факс: (495) 927 0198,  
e-mail: info@molnet.ru

Отпечатано в ООО «ПОЛИГРАФ-ПЛЮС»  
117209, г. Москва, ул. Керченская, дом 6, корп. 1,  
Тел.: (499) 408 0116